

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed khider –Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie civil et d'Hydraulique
Référence :/2020



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية و الري
المرجع/2020

Mémoire de Master

Filière : Génie civil

Spécialité : Matériaux

Thème

Etude physico-mécanique d'un mortier à base de granulats recyclés
Physico-mechanical study of a mortar based on recycled aggregates

Nom et Prénom de l'étudiant :

Kherbache Ahmed Amine

Encadreur :

Dr .TAALLAH Bachir

Année universitaire : 2019 – 2020

Remerciements

On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Dr. TAALLAH Bachir, on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

On remercie aussi les membres de jury pour avoir sacrifié de leur temps, et accepter d'examiner ce mémoire.

Mes sincères remerciements aussi à tous les étudiants de l'université de Biskra surtout les étudiants master 2 de génie civil. Comme nous tenons à remercier les personnes qui ont bien voulu contribué de près ou de loin à la naissance de ce mémoire.

Enfin, j'exprime toute ma reconnaissance à mes parents, mes frères, qui m'ont soutenu pendant l'élaboration de ce travail.

الملخص

قد أصبحت التنمية المستدامة ذات أهمية قصوى في صناعة البناء بسبب الاحتياجات المتزايدة للشركات من حيث التشييد وإعادة التأهيل والتجديد لمختلف المنشآت. ونتيجة لذلك، ازداد استهلاك الموارد الطبيعية لإنتاج مواد البناء، كما تم توليد كميات كبيرة من نفايات البناء والهدم. ويمكن لإعادة تدوير هذه النفايات وإعادة استخدامها أن تعمل ضد استنفاد الموارد الطبيعية والحفاظ على البيئة.

تهدف هذه الدراسة التجريبية الى تثمين مخلفات الهدم من الخرسانة والأجور بشكل رمل في خلطات الملاط ، إن جزيئات الرمل المدور تم إضافتها للخلطات بتعويض جزئي للرمل الطبيعي و هذا بنسب مختلفة (25،50،75،100)%. .

هذه الدراسة التجريبية تعرض نتائج الخصائص التجريبية للركام الطبيعي و المدور و كذلك تأثيرها على خصائص الملاط في حالة الطرية و الصلابة . دراسة خصائص المواد المستخدمة بينت ان الركام المدور يتميز بعدم تجانس و كذا بدرجة امتصاص كبيرة للماء ، وقساوة بنوعية متوسطة ، ونسجل هنا ان المقاييس المعمول بها حاليا لا تمنع استخدام هذه المواد في تحضير الملاط .

النتائج التجريبية اثبتت ان قابلية التشكيل لمختلف انواع الملاط المحضرة تنقص بزيادة نسبة الركام المدور ، غير ان الإنكماش يزداد بزيادة نسبة هذا الركام المدور و هذا بسبب المسامية العالية للركام المدور و درجة امتصاصه العالية للماء .

ان المقاوامات الميكانيكية للضغط و الشد بالإنحناء عبر الزمن لمختلف انواع الملاط المحضر بالركام المدور بتركيبتين الحبيبتين (25.50)٪،تعتبر مقبولة بالمقارنة مع الملاط بالرمل الطبيعي .

الكلمات المفتاحية :

الملاط ،الرمل الطبيعي، ركام المدور، المقاومة الميكانيكية،الخصائص الفيزيائية ، درجة الإمتصاص ، إنكماش .

RESUME

Le développement durable est devenu d'une importance primordiale dans l'industrie de construction à cause des besoins croissant des sociétés en termes de construction, de réhabilitation et de rénovation des différents ouvrages. En conséquence, la consommation des ressources naturelles pour la production des matériaux de construction a augmenté et de grandes quantités de déchets de construction et de démolition sont générées. Le recyclage et la réutilisation de ces déchets peuvent agir contre la déplétion des ressources naturelles et préserver l'environnement.

Cette étude vise à valoriser les déchets de béton et de brique sous forme de sable dans les mélanges de mortier. Les particules de sable recyclé ont été ajoutées aux mélanges en remplacement en termes de masse partiel de sable naturel à différents pourcentages (25%, 50%, 75%, et 100%).

Cette étude expérimentale expose les résultats de caractérisations physiques des granulats naturels et recyclés, ainsi que l'influence de ces recyclés sur les propriétés du mortier frais et durci. La caractérisation des matériaux utilisés a montré que, les granulats recyclés présentent une hétérogénéité, un fort pouvoir d'absorption d'eau et une dureté de qualité moyenne. Toutefois, les limites prescrites par les normes en vigueur ne disqualifient pas ces matériaux pour une application dans le mortier.

Les résultats expérimentaux ont prouvé que la maniabilité des mortiers élaborés diminue avec l'augmentation du taux de granulat recyclé, mais le retrait augmente avec l'augmentation de granulat recyclé à cause de la plus grande porosité des granulats recyclés et de leur plus grande capacité d'absorption d'eau.

Les résistances mécaniques, à la compression et à la traction par flexion en fonction du temps, des mortiers à base des granulats recyclés, avec les combinaisons granulaires M (25,50)%, sont acceptables par rapport à celles des mortiers naturels.

Mots clés : mortier , sable naturel , granulats recyclés, résistance mécaniques, absorption totale d'eau, maniabilité, retrait ,caractérisations physiques.

Table des matières

| | |
|-----------------------------|-----|
| Remerciements..... | i |
| الملخص | ii |
| Résumé..... | iii |
| Table des matières..... | iv |
| Liste des figures..... | iv |
| Liste des tableaux..... | iv |
| Liste des abréviations..... | iv |
| INTRODUCTION GENERALE..... | 1 |

| | |
|-----------------------------------------------|---|
| PREMIÈRE PARTIE : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQ..... | 4 |
|-----------------------------------------------|---|

Chapitre I :

Le mortier : composition et caractéristiques exigées

| | | |
|-------|-------------------------------------|----|
| 1.1 | Introduction..... | 5 |
| 1.2 | Définition des mortiers | 5 |
| 1.3 | Constituants des mortiers..... | 6 |
| 1.3.1 | Les liants..... | 6 |
| 1.3.2 | Le sable..... | 7 |
| 1.3.3 | L'eau de gâchage..... | 9 |
| 1.3.4 | Les adjuvants | 9 |
| 1.3.5 | Les ajouts..... | 11 |
| 1.4 | Différents types des mortiers | 11 |
| 1.4.1 | Les mortiers de ciment | 11 |
| 1.4.2 | Les mortiers de chaux..... | 12 |
| 1.4.3 | Les mortiers bâtards | 12 |
| 1.4.4 | Mortier réfractaire | 12 |
| 1.4.5 | Mortier rapide | 12 |
| 1.4.6 | Mortier industriel | 12 |
| 1.5 | Classification des mortiers..... | 12 |
| 1.5.1 | Selon leur domaine..... | 12 |
| 1.5.2 | Selon la nature du liant | 13 |
| 1.6 | Caractéristiques des mortiers | 13 |

| | | |
|-------|---------------------------------|----|
| 1.6.1 | Ouvrabilité | 13 |
| 1.6.2 | Prise | 14 |
| 1.6.3 | Résistances mécaniques..... | 14 |
| 1.6.4 | Retraits et gonflements : | 15 |
| 1.6.5 | Masse volumique apparente..... | 15 |
| 1.6.6 | Masse volumique absolue..... | 15 |
| 1.6.7 | Porosité | 15 |
| 1.7 | Conclusion | 16 |

Chapitre 2 :

Les déchets de démolition et les granulats recyclés

| | | |
|-------|-----------------------------------------------------------------------|----|
| 2. 1 | Introduction | 18 |
| 2. 2 | Définition du terme "déchet" | 18 |
| 2. 3 | Sources de déchets utilisés en génie civil | 19 |
| 2.3.1 | Déchets de construction et de démolition | 19 |
| 2.3.2 | Déchets de sous-produits de l'industrie | 19 |
| 2. 4 | Les caractéristiques des déchets | 19 |
| 2.4.1 | La densité | 19 |
| 2.4.2 | Le degré d'humidité | 19 |
| 2.4.3 | Le pouvoir calorifique..... | 19 |
| 2.4.4 | Le rapport des teneurs en carbone et azote..... | 20 |
| 2. 5 | Chiffres et Historique..... | 20 |
| 2. 6 | Classification des déchets de construction et de démolition | 23 |
| 2.6.1 | Les déchets inertes (DI)..... | 24 |
| 2.6.2 | Les déchets industriels banals (DIB) | 24 |
| 2.6.3 | Les déchets industriels spéciaux (DIS) ou déchets dangereux (DD)..... | 24 |
| 2.6.4 | Les déchets d'emballage | 24 |
| 2. 7 | La gestion des déchets en Algérie | 26 |
| 2. 8 | Recyclage des déchets..... | 27 |
| 2.8.1 | Définition..... | 27 |

| | | |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.8.2 | Technique de recyclage: | 27 |
| 2. 9 | Les granulats recyclés | 28 |
| 2.9.1 | Définition de granulats | 28 |
| 2.9.2 | Origines des granulats | 29 |
| 2.9.3 | Description de granulats recyclés | 30 |
| 2.9.4 | Principaux paramètres influant sur les caractéristiques des granulats recyclés | 31 |
| 2.9.5 | Les classes principales des granulats recyclés | 31 |
| 2.9.6 | Fabrication des granulats recyclés | 32 |
| 2. 10 | Conclusion | 34 |

Chapitre 3 :
Effet des granulats recyclés sur les propriétés
des matériaux cimentaires

| | | |
|---------|-----------------------------------------------------------|----|
| 3.1 | Introduction | 36 |
| 3.2 | Propriétés du béton à base des granulats recyclés | 36 |
| 3.2.1 | A l'état frais | 36 |
| 3.2.1.1 | L'ouvrabilité | 36 |
| 3.2.1.2 | La masse volumique et la teneur en air | 37 |
| 3.2.2 | A l'état durci | 38 |
| 3.2.2.1 | Perméabilité | 38 |
| 3.2.2.2 | Porosité | 38 |
| 3.2.2.3 | Résistance à la compression | 38 |
| 3.2.2.4 | Résistance à la traction par flexion et par fendage | 39 |
| 3.2.2.5 | Module d'élasticité | 40 |
| 3.2.2.6 | Propriétés liées à la durabilité | 40 |
| 3.3 | Propriétés du mortier à base des granulats recyclés | 41 |
| 3.3.1 | A l'état frais | 41 |
| 3.3.1.1 | Ouvrabilité | 41 |
| 3.3.1.2 | Densité à l'état frais | 43 |

| | |
|--------------------------------------|----|
| 3.3.2 A l'état durci..... | 44 |
| 3.3.2.1 La porosité | 44 |
| 3.3.2.2 Le retrait | 45 |
| 3.3.2.3 Résistances mécaniques..... | 46 |
| 3.3.2.4 Module d'élasticité..... | 50 |
| 3.3.2.5 Densité à l'état durci | 50 |
| 3.3.2.6 Absorption capillaire | 51 |
| 3.4 Conclusion..... | 52 |

Deuxième partie Etude expérimentale.....53

Chapitre 4 :

Matériaux de l'étude et les techniques expérimentales

| | |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1 Introduction | 55 |
| 4.2 Matériaux | 55 |
| 4.2.1 Le ciment..... | 55 |
| 4.2.1.1 Composition chimique et minéralogique du ciment utilisé | 55 |
| 4.2.1.2 Les caractéristiques physiques du ciment utilisé | 56 |
| 4.2.2 Sable..... | 57 |
| 4.2.2.1 Les caractéristiques physiques..... | 58 |
| 4.2.3 L'eau | 62 |
| 4.3 Formulation des mortiers | 62 |
| 4.4 Malaxage du mortier | 63 |
| 4.5 Confection des éprouvettes de mortier | 63 |
| 4.6 Conservation des éprouvettes..... | 64 |
| 4.7 Les essais réalisés durant l'étude..... | 64 |
| 4.7.1 Essais sur le mortier frais | 64 |
| 4.7.1.1 Essai d'étalement à la table à secousse | 64 |
| 4.7.2 Essais sur le mortier durci | 65 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| 4.7.2.1 Essai de résistance à flexion et traction par flexion : | 65 |
| 4.7.2.2 Essai de résistance à la compression | 66 |
| 4.7.2.3 Essai de porosité | 66 |
| 4.7.2.4 Essai d'absorption d'eau par immersion | 67 |
| 4.7.2.5 Essai de retrait..... | 67 |
| 4.8 Conclusion..... | 69 |

CHAPITRE 5 :

Résultats et discussion

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.1 Introduction | 71 |
| 5.2 Effet des granulats recyclés (type et taux de substitution) sur les propriétés rhéologiques des mortiers | 72 |
| 5.2.1 L'Ouvrabilité | 72 |
| 5.3 Effet des granulas recyclés (type et taux de substitution) sur les propriétés mécaniques des mortiers | 73 |
| 5.3.1 Résistance à la compression | 73 |
| 5.3.2 Résistance à la traction par flexion | 75 |
| 5.4 Effet des granulats recyclés (type et taux de substitution) sur les propriétés physiques des mortiers | 77 |
| 5.4.1 La porosité | 77 |
| 5.4.2 La capacité d'absorption totale d'eau A_b | 78 |
| 5.4.3 Retrait..... | 79 |
| 5.5 Conclusion..... | 81 |
| Conclusion générale..... | 82 |
| Perspectives..... | 85 |
| Références bibliographiques..... | 86 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1. 1 : le mortier | 5 |
| Figure 1. 2 : mode d'action des superplastifiants..... | 10 |
| Figure 1. 3 : Table à secousses..... | 13 |
| Figure 1. 4 : Principe de fonctionnement du maniabilimètre | 14 |
| Figure 2. 1 : Taux de recyclage en fonction de la quantité de déchets de démolition produite aux Pays Bas, en Allemagne, au Royaume-Uni et en France..... | 22 |
| Figure 2. 2 : Déchets De Construction Et Démolition..... | 22 |
| Figure 2. 3 : Différents type du granulats recyclé | 23 |
| Figure 2. 4 : Déchets dans un bâtiment | 25 |
| Figure 2. 5 : Compositions des déchets du bâtiment..... | 25 |
| Figure 2. 6 : Schématisation d'un granulats recyclé | 30 |
| Figure 2. 7 : Origines des granulats recyclés | 32 |
| Figure 2. 8 : Systèmes de concassage / (a) système ouvert et (b) système fermé..... | 33 |
| Figure 3. 1 : Relation entre l'affaissement et le taux de remplacement en masse en gravillons recyclés. | 37 |
| Figure 3. 2 : Résistance en Compression à 28 jours..... | 39 |
| Figure 3. 3 : Résistance en traction par fendage à 28 jours | 40 |
| Figure 3. 4 : Effet de la substitution du sable par des résidus en grains sur la fluidité du mortier..... | 42 |
| Figure 3. 5 : Variation de la consistance du mortier avec l'augmentation de la teneur en granulats fins recyclés (RA) et sans compensation en eau. | 42 |
| Figure 3. 6 : Densité à l'état frais des mortiers avec une teneur croissante en granulats fins recyclés (RA). | 44 |
| Figure 3. 7 : Porosité à l'eau, porosité par injection de mercure (PIM) et air occlus pour (a) la série 1 et (b) la série 2..... | 45 |
| Figure 3. 8 : Résistance en compression simple des différents mortiers à 7 et 28 jours | 47 |
| Figure 3. 9 : Résistance à la compression des mortiers d'enduit avec une augmentation de la teneur en granulats fins recyclés (RA). | 48 |
| Figure 3. 10 : Contraintes de traction par fendage et par Flexion 3 points des différents mortiers à 7 et 28 Jours. | 49 |
| Figure 3. 11 : Résistances de traction de différents mélanges de mortier en fonction du taux de substitution en granulats recyclés fins. | 49 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 3. 12 : Résistances de flexion de différents mélanges de mortier en fonction du taux de substitution en granulats recyclés fins. | 50 |
| Figure 3. 13 : Densité relative à l'état durci des mortiers fabriqués avec une teneur croissante en granulats fins recyclés (RA). | 51 |
| Figure 4. 1 : Les sables utilisés : a. sable naturel, b. sable recyclé du béton, | 57 |
| Figure 4. 2 : Elaboration des sables recyclés : a. Concassage primaire des granulats recyclés, b. Broyage via le broyeur à mâchoire, c. Criblage..... | 58 |
| Figure 4. 3 : courbe granulométrique des sables utilisés..... | 59 |
| Figure 4. 4 : moule métallique (4*4*16) fixés à la table de choc | 64 |
| Figure 4. 5 : Table à secousses..... | 65 |
| Figure 4. 6 : Appareil d'essai de traction par flexion..... | 65 |
| Figure 4. 7 : Dispositif de rupture en compression | 66 |
| Figure 4. 8 : Essai de porosité..... | 66 |
| Figure 4. 9 : Dilatomètre à comparateur pour retrait- gonflement du mortier..... | 68 |
| | |
| Figure 5. 1 : Variation de l'ouvrabilité des mortiers à base de sable recyclé avec E/C= 0.6. | 73 |
| Figure 5. 2 : Résistances à la compression des mortiers à base de sable recyclé à l'âge de 7 jours. | 73 |
| Figure 5. 3 : Résistances à la compression des mortiers à base de sable recyclé à l'âge de 28 jours. | 74 |
| Figure 5. 4 : Résistances à la traction par flexion des mortiers à base de sable recyclé 7 jour. | 75 |
| Figure 5. 5 : Résistances à la traction par flexion des mortiers à base de sable recyclé 28 jour. | 76 |
| Figure 5. 6 : Evolution de La porosité des mortiers à base de sable recyclé à 28j..... | 78 |
| Figure 5. 7 : Evolution de l'absorption totale d'eau après 24h d'immersion des mortiers à base de sable recyclé à 28j..... | 78 |
| Figure 5. 8 : Evolution du retrait des mortiers à base sable recyclé de bétons | 80 |
| Figure 5. 9 : Evolution du retrait des mortiers à base sable recyclé de briques..... | 80 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 1.1 : Les types de ciment..... | 7 |
| Tableau 3. 1 : Propriétés à l'état frais de mortiers avec sable recyclé | 42 |
| Tableau 4. 1 : la composition chimique du clinker (%). (Fiche technique) | 56 |
| Tableau 4. 2 : la composition minéralogique du clinker (%). (Fiche technique) | 56 |
| Tableau 4. 3 : Résultats des masses volumiques du ciment étudié..... | 56 |
| Tableau 4. 4 : module de finesse (Mf) des sables étudiés | 59 |
| Tableau 4. 5 : classement du sable | 60 |
| Tableau 4. 6 : Les masses volumiques des sables étudiés..... | 60 |
| Tableau 4. 7 : Résultats de la compacité et la porosité des sables. | 61 |
| Tableau 4. 8 : Résultats d'équivalent de sable des sables étudiés. | 61 |
| Tableau 4. 9 : Résultats du coefficient d'absorption des sables étudiés. | 62 |
| Tableau 4. 10 : Composition d'une gâchée de mortier. | 63 |
| Tableau 4. 11 : Formulation des mortiers d'étude. | 63 |
| Tableau 4. 12 : Opérations de malaxage du mortier | 63 |

LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS

- CPJ-CEM II/A 42.5:** Ciment Portland composé
- E/C :** Rapport massique de l'eau sur ciment.
- Rc:** refus cumulé en (%).
- Mf:** Module de finesse
- ESp:** équivalent de sable mesuré au piston.
- ESV :** équivalent de sable visuel mesuré visuellement.
- SN :** Sable naturele (Biskra).
- GN :** granulat naturel
- SRBE :**Sable recyclé produit par le concassage de béton
- SRBR :**Sable recyclé produit par le concassage de la brique cuite.
- pabs :** masse volumique absolue.
- papp :** masse volumique apparent.
- P(%):** porosité.
- C(%):** compacité.
- A (%) :** taux d'absorption.
- M10 :** Mortier à 10% de sable recyclé.
- Rc:** Résistance à la compression en MPa.
- b:** Côté de l'éprouvette en mm.
- Rt :** résistance à la traction par flexion..
- Ff:** Charge de rupture de l'éprouvette en flexion N.
- E :**Module d'Young
- L :** Longueur qui sépare les deux appuis inférieurs en mm.
- SP :** Superplastifiants.
- NF P :** Norme françaises applicable au bâtiment et génie civil.
- EN :** Norme Européenne définitive.
- AFNOR :** Association française de normalisation.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Les mortiers ont connu un essor important ces dernières années en Algérie ce sont présents dans tous les secteurs d'activité du bâtiment et des travaux publics. Au cours des 40 dernières années, les mortiers sont devenus de plus en plus complexes. Aujourd'hui, ils associent des liants hydrauliques et de multiples adjuvants.

La rénovation et la reconstruction des ouvrages de génie civil produisent chaque année beaucoup de déchets. Devant les besoins croissant des ressources en matériaux et aux exigences de préservation de l'environnement dans une vision de développement durable, il est devenu nécessaire et pertinent de prospecter et d'étudier toutes les possibilités de réutilisation et de valorisation des déchets et sous-produits industriels notamment dans le domaine de génie civil.

L'Algérie, notamment dans les régions du sud, compte un déficit important en matériaux de construction et en particulier le ciment et le sable. L'Algérie accuse un retard énorme dans la gestion des déchets d'une manière générale, en particulier ceux à base de matériaux cimentaires, qui sont le plus souvent abandonnés dans des décharges sauvages causant un impact sur l'environnement. Dans la perspective de développement durable, il est souhaitable de penser au recyclage du béton et de briques de démolition dans la fabrication des bétons et des mortiers.

Aujourd'hui, le recyclage des déchets de construction et de déconstruction, comme source de granulats pour mortier, est considéré comme très important dans la tentative générale pour la protection de l'environnement et pour la promotion des principes de développement durable.

Dans ce contexte, les laboratoires de recherche sur les matériaux travaillent sur le développement de nouveaux composites cimentaires à base de ces déchets, dans le but économique (réduire le coût de réalisation), écologique (éliminer ces déchets de l'environnement) et technique (améliorer les propriétés mécaniques et physiques des mortiers ou des bétons). Parmi ces déchets, les déchets de démolition de béton et de brique de terre cuite qui peuvent être broyés et utilisés comme sable recyclé pour la fabrication du mortier, ce qui contribue à la protection de l'environnement et répond aussi aux besoins du secteur de la

construction et des travaux publics, du moment qu'ils existent des millions de tonnes de sable recyclé éparpillé à travers le territoire national.

Dans l'ordre à valoriser les déchets de démolition, l'objectif principal de ce travail est d'étudier l'influence des granulats fins issus du recyclage du béton et de briques de démolition des constructions et ouvrages en génie civil sur les propriétés physico-mécaniques des mortiers. En procédant par substitution du sable alluvionnaire par le sable de recyclage. En finalité, on cherche la formulation adéquate du mortier de manière à augmenter ses performances mécaniques et à assurer une meilleure ouvrabilité.

Pour atteindre cet objectif, ce mémoire est scindé en cinq chapitres, précédés par une introduction générale qui définit la problématique du sujet ainsi que les objectifs visés.

Le premier chapitre : donne un aperçu général sur les principaux constituants du mortier.

Le deuxième chapitre : présente Les déchets de démolition et les granulats recyclés.

Le troisième chapitre : est consacré à présenter les travaux antérieurs réalisés sur l'effet des granulats recyclés sur les propriétés des matériaux cimentaires.

Le quatrième chapitre : présente les caractéristiques des matériaux utilisés et les méthodes d'essais.

Le cinquième chapitre : est dédié à l'analyse des résultats et discussion.

Une conclusion générale clos ce travail en mettant l'accent sur les différents aspects de la problématique posée et en ouvrant des perspectives éventuelles sur le domaine de recherche investi.

Chapitre I :
Le mortier : composition et caractéristiques exigées

Chapitre I

Le mortier : composition et caractéristiques exigées

1.1 Introduction

Le mortier est l'un des matériaux de construction que l'on utilise pour solidariser les éléments entre eux, assurer la stabilité de l'ouvrage, combler les interstices entre les blocs de construction.

Ce chapitre expose des généralités sur les mortier, ces composants (l'eau, les sables et le ciment), et actuelles connaissances sur ces performances de durabilité, Les caractéristiques principales des mortiers et leurs utilisations.

1.2 Définition des mortiers

Le mortier est obtenu par le mélange d'un liant (chaux ou ciment), de sable, d'eau et éventuellement d'additions. Des compositions multiples de mortier peuvent être obtenues en jouant sur les différents paramètres : liant (type et dosage), adjuvants et ajouts, dosage en eau (Figure 1.1).

Les mortiers peuvent être très différents les uns des autres selon la nature et les pourcentages des constituants, le malaxage, la mise en œuvre et la cure (Delaldja, 2018).



Figure 1. 1 le mortier (<https://www.linternaute.fr>)

1.3 Constituants des mortiers

1.3.1 Les liants

Les liants hydrauliques les plus utilisés dans la construction sont les ciments et Les chaux hydrauliques.

1.3.1.1 Les chaux

Chimiquement, la chaux est un oxyde de calcium, avec plus ou moins d'oxyde de magnésium, mais la désignation usuelle de chaux peut englober différents états chimiques de ce produit. Trois catégories se distinguent de par leur utilisation dans la construction : la chaux vive (produit direct de la pyrolyse du calcaire), la chaux aérienne (ou éteinte, obtenue par la réaction de la chaux vive avec de l'eau), et la chaux hydraulique (constituée en plus de silicate et d'aluminate de calcium). Cette dernière est désignée « hydraulique » parce qu'elle durcit en présence d'eau.

Les mortiers de chaux trouvent leur application essentiellement dans le bâtiment, où leurs qualités sont appréciées pour les enduits, les menus ouvrages en maçonnerie, et d'une façon générale pour les travaux de restauration.(PATURAL, 2011).

1.3.1.2 Le ciment

Le ciment est un liant hydraulique c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui est gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réaction et processus d'hydratation et qui, après durcissement conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. Il est principalement composé de calcaire et d'argile. Le ciment joue le rôle de liant dans le béton hydraulique. Il est lui-même composé de clinker additionné de gypse (3 à 5 %), et éventuellement pour les ciments composés, d'autres constituants secondaires, tel que, le laitier de haut fourneau : un résidu minéral issu de la préparation de la fonte à partir du minerai de fer du coke métallurgique, de cendre volante ou de fillers calcaires (granulats fins obtenus par broyage de roches) (Habib, 2016).

A. Hydratation du ciment

Le ciment anhydre est composé des poudres minérales obtenues par cuisson puis broyage d'un mélange intime de 80% de calcaire et 20% d'argile. Lorsque nous ajoutons de l'eau au ciment, l'eau permet la fluidification et l'hydratation du ciment. Et quand il y'a un mélange d'eau et de ciment à l'interface solide et liquide, il se crée une réactivité et différents mécanismes élémentaires (absorption, hydrolyse, dissolution, solvataion et la cristallisation) conduisant ainsi à l'hydratation du ciment (COULIBALY, 2015).

B. Les types de ciment

La normalisation des ciments (NF EN 197-1) distingue cinq types de ciments courants, comme présentés sur le Tableau 1.1 (KATTAB.R, 2007) :

Tableau 1.1 Les types de ciment (KATTAB.R, 2007)

| <i>Désignation</i> | <i>Types de ciment</i> | <i>Clinker %</i> | <i>Ajouts et Teneurs en %</i> | <i>Matière secondaire</i> |
|------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| CEM I | Ciment portland | 95 à 100 % | ----- | |
| CEM II /A CEM II /B | Ciment portland Composé | 80 à 94 % 65 à 79 % | L'un des Ajouts - 6 à 20% - 21 à 35 % | 0 à 5% |
| CEM III/A | Ciment de haut fourneau | 35 à 64 % 20 à 34 % 5 à 19 % | Laitier - 35 à 65 % - 66 à 80% - 81 à 95 % | |
| CEM IV/A CEM IV/B | Ciment pouzzolanique | 65 à 90 % 45 à 64 % | Pouzzolane, cendre, ou fumée de silice - 10 à 35% - 36 à 55% | |
| CEM V/ A CEM V/ B | Ciment au laitier et aux cendres | 40 à 64 % 20 à 39 % | Laitier - 18 à 30% Etcendre- 31 à 50% | |

1.3.2 Le sable

1.3.2.1 Définition

C'est une matière minérale siliceuse ou calcaire qui se présente dans le sol sous la forme de grains ou de poudre, suivant qu'il s'agit de sable grossier ou de sable fin. Les sables proviennent de la désagrégation des roches qui constituent l'écorce terrestre; suivant leur

composition, ils sont blancs, jaunes, gris ou rougeâtres. On peut encore classer les sables d'après leur origine et distinguer les sables de carrière, les sables de mer et les sables de rivière (DUPAIN et al., 1995).

1.3.2.2 Les types des sables

- **Sable Alluvionnaire**

Le sable alluvionnaire, dit aussi roulé, dont la forme a été acquise par l'érosion. Il est issu de roches meubles des dépôts des alluvions trouvés dans les lits des fleuves ou des rivières. Bien qu'on puisse trouver différentes roches selon la région d'origine, le sable utilisé pour le béton est le plus souvent siliceux.

Ce sable, plus recommandé à la confection des bétons, doit présenter une granularité telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Cette granularité est caractérisée par le module de finesse (Mf). Plus le module de finesse est faible, plus le sable est fin.

- $1.8 \leq MF \leq 2.2$: le sable convient bien pour obtenir une bonne ouvrabilité et une résistance satisfaisante.
- $2.2 \leq MF \leq 2.8$: le sable convient bien pour obtenir une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégations limités.
- $2.8 \leq MF \leq 3.2$: le sable convient bien pour obtenir une moins bonne ouvrabilité et une résistance élevée avec des risques de ségrégations.

(Abdallah et al., 2018)

- **Le sable concassé**

Connu aussi sous l'appellation du sable de carrière, est obtenu à partir du concassage des roches calcaires, andésite, granite, dolomie et basalte. Ses dimensions se situent entre 0 et 6 mm En raison du processus de broyage, le sable de concassage diffère des sables naturels par la granulométrie, la forme et la texture des particules, de même il contient généralement entre 10 % et 20 % de fines (les particules passant au tamis de 80 μ m). Les fines sont généralement très probablement les plus petites fractions granulométriques de granulats concassés dans le sable de concassage, il faut limiter le pourcentage des fines. Alors que dans

les sables naturels, les fines peuvent être des argiles ou autres particules nocives (BOUNEDJEMA, 2017).

- **Le sable de dune**

C'est une variété des sables de mer. Il est donc très fin. Les sables de dune se trouvent dans les régions sud du pays. Ils sont situés en zone présaharienne. Les sables retenus sont ceux issus des dunes continentales. Ces dunes sont constituées des nombreux amas de sables fins accumulés dans certaines régions spécifiques du Sahara.

1.3.2.3 Rôle de sable dans le mortier

L'introduction des sables permet de diminuer le retrait du liant (ossature mortier) en augmentant les résistances mécaniques, de plus, sa disponibilité et son aspect esthétiques (couleur). Les sables de bonne granulométrie doivent contenir des grains fins, moyens et gros. Les grains fins se disposent dans les intervalles entre les gros grains pour combler les vides.

Ils jouent un rôle important: Ils réduisent les variations volumiques, les chaleurs dégagées et même le prix. Les dosages se feront en poids plutôt qu'en volume comme c'est souvent le cas, afin d'éviter les erreurs de dosage, par suite de l'augmentation de volume de sable humide (BOUALI, 2014).

1.3.3 L'eau de gâchage

L'eau joue un rôle important, elle sert à hydrater le ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier, ainsi elle contribue à son ouvrabilité, L'eau doit être propre et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis). L'eau potable convient toujours le gâchage à l'eau de mer est à éviter, surtout pour le béton armé. Les caractéristiques des eaux requises pour la confection des mortiers et des bétons sont précisées dans la norme NA-442. Les mortiers devraient contenir la quantité d'eau maximale compatible avec une ouvrabilité optimale (William, 2001)

1.3.4 Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques que l'on utilise dans le cas des bétons. Ils modifient les propriétés des bétons et des mortiers auxquels ils sont ajoutés en faible proportion (environ de 5% du poids de ciment). Les mortiers peuvent comporter différents types d'adjuvants:

- les plastifiants (réducteurs d'eau);

- les entraîneurs d'air;
- les modificateurs de prise (retardateurs, accélérateurs);
- les hydrofuges. Dans tous les cas des soins particuliers doivent être pris afin d'obtenir des mortiers sans ressuage, homogènes d'une gâchée à l'autre (Phoummavong, 2006).

Puisque on s'intéresse dans ce mémoire à l'utilisation des superplastifiants, on essaye de donner plus de détails sur ce type d'adjuvant et son mode d'action.

• Les superplastifiants :

Les superplastifiants sont des polymères solubles dans l'eau, lesquels possèdent de nombreuses applications dans l'industrie de la construction. Ces matériaux sont également appelés réducteurs d'eau de haut rang. Ils font partie des adjuvants pour béton, lesquels sont définis, selon la norme EN 934-2, comme des matériaux qui sont ajoutés au béton pendant le processus de malaxage, dans des quantités inférieures à 5% de la masse de ciment, afin de modifier ses propriétés à l'état frais et à l'état durci (SALHI, 2018).

L'action d'un superplastifiant passe nécessairement par son adsorption sur les particules de ciment. En se fixant sur les grains de ciment, modifie la nature des charges électriques. Les grains de ciment ont alors tendance à s'éloigner les uns des autres du fait qu'ils ont tous la même charge et s'entourent d'un film d'eau très mince. Ainsi on obtient un grain de fluidité, puisque les grains de ciment sont mieux dispersés. L'eau existante sert alors de fluidifier le béton (Berkouk et Ameer Tassadit , 2007).

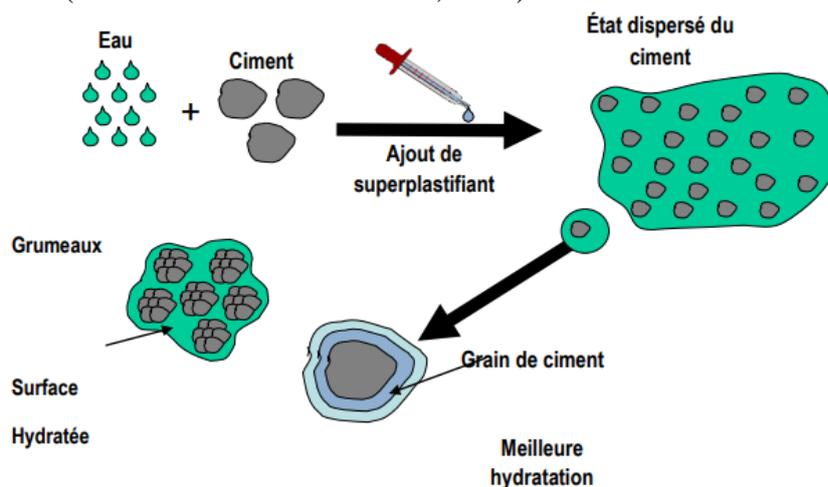


Figure 1. 2 mode d'action des superplastifiants (Berkouk et Tassadit, 2007)

1.3.5 Les ajouts

Sont des matériaux en fines particules qui peuvent être ajoutés en quantités limitées pour influencer certaines propriétés ou obtenir des propriétés particulières. Ils sont à prendre en compte dans la composition volumétrique. On peut citer (Chanvillard,1999) :

- **Les cendres volantes**

Les cendres volantes sont un sous-produit industriel récupéré dans les dépoussiéreurs de cheminée des centrales thermiques fonctionnant au charbon pulvérisé ou au lignite. Cette poudre sous forme finement divisée et est constituée de particules vitreuses et sphériques. Ayant des propriétés pouzzolaniques et composées essentiellement de silice et d'alumine (SiO_2 et Al_2O_3), la proportion de silice (SiO_2) réactive constituant au moins 25% en masse.

- **Fillers et additions calcaires**

Les données économiques ne faisant pas de distinction entre les fillers et les additions qui relèvent pourtant de normes différentes, nous utilisons ci-après le terme de (fillers) pour désigner l'ensemble de la production.

- **Laitier**

C'est un produit de la production de la fonte. Dans le procédé de fabrication, dans les hauts fourneaux, le laitier surnage au-dessus de la fonte, et se vérifie rapidement après refroidissement. Le broyage de ce dernier donne ce qu'on appelle le laitier vérifié moulu.

- **Fumée de silice**

C'est une poudre amorphe de silice extrêmement fine, récupérée dans les cheminées lors de la condensation des gaz de réaction résultant de la fabrication du silicium ou de ses alliages.

1.4 Différents types des mortiers

Les mortiers se partagent en différents types (GCI712 , 2009) :

1.4.1 Les mortiers de ciment

Les mortiers de ciments sont très résistants, prennent et durcissent rapidement. Le dosage entre le ciment et le sable est, en général, un rapport volumétrique de 1:3 :

- 1/3 de ciment
- 2/3 de sable

Le dosage de l'eau correspond au rapport (en kg) Eau/Ciment (E/C) qui est environ égal à 0,35. Il faut savoir qu'un dosage optimum en ciment rend les mortiers pratiquement imperméables.

1.4.2 Les mortiers de chaux

Les mortiers de chaux sont gras et onctueux. Ils durcissent plus lentement que les mortiers de ciment, surtout lorsque la chaux est calcique.

1.4.3 Les mortiers bâtards

Le mélange de ciment et de chaux permet d'obtenir conjointement les qualités des ces deux liant. Généralement, on utilise la chaux et le ciment par parties égales ; mais on mettra une quantité plus ou moins grande l'un ou de l'autre suivant et la qualité recherchée.

1.4.4 Mortier réfractaire

Il est fabriqué avec du ciment fondu, qui résiste à des températures élevées. Il est utilisé pour la construction des cheminées et barbecues.

1.4.5 Mortier rapide

Il est fabriqué avec du ciment prompt, il est rapide et résistant pour les scellements.

1.4.6 Mortier industriel

Ce sont des mortiers que l'on fabrique à partir de constituants secs, conditionnés en sacs.

1.5 Classification des mortiers

Les mortiers sont classés comme suit :(P. Sylver, 2005) :

Classification générale des mortiers :

1.5.1 Selon leur domaine

L'utilisation des mortiers varient selon leur domaine d'application, et ce dernier qu'est très vaste et leurs domaines permet de citer les catégories suivantes:

- Mortier de pose,
- Mortier de joints,
- Mortier pour les crépis,
- Mortier pour le sol,

- Mortier pour les stucs,
- Pierres artificielles,
- Support pour les peintures murales.

1.5.2 Selon la nature du liant

On peut classer les mortiers selon la nature du liant en:

- Mortier de ciment portland,
- Mortier de chaux,
- Mortiers bâtards,
- Mortier à base de ciment de maçonnerie.

1.6 Caractéristiques des mortiers

Les caractéristiques principales des mortiers sont (V.PHOUMMAVONG,2006) :

1.6.1 Ouvrabilité

L'ouvrabilité d'un mortier se mesure à l'aide de divers appareils. Les plus connus sont:

- **Table à secousses**

Après le démoulage du mortier, ce dernier reçoit 15 chocs en 15 secondes. On mesure le diamètre de la galette ainsi obtenue (Figure 1.3). L'étalement en % est donné par la formule:

$$E\% = 100 \frac{D_r - D_i}{D_i}$$

Avec: **Dr** : diamètre final

Di: diamètre initial

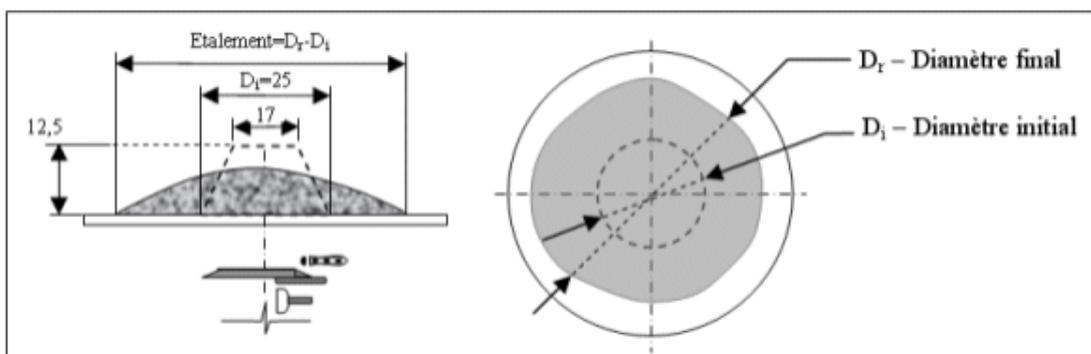


Figure 1. 3 Table à secousses (V.PHOUMMAVONG,2006)

- **Maniabilimètre du LCPC**

Il est constitué d'un moule parallélépipédique comportant une paroi mobile et un vibreur (Figure 1.4). Le principe de l'essai consiste, après avoir enlevé la paroi mobile, à mesurer le temps mis par le mortier sous vibrations pour atteindre un repère gravé sur la face intérieure du moule.

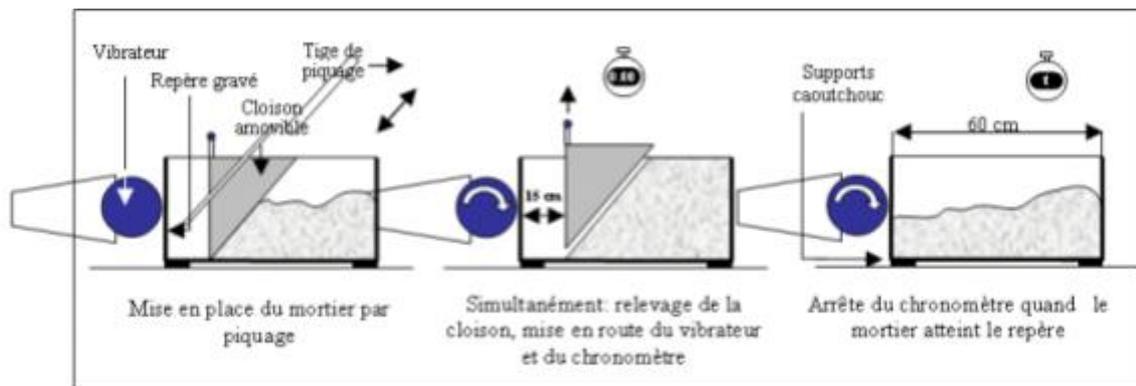


Figure 1. 4 Principe de fonctionnement du maniabilimètre (V.PHOUMMAVONG,2006)

1.6.2 Prise

Le temps de prise se mesure habituellement sur une pâte pure de ciment de consistance normale (24 à 30% d'eau) et conformément à la norme concernée (à l'aide de l'appareil de Vicat). Il est possible d'obtenir (hors norme) le temps de prise d'un mortier avec le même appareillage mais en plaçant une surcharge de 700 grammes sur le plateau supérieur. Le poids de l'aiguille pénétrant dans le mortier est de 1000 grammes. Le début de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du fond (taille des plus gros grains de sable) et la fin de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du niveau supérieur.

1.6.3 Résistances mécaniques

Les essais sont souvent effectués sur les éprouvettes prismatiques de 4x4x16cm conservés dans l'eau à 20°C. Les éprouvettes sont rompues en traction par flexion puis en compression. Les résistances, aussi bien en traction par flexion qu'en compression, progressent à peu près comme logarithme du temps (entre 1 et 28 jours).

Les résistances des mortiers dépendent de très nombreux facteurs:

- Nature et dosage en ciment.
- Rapport E/C.

- Granulométrie et nature du sable.
- Energie de malaxage et mise en œuvre.
- Protection des premiers jours. (V.PHOUMMAVONG,2006)

1.6.4 Retraits et gonflements

- **Le Retrait**

Les retraits se mesurent sur des prismes 4 x 4 x 16 cm en mortier 1/3, munis de plots à leurs extrémités et conservés, après démoulage, dans une enceinte à 20 °C et à 90 % d'humidité relative. Ce retrait progresse à peu près comme le logarithme entre 1 et 28 jours.

Le mortier prend son retrait plus rapidement que la pâte pure. Le rapport du retrait de la pâte pure sur le retrait du mortier croît avec le temps. Il est de l'ordre de 1,5 à 2,5 les premiers jours, puis augmente pour atteindre 2,5 à 3,5 en un an. En moyenne, le retrait sur mortier est 2 à 3 fois plus faible que celui de la pâte pure (avec le même ciment).

- **Le gonflement**

Le gonflement des mortiers (qui se produisent lorsqu'ils sont conservés dans l'eau) se mesure sur les mêmes éprouvettes de 4 x 4 x 16 cm conservées dans l'eau à 20 °C. Ils sont en général assez faibles (cas de ciment stable ayant une expansion aux aiguilles de le Chatelier inférieure sur pâte pure à 10 mm). (V.PHOUMMAVONG,2006)

1.6.5 Masse volumique apparente

C'est la masse d'un corps par unité de volume apparent en état naturel (y compris les vides et les capillaires). Elle est exprimée en (g/cm^3 , kg/m^3 ou t/m^3).

1.6.6 Masse volumique absolue

C'est la masse d'un corps par unité de volume absolu de matière pleine (volume de matière seule sans tenir compte les vides et les pores). Elle est exprimée en (g/cm^3 , kg/m^3 ou t/m^3).

1.6.7 Porosité

La porosité est aussi un indicateur de la qualité générale du matériau. Ce paramètre est plutôt bien corrélé avec la résistance à la compression ; quand la porosité diminue (du fait de la diminution du rapport Eau/Ciment) la résistance augmente ainsi que sa durabilité. Les caractéristiques du réseau poreux sont des paramètres de premier ordre vis-à-vis de la durabilité du béton (Baroghel, 2008).

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre on s'est intéressé au mortier : définition, constituants, types et propriétés, parce qu'il constitue le matériau de base de notre étude, vu sa large utilisation dans tous les secteurs d'activité du bâtiment et des travaux publics. Au cours des 40 dernières années, les mortiers sont devenus de plus en plus complexes. Aujourd'hui, ils associent des liants hydrauliques et de multiples adjuvants. Les mortiers d'enduit, les colles à carrelages et les mortiers de réparation représentent, en termes de ventes et de quantités produites, les applications les plus importantes de tous les mortiers utilisés avec leur durabilité et résistance sont intimement liées aux propriétés de ses composantes (ciment, sable, l'eau de gâchage et les adjuvants).

Chapitre 2 :
Les déchets de démolition et les granulats recyclés

Chapitre 2

Les déchets de démolition et les granulats recyclés

2.1 Introduction

Chaque année les activités du Bâtiment et des Travaux Publics produisent des millions de tonnes de matériaux de démolition, qui dans le cas général sont des déchets inertes. Leur réutilisation dans un contexte d'économie de la ressource naturelle a vite été considérée comme une priorité pour les acteurs des Travaux Publics.

Le recyclage des déchets de construction et de démolition a été l'objet de beaucoup de recherches afin de préserver l'environnement et s'intégrer ainsi au concept de développement durable.

L'utilisation du béton concassé comme granulats recyclés sert à réduire les espaces de décharge publique et minimiser la consommation des granulats naturels et des diminutions importantes d'émissions de gaz (CO₂). Cependant, telles qu'ils sont, les agrégats recyclés présentent des propriétés physiques et mécaniques moins intéressantes.

2.2 Définition du terme "déchet"

On définit le déchet comme un produit ou n'importe quel résidu issu du métabolisme ou d'une activité humaine : domestiques, industrielles et agricoles, quand il ne peut plus être utilisé à d'autres fins par celui qui l'a fabriqué. L'ensemble de ces résidus se présentent sous forme solide, voire liquide quand - ils sont contenus dans des récipients réputés étanches .

Au sens du Code de l'Environnement -Article I de la loi française du 15 juillet 1997- ,un déchet est défini comme " Tout résidu d'un processus de production, de transformation, ou d'utilisation, toute - substance, matériau produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destiné à l'abandon et qui sont de nature à produire des effets nocifs sur le sol, la flore et la faune, à - dégrader les sites ou les paysages, à polluer l'air ou les eaux, à engendrer des bruits ou des odeurs, et d'une façon générale, à porter atteinte à la santé de l'homme et à l'environnement" (BALLESTER J.M.,1992 et GERARD.M,1999).

2.3 Sources de déchets utilisés en génie civil

Le terme « déchet » est un : « résidus, matériaux, substances ou débris rejetés à la suite d'un processus de production, de fabrication et d'utilisation ».

En génie civil deux principales sources de production de déchets qu'on rencontre généralement par la suite :

2.3.1 Déchets de construction et de démolition

Sont lourds et volumineux, généralement classés parmi les déchets industriels, tel que : béton, briques, pierre de taille, bois...etc.. Ces tas sont plus ou moins composites suivant la nature et l'âge des ouvrages . (Aissa, 2018).

2.3.2 Déchets de sous-produits de l'industrie

L'utilisation des déchets industriels, a une importance pratique et économique immédiate, car de nombreux produits secondaires et déchets résiduels peuvent remplacer des matières premières naturelles. Parmi les sous-produits utilisés tel que (les laitiers de haut fourneau, cendre volante, terre cuite...etc.)(Aissa, 2018).

2.4 Les caractéristiques des déchets

Les caractéristiques des déchets sont données par les paramètres suivants :

2.4.1 La densité

Vu l'importance de savoir la densité des déchets pour le choix des moyens de collecte et de stockage, on ne peut pas avoir une densité en poubelle, une densité en benne, une densité en décharge, une densité en fosse.

2.4.2 Le degré d'humidité

Il existe une quantité d'eau dans les déchets qui varient en fonction des saisons et le milieu environnemental. Cette eau a une grande influence sur la rapidité de la décomposition des matières qu'elles renferment et sur le pouvoir calorifique des déchets.

2.4.3 Le pouvoir calorifique

c'est la quantité de chaleur dégagée par la combustion de l'unité de poids en ordure brute.

2.4.4 Le rapport des teneurs en carbone et azote

le rapport C/N a été choisi comme critère de qualité des produits obtenus par le compostage des déchets. Il est d'une grande importance pour le traitement biologique des déchets. (BOUZROURA, 2017).

2.5 Chiffres et Historique

Les déchets de construction et de démolition représenteraient approximativement 30% de l'ensemble des déchets (en tonnes par an), générés par la Région. La partie majoritaire de cet important gisement de déchets est produite durant les travaux ; une petite partie du gisement est constituée de matériaux neufs non-utilisés. La nature des déchets produits varie fortement en fonction du type de travaux ou de bâtiment. Il s'agit majoritairement de déchets inertes. 75 à 80% des déchets de construction et de démolition seraient recyclés, essentiellement sous forme de remblais.(Loi n° 92-646 du 13 juillet 1992, RECORD 02-0807/1A - février 2005.) (SPERANDIO, 2001).

En Europe, sur les 1,4 milliards de tonnes de déchets annuels, 40% (soit 510 millions de tonnes) sont des déchets de construction .En 2006, il a été signalé que près de 850 millions de tonnes de déchets de construction et de démolition ont été générés dans l'union européenne par an, ce qui représente 31% de la production globale de déchets. Les Etats-Unis produisent 325 millions de tonnes de déchets de construction et le Japon 77 millions Comme la Chine et l'Inde et Brésil produisent maintenant plus de 50% du béton mondial, leurs déchets de béton seront eux aussi considérables (Adem, 2017).

En 2016, l'Union Européenne a produit 2533 millions de tonnes de déchets au total. Ce chiffre est à la hausse continuellement depuis le début des relevés en 2004 [Eurostat StatisticsExplained.30 avril 2019]. Parmi ce volume de déchet, plus d'un tiers provient du secteur de la construction ce qui représente plus ou moins 845 millions de tonnes de déchet par an. En ramenant ce chiffre au nombre d'habitant dans l'Union Européenne en 2016 à savoir 510 millions de personnes [Eurostat StatisticsExplained.13 mai 2019], cela signifie que chaque habitant produirait environ 1.65 tonne de déchet de construction par an. Ce volume de déchet ne risque pas de diminuer au fil du temps puisque de nombreuses anciennes constructions arrivent au bout de leur cycle de vie.

En Belgique, la quantité totale de déchets inertes concassés est évaluée à +/- 15 millions de tonnes par an, soit plus d'une tonne par habitant et par an. Cette quantité totale,

correspond à plus de 40% du volume total des déchets issus de la construction. A ce jour, plus de 90% des déchets inertes sont recyclés et réutilisés sous forme de granulats pour différents usages.(CANAT et CHEVET,1995).

En France, le secteur de la démolition produit annuellement 20 à 25 millions de tonnes de gravats (GDCBFNB, 1994).et 300 millions en 2011de déchet de béton est produit [Faisabilité PN Recybéton, 2011], Tous les gravats de démolition ne peuvent être utilisés afin de produire des granulats de recyclage. Ainsi, en France le potentiel de matériaux recyclables est seulement de 10 à 15 millions de tonnes (GDCBFNB, 1994).

Deux milliards de tonnes de granulats sont extraits chaque année aux États-Unis, et ce nombre atteindra 2,5 milliards de tonnes d'ici 2020, ce qui soulève des préoccupations au sujet de la source des nouveaux granulats. Une alternative consiste à réutiliser des matériaux recyclés, ce qui peut être considéré comme une ressource plutôt que comme des "déchets". Au Royaume-Uni, la demande en granulats pour tous les usages est d'environ 270 millions de tonnes par an, avec 70 millions de tonnes de cette demande à venir à partir des granulats secondaires et recyclés.

Certains pays recyclent presque tout leur béton, comme la Suisse. En Europe, le taux de recyclage varie du minimum (comme au Portugal) jusqu'à 95% en Suisse, passant par la France et l'Allemagne qui recyclent respectivement 63 et 80% de leurs bétons. Dans le monde, de nombreuses sociétés sont spécialisées dans le recyclage du béton dans le but d'éliminer complètement le béton de ses décharges ; une obligation déjà en vigueur notamment dans les pays scandinaves (Adem, 2017).

La Figure 2.1 montre le taux de recyclage en fonction de la quantité de déchets de démolition produite aux Pays Bas, en Allemagne, au Royaume-Uni et en France.

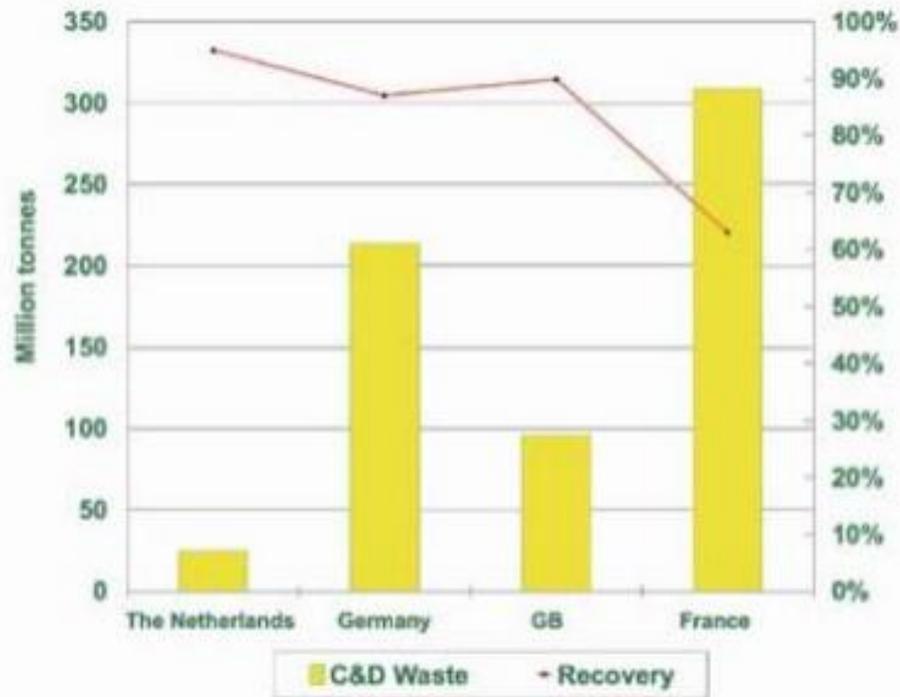


Figure 2. 1 Taux de recyclage en fonction de la quantité de déchets de démolition produite aux Pays Bas, en Allemagne, au Royaume-Uni et en France. (UEPG, 2006) UEPG : Union Européenne des Producteurs de Granulats. (Laneyrie, 2014).

En Algérie, les déchets de construction et de démolition (Figure 2.2), qui sont généralement classés parmi les déchets industriels, restent inconnus et sont estimés approximativement à des millions de tonnes par ans. les déchets issus du bâtiment sont estimés à 2,2 millions de tonnes par ans.(SPERANDIO, 2001).



Figure 2. 2 Déchets De Construction Et Démolition (Quartier Dhalaa, Biskra, Algérie)

Approximative des déchets de démolition de bâtiments peuvent donc être constitués comme suit : (Zineb, 2018).

- béton (40 %),
- brique (30 %),
- bois (10 %),
- plastique (5 %),
- métaux (5 %),
- autres éléments (10 %).

La démolition des routes génère des déchets d'enrobés mais également des déchets de bétons hydrauliques, le traitement de ces déchets permet d'extraire les éléments non appropriés comme les métaux. Dans la fabrication des granulats recyclés pour usage routier, on distingue trois types (Figure 2.3) :

- Granulat recyclé béton,
- Granulat recyclé enrobés,
- Granulat recyclé tout venant.



Figure 2. 3 Différents type du granulat recyclé(Zineb,2018)

2. 6 Classification des déchets de construction et de démolition

Il est nécessaire de distinguer les différentes catégories des déchets. Les déchets de construction et de démolition (C & D) des ouvrages en génie civil peuvent être classés en quatre grandes catégories (Fatma et Idris 2018) :

- Les déchets inertes ;
- Les déchets industriels banals ;
- Les déchets industriels spéciaux ou dangereux ;
- Les déchets d'emballages.

2.6.1 Les déchets inertes (DI)

Déchet qui ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique importante ; ne se décompose pas, ne brûle pas, et ne produit aucune réaction physique ou chimique d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine. Ces déchets sont admissibles dans les installations de stockage et proviennent essentiellement des chantiers de bâtiment et de et de travaux publics ou d'industries de fabrication de matériaux de construction.

2.6.2 Les déchets industriels banals (DIB)

Un déchet est dit banal s'il est traité par les mêmes procédures que ceux employés pour les déchets ménagers. Ces déchets ne sont ni inertes, ni toxiques. Ces déchets peuvent être appelés aussi Déchets Non Dangereux (DND). Dans cette catégorie, on trouve le bois, les métaux, les plastiques, le verre...

2.6.3 Les déchets industriels spéciaux (DIS) ou déchets dangereux (DD)

En opposition avec les DIB, ce type de déchet est traité par des procédés qui diffèrent de ceux employés pour les ordures ménagères. Ils contiennent des substances dangereuses pour l'homme et pour l'environnement. Leur stockage et leur traitement sont soumis à des règles strictes. On trouve dans cette catégorie par exemple l'amiante, les solvants, les peintures, les huiles, les colles, le goudron...

2.6.4 Les déchets d'emballage

Les déchets d'emballage sont tout type d'emballage destiné à contenir ou à protéger une marchandise, allant de l'emballage en contact direct avec des produits vendus aux emballages de groupage ou de transport, quels que soient les matériaux dont ils sont constitués. Dans cette catégorie on trouve les sacs de ciment, les palettes en bois. (Fatma et Idris, 2018).

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>INERTES</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Bétons, - Briques, tuiles et céramiques, - Mélange de béton, briques, tuiles et céramiques, - Verre (partie vitrage uniquement), - Matériaux bitumineux sans goudron, - Terres et pierres (y compris déblais mais hors terre végétale), |
|  <p>DÉCHETS NON DANGEREUX</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Métaux et leurs alliages, - Bois bruts ou faiblement adjuvantés, - Papiers, Cartons, - Plastiques, - Laines minérales, - Peintures, vernis, colles, mastics en phase aqueuse, - Cartouches ne contenant pas de produits toxiques, - Mélanges de ces différents déchets, y compris les mélanges contenant des déchets inertes, (déchets d'équipements électriques et électroniques) ne contenant pas de substances dangereuses, - Déchets alimentaires liés à la vie sur le chantier... - du Plâtre, |
|  <p>DÉCHETS DANGEREUX</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Aérosols, - Accumulateurs et piles contenant des substances dangereuses, - Bois traité avec des substances dangereuses, - Boues de séparateur d'hydrocarbures, - Cartouches contenant des substances dangereuses, - Emballages souillés par des substances dangereuses, - Produits contenant du goudron, - Lampes à économie d'énergie, - déchets d'équipements électriques et électroniques contenant des substances dangereuses, - peintures, vernis, colles, solvants contenant des substances dangereuses, - Pinceaux, chiffons souillés avec des produits dangereux, - Produits absorbants pollués aux hydrocarbures, - Transformateurs au pyralène... - de l'amiante friable et lié, tous matériaux amiantés, |

Figure 2. 4 Déchets dans un bâtiment

[Rapport sur la gestion des déchets solides en Algérie, Avril 2014.]

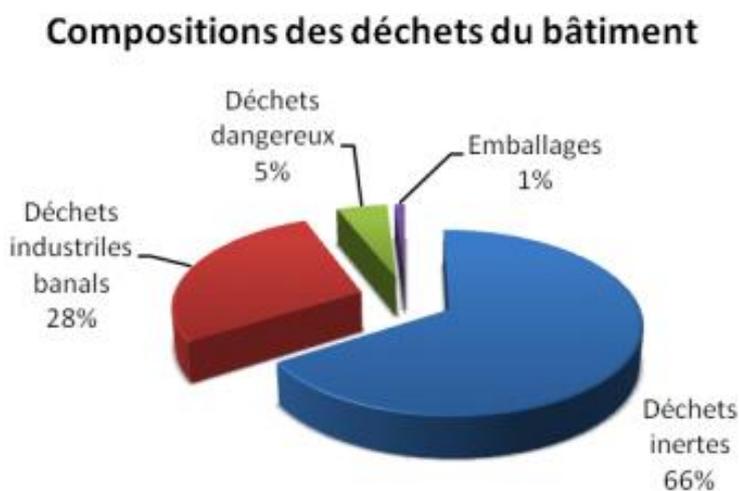


Figure 2. 5 Compositions des déchets du bâtiment (Zineb, 2018).

2.7 La gestion des déchets en Algérie

La gestion des déchets consiste en toute opération relative à la collecte, au tri, au transport, au stockage, à la valorisation et à l'élimination des déchets, y compris le contrôle de ces opérations. À partir de cette définition, plusieurs opérations se distinguent dans le mode de gestion des déchets existant en Algérie (Brahim, 2012).

- **La collecte des déchets** est l'opération de ramassage et/ou le regroupement des déchets en vue de les transférer vers un lieu de traitement.
- **Le tri des déchets** est la séparation des déchets selon leur nature en vue de leur traitement, par exemple le papier, plastique...
- **La valorisation des déchets** est la réutilisation, le recyclage ou le compostage des déchets. Le recyclage consiste à valoriser des produits usés ou des déchets.
- **L'élimination des déchets** comprend les opérations de traitement thermique, physico-chimique et biologique, de mise en décharge, d'enfouissement, d'immersion et de stockage des déchets, ainsi que toutes les autres opérations ne débouchant pas sur une possibilité de valorisation ou autre utilisation du déchet. Immersion des déchets : tout rejet de déchets dans le milieu aquatique. Enfouissement des déchets : tout stockage des déchets en sous-sol. L'incinération est un processus d'oxydation de la partie combustible du déchet dans une unité adaptée aux caractéristiques variables des déchets. Ce processus permet une forte réduction de volume des déchets à éliminer (déchets concernés : hydrocarbures, huiles, peintures, déchets d'usinage...). Les déchets issus de l'incinération (cendres, mâchefer) sont ensuite éliminés en centre d'enfouissement technique.
- **L'enfouissement technique** : Les déchets spéciaux ultimes sont ceux qui ne sont plus susceptibles d'être traités dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par l'extraction de la part valorisable ou par réduction de leur caractère dangereux et polluant. Les déchets admis en centre d'enfouissement technique (CET) sont des déchets essentiellement solides, minéraux avec un potentiel polluant constitué de métaux lourds peu mobilisables. Ils sont très peu réactifs, très peu évolutifs, et très peu solubles. (Brahim, 2012).

2.8 Recyclage des déchets

2.8.1 Définition

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets industriels et des déchets ménagers qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui le composent. Le recyclage a deux conséquences écologiques majeures : la réduction du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles. C'est une des activités économiques de la société de consommation. Certains procédés sont simples et bon marché mais, à l'inverse, d'autres sont complexes, coûteux et peu rentables. Dans ce domaine, les objectifs de l'écologie et ceux des consommateurs se rejoignent mais parfois divergent ; c'est alors le législateur qui intervient. Ainsi, en particulier depuis les années 70, le recyclage est une activité importante de l'économie et des conditions de vie des pays développés (Sabrina, 2006).

Le recyclage s'inscrit dans la stratégie de traitement des déchets dite des troisR :

- réduire, qui regroupe tout ce qui concerne la réduction de la production de déchets,
- réutiliser, qui regroupe les procédés permettant de donner à un produit usagé un nouvel usage.
- recycler, qui désigne le procédé de traitement des déchets par recyclage.

Le recyclage apporte une contribution importante à la baisse des quantités de déchets à éliminer par enfouissement et par incinération, mais il n'est pas suffisant pour contrer l'augmentation de la production des déchets ou y suffit à peine.

Pour lutter contre l'augmentation des déchets, le recyclage est donc nécessaire, mais il doit être inclus dans une démarche plus large.

2.8.2 Technique de recyclage

- **Procédés du recyclage**

Il existe trois grandes familles de techniques de recyclage : chimique, mécanique et organique.

Le recyclage dit « **chimique** » utilise une réaction chimique pour traiter les déchets, par exemple pour séparer certains composants. Le recyclage dit « **mécanique** » est la transformation des déchets à l'aide d'une machine, par exemple pour broyer. Le recyclage dit « **organique** » consiste, après compostage ou fermentation, à produire des engrais et du carburant tel que le biogaz.

- **La chaîne du recyclage**

a. Collecte de déchets : Les opérations de recyclage des déchets commencent par la collecte des déchets. Les déchets non recyclables sont incinérés ou enfouis en centres d'enfouissement techniques.

Les déchets collectés pour le recyclage ne sont pas destinés ni à l'enfouissement ni à l'incinération mais à la transformation. La collecte s'organise en conséquence. La collecte sélective, dite aussi séparative et souvent appelée à tort tri sélectif est la forme la plus répandue pour les déchets à recycler. Le principe de la collecte sélective est le suivant : celui qui crée le déchet le trie lui-même.

À la suite de la collecte, les déchets, triés ou non, sont envoyés dans un centre de tri où différentes opérations permettent de les trier de manière à optimiser les opérations de transformation. Le tri manuel est une de ces opérations.

b. Transformation : Une fois triés, les déchets sont pris en charge par les usines de transformation. Ils sont intégrés dans la chaîne de transformation qui leur est spécifique. Ils entrent dans la chaîne sous forme de déchets et en sortent sous forme de matière prête à l'emploi.

c. Commercialisation et consommation : Une fois transformés, les produits finis issues du recyclage sont utilisés pour la fabrication de produits neufs qui seront à leur tour proposés aux consommateurs et consommés. Pour être en fin de vie, à nouveau jetés, récupérés et recyclés. (Sabrina, 2006).

2. 9 Les granulats recyclés

2.9.1 Définition de granulats

La plupart des définitions relatives aux granulats sont empruntées du texte de la norme XP P 18-540 [Norme Française XP P 18-540]. Un granulats est un ensemble de grains compris entre 0 et 125 mm, destiné notamment à la confection des mortiers, des bétons, des couches de fondation et de base, de liaison et de roulement des chaussées, des assises et ballasts de voies ferrées, des remblais (CHAREF,2007)

2.9.2 Origines des granulats

En fonction de sa nature et de son origine, un granulat, peut-être (XP P 18-545 – Février 2004) :

- **Les granulats naturels**

D'origine minérale, issu de roches meubles (alluvions) ou de roches massives, n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (tels que concassage, broyage, criblage, lavage). Indépendamment de leur origine minéralogique, on classe ces granulats en deux catégories :

— Les granulats de roche meuble, dits roulés, dont la forme a été acquise par l'érosion, ces granulats sont lavés pour éliminer les particules argileuses nuisibles à la résistance du béton et criblés pour obtenir différentes classes. Bien qu'on puisse trouver différentes roches selon la région d'origine, les granulats utilisés pour le béton sont le plus souvent siliceux, calcaires ou silico-calcaires.

Ils sont exploités à proximité des cours d'eau, dans la nappe ou au-dessus de la nappe ou sur des fonds marins peu profonds. L'extraction est donc réalisée en fonction du gisement à sec ou dans l'eau.

— Les granulats de roches massives sont obtenus par abattage et concassage, ce qui leur donne des formes angulaires. Une phase de précriblage est indispensable à l'obtention de granulats propres. Différentes phases de concassage et de criblage aboutissent à l'obtention des classes granulaires souhaitées. Les granulats concassés présentent des caractéristiques qui dépendent d'un grand nombre de paramètres : origine de la roche, régularité du banc, et degré de concassage.

- **Les granulats artificiels**

Dans cette catégorie se rangent des granulats provenant de la transformation thermique de roches, de minerais et de sous-produits industriels transformés.

- **Les granulats recyclés**

Obtenu par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition de bâtiments.

2.9.3 Description de granulats recyclés

On entend par « granulat recyclé », un granulat provenant du recyclage de débris de démolition en opposition aux « granulats naturels » provenant de carrières ou de sablières. Les granulats recyclés sont formés du granulat d'origine et de mortier attaché à celui-ci. Ceux-ci doivent donc être considérés comme un système composé de deux phases distinctes, le mortier et le granulat d'origine. La teneur en mortier résiduel attaché au granulat d'origine a un grand impact sur les propriétés du granulat recyclé. La teneur en mortier résiduel du granulat est une des caractéristiques importantes permettant d'évaluer la qualité d'un granulat recyclé. Une des conséquences de la présence du mortier résiduel est la formation d'une zone de transition entre le granulat original et le mortier résiduel en plus de la zone de transition se formant entre le granulat recyclé et la nouvelle pâte de ciment. La schématisation du granulat recyclé est illustrée sur **la figure 2.5** (Zineb, 2018).

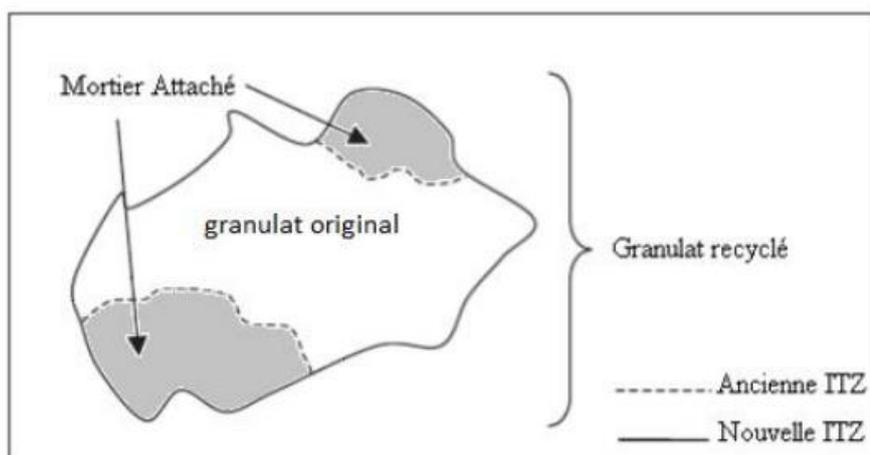


Figure 2. 6 Schématisation d'un granulat recyclé .

2.9.4 Principaux paramètres influant sur les caractéristiques des granulats recyclés

Un GRB consiste généralement d'un granulat naturel grossier et un mortier accolé. Le mortier accolé contient des granulats fins et des particules de ciment hydratées et non hydratées. La qualité des GRB dépend essentiellement de la méthode de recyclage adoptée et du rapport eau/ciment (E/C) du béton original démolé .

L'absorption d'eau des granulats recyclés est comprise entre 3 et 12% , la valeur précise dépendant du béton à partir duquel ont été produits les granulats, dit béton « parent ». Il est important de noter que cette valeur est bien plus élevée que celle des granulats naturels, qui ont une absorption d'eau comprise entre 0.5 et 3%. Cette différence est principalement

due aux résidus de mortier adhérent au granulat naturel de départ, qui est plus poreux que la pierre en elle-même, ce qui augmente globalement l'absorption d'eau du nouveau granulat.

le pourcentage d'absorption d'eau du granulat recyclé augmente avec la performance mécanique du béton parent, à cause de la plus grande quantité de mortier attachée dans ce cas-là. Son étude a également prouvé que la taille des granulats utilisés dans le béton parent influence l'absorption d'eau des granulats produits à partir de ce béton : en effet, plus le granulat naturel initial est petit, plus la surface spécifique totale disponible est grande, et donc plus les granulats recyclés sont riches en ancien mortier, autrement dit, plus ils sont poreux .

Un autre facteur peut influencer significativement la qualité des granulats recyclés provenant de sites de démolition, il s'agit de la présence de contaminants, soit de déchets de chantier de nature non cimentaire. On peut trouver parmi les granulats recyclés du verre, du bois, du plastique, du bitume, du gypse, des matières organiques ou des contaminations sous forme de chlorures ou de sulfates .La présence de ces contaminants peut induire une diminution de résistance en compression pouvant aller jusqu'à 15% de perte par rapport à un béton sans contaminant (Laneyrie, 2014).

2.9.5 Les classes principales des granulats recyclés

D'une manière générale, il y a quatre classes principales des granulats recyclés (BRUXELLES ENVIRONNEMENT, 2010) :

1. Granulats de débris de béton Proviennent de la démolition de bâtiments ou d'infrastructures de génie civil (bétons ou béton armé d'acier) (Figure 2.6 .A)
2. Granulats de débris de maçonnerie Proviennent de la construction, de la rénovation et de la démolition des bâtiments. (Figure 2.6 .B) .
3. Granulats de débris hydrocarbonés Proviennent de la démolition d'infrastructures de génie civil (routes...), de la démolition de parkings...(Figure 2.6.C).
4. Granulats de débris mixtes Proviennent de la construction / rénovation démolition de bâtiments (briques/blocs/tuiles...). (Figure 2.6 .D) .

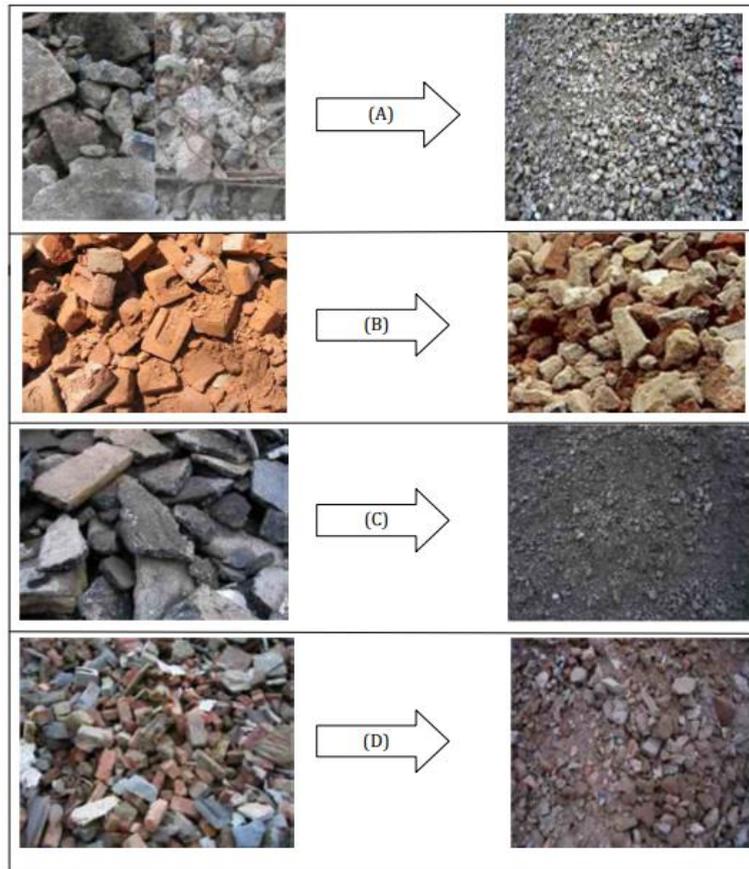


Figure 2. 7 Origines des granulats recyclés. (BRUXELLES ENVIRONNEMENT, 2010)

2.9.6 Fabrication des granulats recyclés

Les différentes phases d'élaboration des produits issus du recyclage des matériaux de démolition sont :

- Sélection, stockage et traitement des produits bruts ;
- Préparation des matériaux avant concassage : cette étape consiste à réduire les plus gros éléments à l'aide d'un brise roche hydraulique (BRH) et à retirer les impuretés les plus grosses ;
- Tri manuel
- Déferrage électromagnétique ;
- Concassage et criblage : étape destinée à éliminer les matériaux de faibles caractéristiques ;
- Concassage secondaire éventuel de la fraction supérieure issue du concassage primaire;
- Stockage ;

- Analyses éventuelles avant utilisation.

L'Organigramme suivant présente les différents systèmes de fabrication des granulats recyclés (Figure 2.7).

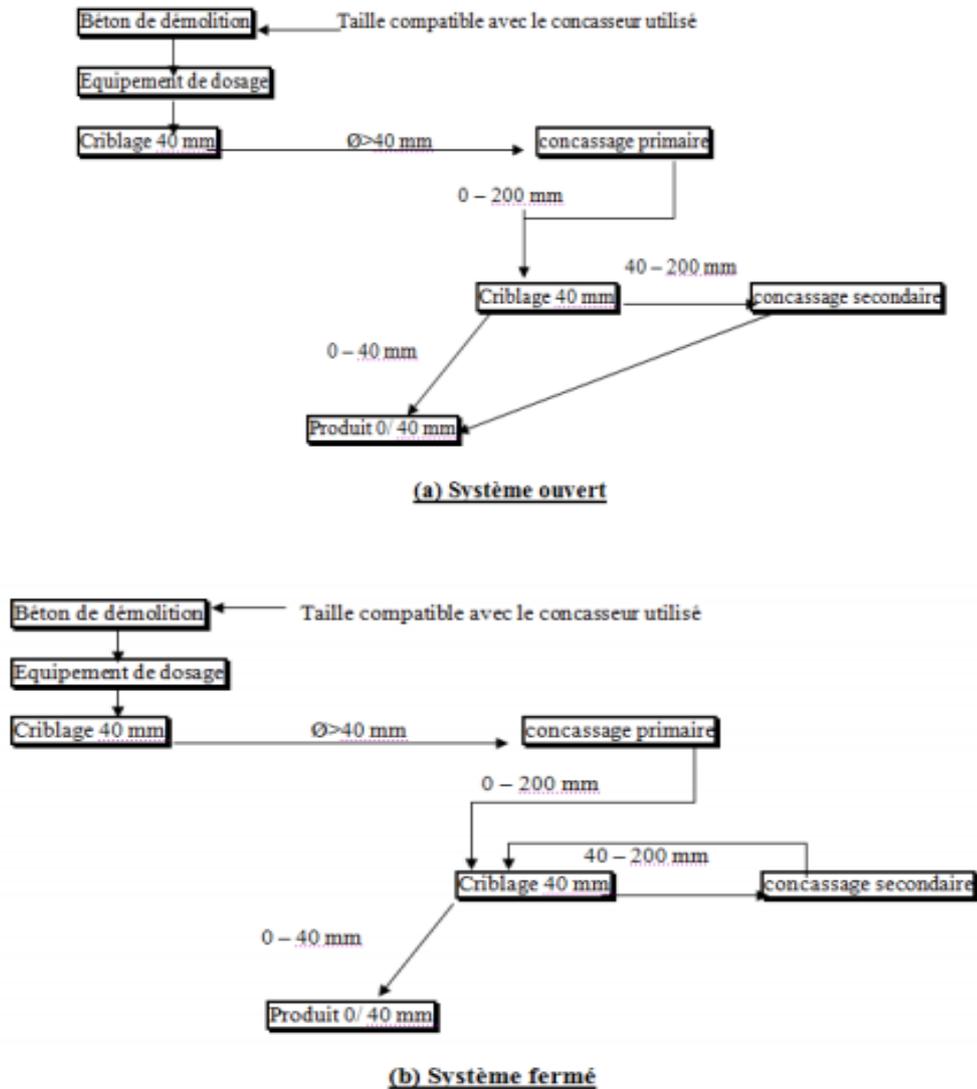


Figure 2. 8 Systèmes de concassage / (a) système ouvert et (b) système fermé (QUEBAUD, 1996) cité par (HACHANA, 2008).

2. 10 Conclusion

Le recyclage permet une meilleure gestion des ressources, par valorisation des « déchets » et par économie des granulats naturels traditionnels. Son impact environnemental et écologique est conditionné également par la limitation des zones de dépôt, de l'ouverture de carrières et de l'exploitation des lits alluvionnaires. Dans ce chapitre, nous présentons la réglementation concernant les déchets, la gestion et l'activité de recyclage de ces matériaux en abordant le cas de certains pays qui ont adopté cette politique et en soulignant la situation en Algérie. Nous présentons aussi les différents déchets utilisés dans le domaine du génie civil.

Chapitre 3 :
**Effet des granulats recyclés sur les propriétés
des matériaux cimentaires**

Chapitre 3

Effet des granulats recyclés sur les propriétés des matériaux cimentaires

3.1 Introduction

Les granulats sont le constituant de base de tous travaux de génie civil. Il est donc important de maîtriser l'ensemble de leurs propriétés (et influences), tant de point de vue de leurs élaborations, que de leurs utilisations (mise en œuvre), et ce, afin de maîtriser au mieux le coût tout en respectant des critères de qualité.

L'utilisation des granulats recyclés dans le béton hydraulique n'est pas récente et de nombreuses études prouvent qu'un béton formulé avec des granulats recyclés peut avoir des caractéristiques mécaniques satisfaisant par comparaison à celles d'un béton traditionnel formulé avec des granulats naturels (EVANGELISTA, 2007). Cependant, la majorité des études se limitent à l'utilisation de gravillons et très peu se sont intéressées à la substitution du sable naturel par un sable recyclé, que ce soit sur les bétons ou sur les mortiers.

Dans ce chapitre, on va essayer de présenter les travaux disponibles dans la littérature, qui se penchent sur l'étude de l'effet des granulats recyclés RA sur les propriétés à l'état frais et à l'état durci des bétons et des mortiers.

3.2 Propriétés du béton à base des granulats recyclés

3.2.1 A l'état frais

3.2.1.1 L'ouvrabilité

L'absorption d'eau élevée des granulats recyclés (GR et SR) affecte le comportement rhéologique du béton frais. Cette absorption est constatée dans les compositions à base de ces granulats (Arabi et Berredjem, 2011).

Dans le même sens, l'étude réalisée par (Adem, 2017) a montré que l'utilisation des granulats recyclés diminue l'affaissement du béton par rapport à un béton de granulats naturels pour un même rapport E/C. Cette baisse d'affaissement serait due à la grande absorption et l'angularité des granulats recyclés. En effet, on observe une augmentation de 3,1% à 9,4 % de la demande en eau du béton lors de l'utilisation des granulats recyclés, pour garantir un même

affaissement. Ceci a été attribué aux granulats recyclés ayant une surface plus rugueuse et une forme plus anguleuse, créant ainsi plus de friction interne dans le béton.

La grande absorption des granulats recyclés peut affecter l'ouvrabilité ainsi que le rapport E/C effectif des bétons incorporant ceux-ci puisque les granulats non saturés (secs) peuvent absorber l'eau du mélange lors du malaxage. Il reste donc moins d'eau libre pouvant servir à lubrifier les composantes du béton, diminuant par le fait même son affaissement.

D'après les résultats de [Topcu and Şengel, 2004] (Figure 3.1), une augmentation du taux de remplacement des gravillons naturels par des gravillons recyclés (satures en eau pendant 30 minutes avant le coulage) va favoriser une diminution de l'affaissement du béton de classe C16 ou C20.

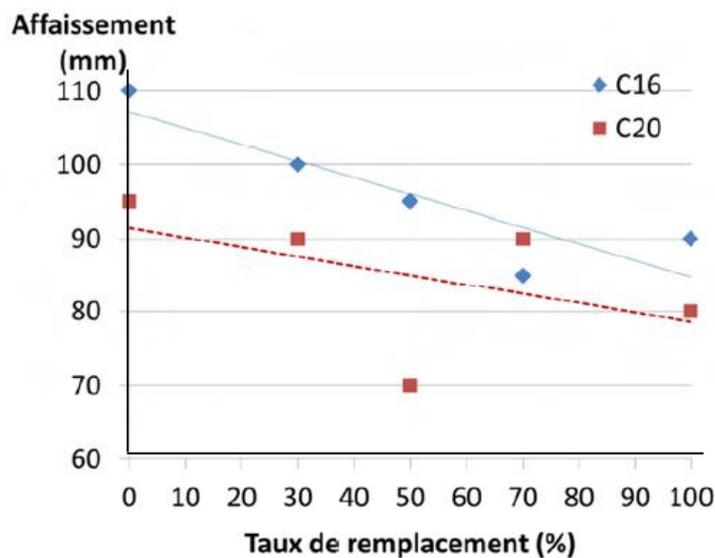


Figure 3. 1 Relation entre l'affaissement et le taux de remplacement en masse en gravillons recyclés. [Topçu and Şengel, 2004]

3.2.1.2 La masse volumique et la teneur en air

La masse volumique apparente du béton frais à base de granulats naturels est dans la plage de 2400 kg/m³, alors que le béton à base de granulats recyclés est nettement plus léger, 2150 kg/m³, quel que soit le type de ciment. Et la teneur en air du béton de granulat recyclé est légèrement supérieure (4% à 5,5%) par rapport au béton à base des granulats 100% naturel [Aissa, 2018].

D'après [Katz, 2003], cela peut être attribué à une porosité plus élevée des gravillons recyclés.

3.2.2 A l'état durci

3.2.2.1 Perméabilité

La perméabilité à l'eau du béton augmente avec le taux de remplacement du granulat naturel. Cette augmentation est principalement due à l'absorption d'eau des granulats recyclés qui est beaucoup plus grande que celle des granulats naturels. [Adem, 2017].

3.2.2.2 Porosité

La porosité des granulats est généralement corrélée à leur capacité d'absorption et le volume de pores et la distribution. Ceci a un impact important sur la durabilité du béton, notamment sur sa résistance au gel/dégel. Du fait de la présence de mortier attaché aux granulats, la structure des bétons recyclés est plus poreuse qu'un béton ordinaire, et cela est d'autant plus significative quand le taux de remplacement est important, Les valeurs de porosité obtenues dans la littérature vont de 14% à 20,1%. [Adem, 2017].

3.2.2.3 Résistance à la compression

La résistance à la compression du béton incorporant des gravillons recyclés a fait l'objet de plusieurs études [Casuccio et al., 2008 ; Kwan et al., 2012 ; Kou and Poon, 2015]. Il ressort de manière unanime qu'une incorporation de gravillons recyclés engendre une perte de résistance à la compression. Cela peut s'expliquer par des caractéristiques intrinsèques plus médiocres des gravillons recyclés comparativement aux gravillons naturels (Nguyen, 2016) :

- les gravillons recyclés sont plus poreux et donc conduisent à une porosité plus élevée du matériau final induisant ainsi une diminution de la résistance,
- les gravillons recyclés ont une résistance mécanique à l'abrasion plus faible que les gravillons naturels.

Pour le sable recyclé, Il est bien connu que la résistance à la compression d'un matériau cimentaire diminue avec l'augmentation du taux de substitution massique en sable recycle [Cassagnabere et al., 2012]. En revanche, cette chute de performance n'est pas significative pour un taux de remplacement massique inférieur à 30%. Avec un taux de 30% de SR, les travaux de [Zega, 2011] ont montré une diminution de 5% par rapport au béton de référence. D'autre part, l'étude de [Khatib, 2005] établit qu'un remplacement de 100% en masse de sable naturel par du SR provoque une chute de résistance de 30%.

Des résultats similaires sont obtenus par [Meftah, 2011]. Ils ont constaté des améliorations de la résistance à la compression par rapport au mélange témoin (graviers naturels 100%) sont obtenues pour les taux de substitution en graviers recyclés à 20 et 40%. Alors qu'au-delà de 40% de granulats recyclés, les résistances diminuent et ceci est probablement lié aux caractéristiques intrinsèques des granulats recyclés (figure 3.2).

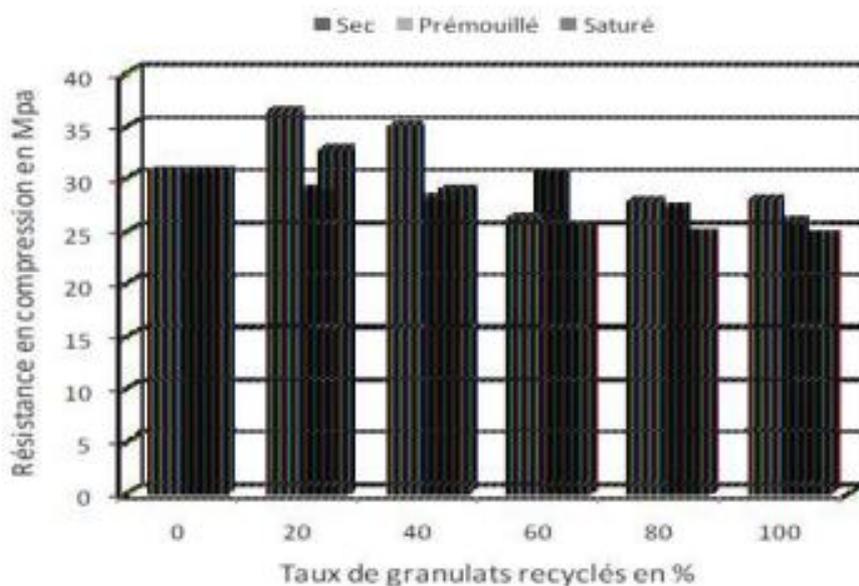


Figure 3. 2 Résistance en Compression à 28 jours [Meftah, 2011]

3.2.2.4 Résistance à la traction par flexion et par fendage

Les études réalisées concernant la résistance en traction des bétons recyclés présentent des résultats légèrement différents les uns des autres. Si toutes indiquent une perte de résistance pour le béton recyclé par rapport au béton standard, comme le cas de [Meftah, 2011] (figure 3.3), certains ont obtenu une réduction de 15 à 20% à un taux de remplacement de 100% et d'autres une perte de moins de 10% pour un essai réalisé à 28 jours.

Ces auteurs ont également constaté que l'utilisation de divers adjuvants, tels que la fumée de silice par exemple, permet d'améliorer les performances du béton recyclé. De la même manière que pour la résistance à la compression, il a été constaté que sur le long terme (5 ans), le gain de performance en traction d'un béton recyclé est clairement meilleur que celui d'un béton naturel. (Laneyrie, 2014)).

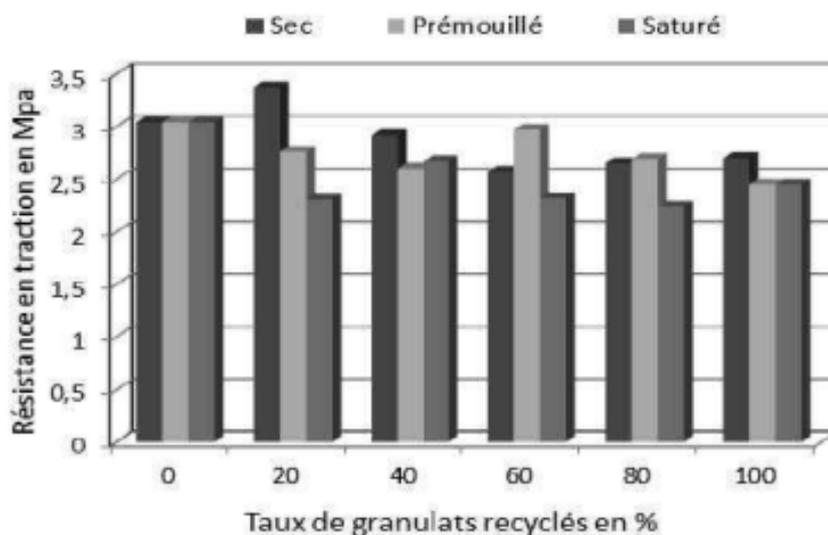


Figure 3. 3 Résistance en traction par fendage à 28 jours [Meftah, 2011].

3.2.2.5 Module d'élasticité

Pour un béton ordinaire, le module d'Young augmente en fonction de l'âge du béton tandis que le module d'Young des bétons de granulats recyclé (26,6 Gpa) ne semble pas dépendre de l'âge de l'éprouvette de béton (à rappeler que la valeur conventionnellement utilisée pour un béton ordinaire est 35 Gpa). (Zineb, 2018).

3.2.2.6 Propriétés liées à la durabilité

A. Retrait et fluage

L'utilisation des agrégats recyclés dans le béton induit une contraction due à la forte absorption de ces agrégats. Certaines études montrent que, pour le béton à base de granulats recyclés à l'âge de 90 jours, le retrait pourrait être d'environ de 0.55 à 0.8mm/m, alors que les valeurs pour un béton à base de granulats naturels est seulement d'environ 0.30mm/m.

Cependant les résultats des tests pour fluage en conditions normales de laboratoire ne se pas si évident, si certaines études ont montré la tendance à s'inverser, c'est-à-dire le fluage après 1 an est d'environ 20% inférieur à celle du béton avec béton à base des granulats naturels. (Zineb, 2018).

B. Effet de l'âge du béton parent sur la résistance

L'utilisation de granulats recyclés issus de béton « jeune » (entre 1 et 3 jours) permet d'obtenir un élément résistant à la compression. En effet, les grains réinsérés contiennent de l'ancien ciment hydraté qui, démoli au jeune âge, confère au nouveau une bonne tenue (Katz, 2003; Shokry & Abourizk, 1997). Les gravillons issus de l'écrasement du matériau

récemment coulé peuvent par ailleurs contenir aussi du ciment non hydraté. Les grains réutilisés partiellement humectés pourraient influencer les propriétés (telle que la résistance) du nouvel élément fabriqué. Une pâte de ciment très bien imbibée avec une structure de pores fine est plus forte qu'une non arrosée contenant un assemblage plus grossier. La quantité non humidifiée restant dans les graviers recyclés peut améliorer la résistance du nouveau béton. Selon les résultats de Katz (Katz, 2003), les propriétés de l'élément réalisé à partir de l'écrasement de ces granulats à 3 jours étaient significativement meilleures que celles des bétons à base d'éléments concassés à 1 ou 28 jours.

3.3 Propriétés du mortier à base des granulats recyclés

3.3.1 A l'état frais

3.3.1.1 Ouvrabilité

Dans leur étude, [Cartuxo et al., 2015] ont trouver que pour une valeur d'affaissement visée de 120mm (les sables recycles possédaient le même état hydrique que le sable naturel (3,2%)), il a fallu augmenter le rapport E/C de 16,3% pour le béton incorporant 100% volumique de SR comparativement au béton de référence (0%SR).

De la même façon, pour viser un affaissement de 110 ± 5 mm sur mortier, le rapport E/C varie de 0,60 à 0,71 lorsque 100% massique de sable naturel est remplacé par du sable recycle [Corinaldesi and Moriconi, 2009]. Il est important de noter que la partie fine du SR (inferieure a $150 \mu\text{m}$) dispose d'une finesse Blaine beaucoup plus élevée ($6420 \text{ cm}^2/\text{g}$) que celle du sable naturel ($1450 \text{ cm}^2/\text{g}$). Cette augmentation de surface spécifique explique celle de la demande en eau du mélange avec 100% de sable recyclé.

Dans une étude menée par (Gomart, 2013), ils ont montré que l'affaissement des mortiers diminue avec l'augmentation du taux de substitution du sable naturel avec le sable recyclé (tableau 3.1). (Luis de Oliveira Júnior, 2019) ont montré aussi, comme le montre la figure 3.4, que le taux de substitution du sable par les résidus en grains a une grande influence sur la fluidité du mortier recyclé, et que les mortiers avec les proportions de grains recyclés les plus élevées (15 et 20%) avaient les indices de fluidité les plus faibles, tandis que les mortiers avec les proportions de sable naturel les plus élevées (0 et 10%) avaient les indices de fluidité les plus élevés. Les auteurs ont attribué ce résultat à la forte absorption d'eau des grains recyclés. Plusieurs études (Bektas et al., 2009; Torkittikul and Chaipanich, 2010; Evangelista et al., 2017) (cité par(Dhir, 2019))ont confirmé ces résultats, comme le montre la figure 3.5.

Tableau 3. 1 Propriétés à l'état frais de mortiers avec sable recyclé (Gomart,2013).

| | SR 0% | SR 30% | SR 50% | SR 75% | SR 100% |
|---------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <i>Série 1 – ouvrabilité variable</i> | | | | | |
| Air occlus (%) | 1,5±0,3 | 2,1±0,4 | 2,8±0,3 | 2,6±0,4 | -- |
| Masse volumique (kg/m ³) | 2139±9 | 2066±7 | 2062±3 | 2052±8 | -- |
| Affaissement (cm) | 12,0 | 5,0 | 2,3 | 0 | |

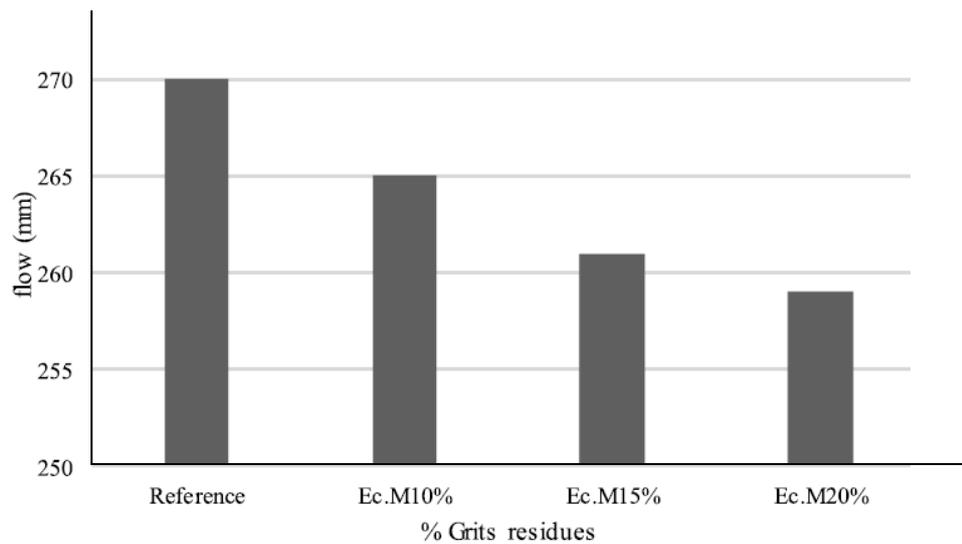


Figure 3. 4 Effet de la substitution du sable par des résidus en grains sur la fluidité du mortier (Luis de Oliveira Júnior, 2019)

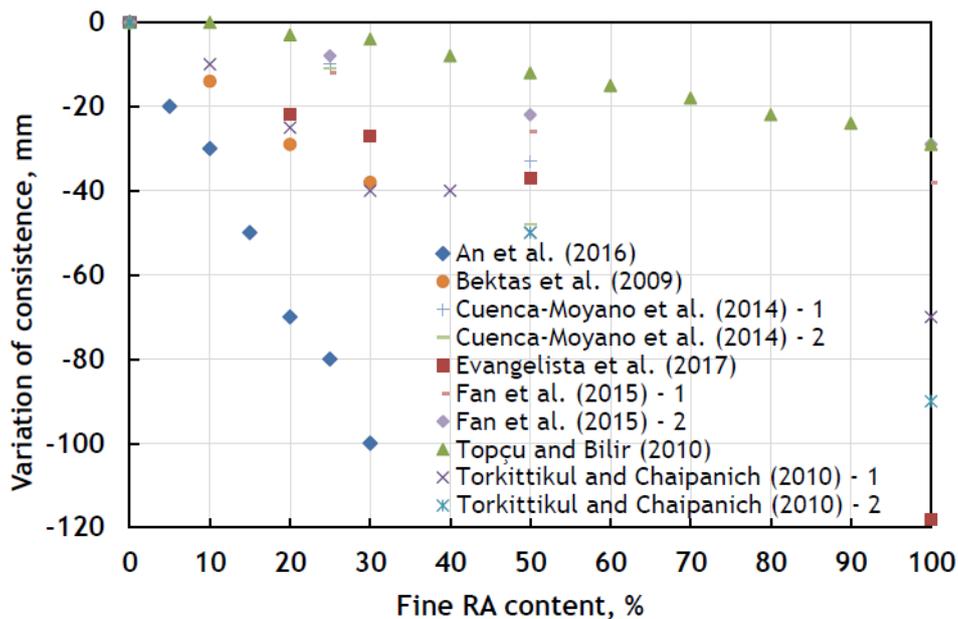


Figure 3. 5 Variation de la consistance du mortier avec l'augmentation de la teneur en granulats fins recyclés (RA) et sans compensation en eau (cité par (Dhir, 2019)).

Il faut signaler que le taux d'humidité des granulats recyclé au moment de la fabrication des mortiers a un impact sur l'ouvrabilité. Les résultats au test d'étalement des mortiers préparés avec des granulats secs montrent toujours un plus grand étalement que ceux préparés avec des granulats saturés pour un même rapport E/C. Il a émis l'hypothèse que l'absorption des granulats secs dans le mortier est plus faible et/ou ce fait de manière plus lente que l'absorption d'eau déterminée à l'aide des procédures standards. Cela peut s'expliquer par le fait qu'une partie des pores des granulats secs soit bouchée par des particules de ciment mais également par le fait que les grains de ciment augmentent la viscosité de l'eau et empêche l'absorption de l'eau par les granulats. Une diminution de l'affaissement normalisé au cours du temps pour les mortiers recyclés quelque soit la méthode de formulation. Cette diminution est expliquée en partie par le fait que le sable recyclé continue à absorber une partie de l'eau au cours du temps. - Pour des taux de substitution supérieurs à 50% l'évolution du maintien au cours du temps est identique pour tous les mortiers quel que soit la série. [Zengfeng Zhao, 2015]

3.3.1.2 Densité à l'état frais

La figure 3.6 présente la densité à l'état frais des mortiers fabriqués avec une teneur croissante en agrégats recyclés fins RA d'un ensemble de travaux de recherches(cité par (Dhir, 2019)). Les résultats montrent que la densité fraîche diminue avec l'augmentation de la teneur en RA fin, ce qui est principalement dû à la densité plus faible du RA fin par rapport à celle des agrégats naturels NA fin. En moyenne, l'inclusion de 100% de RA fine devrait entraîner une réduction de densité d'environ 10%, bien que des diminutions allant jusqu'à 23% aient été observées pour le mortier contenant 100% de RCA fin (Vegas et al., 2009). Cependant, dans certains cas, la nouvelle densité du mortier a montré une légère augmentation lorsque la RA fine était utilisée (Braga et al., 2012; Hwang et al., 2007; Cuenca-Moyano et al., 2014). Cela était probablement dû à la réduction de l'eau efficace pour maintenir la consistance du mortier (Braga et al., 2012; Cuenca-Moyano et al., 2014) ou à l'utilisation de modificateurs de ciment polymère (Hwang et al., 2007) .

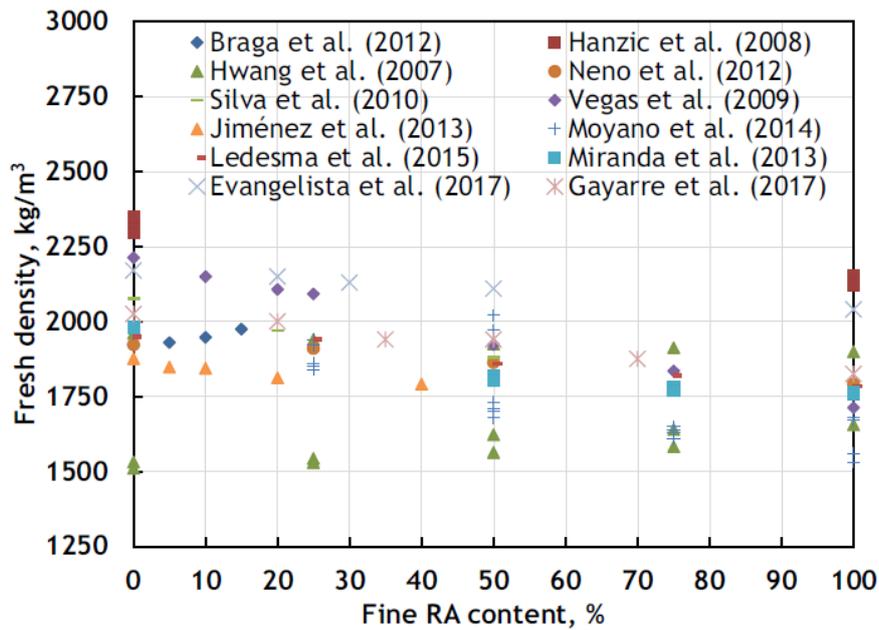


Figure 3. 6 Densité à l'état frais des mortiers avec une teneur croissante en granulats fins recyclés (RA) (cité par (Dhir, 2019)).

3.3.2 A l'état durci

3.3.2.1 La porosité

D'après l'étude de (Gomart, 2013), les résultats montrent que le mortier de référence possède une porosité de 19%. Pour les mortiers à ouvrabilité variable, la porosité des mortiers recyclés augmente mais ne semble être affectée par le taux de substitution. Elle atteint une valeur moyenne égale à 24% (Figure 3.7.a). Ce phénomène peut s'expliquer par la compétition entre la diminution du rapport E_{eff}/C , responsable de la diminution de la porosité, et par l'augmentation de la quantité de sable recyclé, capable d'absorber l'excédent d'eau responsable des espaces libre laissés dans le mortier. En revanche, pour la série à ouvrabilité constante, la porosité croît linéairement de 19% à 32% pour l'échantillon SR100% (Figure 3.7.b). Pour cette série la quantité totale d'eau introduite lors du malaxage conduit inévitablement à l'augmentation de l'air occlus et de la porosité à l'état durci.

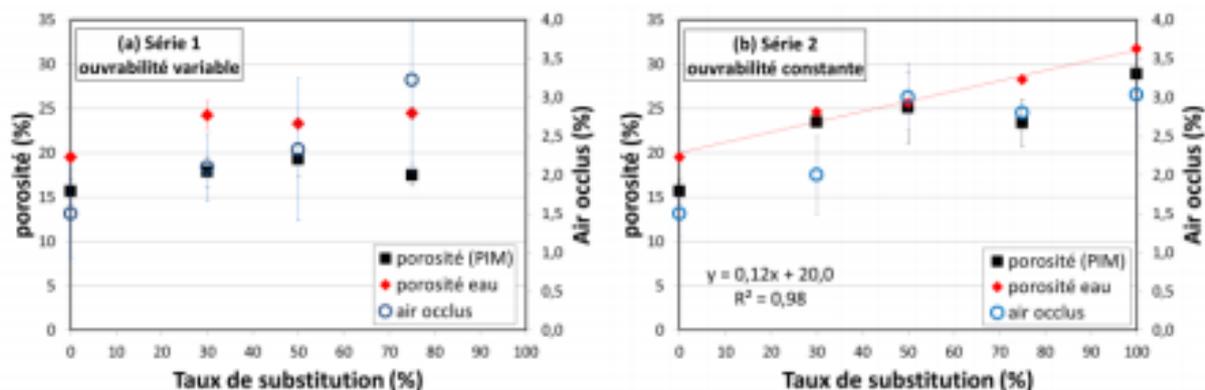


Figure 3. 7 Porosité à l'eau, porosité par injection de mercure (PIM) et air occlus pour (a) la série 1 et (b) la série 2.(Gomart, 2013)

3.3.2.2 Le retrait

Les dommages liés à la fissuration associés au retrait se produisent en raison des contraintes de traction élevées à l'intérieur de la matrice de ciment en raison de la variation dimensionnelle dans le temps des mortiers qui adhèrent à un mur de maçonnerie (Veiga, 1997). Cette pathologie est l'un des principaux facteurs influençant les performances exigées.

Bien que l'introduction des agrégats recyclés fins RA ait montré un changement négligeable dans le retrait du mortier dans certains cas (Fan et al., 2015; Jiménez et al., 2013; Bektas et al., 2009), il existe un consensus dans la littérature selon lequel la contrainte de retrait augmente avec l'augmentation de la teneur en RA fine (Braga et al., 2012; Corinaldesi, 2009; Leite et al., 2009; Neno et al., 2014; Silva et al., 2009, 2010; Topçu et Bilir, 2010; Vegas et al., 2009; Farinha et al., 2015a; Ledesma et al., 2015; Gayarre et al., 2017; Mesbah et Buyle-Bodin, 1999; Miranda et Selmo, 2006) (cité par (Dhir, 2019)). Cette augmentation du retrait est due au module d'élasticité plus faible du RA fin par rapport à celui du sable naturel et est donc moins capable de restreindre la déformation liée au retrait (Silva et al., 2015a). L'ampleur de cette augmentation peut fluctuer et elle pourrait être quatre fois plus importante que le retrait des mortiers de référence correspondants lors de l'utilisation de 100% de RMA à partir de tuiles broyées (Topçu et Bilir, 2010).

Les résultats concernant les effets de l'ajout de différents types de RR sur le retrait des mélanges de mortier ne sont pas concluants. Cependant, les mortiers fins contenant du RMA devraient présenter une déformation plus élevée que les mortiers fins contenant du RCA en raison du module d'élasticité inférieur du premier. En revanche, si la RMA fine présente une pouzzolanité, cela peut conduire à la formation de produits d'hydratation supplémentaires et donc à une structure plus dense et moins déformable. Même si l'inclusion de RMA peut entraîner une amélioration des performances mécaniques par rapport au mortier de référence, en même temps, elle peut augmenter considérablement le rétrécissement du mortier (Gayarre et al., 2017), contrairement à celui observé par d'autres chercheurs (Bektas et al., 2009; Jiménez et al., 2013).

3.3.2.3 Résistances mécaniques

A. Résistance à la compression

La résistance à la compression est souvent utilisée comme critère principal pour sélectionner le type de mortier car elle est relativement facile à mesurer et peut également être liée à d'autres propriétés, telles que la résistance à la traction et l'absorption d'eau. Selon EN-998-1 (2010), les mortiers d'enduit peuvent être classés en quatre catégories avec des valeurs de résistance à la compression allant de 0,4 à 7,5 MPa. Mortiers de maçonnerie, selon EN-998-2 (2016), peut appartenir à l'une des sept catégories de résistance, allant de 1 à 20 MPa (Dhir, 2019).

Selon [Zengfeng Zhao, 2015] la résistance en compression des mortiers diminue avec l'augmentation du taux de substitution du sable naturel par du sable recyclé de béton. Cette diminution est linéaire en fonction du taux de substitution du sable naturel par du sable recyclé. Il a également montré que les fractions fines de granulats recyclés ont un impact plus néfaste sur la résistance que les fractions plus grossières, car elles ont une plus grande teneur en pâte de ciment.

Une autre étude réalisée par (Layachi, 2016) a révélé que pour des mortiers non adjuvés (figure 3.8), les résistances en compression à 7 jours montrent des valeurs plus élevées lors de la substitution du sable naturel SN par le sable recyclé SR. Toutefois, à 28 jours, toutes les résistances sont quasiment similaires, sauf pour le mortier M30 qui montre une résistance plus élevée et le mortier M100 qui montre une résistance plus faible. Dans cette étude, le rapport Eff/C est constant ce qui explique les faibles variations de résistance. Le mélange de 70% de SN avec 30% de SR conduit à un sable plus homogène, situé de façon plus idéale dans le

fuseau de référence. Cela peut expliquer le gain de résistance mesuré. Les gains constatés à 7 jours peuvent être expliqués par l'existence probable de ciment anhydre dans le SR.

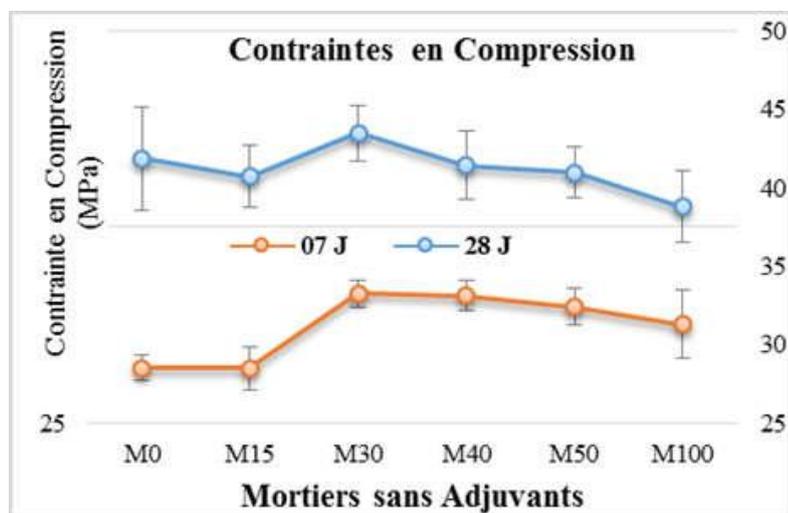


Figure 3. 8 Résistance en compression simple des différents mortiers à 7 et 28 jours (Layachi, 2016)

D'après les résultats présentés sur la figure 3.9 et présente la résistance à la compression à 28 jours des mortiers d'enduit en fonction de la teneur en RA fine. Contrairement à ce qui est normalement observé dans le béton à base de RA (Silva et al., 2014a), les résultats montrent qu'en augmentant la teneur en RA fine la résistance à la compression du mortier fin RA peut être similaire ou supérieure à celle des mortiers de référence.

Ce gain de résistance pourrait être attribué à une combinaison de différents facteurs. La surface plus élevée du RA fin, par rapport à celle du sable naturel, offre un meilleur mécanisme de compacité entre le RA et la matrice de ciment (Topçu et Bilir, 2010; Silva et al., 2016). Les particules de ciment non hydraté présentes dans le RCA fin peuvent également contribuer au développement de la résistance des mortiers (Braga, 2014).

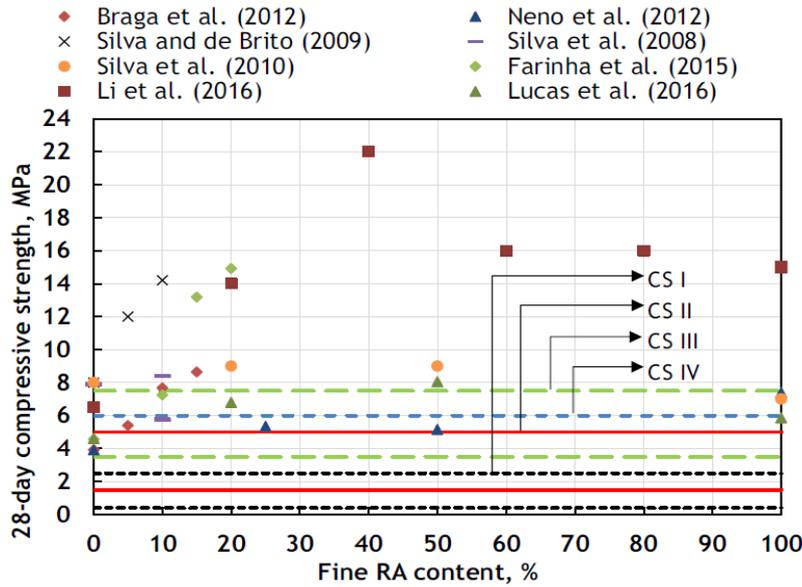


Figure 3. 9 Résistance à la compression des mortiers d'enduit avec une augmentation de la teneur en granulats fins recyclés (RA) (Dhir, 2019).

B. Résistance à traction par flexion

Bien que l'EN-998-1 (2010) et l'EN-998-2 (2016) n'aient pas de limites spécifiques pour la résistance à la flexion du mortier, cette propriété permet une évaluation indirecte de la force d'adhérence du matériau au support et de sa sensibilité à la fissuration, et le comportement mécanique d'un mur de maçonnerie. Il faut dire qu'il n' ya pas de consensus entre les chercheurs sur la variation de la résistance à traction du mortier en fonction du taux de substitution du sable naturel par du sable recyclé.

L'étude réalisée par (layachi, 2016) pour déterminer les résistances à la traction par fendage et par flexion 3 points des différents mortiers à 7 et 28 jours de maturation a révélé les résultats représentés dans la figure 3.10. Les auteurs ont constaté que la traction par fendage et en flexion des mortiers à base de sable recyclé sont toutes meilleures que celles du mortier naturel pour toutes les échéances. Les résistances de traction par flexion et par fendage augmentent avec la substitution du sable naturel par le sable recyclé jusqu'à un optimum de 50% puis elles chutent.

Alors que l'étude menée par (Santha Kumar,2019) visant à étudier l'effet de la fluidité sur le mortier à base de sable recyclé, a abouti à des résultats constant que la résistance à la traction

par fendage et par flexion de divers mélanges de mortier diminue avec l'augmentation de la teneur en RFA dans toutes les séries de mélanges de mortier(figure 3.10 et figure 3.11).

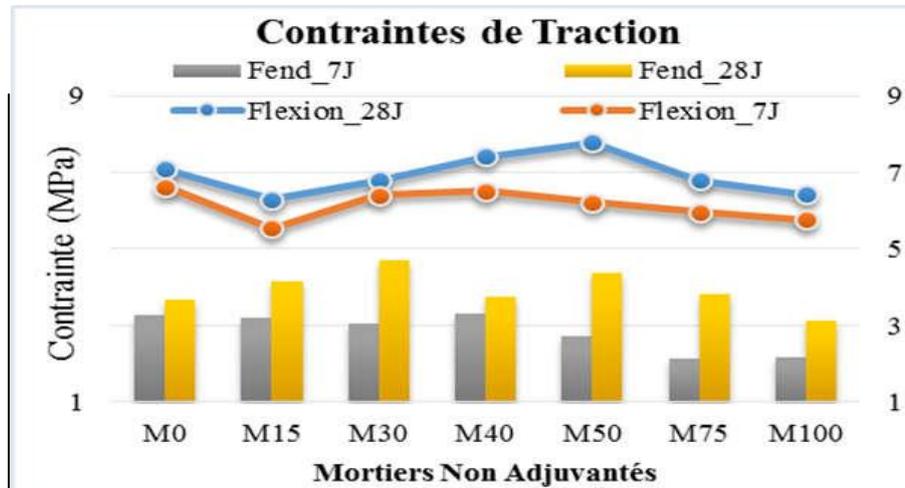


Figure 3. 10 Contraintes de traction par fendage et par Flexion 3 points des différents mortiers à 7 et 28 Jours.

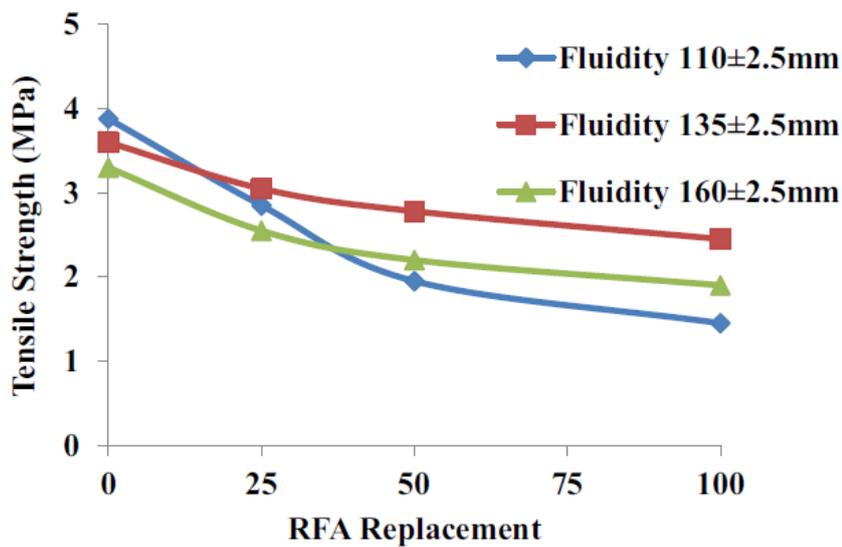


Figure 3. 11 : Résistances de traction de différents mélanges de mortier en fonction du taux de substitution en granulats recyclés fins.

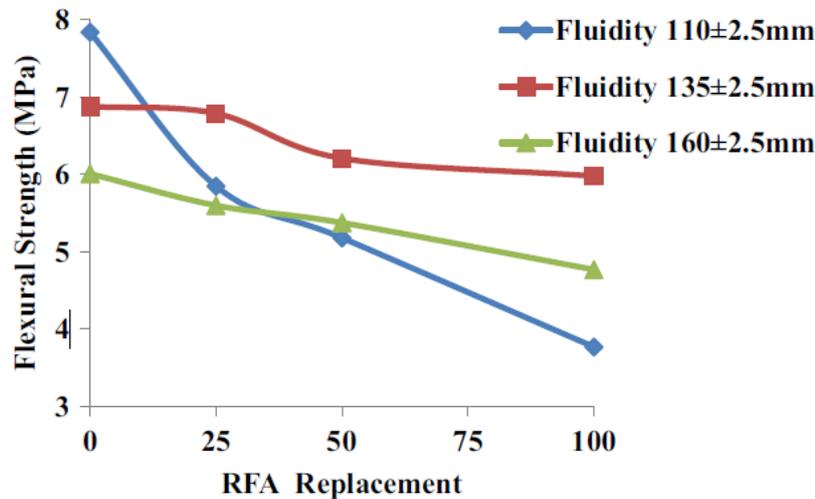


Figure 3. 12 : Résistances de flexion de différents mélanges de mortier en fonction du taux de substitution en granulats recyclés fins.

3.3.2.4 Module d'élasticité

Lorsqu'une charge est appliquée sur un mur de maçonnerie, le mortier d'enduit doit être capable d'absorber les déformations sans se fissurer, ce qui affecterait autrement sa force d'adhésion au support et les propriétés d'infiltration. Il est à noter que lorsque le module d'élasticité du mortier est supérieur à celui du mur de maçonnerie, le mortier prendra la majeure partie de la charge et deviendra ainsi susceptible de se détacher du mur (Veiga, 1997).

L'influence des granulats recyclés fins RA sur le module élastique des mortiers a été évaluée dans un certain nombre d'études (Corinaldesi, 2009; Miranda et Selmo, 2006; Poon et Kou, 2010; Topçu et Bilir, 2010; Higashiyama et al., 2012; Braga et al., 2012, 2014; Farinha et al., 2015a, b). Dans certains cas (Corinaldesi, 2009; Poon et Kou, 2010; Topçu et Bilir, 2010; Lucas et al., 2016), dans lesquels le sable naturel a été remplacé par du RA fin avec une distribution granulométrique comparable, le module d'élasticité a diminué en raison de la rigidité plus faible du RA par rapport à celle des agrégats naturels fins NA.

3.3.2.5 Densité à l'état durci

Plusieurs chercheurs ont étudié l'effet de l'augmentation du taux de substitution du sable naturel NA par des granulats recyclés fins RA sur la densité apparente du mortier à l'état

durci. La figure 3.13 présente la variation de la densité relative des mortiers avec l'augmentation de la teneur en RA fins. Même si une augmentation de la densité a été observée en raison de l'effet de micro-remplissage provoqué par l'inclusion des granulats très fines de RA (Farinha et al., 2015b; Braga et al., 2012), en général, l'augmentation de la teneur en RA tend à entraîner une densité progressivement plus faible (Braga et al., 2012; Cabrera-Covarrubias et al., 2016; Cuenca-Moyano et al., 2014; Farinha et al., 2015b; Jiménez et al., 2013; Lee, 2009; Lucas et al., 2016; Silva et al., 2009, Vegas et al., 2009). Ceci s'explique par la nature poreuse de la RA fins ce qui se traduit par une densité plus faible par rapport à celle des granulats naturels fins NA fine. Il a été constaté que la substitution à des taux jusqu'à 100% de RA fins entraînait une réduction moyenne de 13% de la densité, bien que près de 30% de réduction a été observée (Vegas et al., 2009).

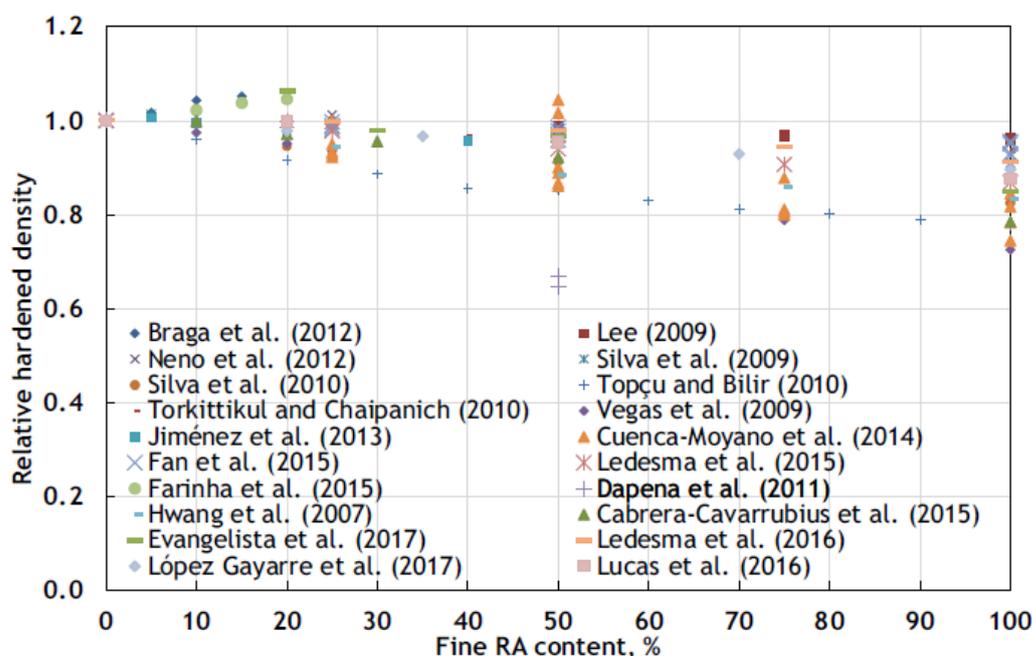


Figure 3. 13 : Densité relative à l'état durci des mortiers fabriqués avec une teneur croissante en granulats fins recyclés (RA).

3.3.2.6 Absorption capillaire

La capacité d'absorption d'eau fournit une évaluation indirecte de la durabilité d'un matériau cimentaire. Une absorption d'eau plus élevée du mortier par capillarité indique généralement que les agents externes tels que les ions agressifs peuvent pénétrer plus facilement dans le mortier, détériorant ainsi la durabilité des murs de maçonnerie (Dhir, 2019)..

Les résultats obtenus par certains chercheurs concernant l'absorption d'eau par capillarité des mortiers d'enduit à plus forte teneur en granulats recyclés, effectués conformément à EN-

1015-18 (2002), ont montré dans l'ensemble, qu'il semble qu'il y a une variation marginale de l'absorption d'eau du mortier lorsque la RA fins sont utilisés. Les RA fins ont une absorption d'eau plus élevée et intuitivement, elle entraînerait une plus grande porosité, comme observé dans certains cas (Ledesma et al., 2015; Lucas et al., 2016) . Cependant, la porosité du mortier s'est avérée diminuer lorsque de la RA fins ont été utilisée; cela pourrait être attribué à la réduction du rapport efficace E/C (Neno et al., 2014) et la réactivité pouzzolanique induite par certains AR fins (Higashiyama et al., 2012) .

3.4 Conclusion

Cette partie présente un aperçu détaillé sur les granulats recyclés et leur effet sur les propriétés des bétons et des mortiers à l'état frais et à l'état durci.

Il existe de nombreuses études dans la littérature, avec des résultats parfois contradictoires qui proviennent de la diversité des granulats de béton recyclé utilisés, des différentes méthodologies déployées pour maintenir constants les paramètres de composition, et de la diversité des modes opératoires.

A travers la recherche bibliographique menée dans ce chapitre, on a constaté que le taux de remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés a un impact important sur les propriétés des bétons et des mortiers recyclés. Plus le taux de remplacement augmente, plus les effets négatifs sur les propriétés seront importants. Mais dans certaines études, Ils ont pu déterminer un taux de remplacement qui a conduit à l'amélioration des propriétés des bétons ou des mortiers, ou il a montré peu d'impact négatif sur le comportement du martiaux. Cette valeur n'est pas exacte, puisqu'elle varie selon les études et en fonction des propriétés étudiées.

Ce qui montre l'importance de la déconstruction sélective des constructions, malgré que ce choix est plus couteux mais assure des granulats de bonne qualité. En plus il faut accorder plus d'attention au contrôle de la régularité des caractéristiques des granulats recyclés.

Deuxième partie

Etude expérimentale

Chapitre 4 :

Matériaux de l'étude et les techniques expérimentales

Chapitre 4

Matériaux de l'étude et les techniques expérimentales

4.1 Introduction

Le comportement physico-mécanique et rhéologique du mortier est le résultat d'une interaction complexe entre ses divers constituants, c'est la raison pour laquelle, nous commençons ce chapitre par une présentation des matériaux mis en œuvre avec laquelle ils entrent dans les compositions et Les caractéristiques physico-chimiques de ces matériaux ainsi que les techniques expérimentales permettant leur caractérisation en laboratoire du département de génie civil de l'université de Biskra.

Dans la deuxième partie de ce chapitre nous avons présenté la composition des différents mélanges et le mode de préparation des différents types d'éprouvettes et enfin nous avons présenté les différents essais réalisés.

4.2 Matériaux

Nous avons utilisé pour la confection du mortier les matériaux locaux (composants usuels dans la région) suivants : ciment, Sable naturel, Sable recyclé et leau.

4.2.1 Le ciment

Le ciment utilisé dans toutes les formules de l'étude est le (CPJ-CEM II/A 42.5). Ce ciment est principalement constitué de 80-94% de clinker et gypse et 6-20 % de calcaire. Ce ciment est ciment portland au calcaire qui provient de la cimenterie (SCIMAT) d'Ain touta, wilaya de Batna, fabriqué conformément à la norme NA 442, EN 197-1 et à la norme NF P 15-301194.

4.2.1.1 Composition chimique et minéralogique du ciment utilisé

La composition chimique et minéralogique du ciment a été effectuée au niveau du laboratoire de la cimenterie d'Ain touta, selon la norme NF EN 196-2. Les résultats des analyses sont tirés de la fiche technique du ciment et sont résumés dans le tableau 4.1 et le tableau 4.2.

Tableau 4. 1 : la composition chimique du clinker (%). (Fiche technique)

| SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | Cl- | Chaux libre | Perte au feu | Résidu insoluble |
|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|-----|-----------------|-------|-------------|--------------|------------------|
| 20.43 | 5.37 | 3.00 | 61.69 | 1.8 | 2.2 | 0.027 | 0.97 | 5.03 | 1.12 |

Tableau 4. 2 : la composition minéralogique du clinker (%). (Fiche technique)

| Composants | C ₃ S | C ₂ S | C ₃ A | C ₄ AF |
|------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| % | 64.14 | 10.54 | 9.16 | 9.12 |

4.2.1.2 Les caractéristiques physiques du ciment utilisé

- **Les masses volumiques**

- *La masse volumique absolue*

C'est le quotient de la masse sèche de l'échantillon par le volume de la matière solide de celui-ci (hors pores). Elle est déterminée selon la norme NF EN 1097-7.

- *La masse volumique apparente*

La masse volumique apparente est la masse par unité de volume de la matière en tenant compte des vides qui peuvent exister entre les grains. Elle est déterminée selon la Norme NF EN 1097-6.

Les résultats de ces différentes masses volumiques du ciment étudié sont présentés dans le tableau 4.3 :

Tableau 4. 3 : Résultats des masses volumiques du ciment étudié

| | La masse volumique absolue (g/cm ³) | La masse volumique apparente (g/cm ³) |
|--------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| ciment CPJ-CEM II/A 42.5 | 3.01 | 1.02 |

4.2.2 Sable

Il y a trois types de sables utilisés pour la formulation du mortier :

- Sable naturel (SN) 0/5 provenant de Oued-Lioua (Biskra) ;
- Sable recyclé (SRBE) 0 /5 produit par le concassage de béton de ciment d'un situés à Biskra ;
- Sable recyclé (SRBR) 0/5 produit par le concassage de la brique cuite, ramenée de la briqueterie des Frères Amouri (Biskra).

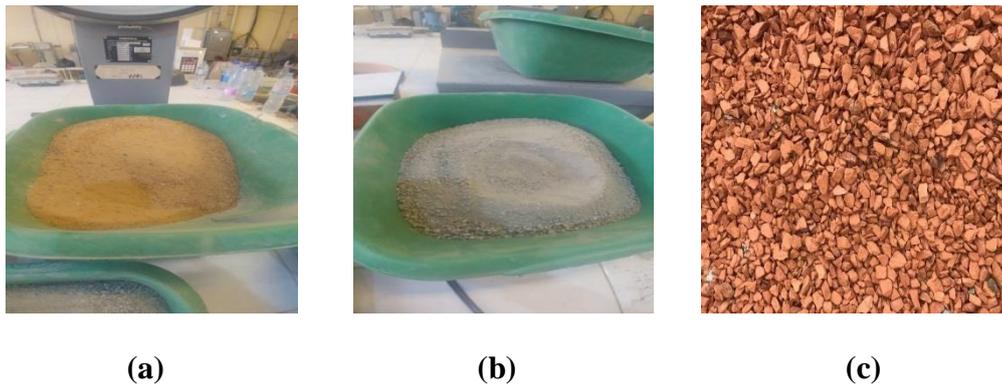


Figure 4. 1 Les sables utilisés : a. sable naturel, b. sable recyclé du béton, c. sable recyclé de brique cuite

➤ **Elaboration des granulats recyclés (Figure 4.2)**

- A. Concassage primaire : pour réduire la taille des blocs du béton et des plaques de brique à l'aide d'un marteau.
- B. Concassage secondaire : Le concassage est effectué dans un broyeur à mâchoire du laboratoire du département génie civil et d'hydraulique de l'université Mohamed khi der, Biskra, pour obtenir les dimensions des grains voulues.
- C. Criblage : pour éliminer les impuretés et pour obtenir les fractions granulaires : sable (0/5).



Figure 4. 2 Elaboration des sables recyclés : a. Concassage primaire des granulats recyclés, b. Broyage via le broyeur à mâchoire, c. Criblage

4.2.2.1 Les caractéristiques physiques

A. Analyse granulométrique

L'analyse s'effectue par tamisage avec un jeu normalisé de tamis et de passoire selon la norme NF EN 933-1. On superpose les tamis par dimensions croissantes, et l'on place un récipient sans ouverture sous la pile. Après tamisage, on mesure les refus de chaque tamis ainsi que le tamisât ayant passé à travers le tamis le plus fin.

La courbe granulométrique est la carte d'identité d'un granulat. Elle indique les proportions des grains de chaque dimension.

Les courbes granulométriques des différents sables étudiés sont présentés sur la figure 4.3.

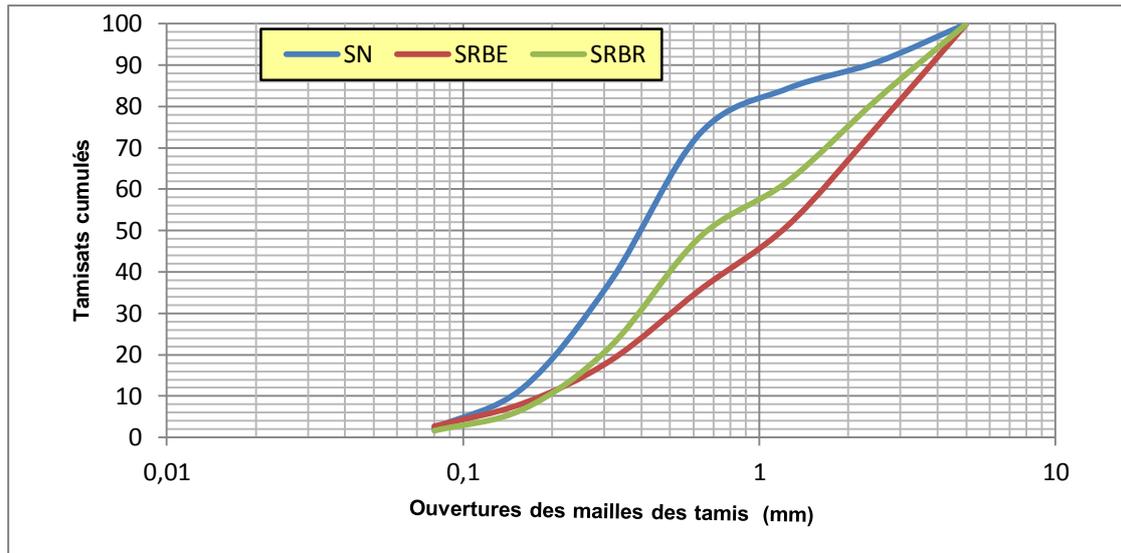


Figure 4. 3 : courbe granulométrique des sables utilisés

B. Module de finesse

Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse M_f . celui-ci correspond à la somme des pourcentages des refus cumulés pour les tamis d'ouverture : 0.16-0.315-0.63-1.25-2.5 et 5 (mm) sur 100, déterminée selon la norme NFP 18-540. Calculé par la relation suivante :

$$M_f = \frac{\sum RC}{100}$$

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 4.4:

Tableau 4. 4 : module de finesse (M_f) des sables étudiés

| Type de sable | Module de finesse (M_f) |
|---------------|-----------------------------|
| SN | 2.01 |
| SRBE | 3.11 |
| SRBR | 2.79 |

La classification des sables étudiés est faite selon le tableau 4.5 :

Tableau 4. 5 : classement du sable

| Qualité de sable | Module de finesse |
|-------------------------------|-------------------------|
| Sable fin | $1.8 \leq M_f \leq 2.2$ |
| Sable moyen (préférentiel) | $2.2 \leq M_f \leq 2.8$ |
| Sable grossier | $2.8 \leq M_f \leq 3.2$ |

❖ Pour notre étude on a :

- **Sable naturel** : sable fin
- **Sable recyclé de béton** : sable grossier
- **Sable recyclé de briques** : sable moyen

C. Les masses volumiques

Pour étudier la formulation d'un mortier, il est indispensable de connaître la masse volumique absolue et apparente des granulats. Elles sont exprimées en kg/m^3 , ou g/cm^3 et sont réalisées selon les normes NF P 18-555 et NF P 18-554 respectivement.

Les résultats obtenus sont présentés sur le tableau 4.6 .

Tableau 4. 6 : Les masses volumiques des sables étudiés

| Type de sable | Masse volumique apparente (g/cm^3) | Masse volumique absolue (g/cm^3) |
|---------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| SN | 1.52 | 2.56 |
| SRBE | 1.3 | 2.4 |
| SRBR | 1.21 | 2.45 |

D. Porosité et Compacité

L'essai est réalisé selon la norme NFP18-554.

• La compacité :

Elle est définie comme étant le rapport de la masse volumique apparente ρ_a sur la masse volumique absolue ρ_{ab} ; Elle est représentée en pourcentage:

$$C (\%) = (\rho_a / \rho_{ab})$$

- **La porosité :**

C'est le volume des vides entre les grains du sable, la porosité par définition est le complément à l'unité de la compacité au volume total :

$$P\% = 100 - C\%$$

Les résultats obtenus sont présentés sur le tableau 4.7.

Tableau 4. 7 : Résultats de la compacité et la porosité des sables.

| | SN | SDB | SDBR |
|--------------|-------|-------|-------|
| La compacité | 59.37 | 54.16 | 49.38 |
| La Porosité | 40.63 | 45.84 | 50.62 |

E. Equivalent de sable

Cet essai est défini par la norme NF P 18-598, il est utilisé pour évaluer la propreté du sable entrant dans la composition du mortier, par conséquent la proportion des impuretés argileuses contenue dans le sable par rapport à la quantité des grains solide sableux. Il est effectué sur la fraction 0/5 mm du matériau à étudier. Il nous permet de déterminer l'équivalent de sable mesuré au piston ESP et l'équivalent de sable visuel ESV mesuré visuellement.

Les résultats obtenus sont présentés sur le tableau 4.8.

Tableau 4. 8 : Résultats d'équivalent de sable des sables étudiés.

| Type de sable | ESV% | ESP% | Nature et qualité du sable |
|---------------|------|------|----------------------------|
| SN | 82 | 77 | Sable propre |
| SRBE | 83 | 80 | Sable propre |
| SRBR | 90 | 88 | Sable très propre |

F. Absorption d'eau

On détermine un coefficient d'absorption, qui est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après imbibition par l'eau, à la masse sèche de l'échantillon. Cet essai est réalisé selon la norme NF P 18-555. Cette imbibition est obtenue par immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures à 20°C. Le coefficient d'absorption (Ab) est défini par la relation :

$$Ab, \% = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100$$

M_s : Masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105°C.

M_h : Masse de l'échantillon imbibé, surface sèche déterminée comme suit.

Les résultats obtenus sont présentés sur le tableau 4.9.

Tableau 4. 9 : Résultats du coefficient d'absorption des sables étudiés.

| | SN | SDB | SDBR |
|-------------------|----|-----|------|
| Absorption d'eau% | 8 | 11 | 13 |

4.2.3 L'eau

En référence à la norme NF EN 1008, l'eau potable toujours utilisable, mais dans certains cas l'eau contient des impuretés, ce qui nécessite une analyse chimique. Pour déterminer les impuretés qui se trouvent donc l'eau de gâchage, trois critères doivent être vérifiés : chimique, physique et mécanique.

Dans cette étude, l'eau de gâchage utilisée est une eau potable (eau de robinet).

4.3 Formulation des mortiers

La composition des mortiers est réalisée conformément à la norme EN 196-1, de manière qu'elle soit similaire à celle du mortier normalisé. Le mortier est composé en masse, d'une partie de ciment, de trois parties de sable et d'une demie partie d'eau (E/C=0,5 et S/C=3) (Tableau 4.9).

Tableau 4. 10 : Composition d'une gâchée de mortier.

| Ciment (g) | Sable (g) | Eau (g) |
|------------|-----------|---------|
| 450 ± 2 | 1350 ± 2 | 225 ± 2 |

Tableau 4. 11 : Formulation des mortiers d'étude.

| Code du mortier | Taux de sub. (%) | SN(g) | SR(g) | C(g) | E/C |
|-----------------|--------------------|--------|--------|------|-----|
| M0 | 0 | 1350 | 0 | 450 | 0.6 |
| M25 | 25 | 1012.5 | 337.5 | 450 | 0.6 |
| M50 | 50 | 675 | 675 | 450 | 0.6 |
| M75 | 75 | 337.5 | 1012.5 | 450 | 0.6 |
| M100 | 100 | 0 | 1350 | 450 | 0.6 |

4.4 Malaxage du mortier

Le mortier est malaxé pendant 4 minutes conformément aux prescriptions de la Norme EN 196-1. Ces opérations de malaxage sont récapitulées dans le tableau 4.11.

Tableau 4. 12 : Opérations de malaxage du mortier (EN 196-1).

| Opération | Introduction de l'eau | Introduction du ciment | | Introduction du sable | | Raclage de la cuve | | |
|------------------|-----------------------|------------------------|---------------|-----------------------|---------------|--------------------|-----------|----------------|
| Durée | | | 30s | 30s | 30s | 15s | 1 min 30s | 60s |
| Etat du malaxeur | Arrêt | | Vitesse lente | | Vitesse lente | Arrêt | | Vitesse rapide |

4.5 Confection des éprouvettes de mortier

La mise en place du mortier est réalisée conformément à la norme EN 196-1.

Pour le mortier, des éprouvettes de $(5*5*5)$ cm³ ont été réalisées pour les essais de porosité et absorption, les éprouvettes de $(4*4*16)$ cm³ pour les essais de compression et traction par flexion et retrait et masse volumique.

Les éprouvettes ont été coulées dans des moules métalliques préalablement huilés. Le moule métallique à trois alvéoles et sa hausse étant fermement fixés à la table à choc (figure 4.4), on

introduit la première des deux couches de mortier. La couche est étalée uniformément en utilisant la grande spatule puis serrée par 60 chocs. La deuxième couche est alors introduite, nivelée avec la petite spatule et serrée à nouveau par 60 chocs. Le moule est enlevé de la table à choc, et après avoir retiré la hausse, on enlève l'excédent de mortier par arasage de la surface des éprouvettes est ensuite lissée. Les moules remplis avec le mortier frais sont ensuite recouverts par un film plastique jusqu'au démoulage. Le démoulage est effectué après 24 heures. Ensuite, les éprouvettes sont curées.

Il faut mentionner que durant toute l'étude et pour chaque cas étudié, trois éprouvettes sont préparées.



Figure 4. 4 : moule métallique (4*4*16) fixés à la table de choc

4.6 Conservation des éprouvettes

Après 24h de la confection des éprouvettes et après le décoffrage on les conserve dans l'eau de robinet, durant 7 jours et 28 jours. Ensuite on met les éprouvettes dans l'étuve pour séchage à 105°C pendant au moins 24h jusqu'à obtention d'une masse constante pour subir l'essai.

4.7 Les essais réalisés durant l'étude

4.7.1 Essais sur le mortier frais

4.7.1.1 Essai d'étalement à la table à secousse

Selon la norme **EN 12-358**, cet essai d'étalement est une mesure testant plus

Particulièrement l'aptitude du béton et mortier à s'étaler par écoulement, L'essai est exécuté sur une table à laquelle on peut imprimer des secousses verticales à l'aide d'une manivelle (**Figure 4.5**). On démoule sur la table un tronc de cône et on le soumet à une série de 30 secousses, ensuite on mesure le diamètre d'étalement $D = (D_1 + D_2) / 2$

Avec : D_1 et D_2 = Diamètre final dans deux axes.

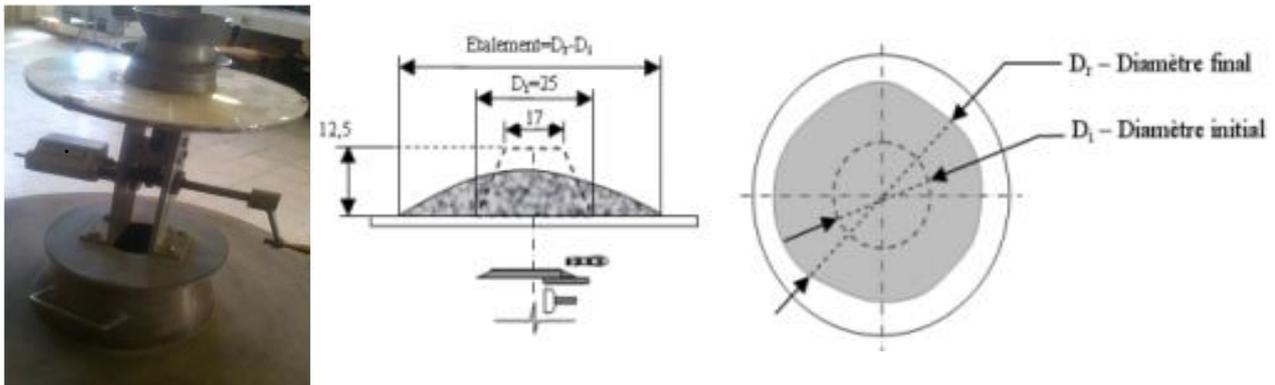


Figure 4. 5 :Table à secousses

4.7.2 Essais sur le mortier durci

4.7.2.1 Essai de résistance à flexion et traction par flexion :

La flexion centrée de l'éprouvette (4x 4 x 16) est effectuée sur une machine de flexion décrite par la norme NF EN 196-1 (Figure 4.6). Les éprouvettes sont exposées à l'air libre pendant 20 minutes pour qu'elles acquièrent l'état normal d'humidité.

Dans notre cas les valeurs sont lues directement sur la règle de l'appareil d'essai :

- La charge de rupture : P en N.
- La contrainte de traction : σ_{tf} en N/cm^2 .
- La contrainte de flexion : σ_f en N/cm^2 .



Figure 4. 6 : Appareil d'essai de traction par flexion.

4.7.2.2 Essai de résistance à la compression

La machine utilisée est une presse hydraulique décrite par la norme NF EN 196-1. Les demi-prismes de l'éprouvette obtenue après rupture en flexion seront rompus en compression comme indiqué sur la figure 4.7:

$$R_c \text{ (Mpa)} = F_c / 1600 \text{ (N /mm}^2\text{)}$$

Où :

R_c : la résistance à la compression, en newtons par millimètre carré.

F_c : la charge maximale à la rupture, en newtons.

1600= 40 mm x 40 mm est l'aire des plateaux ou des plaques auxiliaires, en millimètres carrés.

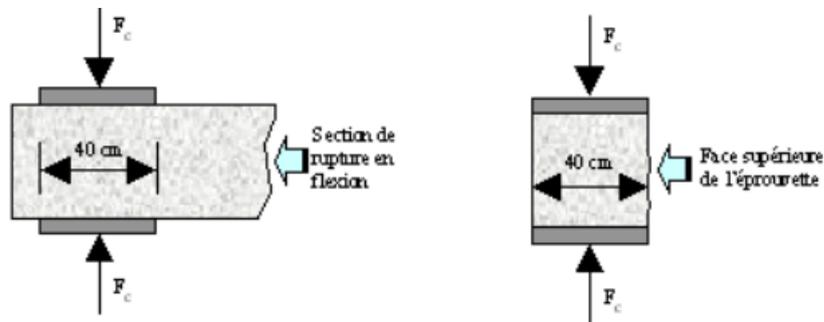


Figure 4. 7 : Dispositif de rupture en compression .(DUPAIN. R,1995)

4.7.2.3 Essai de porosité (NF P 18-459)

la détermination de la porosité accessible à l'eau par pesée hydrostatique selon le mode opératoire AFPC-AFREM est une mesure simple et praticable sur une large variété de matériaux . La masse volumique apparente est également déterminée par cette technique.(figure 4.8).

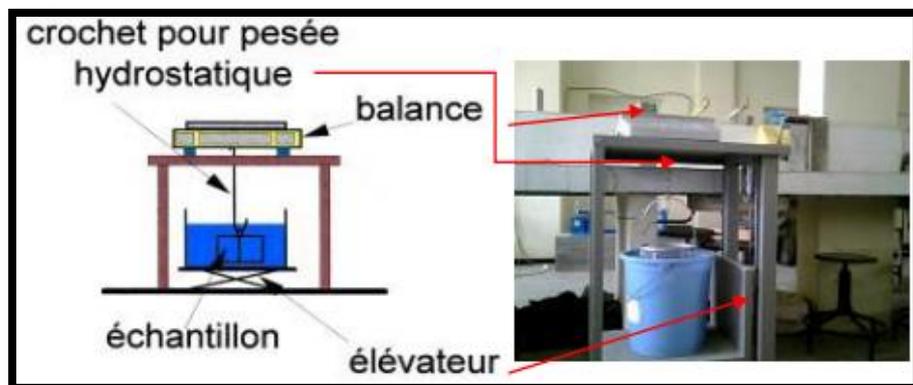


Figure 4. 8 : Essai de porosité

La porosité accessible à l'eau (porosité ouverte) , est calculée par la formule suivante:

$$P = \frac{M_a - M_e}{M_a - M_i}$$

Ou :

P: porosité (volume des vides (%)) ;

Me : poids de l'échantillon après étuvage (g) ;

Ma : poids à l'air après immersion et ébullition(g) ;

Mi : poids à l'eau après immersion et ébullition(g).

4.7.2.4 Essai d'absorption d'eau par immersion (EN 13369)

Cet a été effectué afin d'avoir une idée sur la porosité interne du matériau étudié. L'essai consiste à mettre les éprouvettes du béton ou mortier dans l'étuve et de les peser jusqu'à un poids constant, ensuite les immerger totalement dans l'eau à 20°C pendant une durée de 24h (c'est-à dire jusqu'à saturation du matériau) afin de calculer le volume des vides du béton ou mortier.

Le coefficient d'absorption par immersion A_b est donné par relation suivante :

$$A_b = \frac{M_a - M_s}{M_s}$$

Avec :

Ma : Masse de l'échantillon imbibée ;

Ms : Masse de l'échantillon sèche après passage à l'étuve à 105°C.

4.7.2.5 Essai de retrait

Il est décrit dans la Norme NF P15-433.

Une salle maintenue à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ Un malaxeur normalisé.

Des moules équipés de plots de retrait en laiton.

Les plots sont vissés au centre de chaque face carré du moule au moment de la mise en place du mortier, puis désolidarisés du moule avant le démoulage.

Un dilatomètre équipé d'un comparateur permettant de réaliser des mesures avec une précision inférieure ou égale à 5 μm .

Une tige de 160mm de longueur en invar (insensible aux variations de température pendant la manipulation) pour permettre de régler le zéro du dilatomètre.

Conduite de l'essai

Régler le comparateur à zéro juste au moment du démoulage de l'éprouvette sur la tige en invar de 160mm de longueur, soit L_0 la mesure de l'éprouvette.

Soit $d_l(t)$ la valeur lue sur le comparateur au temps t_0 la longueur de l'éprouvette est:

$$L(t) = L_0 + d_l(t)$$

La variation de longueur au temps t_0 est :

$$\Delta l(t) = L(t) - L_0 = d_l(t) - d_l(t_0)$$

La variation relative de la longueur est :

$$\varepsilon(t) = \Delta l(t)/L_0 = [d_l(t) - d_l(t_0)]/L_0$$

$\Delta l(t)$ est la moyenne des trois éprouvettes issues de la même confection du mortier.

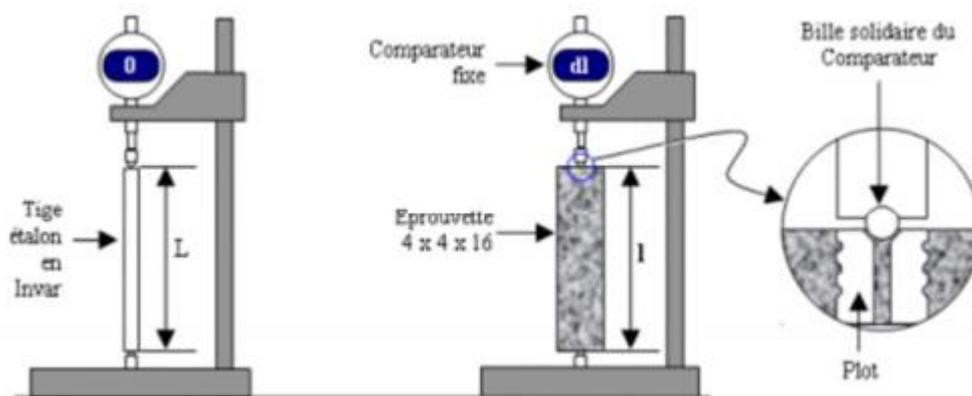


Figure 4. 9 : Dilatomètre à comparateur pour retrait- gonflement du mortier.

4.8 Conclusion

La présentation des caractéristiques des matériaux utilisés, la composition des mélanges et les procédures expérimentales va nous permettre de mieux analyser les résultats et d'avoir une meilleure compréhension de l'influence des différents paramètres étudiés sur les propriétés rhéologique et mécaniques des mortiers à base de sables recyclés, qui seront l'objet d'analyse et de discussions dans le chapitre 5.

CHAPITRE 5 :

Résultats et discussion

Chapitre 5

Résultats et discussions

5.1 Introduction

La synthèse bibliographique a mis en évidence les besoins d'expérimentation pour étudier l'effet des sables recyclés sur les propriétés physico-mécanique d'un mortier. Dans ce cadre, ce chapitre est consacré à l'analyse et à l'interprétation des résultats d'un programme expérimental, qui a comme but, l'étude de l'effet de différentes combinaisons des sables recyclés et naturels sur :

- ❖ **L'effet sur les propriétés rhéologiques ;**
 - La maniabilité à la table à secousse.
- ❖ **L'effet sur les propriétés mécaniques:**
 - La résistance à la compression.
 - La résistance à la flexion par traction ;
- ❖ **L'effet sur les propriétés physiques :**
 - Le retrait
 - La porosité
 - L'absorption totale à l'eau.

Nos essais physiques et mécaniques ont été effectués au sein de laboratoire de département de génie civil à l'Université de Biskra. Nous présentons dans ce chapitre les résultats des différents essais effectués sur les mortiers confectionnées selon les différentes combinaisons des sables recyclés (déchets de brique, déchets de béton), Substitutions du sable naturel par le sable recyclé avec différents pourcentages volumiques de : 0, 25, 50, 75 et 100 %.

5. 2 Effet des granulats recyclés (type et taux de substitution) sur les propriétés rhéologiques des mortiers

5.2.1 L'Ouvrabilité

Les différents mortiers présentent le même rapport E/C à savoir 0.6 pour une seule variable qui est le taux de substitution du sable naturel par les sables recyclés, D'après la mesure d'étalement on remarque l'évolution de l'ouvrabilité, figures 5.1:

- On remarque que l'ouvrabilité des mortiers diminue avec l'augmentation de pourcentage des sables recyclés (SRBE et SRBR) ,(0%,25%,50%,75%,100%), pour un dose de ciment 450 kg et rapport E/C=0.6.

-une diminution de l'affaissement normalisé au cours du temps pour les mortiers recyclés quel que soit la méthode de formulation. Cette diminution est expliquée en partie par le fait que le sable recyclé continue à absorber une partie de l'eau au cours du temps.

-Cette petite diminution en raison des réactions d'hydratation du ciment responsable d'un raidissement de la pâte et probablement aussi de l'absorption d'eau des granulats recyclés.

- L'influence sur le comportement à l'état frais (la maniabilité) du mortier contenant du sable recyclé est non seulement due à l'absorption d'eau et des réactions d'hydratation du ciment. Probablement, la maniabilité du mortier peut être influencée par la géométrie des granulats (forme et rugosité de surface).

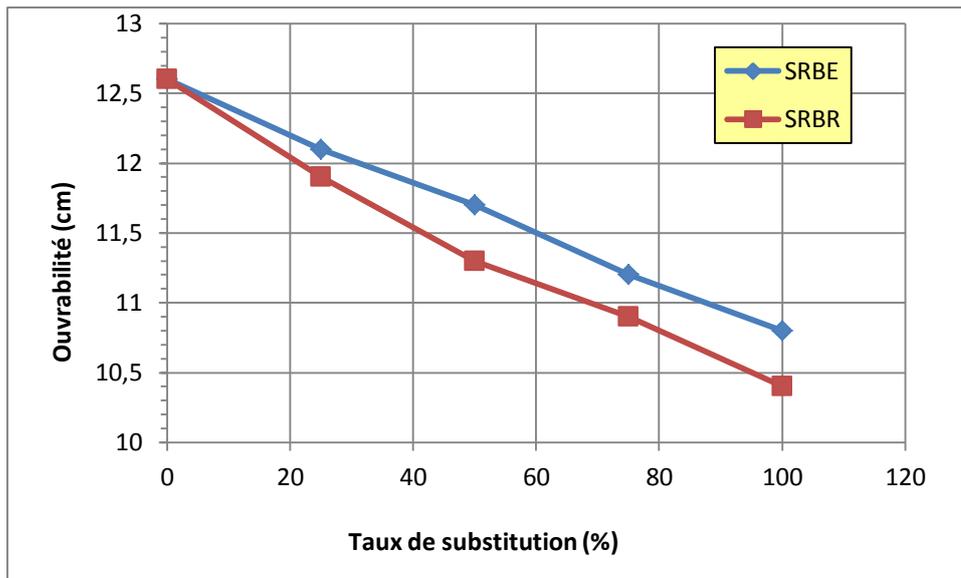


Figure 5. 1 : Variation de l'ouvrabilité des mortiers à base de sable recyclé avec $E/C= 0.6$.

5.3 Effet des granulats recyclés (type et taux de substitution) sur les propriétés mécaniques des mortiers

5.3.1 Résistance à la compression

Les figures (5.2 et 5.3) montrent la variation de la résistance à la compression R_C des éprouvettes de mortier à l'âge de (7 et 28) jours en fonction des taux de substitution du sable naturel par les sable recyclés.

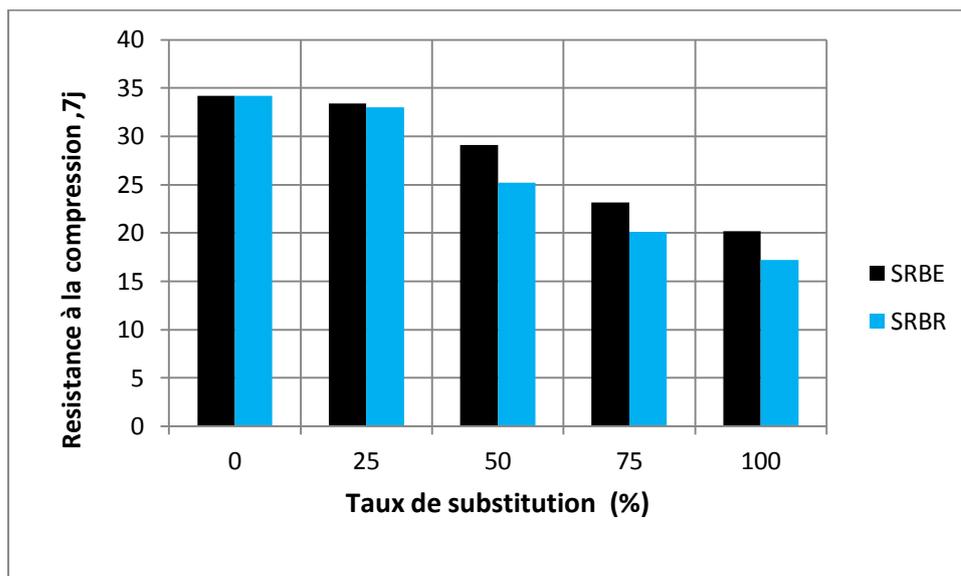


Figure 5. 2 : Résistances à la compression des mortiers à base de sable recyclé à l'âge de 7 jours.

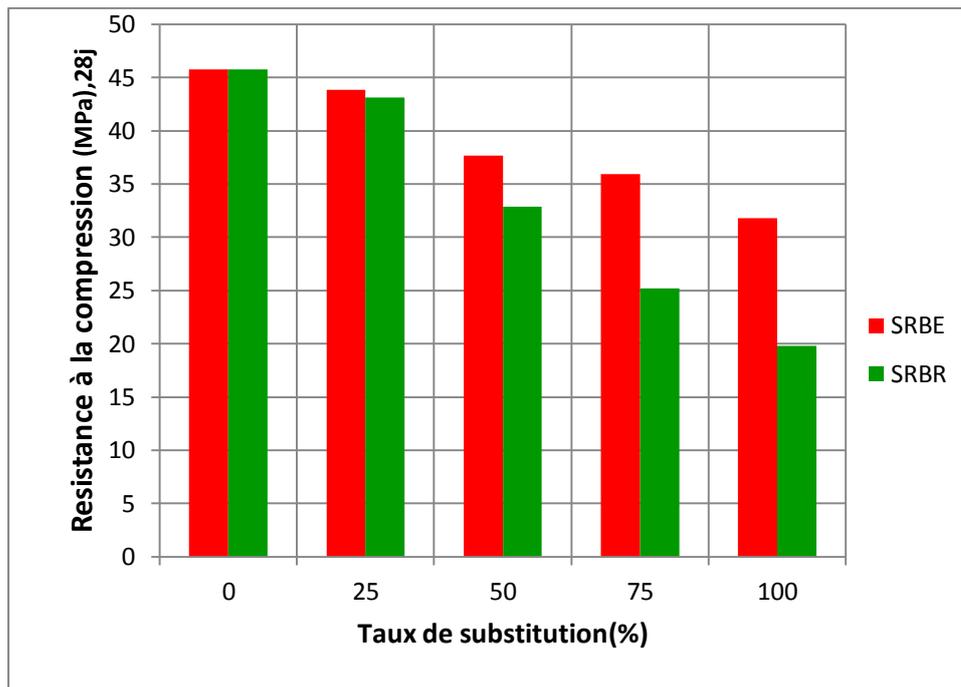


Figure 5. 3 : Résistances à la compression des mortiers à base de sable recyclé à l'âge de 28 jours.

On remarque que les résistances à la compression des différents mortiers augmentent dans le temps, la résistance en compression à 7 et 28 jours diminue avec augmentation de taux de substitution du SN par le SR, On enregistre une diminution à 7 jours de (2.3 %, 14.8%, 32.2% et 40.9%) et (3.5 %, 26.3, 41.2 % et 49.7 %) pour les taux de substitution en sable recyclé de (25 %, 50 %, 75% et 100 %) pour le sable recyclé de béton et le sable recyclé de brique successivement. On a enregistré aussi à l'âge de 28 jours une diminution de (4.2 %, 17.6%, 21.4 % et 30.4%) et (5.6 %, 28%, 44.8 % et 56.7 %) pour les taux de substitution en sable recyclé de (25 %, 50 %, 75% et 100 %) pour le sable recyclé de béton et le sable recyclé de brique successivement. La valeur maximale de la résistance à la compression du mortier à 7 jours est enregistrée pour le mortier témoin avec une valeur de 34.2 MPa. Pour un mortier qui contient 25% de granulats recyclés, R_C est de 33,4 MPa et 33 MPa pour le sable recyclé de béton et le sable recyclé de brique successivement. Pour 28 jours, la valeur maximale de R_C des mortiers étudiés est de 45.75 constatée le mortier témoin, alors qu'avec la substitution de 25% en sable recyclé, on a enregistré une valeur de R_C de 43.82 MPa et 43.16 MPa pour le sable recyclé de béton et le sable recyclé de brique successivement. Les résultats montrent qu'à l'âge de 28 jours R_C max est enregistrée pour M25 alors que la plus faible est

enregistrée pour M100. Ces résultats concordent avec ceux trouvés par (Zengfeng Zhao, 2015) et (Layachi, 2016)

On peut dire qu'avec un taux de substitution de 100%, la résistance à la compression a chuté d'une façon considérable, cela peut être attribué à la faible adhérence entre la pâte de ciment et les grains de sable de déchets de béton et de briques et à la résistance et la dureté des particules de sable c'est-à-dire sa capacité à résister aux contraintes qui lui sont appliquées et la présence de matériaux argileux et la porosité élevé du sable recyclé.

5.3.2 Résistance à la traction par flexion

La variation des résistances à la traction par flexion R_{tf} en fonction des taux de substitution en sable de déchets de béton et briques est représentée sur Les figures (5.4 et 5.5).

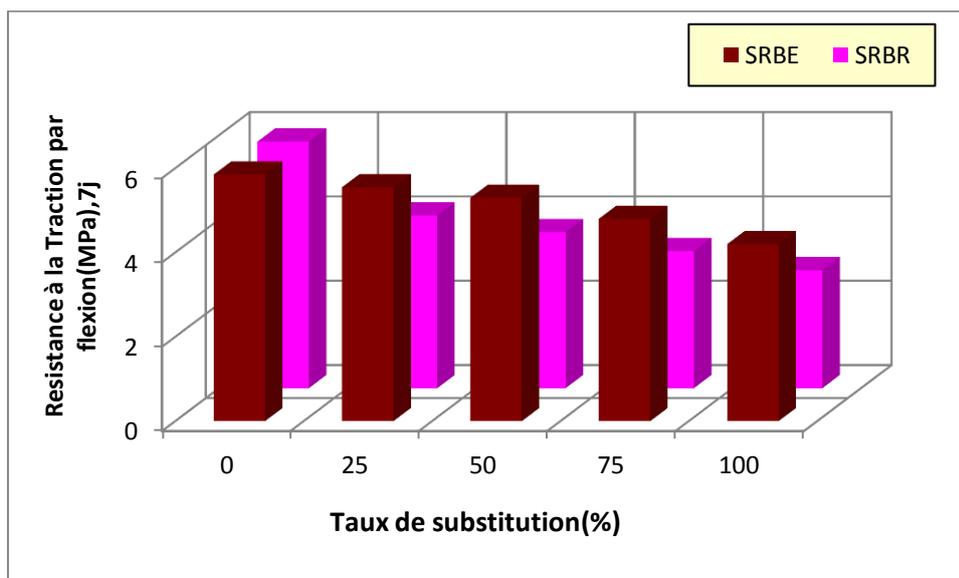


Figure 5. 4 : Résistances à la traction par flexion des mortiers à base de sable recyclé 7 jour.

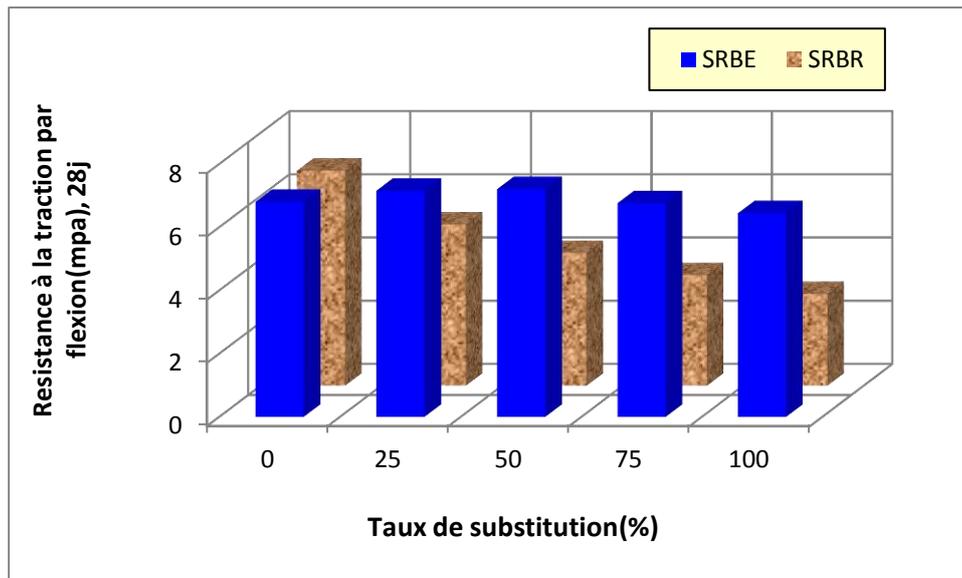


Figure 5. 5 : Résistances à la traction par flexion des mortiers à base de sable recyclé 28 jour.

On remarque que la résistance à la traction par flexion à 7 jours décroît avec l'augmentation du pourcentage de substitution en sable recyclé. On enregistre une diminution à 7 jours de (5.1 %, 9.4%, 17.9% et 28.2%) et (29.9 %, 36.7, 44.4 % et 52.1 %) pour les taux de substitution en sable recyclé de (25 %, 50 %, 75% et 100 %) pour le sable recyclé de béton et le sable recyclé de brique successivement. On a enregistré aussi à l'âge de 28 jours une diminution de (4.2 %, 17.6%, 21.4 % et 30.4%) et (5.6 %, 28%, 44.8 % et 56.7 %) pour les taux de substitution en sable recyclé de (25 %, 50 %, 75% et 100 %) pour le sable recyclé de béton et le sable recyclé de brique successivement. La figure montre qu'à l'âge de 28 jours que la résistance à traction par flexion des mortiers augmentent avec l'augmentation de pourcentage des sables recyclés de béton avec une augmentation de 5.8% pour le mortier recyclé SRBE 50% et puis ça diminue jusqu'à (0.6, 5.2)% pour de taux de sable recyclé de béton successivement de (75% et 100 %) par rapport témoin . Ces résultats concordent avec ceux trouvés par (Layachi, 2016). En ce qui concerne les mortiers à base des sables recyclés de brique, ils présentent des résistances plus faible que le témoin. On a enregistré une diminution avec l'augmentation du pourcentage de substitution en sable recyclé de brique de l'ordre de (25 %, 38.2%, 48.5% et 57.3%) pour les taux de sable recyclé de brique (25 %, 50 %, 75% et 100 %) successivement. Cette diminution de résistance peut être justifiée par la présence de l'ancien mortier collé à la surface des granulats issus du concassage du béton de démolition causant une faible adhérence, tandis que pour les bétons de SDBR la fragilité des granulats facilite la propagation de la rupture et rend la résistance à la flexion plus faible.

La règle principale de la résistance mécanique des mortiers est directement liée au rapport (E/C), c'est-à-dire un faible rapport conduit à une faible porosité donc une grande compacité et par conséquent une résistance mécanique élevée, tout en précisant l'importance de la nature des granulats.

5. 4 Effet des granulats recyclés (type et taux de substitution) sur les propriétés physiques des mortiers

5.4.1 La porosité

La figure 5.6 illustre la variation de la porosité d'un mortier à base de sable recyclés en fonction de taux de substitution en sables recyclés. On constate d'après ces résultats que la porosité des mortiers augmente avec l'augmentation du pourcentage de substitution en sables recyclés. On enregistre une augmentation de 11.4 %, 28.5%, 48.5 % et 62.8% pour le cas de sable recyclé de béton et 31.4 %, 45.7%, 65.7 % et 71.4 % pour le cas de sable recyclé de brique , et ce pour les taux de substitution en sables recyclés de 25 %, 50 %, 75% et 100% successivement.

D'après la figure 5.6 la porosité a atteint sa valeur maximale de 5.7% pour un mortier qui contient 100% de granulats recyclés de béton alors que pour un mortier qui contient 100% de granulats recyclés de brique, elle est de 6 % . , donc nous concluons que Les mortiers contenant des sables issus du concassage de béton de démolition possèdent une porosité plus faible de 8.5% que celle du sable provenant du concassage de brique. Cette porosité est due essentiellement à la nature des granulats, la géométrie des granulats (forme et rugosité de surface).

. On sait que les granulats issus de la brique sont plus poreux que ceux du béton et que es granulats issus de la brique demandent plus d'eau que ceux du béton.

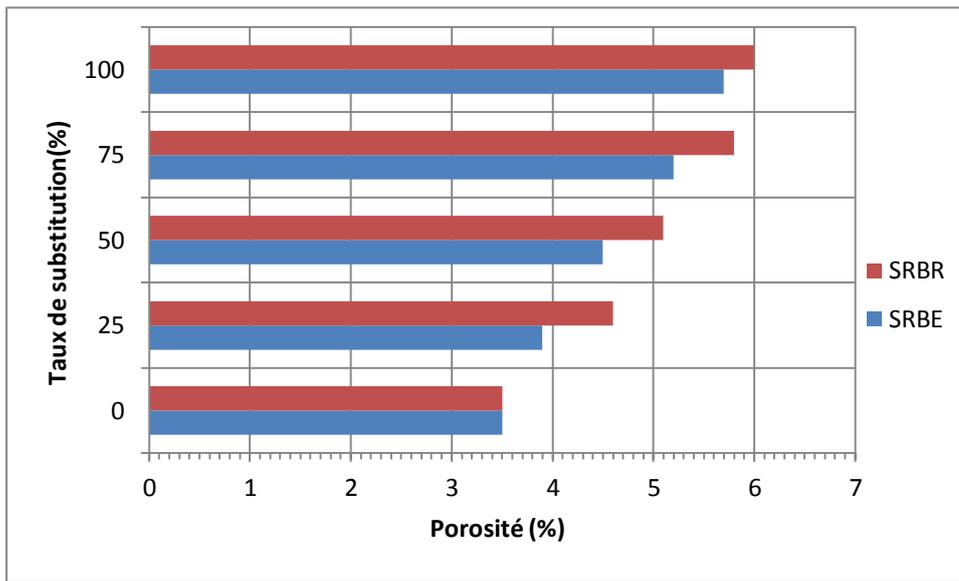


Figure 5. 6 : Evolution de La porosité des mortiers à base de sable recyclé à 28j.

5.4.2 La capacité d'absorption totale d'eau A_b

La figure 5.7 présentent les résultats de l'absorption totale d'eau A_b des mortiers à base de sable de recyclés.

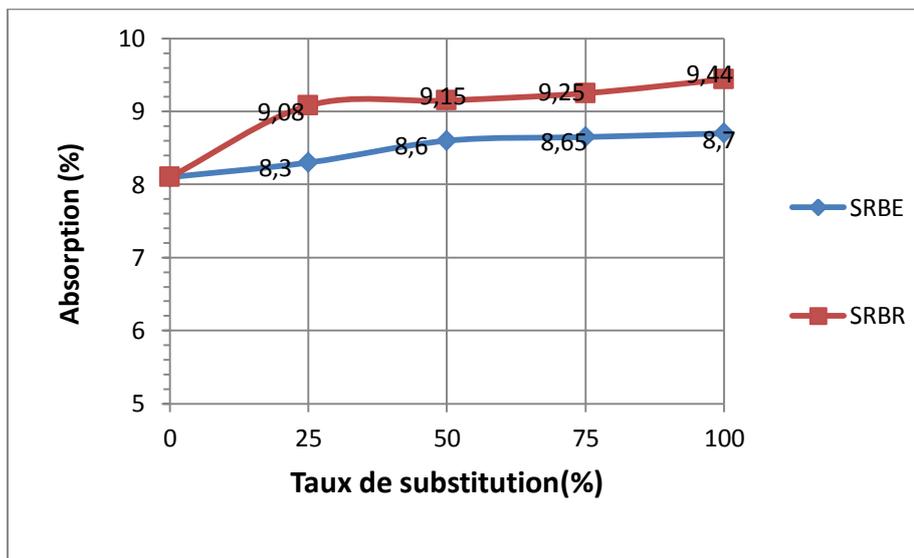


Figure 5. 7 : Evolution de l'absorption totale d'eau après 24h d'immersion des mortiers à base de sable recyclé à 28j.

Les résultats illustrés dans la figure 5.8 montrent que l'absorption totale d'eau après un jour d'immersion augmente avec l'augmentation du taux de sable recyclé. La valeur maximale de A_b est de 8.7% et 9.44% pour un mortier qui contient 100% de granulats recyclés de béton et de brique successivement, alors que la plus faible valeur est constatée dans le cas du mortier témoin.

On a constaté que l'augmentation de A_b par rapport au mortier témoin est de 7.4% et 16.5% pour le cas de 100% de substitution en sable recyclé de béton et de brique successivement. Par suite on conclut que les mortiers contenant des sables issus du concassage de béton de démolition absorbent 9.1% de moins que ceux contenant des sables provenant du concassage de brique. Ces résultats concordent avec ceux trouvés par (Dhir, 2019).

Cette augmentation de A_b peut être justifiée par certaines propriétés, à savoir la porosité des granulats et la porosité des mélanges et leur nature qui nécessite la variation du rapport E/C (plus important pour les granulats recyclés du broyage de brique que celui du béton) comme observé dans certains cas (Ledesma et al., 2015; Lucas et al., 2016).

5.4.3 Retrait

Les figures (5.8 et 5.9) montrent la variation de retrait dans les mélanges de mortier à un âge de 28 jours en fonction du pourcentage de substitution en sable recyclé.

On sait que la réaction d'hydratation s'accompagne d'une réduction de volume jusqu'au 7^{ème} jours puis une stabilisation continue jusqu'à 28 jours.

On remarque que le retrait des mortiers augmente avec l'augmentation du pourcentage des sables recyclés. Il y a une grande augmentation de retrait à 3 et 7 jours, mais cette augmentation devient de plus en plus faible jusqu'à 28 j.

Le retrait d'un mortier augmente avec l'augmentation du taux de remplacement du SN par le SRBE à 7 jours jusqu'à 53.8% et 90.2% pour un mortier qui contient 100% de granulats recyclés de Béton et de brique successivement.

La valeur maximale du retrait à 28 jours est de 918 $\mu\text{m/m}$ et 1015 $\mu\text{m/m}$ pour un mortier qui contient 100% de granulats recyclés de béton et de brique successivement. Par suite, nous concluons que les mortiers contenant des sables issus du concassage de béton de démolition présentent un retrait à l'âge de 28 jour plus faible d'un taux de 18.6% que celui contenant des

sables provenant du concassage de brique. Ces résultats concordent avec ceux trouvés par (Dhir, 2019).

Le retrait élevé est probablement de la porosité élevée des granulats recyclés ainsi qu'au degré important d'absorption d'eau du mortier de l'ancien béton qui recouvre ces granulats et utilise les gros et fins granulats de briques.

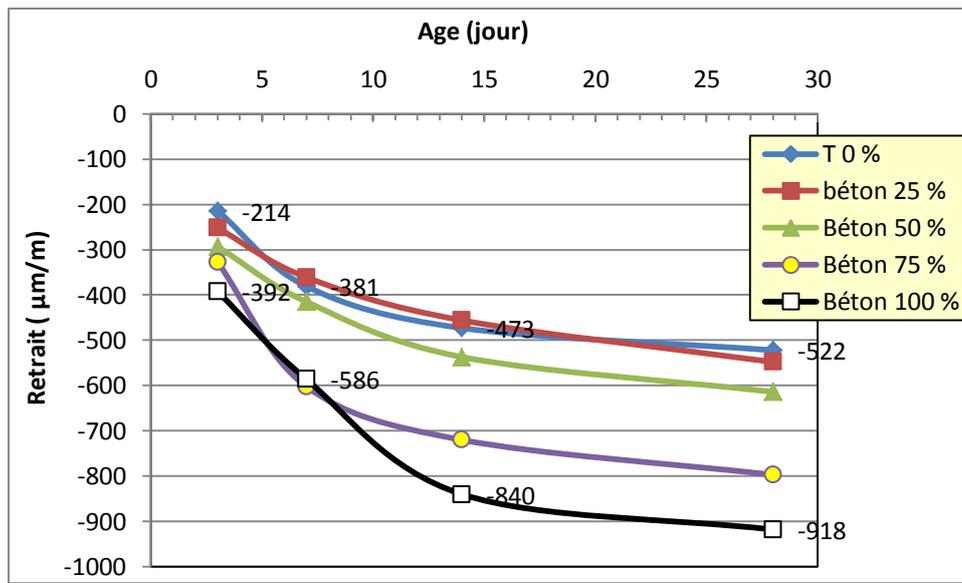


Figure 5. 8 : Evolution du retrait des mortiers à base sable recyclé de bétons

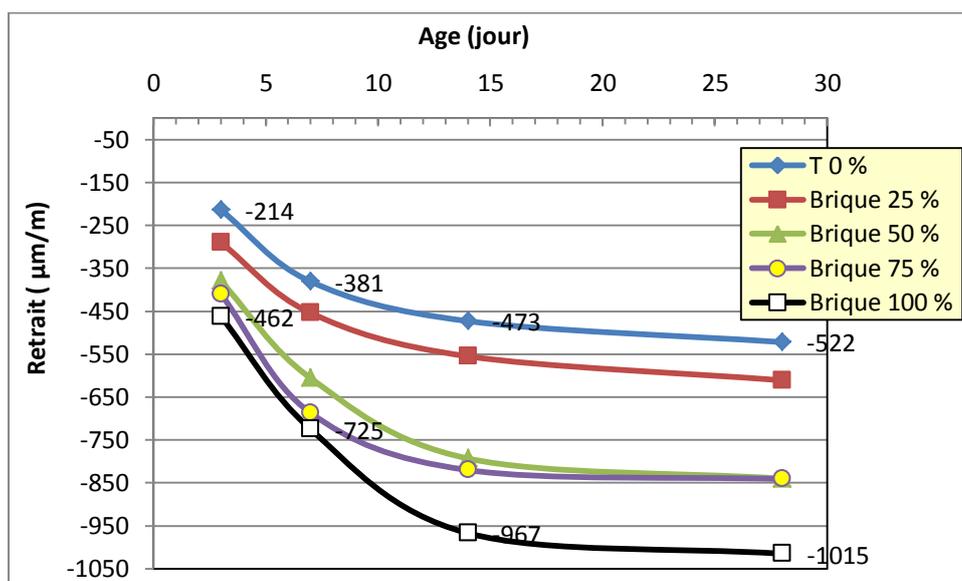


Figure 5. 9 : Evolution du retrait des mortiers à base sable recyclé de briques.

5.5 Conclusion

Cette étude a permis de concrétiser l'effet de la substitution des granulats recyclés sur les propriétés du mortier à l'état frais (ouvrabilité et rhéologie), à l'état durci (résistance à la compression, résistance à la traction par flexion, L'absorption totale d'eau, la porosité et le retrait de séchage). Les résultats trouvés montrent que :

la présence des granulats recyclés dans le mortier entraîne une baisse d'ouvrabilité et un besoin en superplastifiant accru à cause de leur forte absorption d'eau et l'état de leurs surfaces. Par contre, cet effet a des conséquences positives sur les propriétés mécaniques pour des faibles taux de substitution. La pré-saturation préalable des granulats recyclés est une solution prometteuse afin de lutter contre les effets indésirables de ces granulats et de les rendre opérationnels sur les chantiers de la construction. au niveau de la porosité accessible à l'eau, une forte augmentation de cette propriété est constatée avec l'augmentation de la proportion de granulats recyclés. Cela est dû à la forte absorption d'eau des granulats recyclés qui induit un rajout d'une forte quantité d'eau pour garantir une plasticité acceptable. De plus, cela est lié à la présence de l'ancien mortier sur la surface de ces granulats.

On peut donc retenir à la suite des propriétés mesurées sur les mortiers étudiés une utilisation possible des granulats recyclés à des pourcentages de substitution inférieure à 50 % pour garantir des propriétés acceptables dans des applications d'éléments préfabriqués.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le besoin croissant de matériaux de construction engendre un épuisement des ressources. Ainsi, l'utilisation de granulats recyclés dans la fabrication des matériaux cimentaires est une voie pour répondre aux besoins tout en préservant l'environnement dans une démarche de construction durable.

D'une manière générale, cette étude a mis en évidence que la substitution des granulats naturels par des granulats de briques et de bétons concassés engendrait des différences importantes dans les propriétés du mortier, avec toutes ses conséquences en terme de durabilité.

Notre étude a pour objectif la caractérisation rhéologique et physico mécanique d'un mortier à base de granulats recyclés de déchets de démolition par substitution des granulats naturel. Plusieurs formulations de mortier avec différents dosages en granulats recyclés, issue du broyage de béton et de brique, ont été étudiés à l'état frais à travers la maniabilité à la table à secousse, à l'état durci pour estimer les propriétés mécaniques : résistance à la compression et résistance à la traction par flexion et les propriétés physiques : Le retrait ,La porosité , L'absorption totale à l'eau.

D'après les résultats obtenus, on peut conclure que:

- les granulats recyclés ont une masse volumique plus faible et une absorption d'eau beaucoup plus élevée que celle des granulats naturels. La vitesse d'absorption relative du granulat recyclé est plus grande que celle du granulat naturel. Cette propriété est donc importante à considérer lors de la préparation des mortiers à base de granulats recyclés.
- une diminution de l'étalement au cours du temps pour les mortiers recyclés quel que soit la composition du mélange étudié.
- tous les mélanges de mortier à base des granulats recyclés présentent des résistances mécaniques à la compression et à la flexion plus faibles que les mélanges de mortier à base de granulats naturels. Néanmoins les mélanges de mortier à base de 25% et 50% des granulats

recyclés présentent des résistances mécaniques proches à celle de mortier à base des granulats naturels. Pour les plus hauts taux de remplacement, la présence des granulats recyclés ont un impact négatif sur les résistances mécaniques et les propriétés liées à la durabilité des mortiers.

- un mortier à base de sable de déchets de béton présente une résistance mécanique meilleure que celle du mortier à base de sable de déchets de briques, tout en signalant que généralement, il y a une faible diminution des résultats des mélanges à base de sables recyclés par rapport au mélange témoin (sans substitution).
- la porosité des mortiers augmentent avec l'augmentation le taux de substitution de sables recyclés.
- l'absorption d'eau des mortiers recyclés réalisés SR (à base de granulats de béton et de briques) est plus élevée que celle d'un mortier témoin à base de 100% de granulats naturels.
- L'étude de l'influence des granulats recyclés sur le retrait a mis en évidence le retrait des mortiers augmente avec l'augmentation du pourcentage des sables recyclés. Il y a une grande augmentation de retrait à à jeune âge 3 et 7 jours, mais cette augmentation devient de plus en plus faible jusqu'à 28 j .lorsque la résistance à la traction par flexion est faible et le risque de fissuration est important. Ainsi, cette fissuration peut faciliter d'autant la circulation des agents agressifs dans les mortiers recyclés.

Perspectives

1. Amélioration des propriétés mécaniques et physiques du mortier à base de granulats recyclés avec l'utilisation d'ajouts minéraux, tels que le laitier, fumé de silice, pouzzolane.
2. Étude des performances mécaniques du mortier à base de granulats recyclés en utilisant des adjuvants ou des produits qui améliorent la surface des agrégats
3. Étude de la finesse des granulats recyclés sur l'effet des performances mécaniques du mortier.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

Abdallah, G, & Lakhdar, R. (2019). Etude Des Caractéristiques Rhéologique Et Mécanique D'un Mortier Auto-Plaçant A Base De Fillers Calcaire (Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA).

Adem, A. (2017). Valorisation des matériaux de démolition dans la construction. mémoire doctorat, Université Hassiba Ben Bouali–Chlef.

AFNOR (2004). Eléments de définition, conformité et codification (XP P 18-545).

Aissa, S. (2018). Etude du comportement d'un béton compacté au Rouleau (BCR) à base des granulats recyclés (UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA).

AIT MOHAMED AMER, A. (2017). Valorisation des matériaux de démolition dans la construction (Doctoral dissertation).

Arabi N. & Berredjem L. (2011). Valorisation des déchets de démolition comme granulats pour bétons, déchets - revue francophone d'écologie industrielle.

BALLESTER, J. (1992). Traitement et valorisation (les déchets solides).

Baroghel-Bouny, V. (2008, December). Développement d'une approche globale, performantielle et prédictive de la durabilité des structures en béton (armé) sur la base d'indicateurs de durabilité: Bilan et perspectives... LCPC.

Bektas F, Wang K and Ceylan H, 2009. Effects of crushed clay brick aggregate on mortar durability. Construction and Building Materials .

BELHOCINE, A., & NAGOUDI, N. (2014). Etude expérimentale d'un mortier avec ajouts minéraux (Doctoral dissertation).

Berkouk, K. Ameur, T. (2007). Etude de l'efficacité des super plastifiant sur les propriétés rhéologiques de BAP (Mémoire de fin d'étude de l'Université de Boumerdes).

BOUALI, K. (2014). Elaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d'ajouts de déchets de briques réfractaires (Mémoire de magister UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA- BOUMERDES).

- BOUNEDJEMA, Y. (2017).** Evaluation des modifications mécaniques Et rhéologiques apportées par le sable de concassage aux mortiers et bétons (Doctoral dissertation, EZZIANE Karim, HALLAL Ahmed).
- BOUZROURA, M. (2017).** Influence des déchets industriels (Fibres métalliques et boues) sur le comportement des bétons et mortiers (thèse de doctorat en Sciences. Spécialité : Génie Civil. Option : matériaux et structures).
- Braga M, Brito J and Veiga R, 2014.** Reduction of the cement content in mortars made with fine concrete aggregates. *Materials and Structures* 47 (1–2), 171–182.
- Braga M, de Brito J and Veiga R, 2012.** Incorporation of fine concrete aggregates in mortars. *Construction and Building Materials* 36, 960–968.
- BRUXELLES ENVIRONNEMENT. (2010).** L'utilisation des granulats issus du recyclage–IBGE fiche 4.1.
- Cabrera-Covarrubias F G, Gomez-Soberon J M, Almaral-Sanchez J L, Arredondo-Rea S P, Gomez-Soberon M C and Corral-Higuera R, 2016.** An experimental study of mortars with recycled ceramic aggregates: deduction and prediction of the stress-strain. *Materials* 9 (12).
- Canela, D., & Chevet, H. (1995).** Le recyclage-concassage des matériaux minéraux issus de la démolition en Belgique et au Royaume Uni. *Cahiers du Centre scientifique et technique du bâtiment*, 360(2814).
- Cartuxo F., de Brito J., Evangelista L., Jimenez J. R., Ledesma, E. F. (2015).** Rheological behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates – Influence of the superplasticizer. *Construction and Building Materials*, 89, 36-47.
- Cassagnabere F., Mouret M., Lachemi M., Escadeillas G., Rakotoarimanga A., Bertrand A. (2012).** Impact du taux de substitution de sable recycle sur les propriétés d'un mortier étuvé. Colloque International Francophone NoMaD 2012, LMDC / AUGC, Toulouse.
- Casuccio, M., Torrijos, M. C., Giaccio, G., & Zerbino, R. (2008).** Failure mechanism of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 22(7), 1500-1506.
- CHANVILLARD, G. (1999).** le matériau béton: connaissance générales (Édition Aléas).
- CHAREF, A. (2007).** La problématique des granulats au Maroc (Push-Button).

- Corinaldesi V, 2009.** Mechanical behavior of masonry assemblages manufactured with recycled-aggregate mortars. *Cement and Concrete Composites* 31 (7), 505–510.
- Corinaldesi V., Moriconi G. (2009).** Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, 23(1), 289-294.
- COULIBALY, S. M. (2015).** Etude du comportement hydrique et thermique du mortier contenant le sable de mâchefer.
- Cuenca-Moyano G M, Martin-Morales M, Valverde-Palacios I, Valverde-Espinosa I and Zamorano M, 2014.** Influence of pre-soaked recycled fine aggregate on the properties of masonry mortar. *Construction and Building Materials* 70, 71–79.
- DELALDJA, D. (2018).** Valorisation des déchets industriels dans la formulation des mortiers soumis à des températures élevées (Doctoral dissertation, Université Mohamed Boudiaf-M'sila).
- Dhir, R. K., de Brito, J., Silva, R. V., & Lye, C. Q. (2019).** Use of Recycled Aggregates in Mortar. *Sustainable Construction Materials*, 143–179.
- Djemaci, B. (2012).** La gestion des déchets municipaux en Algérie: Analyse prospective et éléments d'efficacité (Doctoral dissertation).
- DUPAIN. R, LANCHON. R, J. C. SAINT ARROMAN. (1995).** Granulats, sols, ciments et bétons – caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire (Edition castilla – 25, ruerouge-75005 Paris 1995).
- Eurostat Statistics Explained.** Waste statistics. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics. En ligne, consulté le 30 avril 2020.
- EVANGELISTA L., DE BRITO J. (2007),** « Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates », *Cement & Concrete Composites*, vol. 29, n°5, 2007.
- Fan C C, Huang R, Hwang H and Chao S J, 2015.** The effects of different fine recycled concrete aggregates on the properties of mortar. *Materials* 8 (5), 2658–2672.
- Farinha C, de Brito J and Veiga R, 2015a.** Incorporation of fine sanitary ware aggregates in coating mortars. *Construction and Building Materials* 83, 194–206.
- Farinha C, de Brito J, Veiga R and Lucas J, 2015b.** Reduction of cement content in renderings with fine sanitary ware aggregates. *Materials and Structures*.

Fatma., M. Idris, K. (2018). Etude de l'effet de la qualité du béton démolé sur les propriétés des granulats recyclés traités au CO₂ (Larbi tébessi– Tébessa).

Gayarre, F. L., Boadella, Í. L., Pérez, C. L. C., López, M. S., & Cabo, A. D. (2017). Influence of the ceramic recycled aggregates in the masonry mortars properties. *Construction and Building Materials*, 132, 457-461.

GCI712. (2009). Durabilité ET réparation du béton (département Génie civil, Université de Sherbrooke-Canada).

GDCBFNB, 1994. Guide des déchets de chantier de bâtiment Fédération Nationale du Bâtiment, Direction de l'habitat et de la Construction (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie).

GERARD, M. (1999). Recyclage et valorisation des déchets ménagers .

GHOMARI F. & BENDI-OUIS A. (2015). Cours science des matériaux de construction (Travaux pratique): Université Aboubekr Belkaid.

H. Gomart, E. Ghorbel, G. Wardeh. (2013), Étude de l'ouvrabilité et des propriétés mécaniques de mortiers à base de sable recyclé. 31^{èmes} Rencontres de l'AUGC, E.N.S. Cachan, 29 au 31 mai 2013.

Habib, F. (2016). Valorisation des granulats recyclés de déchet des carreaux faïence dans la formulation des bétons autoplaçants R. UNIVERSITE M'OHAMED BOUGARA – BOUMERDES.

Hachana, A. (2008). Etude des bétons à base des agrégats de démolition. Mémoire de magistère, Université de Biskra.

Higashiyama H, Yagishita F, Sano M and Takahashi O, 2012. Compressive strength and resistance to chloride penetration of mortars using ceramic waste as fine aggregate. *Construction and Building Materials* 26 (1), 96–101.

<https://image.app.goo.gl/ei2QNGmiCRLqx4bN7>. En ligne, consulté le 25 mai 2020.

Hwang, E. H., Ko, Y. S., & Jeon, J. K. (2008). Effect of polymer cement modifiers on mechanical and physical properties of polymer-modified mortar using recycled artificial marble waste fine aggregate. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 14(2), 265-271.

- Jiménez J R, Ayuso J, Lopez M, Fernandez J M and de Brito J, 2013.** Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing. *Construction and Building Materials* 40, 679–690.
- KATTAB.R, (2007).** Valorisation de sable de dune (Thèse doctorat ENP Alger).
- Katz, A. (2003). Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Cement and concrete research*, 33(5), 703-711.
- Khatib J. M. (2005).** Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. *Cement and Concrete Research*, 35 (4), 763-769.
- Kou, S. C., & Poon, C. S. (2015).** Effect of the quality of parent concrete on the properties of high performance recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 77, 501-508.
- Kwan, W. H., Ramli, M., Kam, K. J., & Sulieman, M. Z. (2012).** Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. *Construction and Building Materials*, 26(1), 565-573.
- Laneyrie, C. (2014).** Valorisation des déchets de chantiers du BTP: comportement à haute température des béton des granulats recyclés (Doctoral dissertation).
- Layachi, B., Laurent, M., Van-minh, N., & Houria, M. (2016).** Étude Expérimentale De La Formulation Des Mortiers À Base De Sable Recyclé. Université Badji Mokhtar – Annaba - Algérie, Département de Génie Civil.
- Le mortier, S. D. (<https://www.linternaute.fr>)** . En ligne, consulte le 30 avril 2019.
- Ledesma E F, Jiménez J R, Ayuso J, Fernandez J M and de Brito J, 2015.** Maximum feasible use of recycled sand from construction and demolition waste for eco-mortar production – part-I: ceramic masonry waste. *Journal of Cleaner Production* 87, 692–706.
- Lee S T, 2009.** Influence of recycled fine aggregates on the resistance of mortars to magnesium sulfate attack. *Waste Management* 29 (8), 2385–2391.
- Leite M B, Lima P R and Santos A C. (2009).** Study of the consistence and mechanical behaviour of recycled mortars. In: 2nd International RILEM Conference on Progress of Recycling in the Built Environment, São Paulo, Brazil .

- Lucas J, de Brito J, Veiga R and Farinha C, 2016.** The effect of using sanitary ware as aggregates on rendering mortars' performance. *Materials & Design* 91, 155–164.
- Luis de Oliveira Júnior, L. G. Pedrotia, J. Oliveira, W. E. Hilarino Fernandes, A. G. Fineza, S. N. Monteiro, G. H. Nalon.** The influence of partial replacement of natural sand aggregates by grits residues on the mechanical properties of an ecological mortar. *Journal of Building Engineering* 26 (2019) 100912.
- MEFTAH, H., & Arabi, N. (2011).** Les granulats recyclés humidifiés: comportements des bétons frais et durcis.
- Mesbah, H. A., & Buyle-Bodin, F. (1999).** Efficiency of polypropylene and metallic fibres on control of shrinkage and cracking of recycled aggregate mortars. *Construction and building materials*, 13(8), 439-447.
- Miranda L F R and Selmo S M S, 2006.** CDW recycled aggregate renderings: part I – analysis of the effect of materials finer than 75 µm on mortar properties. *Construction and Building Materials* 20 (9), 615–624.
- Neno C, Brito J d and Veiga R, 2014.** Using fine recycled concrete aggregate for mortar production. *Materials Research* 17 (1), 168–177.
- Nguyen V. N. (2016).** Valorisation de fines et granulats issus de bétons recyclés comme matériaux cimentaires. Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse 3 Paul Sabatier (France).
- Noirfontaine, M. N. D. (2000).** Etude structurale et cristallographie du composé majoritaire du ciment anhydre: le silicate tricalcique (Doctoral dissertation, Palaiseau, Ecole polytechnique).
- Norme, N. F. (2012).** EN 197-1. Ciment-Part 1: Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.
- Patural, L. (2011).** Modes d'action des éthers de cellulose sur la rétention d'eau des mortiers à l'état frais (Doctoral dissertation).
- PHOUMMAVONG, V. (2006).** Cours en ligne Matériaux de Construction (Université national LAOS 2006).

- Poon C S and Kou S C, 2010.** Properties of cementitious rendering mortar prepared with recycled fine aggregates. *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition* 25 (6), 1053–1056.
- Quebaud, M. (1996).** Caractérisation des granulats recyclés, étude de la composition et du comportement de bétons incluant ces granulats (Doctoral dissertation, Artois).
- Sabrina, S., & Houari, H. (2008).** Comportement des bétons à base de granulats recyclés (Doctoral dissertation, Université Mentouri Constantine).
- SALHI, M. (2018).** Effet du climat chaud sur la durabilité des bétons autoplaçants (Thèse doctorat, de l'Université de Hassiba Ben Bouali).
- Santha Kumar G.** Influence of fluidity on mechanical and permeation performances of a recycled aggregate mortar. *Construction and Building Materials* 213 (2019) 404–412.
- Shokry, R., & Abourizk, S. (1997).** THE PROPERTIES OF RECYCLED CONCRETE. *CONCRETE INTERNATIONAL*, 56–60. cité par FALEK KAMEL.
- Silva J, de Brito J and Veiga R, 2009.** Incorporation of fine ceramics in mortars. *Construction and Building Materials* 23 (1), 556–564.
- Silva R V, de Brito J and Dhir R K, 2015a.** Prediction of the shrinkage behavior of recycled aggregate concrete: a review. *Construction and Building Materials* 77, 327–339.
- Silva R V, de Brito J and Dhir R K, 2016.** Performance of cementitious renderings and masonry mortars containing recycled aggregates from construction and demolition wastes. *Construction and Building Materials* 105, 400–415.
- Silva, R. V., De Brito, J., & Dhir, R. K. (2014).** Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials*, 65, 201-217.
- Sperandio, K. (2001).** Identification des facteurs mobilisateurs des stratégies de gestion des déchets ménagers mises en œuvre par les collectivités locales (Doctoral dissertation, Lyon, INSA).
- Statistics, S. P. (2019).** https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Social_protection_statistics#Social_protection_expenditure_and_GDP_rates_of_change.
- Sylver, P. (2006).** Science des matériaux (université pierre et marie curie).

- Topçu I B and Bilir T, 2010.** Experimental investigation of drying shrinkage cracking of composite mortars incorporating crushed tile fine aggregate. *Materials & Design* 31 (9), 4088–4097.
- Topcu, I. B., & Şengel, S. (2004).** Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. *Cement and concrete research*, 34(8), 1307-1312.
- Torkittikul P and Chaipanich A, 2010.** Utilization of ceramic waste as fine aggregate within Portland cement and fly ash concretes. *Cement and Concrete Composites* 32 (6), 440–449.
- Vegas, I., Azkarate, I., Juarrero, A., & Frías, M. (2009).** Design and performance of masonry mortars made with recycled concrete aggregates. *Materiales de Construcción*, 59(295), 5-18.
- Vegas, I., Azkarate, I., Juarrero, A., & Frías, M. (2009).** Design and performance of masonry mortars made with recycled concrete aggregates. *Materiales de Construcción*, 59(295), 5-18.
- Veiga M R, 1997.** Performance of Rendering Mortars in Walls – Contribution to the Study of Their Resistance to Cracking (Ph.D. thesis). Faculty of Engineering of the Porto University (FEUP).
- William, D. (2001).** Science et génie des matériaux (Modulo Edition, 2001).
- Zega C. J., Di Maio A. A. (2011).** Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements. *Waste Management*, 31(11), 2336-2340.
- Zhao, Z., Remond, S., Damidot, D., & Xu, W. (2015).** Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars. *Construction and Building Materials*, 81, 179-186.
- Zineb, A. C., & Somia, S. (2018).** Amélioration du comportement mécanique d'un béton à base d'agrégats recyclés (Université Mohamed Boudiaf- M'sila).