

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Faculté du Génie de la Construction

Département de Génie Civil

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

**En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Civil.
Option : Constructions civiles et industrielles.**

Thème :

**Etude expérimentale d'un béton à base de
granulats recyclés**

Présenté par :

**M^{elle} BOUAKAZ Faiza
M^{elle} ATMIMOU Nadjet**

Encadré par :

M^r. KACHI Mohand Said

Promotion 2020-2021

Remerciement

Toute notre parfaite gratitude et remerciement à Dieu, le tout puissant qui nous a donné la force, le courage et la volonté pour élaborer ce travail.

Nous remercions également nos familles respectives pour les sacrifices fournis afin que nous puissions terminer nos études.

*C'est avec une profonde reconnaissance et considération particulière que nous remercions notre promoteur **M^r KACHI Mohand Said** pour la sollicitude avec laquelle il a suivi et guidé ce Mémoire.*

*Nous sincères remerciements vont à **M^r FELLAH Djamel** et **M^{elle} TILMATINE Thilelli** qui nous a proposé cet axe de recherche riche et passionnant.*

*Nous avons effectué notre mémoire au sein du Laboratoire de Génie Civil de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Nous remercions chaleureusement les membres de ce laboratoire en particuliers **Madame BEN MEDJBAR Fadhila** et **Monsieur BOUHERRAOUA Rachid**, pour leur aide, amitié, et leur disponibilité durant les investigations expérimentales.*

*Il est un agréable devoir d'exprimer nos sentiments de reconnaissance aux enseignants et personnel de la bibliothèque du département **GENIE CIVIL** ainsi qu'à ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail.*

Et enfin nos sincères remerciements et notre profonde gratitude s'adressant également aux membres du jury qui nous feront l'honneur de juger notre projet.

Merci.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail:

*A mes très chers **parents**, qui m'ont guidé et encouragé dans mes études jusqu'à atteindre ce stade de formation.*

*A mon très chère frère **Anis***

*A mes très chères sœurs **Lynda et Sarah***

*A mes **grands parents***

*A toute ma **famille** et à tous ceux que j'aime.*

*A mon binôme **Nadjet** avec qui j'ai partagé de bons moments malgré les difficultés que nous avons rencontrés.*

*A tous mes **amis** qui n'ont cessé de m'aider et de me conseiller pour accomplir mon travail.*

A toute personne qui m'a aidé à poursuivre mes études.

A toute la promotion (2020/2021)

Et enfin à tous ceux qui m'ont aidée de près ou de loin.

Faiza

Dédicace

Je dédie ce modeste travail:

*A mes très chers **parents**, qui m'ont guidé et encouragé dans mes études jusqu'à atteindre ce stade de formation.*

*A mon très chère frère **Samir***

*A ma très chère sœur **Nabila***

*A mes quatre **neveux***

*A toute ma **famille** et à tous ceux que j'aime.*

*A mon binôme **Faiza** avec qui j'ai partagé de bons moments malgré les difficultés que nous avons rencontrés.*

*A tous mes **amis** qui n'ont cessé de m'aider et de me conseiller pour accomplir mon travail.*

A toute personne qui m'a aidé à poursuivre mes études.

A toute la promotion (2020/2021)

Et enfin à tous ceux qui m'ont aidée de près ou de loin.

Nadjet

Liste des figures

Figure 1 1 : béton naturel	2
Figure 1 2 : granulats du béton.....	2
Figure 1 3: courbe granulométrique	3
Figure 1 4: granulats d'origine minéralogique.....	4
Figure 1 5: granulats alluvionnaires (roulés).....	4
Figure 1 6: granulats de carrière.....	5
Figure 1 7: le ciment.....	5
Figure 1 8: schématisation d'un granulat recyclé	7
Figure 1 9: un granulat recyclé.....	7
Figure 1 10: absorption des granulats recyclés en fonction de temps	9
Figure 1 11: machine Los Angeles.....	10
Figure 1 12: béton recyclé.....	11
Figure 1 13: absorption de béton recyclé	11
Figure 1 14: éprouvettes de béton recyclé.....	13
Figure 1 15: poutre de flexion	14
Figure 2 1: déchets de démolition des vieilles maisons et éprouvettes de laboratoire.....	17
Figure 2 2: courbe granulométrique de sable (0/3mm).....	18
Figure 2 3: courbe granulométrique de gravier naturel et recyclé (3/8mm)	18
Figure 2 4: courbe granulométrique de gravier naturel GN et recyclé GR (8/15mm).....	19
Figure 2 5: Matériaux du béton	22
Figure 2 6: conservation des éprouvettes	22
Figure 2 7: Description d'essai d'affaissement de cône d'abrams.....	24
Figure 2 8: Mesure d'affaissement	24
Figure 2 9: Mesure de vitesse de propagation des ondes ultrasonique	25
Figure 2 10: Essai de compression uni axial	26
Figure 2 11: Montage de flexion à 4 point	26
Figure 2 12: Géométrie des poutres avec entaille	27
Figure 2 13: Géométrie des poutres sans entaille.....	27
Figure 2 14: dispositif d'essai de flexion quatre points	28

Liste des figures

Figure 3 1: affaissement au cône d'abrams.....	29
Figure 3 2: Résultats de la compression.....	30
Figure 3 3: courbe contrainte déformation.....	31
Figure 3 4 : Propagation des fissures suivant le sens de compression.	32
Figure 3 5: Propagation des fissures dans la face supérieure des échantillons.	32
Figure 3 6 : Résistance à la flexion des poutres Sans et avec entaille.....	33
Figure 3 7: Comparaison entre les poutres sans entaille et les poutres avec entaille.....	34
Figure 3 8: Propagation des fissures dans les poutres de flexion.....	35
Figure 3 9: Module de Young en fonction de taux de remplacement des GN par des GR.....	37
Figure 3 10: Vitesse ultrason.	37
Figure 3 11: Masse volumique en fonction de taux de remplacement.....	39

Liste des tableaux

Tableau 1 1 : classes des granulats.....	3
Tableau 2 1: Composition chimique de ciment.	17
Tableau 2 2: Propriétés des granulats naturels.....	19
Tableau 2 3: Formulations des échantillons.....	21
Tableau 3 1: module de Young	36

Table des matières

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale..... 1

Chapitre 1 : Bibliographie

1.1 Le béton naturel	2
1.1.1 Introduction	2
1.1.2 Les composants du béton	2
1.1.2.1 Les granulats	2
1.1.2.1.1 Définition	2
1.1.2.1.2 Classe des granulats	2
1.1.2.1.3 Les différents types des granulats	4
1.1.2.1.3.1 Origine minéralogique.....	4
1.1.2.1.3.2 Granulats roulés et granulats de carrières	4
1.1.2.2 Le ciment	5
1.1.2.2.1 Définition	5
1.1.2.2.2 Types du ciment	5
1.1.2.3 L'eau de gâchage	6
1.2 Granulats recyclés issus des déchets de la démolition et de la construction.....	6
1.2.1 Introduction	6
1.2.2 Composition de granulat recyclé	7
1.2.3 Caractéristiques physiques et mécaniques des granulats recyclés	7
1.2.3.1 Granulométrie	7
1.2.3.2 Masse volumique	8
1.2.3.3 Absorption	8

Table des matières

1.2.3.4 Résistance à l'usure	9
1.2.3.4.1 Essai los Angeles	9
1.2.4 Conclusion.....	10
1.3 Béton recyclé.....	11
1.3.1 Introduction	11
1.3.2 Caractéristique physiques de béton recyclé	11
1.3.2.1 Absorption	11
1.3.2.2 Ondes ultra son	12
1.3.3 Caractéristiques mécaniques	12
1.3.3.1 Traction	12
1.3.3.2 Flexion	13
1.3.3.3 Compression.....	14
1.3.3.4 Module de Young	15
1.3.4 Conclusion.....	15

Chapitre 2 : matériaux utilisées et caractérisations expérimentales

2.1 Introduction	16
2.2 Matériaux du béton	16
2.2.1 Le liant hydraulique	16
2.2.2 Les granulats	17
2.2.3 Eau de gâchage	20
2.3 Confection de béton au laboratoire	20
2.3.1 Formulation de béton	20
2.3.2 Fabrication de béton.....	21
2.4 Géométrie et conservation des éprouvettes	22
2.5 Essai sur le béton frais	23
2.5.1 Affaissement au cône d'Abrams	23

Table des matières

2.6 Essai sur le béton durci.....	24
2.6.1 Essai non destructif	25
2.6.2 Essai destructif	25
2.6.2.1 Essai de compression	25
2.6.2.2 Essai de flexion quatre points sur des poutres avec entaille et sans entaille	26
2.7 Conclusion.....	28

Chapitre 3 : résultats et discussions

3.1 Introduction	29
3.2 Résultats et discussion	29
3.2.1 Béton à l'état frais	29
3.2.2 Résultats du la compression	30
3.2.3 Résultats du la flexion	32
3.2.4 Module élastique	36
3.2.5 Ultrason	37
3.2.6 Densité	38
3.3 Conclusion	39
Conclusion général	40

Références

Introduction général

Introduction général

Tout au long de son évolution, l'être humain cherche à développer et choisir ses matériaux en fonction de ses besoins dans les différents domaines. De nos jours, le domaine de la construction est un secteur qui ne cesse de développer et s'améliorer pour suivre les temps, ce qui demande la mise en œuvre de grandes quantités de matériaux, Parmi ceux-ci le béton, le matériau le plus communément utilisé au monde : 1m^3 est mis en œuvre par an et par habitant sur la planète. Parallèlement à cela, on assiste à une accélération de la démolition et de la déconstruction d'ouvrages anciens en béton et ainsi à une accumulation importante de déchets. Aux regards des évolutions anthropiques, il devient ainsi essentiel de développer de nouvelles approches de la construction permettant de limiter ses impacts environnementaux et de prendre en compte le cycle de vie des matériaux mis en œuvre. Parmi les nombreuses pistes explorées actuellement, la valorisation des matériaux issus de la démolition et de la déconstruction a pour double objectif de préserver les ressources naturelles ainsi que de réduire les flux de déchets.

Ces dernières décennies, les granulats recyclés obtenus après broyage des déchets de la construction et de la démolition, ont été recommandés comme des substituant aux granulats naturels (GN). Contrairement aux derniers, les granulats recyclés (GR) issus de la déconstruction et de la démolition présentent la particularité de contenir du mortier et de la pâte de ciment résiduels qui influence plusieurs de leurs propriétés. Ces éléments peuvent se trouver sous forme broyée (éléments fins) ou concassée, accolés ou non au granulat du béton démoli (béton parent). Les propriétés des bétons réalisés avec ces matériaux recyclés peuvent alors être modifiées.

La présente étude a comme objectif principal d'évaluer le potentiel d'utilisation des granulats recyclés dans les bétons. Il s'agit d'évaluer l'impact de différent taux de remplacement des granulats naturels (GN) par des granulats recyclés (GR) sur les propriétés du béton. L'utilisation de ressources premières ainsi que la réduction de la quantité de déchets.

Cette étude expérimentale a été réalisée au laboratoire de matériaux de la faculté de génie de la construction de l'université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou.

1.1 Le béton naturel :

1.1.1 Introduction :

Le béton est un matériau composite, utilisé dans le domaine de la construction, il se compose de gravier, de sable, et d'un liant hydraulique (le plus souvent du ciment Portland) qui sert de colle ou matrice . On y ajoute éventuellement des adjuvants et d'autres ingrédients pour modifier et améliorer ses caractéristiques mécaniques et physiques.



Figure 1 1 : béton naturel

1.1.2 Les composants du béton

Les bétons sont composés à 75% de leurs volumes de granulats, il n'est pas donc étonnant que les performances des bétons dépendent des propriétés des granulats qui les composent.

1.1.2.1 Les granulats :

1.1.2.1.1 Définition :

On appelle granulats, tout matériau inerte provenant de l'érosion des roches ou de leur broyage, utilisé dans la construction et entrant dans la composition des mortiers et des bétons, leurs dimensions sont comprises entre 0mm et 25mm.



Figure 1 2 : granulats du béton

1.1.2.1.2 Classe des granulats :

Les granulats sont classés en fonction de leur granularité (distribution dimensionnelle des grains) déterminée par analyse granulométrique à l'aide de tamis.

Un granulat est désigné par sa classe granulaire exprimée par le couple d/D ou 0/D avec :

d : dimension inférieure du granulat.

D : dimension supérieure du granulat.

Tableau 1 1 : classes des granulats selon la norme XP P 18-540.

Classe	Délimitations	caractéristique
Fillers	0/D	$D < 2$ mm avec au moins 85 % de passant à 1,25 mm et 70 % de passant à 0,063 mm
Sablons	0/D	$D \leq 1$ mm avec moins de 10 % de passant à 0,063 mm
Sables	0/D	$d = 0 \leq D \leq 4$ mm
Graves	0/D	$D \geq 6,3$ mm
Gravillons	d/D	$D \geq 2$ mm et $D \leq 63$ mm
Ballasts	d/D	$d = 31,5$ mm et $D = 50$ ou 63 mm

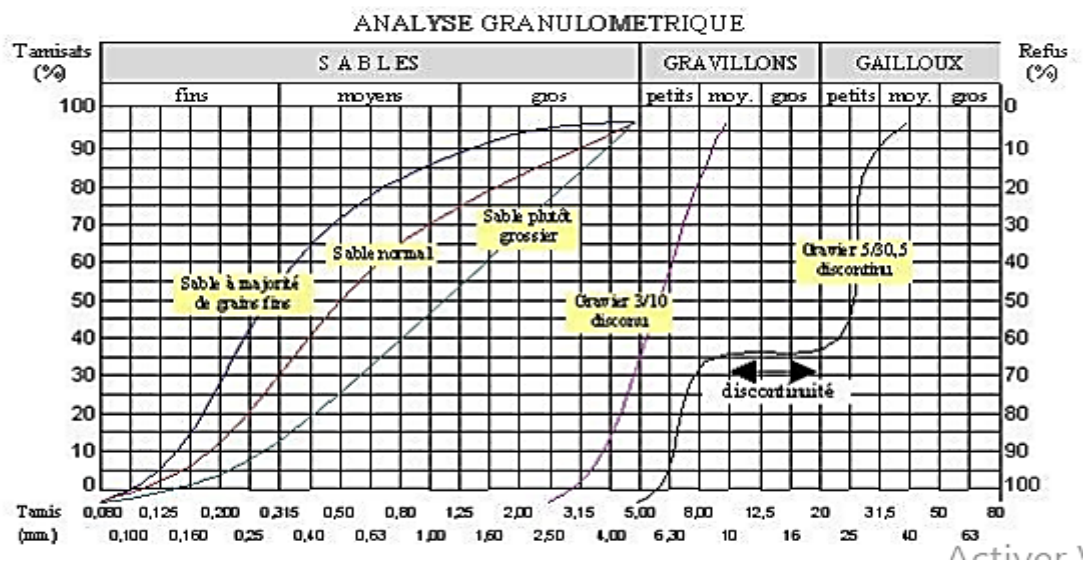


Figure 1 3: courbe granulométrique

1.1.2.1.3 Les différents types de granulats :

1.1.2.1.3.1 Origine minéralogique :

Les granulats naturels (GN), les plus utilisés pour le béton proviennent des roches sédimentaires siliceuses ou calcaires, des roches métamorphiques telle que le quartz et quartzites, ou des roches éruptives telle que les basaltes, les granites, les porphyres.



Figure 1 4: granulats d'origine minéralogique

1.1.2.1.3.2 Granulats roulés et granulats de carrières :

Indépendamment de leur origine minéralogique, on classe les granulats en deux catégories :

- ✓ Les granulats alluvionnaires (roulés), ces granulats sont lavés pour éliminer les particules argileuses nuisibles à la résistance du béton. On trouve les différentes roches selon la région d'origine, les granulats les plus fréquents sont les silico-calcaires.



Figure 1 5: granulats alluvionnaires (roulés)

- ✓ Les granulats de carrières, sont obtenus par abattage et concassage des roches ce qui leur donne une forme angulaire des classes granulaires souhaitées.



Figure 1 6: granulats de carrière

Ces granulats présentent des caractéristiques qui dépendent d'un grand nombre de paramètres : origine de la roche, degrés de concassage... ce type de granulat se fait avec soin et après accord sur l'échantillon.

1.1.2.2 Le ciment :

1.1.2.2.1 Définition :

Le ciment est obtenu par un mélange homogène d'argile et de calcaire, ou d'autres matériaux (des ajouts) contenant de la chaux, de la silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer, cuits à haute température (température de clinkérisation, à 1450 °C) puis broyés. Tous les ciments courants contiennent du clinker Portland (mélange de calcaire et de silice cuits) qui assure la fonction liante. Cependant, En fonction des résistances et de la durabilité souhaitée, on peut envisager d'utiliser des ciments à base d'additifs divers (fumée de silice, cendres volantes, laitiers de haut fourneau...).



Figure 1 7: le ciment

1.1.2.2.2 Types du ciment :

Il existe cinq types de ciment normés « CEM ». Cette désignation caractérise un ciment conforme à la norme européenne EN 197-1. Les ciments CEM sont constitués de différents matériaux et sont de composition statistiquement homogène.

CEM I : désigne un ciment de type « ciment Portland », c'est-à-dire un ciment composé d'un minimum de 95 % de clinker.

CEM II : cette désignation caractérise des ciments dont les plus courants sont le « ciment Portland composé », le « ciment Portland au Calcaire », le « ciment Portland au Laitier » ou le « ciment Portland à la fumée de silice ».

CEM III : sont des ciments du type « ciment de haut fourneau » constitué de clinker et de laitier de haut fourneau, dans des proportions alternatives.

CEM IV : désigne le « ciment pouzzolanique ».

CEM V : désigne le « ciment composé ».

1.1.2.3 L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage est un élément essentiel pour la fabrication du béton. Il est ajouté lors du mélange afin d'hydrater le ciment et permettre de lier les constituants du béton entre eux. L'eau rend également le mélange bien plus maniable, ce qui facilite la mise en œuvre du béton. Élément indispensable pour obtenir du béton, l'eau utilisée doit absolument être propre et ne doit pas être ajoutée avec excès. Si ces deux conditions ne sont pas respectées, le béton risque d'être fragile et ses performances seront altérées.

1.2 Granulats recyclés issus des déchets de la démolition et de la construction

1.2.1 Introduction :

Les granulats recyclés (GR) sont formés du granulat d'origine et du 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 [Fathifazl *et al.*, 2009]. La teneur en mortier résiduel attaché au granulat d'origine a un grand impact sur les propriétés du granulat recyclé (GR) [Etxeberria *et al.*, 2007]. Elle est également une des caractéristiques importantes permettant d'évaluer la qualité d'un granulat recyclé (GR). 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 (GR) et la nouvelle pâte de ciment. La configuration du granulat recyclé (GR) est illustrée sur la Figure suivante.

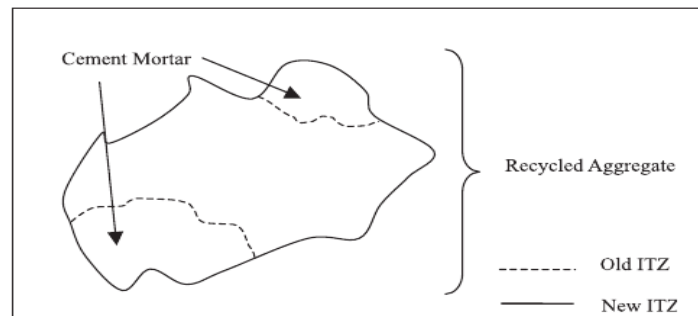


Figure 1 8: schématisation d'un granulat recyclé [Tam et al., 2005]

1.2.2 Composition du granulat recyclé :

Un granulat de béton recyclé (GR) est un matériau composite constitué de deux phases distinctes, la première phase est constituée d'un granulat naturel (GN), et la deuxième est constituée d'une pâte cimentaire généralement adhérente au granulat naturel (GN), tel que cette pâte cimentaire peut enrober le granulat naturel (GN) totalement ou partiellement, alors le taux de chaque phase est en fonction de la composition du béton initial.

La différence entre un granulat naturel (GN) et un granulat recyclé (GR) se présente au niveau de la pâte cimentaire, le granulat naturel (GN) est monophasique, tandis que le granulat recyclé (GR) est bi phasique, les propriétés physiques et mécaniques des (GBR) dépendent essentiellement des propriétés des deux phases (GN) et pâte cimentaire qui constitue le (GBR), la pâte cimentaire adhérente présente une porosité élevée, ce qui modifie les caractéristiques des GBR et les rend différentes de celles des (GN).



Figure 1 9: un granulat recyclé (granulat naturel entouré de mortier adhérent)

1.2.3 Caractéristiques physiques et mécaniques des granulats recyclés

1.2.3.1 Granulométrie :

La granulométrie des éléments fins a été étudiée par l'analyse des particules au laser. Les diamètres des particules sont ainsi obtenus par diffraction (théorie de Fraunhofer). Cette analyse est réalisée sur les éléments de fraction inférieure à 500 μm (réalisée en milieu liquide),

puis à 100 μm (réalisée en milieu sec). L'analyse successive sur les fractions granulaires étudiées permet d'obtenir les proportions d'éléments fins présents dans les granulats.

Cet essai a été réalisé selon la norme [NF EN 933-1], sur les différents lots par tamisage par voie sèche sans lavage. Les granulats recyclés (GR) contenant du mortier tout autour du granulat parent ne sont pas lavés avant l'essai comme préconisé dans la norme. Comme les fines seront conservées dans la formulation des bétons et des mortiers, le lavage engendrerait leur évacuation. De plus, la présence de fines et d'éléments réactifs interdit une hydratation préalable.

1.2.3.2 Masse volumique :

La masse volumique correspond au rapport entre la masse sèche d'un échantillon de granulat et le volume qu'il occupe dans l'eau. En règle générale, la masse volumique du granulat recyclé (GR) est moins grande que celle du granulat naturel (GN) [Chakradhara Rao *et al.*, 2011; de Juan et Gutierrez, 2009; Fathifazl *et al.*, 2009; Padmini *et al.*, 2009; Sagoe-Crentsil *et al.*, 2001]. La littérature à ce sujet indique que la masse volumique des granulats recyclés (GR) se situe généralement entre 2,4 et 2,5 (2400 à 2500 kg/m^3) alors que les granulats naturels (GN) ont généralement une masse volumique de l'ordre de 2,75 (2750 kg/m^3). La masse volumique plus faible du granulat recyclé est causée par la présence du mortier résiduel qui a une masse volumique plus faible que celle du granulat original et diminue par conséquent la masse volumique totale du granulat recyclé [Chakradhara Rao *et al.*, 2011].

1.2.3.3 Absorption :

L'absorption d'eau correspond au rapport entre la masse d'eau absorbée par un échantillon de granulats après immersion dans l'eau et sa masse sèche.

Les études réalisées sur les granulats recyclés (GR) ont relevé des valeurs d'absorption d'eau beaucoup plus grandes pour les granulats recyclés (GR) que les granulats naturels.

Cette propriété est vraisemblablement la plus grande différence entre le granulat recyclé (GR) et le granulat naturel (GN). Les valeurs d'absorption des granulats recyclés (GR) se situent généralement entre 3 et 10% alors que pour un granulat naturel (GN) celles-ci sont souvent de 1%, mais peuvent augmenter jusqu'à une valeur de 5% [Tarn *et al.*, 2008].

La mesure de l'absorption d'un granulat recyclé (GR) est une méthode simple qui peut être utilisée pour évaluer la qualité de celui-ci. Comme l'absorption du granulat est due en grande partie au mortier résiduel, une valeur d'absorption élevée indique la présence d'une grande teneur en mortier résiduel [Tam *et al.*, 2005] et par le fait même, un impact plus important sur

les propriétés du béton préparé avec ce granulat. Cette propriété est particulièrement importante puisqu'elle affecte la quantité d'eau à ajouter au mélange pour une maniabilité donnée. Comme l'absorption du granulat recyclé (GR) est beaucoup plus grande que celle du granulat naturel (GN), la quantité d'eau que celui-ci contient à l'état saturé est largement supérieure. Une rectification de la quantité d'eau ajoutée au mélange est donc nécessaire pour maintenir le même rapport E/L.

Une autre problématique peut se présenter lors de l'utilisation du granulat recyclé (GR) asséché. Comme une plus grande absorption se fait dans les 30 premières minutes pour un granulat recyclé (GR) [Malesev *et al.*, 2010], l'utilisation de ce granulat à l'état sec peut affecter négativement les propriétés rhéologiques du béton frais. Étant donné que les granulats secs absorbent une partie de l'eau présente dans le béton frais, il peut être nécessaire d'ajouter jusqu'à 10 % de l'eau totale pour obtenir le même affaissement. Ceci peut affecter négativement les propriétés mécaniques ainsi que la durabilité du béton [Malesev *et al.*, 2010]. La Figure 10 présente l'absorption d'un granulat recyclé (GR) durant les 30 premières minutes).

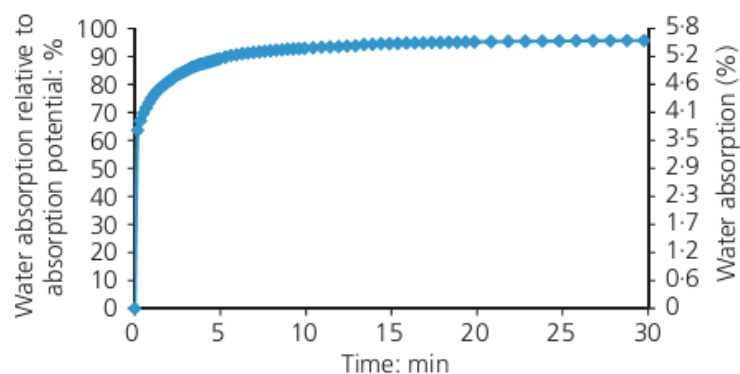


Figure 1 10: absorption des granulats recyclés en fonction de temps

1.2.3.4 Résistance à l'usure :

La résistance à l'usure est l'aptitude d'un matériau à résister aux chocs et aux frottements, elle conditionne très souvent la durée de vie du matériau.

1.2.3.4.1 Essai los Angeles :

L'essai Los Angeles est le plus souvent retenu pour déterminer la résistance aux chocs et à l'abrasion des divers granulats recyclés (GR).

Les recommandations de la norme européenne [NF EN 206/CN, 2014] pour désigner la catégorie de résistance à la fragmentation des granulats recyclés (GR) pour une utilisation dans le béton sont basées sur le coefficient Los Angeles (C_{LA}), réalisé selon la norme [NF EN 1097-

2, 2010] des granulats naturels (GN). En général, la valeur du coefficient Los Angeles mesurée sur les matériaux de construction recyclés (CR) est comprise entre 20 et 40. Elle est donc légèrement supérieure aux valeurs typiques des granulats naturels (GN). C'est la teneur en mortier des (GR) qui explique cette différence [Zega et al., 2010]. Il a été également remarqué que les deux types de granulats naturel (GN) et de (GR), présentent une augmentation presque identique de leur (C_{LA}), lorsque leur masse volumique diminue, avec un taux de variation très proche.



Figure 1 11: machine Los Angeles

1.2.4 Conclusion

Les granulats recyclés (GR) présentent une plus grande absorption d'eau et une plus faible masse volumique par rapport aux granulats naturel (GN) ce qui modifie sensiblement les caractéristiques physiques et mécaniques des granulats recyclés (GR).

1.3 Béton recyclé

1.3.1 Introduction :

Le béton recyclé (BR) est un béton à base de granulats issus de la récupération des déchets. Jusqu'à présent les (GR) sont surtout utilisés dans le secteur du (BTP), en remblais dans les projets de drainage ou comme matériaux de base dans la construction routière, la réutilisation de (GR) pour produire de nouveaux béton n'a pas encore été largement adoptée, cela est lié aux caractéristiques présentées par le béton recyclé (GR).



Figure 1 12: béton recyclé

1.3.2 Caractéristique physiques du béton recyclés :

1.3.2.1 Absorption :

L'absorption d'eau pour le béton recyclé (GR) est plus élevée que celle du béton ordinaire, le pourcentage d'absorption augmente quand le pourcentage de substitution en granulats recyclés (GR) augmente, les valeurs élevées d'absorption d'eau sont une indication propre de la porosité et de la perméabilité élevée de ce type de béton et par conséquent, de l'effet négatif de l'emploi de ces granulats sur la durabilité des bétons.

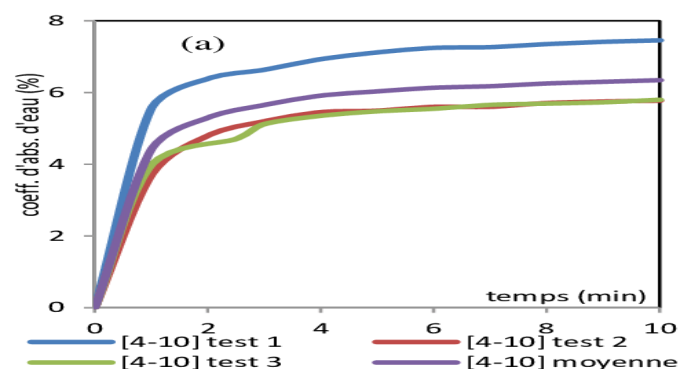


Figure 1 13: absorption de béton recyclé

1.3.2.2 Ondes ultra son :

C'est un essai non destructif qui permet de détecter à la fois plusieurs caractéristiques du béton durci, tels que : le degré de compacité, l'homogénéité, la résistance à la compression, le taux de fissuration... etc. Cet essai permet de contrôler la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression) laquelle est d'autant plus élevée que le béton est plus dense donc plus résistant. Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde à parcourir une distance connue.

1.3.3 Caractéristiques mécaniques**1.3.3.1 Traction :**

La résistance à la traction des bétons est une autre propriété importante pour évaluer la qualité des bétons. On mesure celle-ci par l'essai de résistance à la traction indirecte aussi appelée essai brésilien ou par fendage. Bien que les bétons ne soient généralement pas conçus pour résister à la traction directe, connaître la résistance à la traction permet d'estimer la charge sous laquelle la fissuration se développe [Fathifazl, 2007]. Il semble généralement que la baisse de résistance associée au remplacement du granulats naturels (GN) par un granulats recyclés (GR) dans le béton soit de 10% [Kou *et al.*, 2011], 10 à 15% dans le cas de [Tabsh et Abdelfatah, 2009].

Comme plusieurs autres propriétés du béton, on observe que la résistance à la traction du béton diminue lorsque le taux de remplacement des granulats naturels (GN) par des granulats recyclés (GR) augmente [Chakradhara Rao *et al.*, 2011 ; Kou *et al.*, 2007 ; Kou *et al.*, 2008 ; Rao *et al.*, 2007]. [Yang] a aussi trouvé qu'en plus de varier en fonction du taux de remplacement du granulats naturels (GN), la résistance à la traction diminue quand la porosité augmente. Dans cette étude, l'impact du remplacement de deux granulats recyclés (GR) à porosité différentes a été évalué. Il a été observé que la résistance à la traction était moins grande pour le béton utilisant un granulats recyclés (GR) très poreux que pour un granulats recyclés (GR) peu poreux [Yang *et al.*, 2008]. Selon, [Abd Elhakam *et al.*, 2012], le remplacement d'un granulats naturels (GN) par un granulats recyclés (GR) aurait un plus grand impact négatif sur la résistance à la traction des bétons recyclés (GR) que sur la résistance à la compression.



Figure 1 14: échantillons de béton recyclé

1.3.3.2 Flexion :

La résistance à la flexion des bétons est une propriété importante pour évaluer la qualité des bétons.

Dans plusieurs études, il a été rapporté que l'addition des GR dans le béton ne réduisait pas autant la résistance à la flexion par rapport à la résistance à la compression. La variation de la résistance à la flexion entre le béton de référence et le béton contenant des GR était négligeable dans certaines études et inférieure à 30% dans d'autres selon les variations de différents facteurs tels que la quantité de remplacement, origine et qualité de l'agrégat recyclé.

[Safiuddin et al. (2011)] n'ont pas observé de différences significatives de résistance à la flexion à 28 jours du béton de référence et celle du béton de GR. La résistance augmentait avec le temps de durcissement comme dans le béton de référence.

[Yang et al. (2011)] ont observé une réduction de 7.5 à 13.8% de la résistance à la flexion due au remplacement de 100% du GN par les GBR à divers âges. Au même taux de substitution, [Casuccio et al. (2008)] ont observé une réduction de 5 à 21% de la résistance à la flexion à 28 jours.

[Takavoli et Soroushian (1996)] ont observé une résistance à la flexion plus élevée pour le béton de GBR en utilisant des GBR de taille plus petite que pour un béton de GBR de taille plus grande, et dans certains cas la résistance à la flexion était plus élevée que celle du béton de référence.



Figure 1 15: poutre de flexion

1.3.3.3 Compression :

La résistance à la compression d'un béton est un des paramètres fondamentaux employés pour évaluer la qualité d'un béton. La résistance à la compression est souvent considérée comme la propriété la plus importante du béton pour plusieurs raisons [Fathifazl, 2007] :

- La résistance à la compression est généralement un bon indicateur de la qualité du béton, car elle est directement reliée aux propriétés de la pâte de ciment hydratée.
- La résistance à la compression est un élément essentiel de la conception structural et est généralement requise pour assurer la conformité.
- Plusieurs autres propriétés du béton, telle la résistance en tension, à la flexion et le module d'élasticité, sont directement reliés à la résistance à la compression.

Cette propriété est aussi la plus étudiée dans le cas des bétons incorporant des granulats recyclés. On définit celle-ci comme la contrainte maximale que peut subir une éprouvette de béton avant sa rupture. L'impact du remplacement du granulat naturel par un granulat recyclé (GR) sur la résistance à la compression du béton est, comme pour les autres propriétés du béton, fonction du taux de remplacement.

Il est généralement reconnu que pour une formulation traditionnelle du béton et un taux de remplacement de 100 % du granulat naturel (GN), on observe une diminution de la résistance à la compression. Plusieurs chercheurs ont trouvé une diminution de 10 % de la résistance à l'âge de 28 jours du béton dans ce cas [de Oliveira et Vazquez, 1996 ; Rahal, 2007]. Des résultats divergeant sont, par contre, présentés dans d'autres études. Par exemple, selon les résultats de Etxeberria, la résistance à 28 jours serait de 20 à 25% plus faible [Etxeberria *et al.*, 2007], de 33% et 23% selon [Topcu et Sengel, 2004], de 22% selon [Kou *et al.*, 2011], de 20 à 30% selon [Martinez-Lage *et al.*, 2012] alors que selon Sagoe-Crentsil la résistance à 28 jours

serait la même que pour le béton témoin. Il est, cependant, à noter que dans le cas de l'étude de [Sagoe-Crentsil *et al.*, 2001], un rapport E/C très élevé (0,7) a été utilisé. Ces résultats divers peuvent être expliqués par le fait que le taux de remplacement du granulat naturel (GN) par un granulat recyclé (GR) n'est qu'un des multiples facteurs affectant la résistance à la compression des bétons à granulats recyclés (GR).

1.3.3.4 Module de Young :

Le module d'élasticité ou module de Young est normalement représenté par la pente de la section linéaire de la courbe contrainte/déformation. Les facteurs les plus importants affectant le module d'élasticité sont la teneur en mortier résiduel, le rapport E/C et la teneur en air entraînée [Abbas, 2007]. La plupart des études effectuées sur ce sujet rapportent que le module d'élasticité diminue lorsque le taux de remplacement du granulat vierge par un granulat recyclé augmente [Chakradhara Rao *et al.*, 2011 ; Kou *et al.*, 2007 ; Lopez-Gayarre *et al.*, 2009 ; Malesev *et al.*, 2010 ; Martinez-Lage *et al.*, 2012]. Pour un taux de remplacement du granulat de 100%, on observe des chutes variant de 28 % du module d'élasticité [Kou *et al.*, 2007], de 35% [Chakradhara Rao *et al.*, 2011; Rao *et al.*, 2007] de 30 à 40% [Martinez-Lage *et al.*, 2012] et de 44% [Baofan, 2013]. L'impact sur le module d'élasticité est donc moins grand pour un taux de remplacement plus bas. L'impact d'un bas taux de remplacement sur le module d'élasticité n'est pas le même pour toutes les études sur le sujet. Selon Lopez-Gayarre, il n'y a pas d'impact sur le module d'élasticité pour un taux de remplacement inférieur à 50% alors que selon Corinaldesi, la différence avec le béton témoin est de 15% pour un taux de remplacement de 30% [Corinaldesi, 2010]. Une étude de Rahal présente par contre des résultats divergents. Selon cette étude [Rahal, 2007], on observe une perte de seulement 3% au niveau du module d'élasticité pour un béton recyclé de rapport E/C de 0,55 et de résistance entre 25 et 30 MPa. Finalement, selon Yang *et al.*; le module d'élasticité diminue lorsque l'absorption du granulat recyclé utilisé augmente [Yang *et al.*, 2008].

1.3.4 Conclusion :

Le béton recyclé (BR) est en moyenne moins résistant, plus absorbant que le béton ordinaire.

D'une manière générale, les caractéristiques du béton à base de granulats recyclés (GR) sont certes plus faibles que celles d'un béton ordinaire.

2.1 Introduction :

L'objectif de ce chapitre est de bien d'écrire et de représenter les différentes étapes et manipulations réalisées au laboratoire, à savoir la caractérisation physique et mécanique des granulats naturels et recyclés utilisés dans la fabrication du béton, en effectuant plusieurs tests d'identification comme l'analyse granulométrique, l'essai Los Angeles, et aussi la détermination de la densité et l'absorption des granulats naturels et recyclés. Le béton confectionné dans notre étude est du type ordinaire qui sera utilisé dans le domaine du génie civil, ou la résistance visée à l'âge de 28 jours est de 25 Mpa, pour la formulation du béton on utilise la méthode de Dreux Gorisse pour déterminer la quantité des différents composants nécessaires pour 1m³ de béton.

Le béton confectionné est testé à l'état frais et à l'état durci, à l'état frais, l'essai au cône d'Abrams mesure la consistance et la maniabilité du béton, et à l'état durci, l'essai ultrason détermine la compacité du matériau, les essais destructifs à l'état durci, comme l'essai en compression, donne la résistance maximale en compression du béton ainsi que son comportement, et la même chose pour le teste de flexion à quatre pointes.

Dans cette étude, cinq échantillons de béton ont été préparés, le premier est un béton naturel BN préparé uniquement avec des granulats naturels, les quatre autres échantillons sont des bétons recyclés BR, dans lesquels les granulats naturels sont substitués par des granulats recyclés avec différents taux de remplacement (25%, 50%, 75%, 100%).

2.2 Matériaux du béton :

Pour la confection du béton, on a utilisé des granulats naturels GN et des granulats recyclés GR, et un liant hydraulique (ciment CEM II).

2.2.1 Le liant hydraulique :

Le ciment utilisé dans cette étude est produit par l'entreprise LAFARGE du type CPJ-CEM II/B 42,5 N, est aussi conforme à la norme Algérienne (NA) et européenne (EN 197-1), sa finesse suivant la méthode de Blaine est de 3700-5200 g/cm², et ça masse volumique est de 3130 Kg/m³.

Tableau 2 1: Composition chimique de ciment.

Composant	Pourcentage (%)
C ₃ S	62
C ₂ S	22
C ₃ A	8.2
C ₄ AF	13

2.2.2 Les granulats :

Dans notre étude deux types de granulats ont été utilisés, des granulats naturels GN et des granulats recyclés GR.

- Granulats naturels (GN) : Ce type de granulats sont fournis par une carrière et sont issus du concassage des roches de carrières, ils sont devisés en trois classes granulaires :
 1. Sable (0/3mm).
 2. Gravier (3/8mm).
 3. Gravier (8/15mm).
- Granulats recyclés (GR) : ce type des granulats est issu du concassage et broyage des éprouvettes de béton et aussi de déchets de démolitions des vieilles maisons, tel que le concassage et le broyage ont été effectués au niveau d'une carrière locale, et sont devisés en deux classes granulaires.
 1. Gravier (3/8mm)
 2. Gravier (8/15mm)



Figure 2 1: déchets de démolition des vieilles maisons et éprouvettes de laboratoire

Pour l'identification et la caractérisation des propriétés physiques et mécaniques des granulats naturels et recyclés, plusieurs essais ont été réalisés au niveau du laboratoire.

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer la distribution en poids des particules d'un matériau suivant leurs dimensions (NF P 18-560), les figures suivantes montrent l'analyse granulométrique des granulats naturels et recyclés.

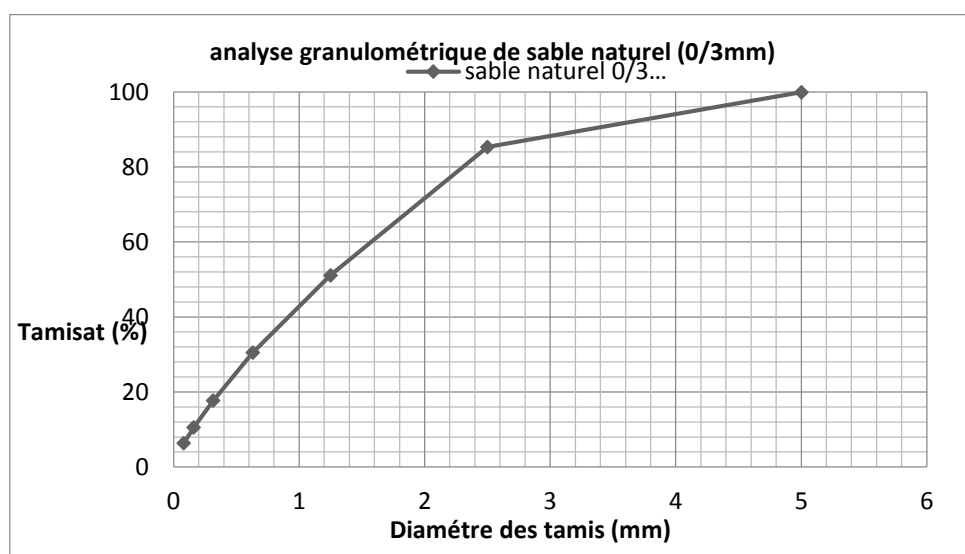


Figure 2 2: courbe granulométrique de sable (0/3mm)

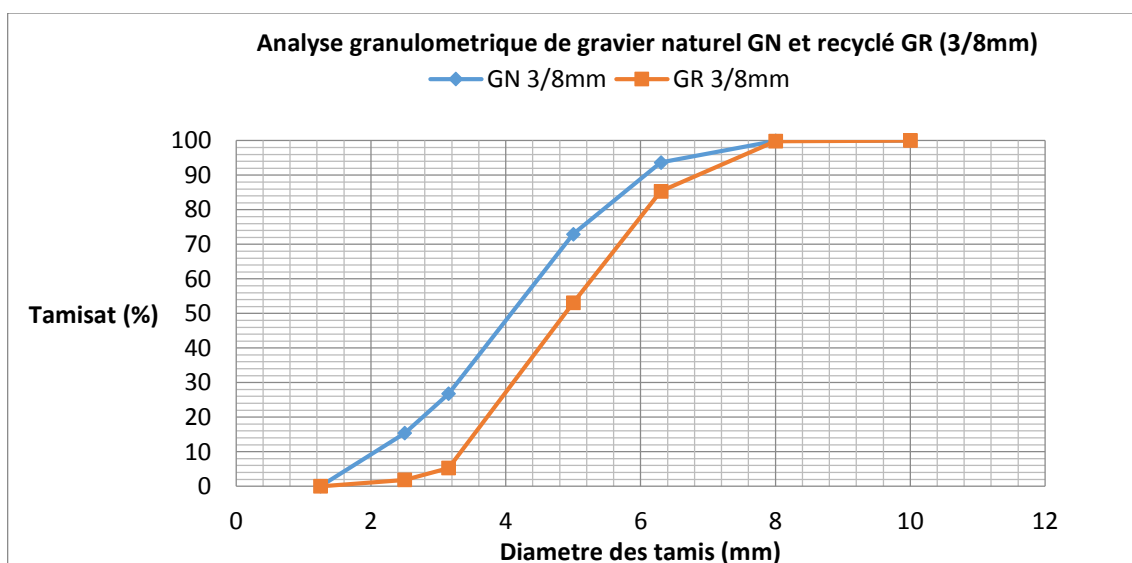


Figure 2 3: courbe granulométrique de gravier naturel et recyclé (3/8mm)

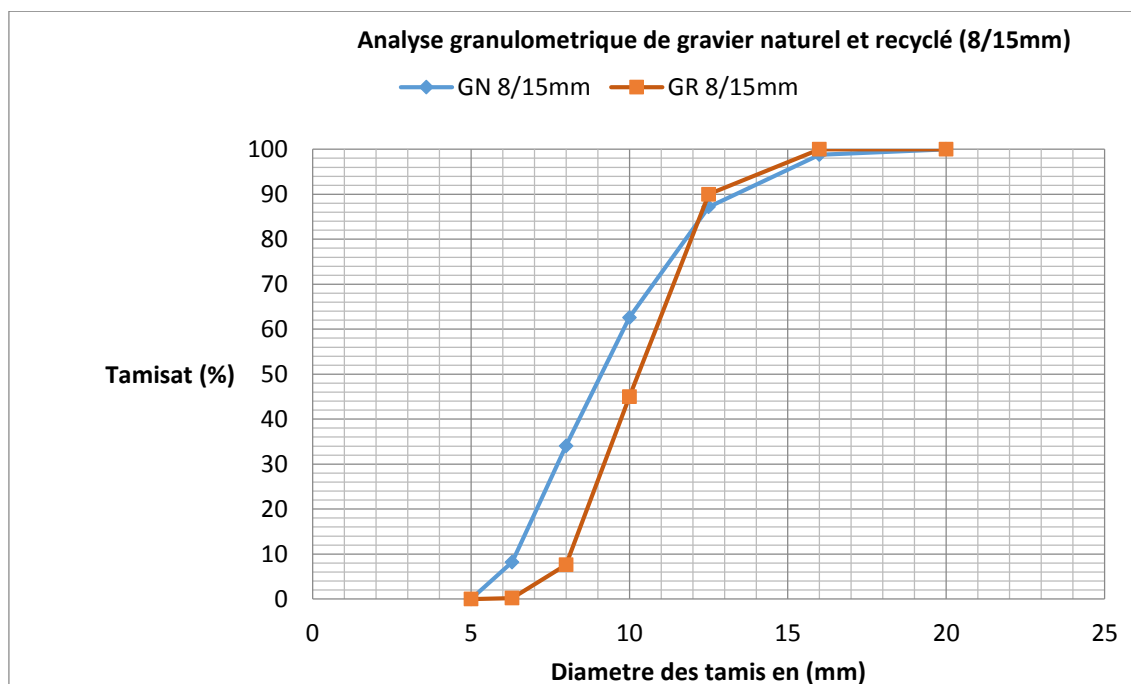


Figure 2 4: courbe granulométrique de gravier naturel GN et recyclé GR (8/15mm)

Les figures 2 3 et 2 4, montrent l'analyse granulométrique du gravier naturel GN et du gravier recyclé GR, de fraction (3/8mm) et (8/15mm), on remarque un léger écart en pourcentage de tamisât de chaque tamis entre le gravier naturel et le gravier recyclé.

Les propriétés mécaniques et physiques des granulats naturels GN et des granulats recyclés GR sont bien montrées dans le tableau suivant (la masse volumique absolue, la masse volumique apparente, l'absorption, coefficient Los Angeles, module de finesse).

Tableau 2 2: Propriétés des granulats naturels (GN) et des granulats recyclés (GR).

	Granulats naturels (GN)			Granulats recyclés (GR)	
	0/3mm	3/8mm	8/15mm	3/8mm	8/15mm
M-V apparente (Kg/m³)	1680	1486	1481	1212	1258
M-V absolue (Kg/m³)	2670	2565	2565	2521	2521
Absorption (%)	2.87	1.42	0.89	5.5	4.95
C_{LA} (%)	/	30.49	33.24	30.1	34.74
Module de finesse	3.05	/	/	/	/

D'après le Tableau 2 2, la masse volumique apparente et absolue des granulats recyclés est inférieure à celle des granulats naturels, l'absorption des GN (3/8mm) et GN (8/15mm) est de 1,42% et 0,89%, et l'absorption des GR (3/8mm) et GR (8/15mm) est de 5,5% et 4,95%, on remarque que l'absorption des granulats recyclés représente cinq fois l'absorption des granulats naturels, la diminution du poids et l'augmentation de l'absorption des granulats recyclés sont attribuées directement à la pâte cimentaire attachée autour de granulat d'origine, cette pâte cimentaire présente des propriétés différentes que celles de granulats qu'il entoure, elle contient des vides et des pores qui font réduire le poids d'une part, et d'autre part augmentent la capacité d'absorption.

Le coefficient Los Angeles (C_{LA}) de gravier recyclé (8/15mm) est supérieur à celui de gravier naturel (8/15mm) de 4.4%, et c'est attribué à la pâte cimentaire attachée au granulat recyclé qui présente une faible résistance à l'usure, tandis que le (C_{LA}) du gravier naturel (3/8mm) et le (C_{LA}) de gravier recyclé (3/8mm) présentent une légère différence, alors leur résistance à la fragmentation est presque la même.

2.2.3 Eau de gâchage :

L'eau utilisée est l'eau disponible au niveau du laboratoire qui est une eau de robinet potable.

2.3 Confection de béton au laboratoire :

2.3.1 Formulation du béton :

L'objectif de cette méthode est de déterminer en fonction de la maniabilité et de la résistance, la nature et la quantité des matériaux nécessaires pour la confection d'un mètre cube ($1m^3$) de béton (eau, ciment, sable, gravier en kg / m^3). Le béton confectionné est un béton plastique qui aura une résistance de 25 MPa à l'âge de 28 jours, et qui sera utilisé dans le domaine du génie civil.

Tableau 2 3: Formulations des échantillons.

Matériau	BN	BR25	BR50	BR75
Ciment (kg)	400	400	400	400
Eau (kg)	228	228	228	228
SN (0/3) (kg)	616,77	616,77	616,77	616,77
GN (3/8) (kg)	169,29	126,9675	84,645	42,32
GR (3/8) (kg)	0	41,5965	83,193	124,8
GN (8/15) (kg)	1049,6	787,19	524,799	262,4
GR (8/15) (kg)	0	249,8166	499,6332	749,45

2.3.2 Fabrication du béton :

Pour avoir des matériaux propres, démunis de toutes impuretés, les graviers ont été lavés puis séchés dans une étuve pendant 24H à une température de 105 °C. Dans ce travail cinq échantillons de béton ont été réalisés comme il est bien montré dans le tableau 2.3.

- BN : Béton naturel, préparé uniquement avec des granulats naturels, et sert comme référence pour notre étude.
- BR25 : Béton recyclé, ou 25% des granulats naturels GN sont remplacés par des granulats recyclés GR.
- BR50 : Béton recyclé, ou 50% des granulats naturels GN sont remplacés par des granulats recyclés GR.
- BR75 : Béton recyclé, ou 75% des granulats naturels GN sont remplacés par des granulats recyclés GR.

Les moules utilisés pour confectionner les différentes éprouvettes ont été huilés afin de faciliter le décoffrage, tous les échantillons ont été préparés dans les mêmes conditions, en suivant les étapes ci-dessous :

1. Préparation des matériaux (eau, ciment, sable, gravier)
2. Humidifier les parois du malaxeur
3. Mettre les matériaux dans le malaxeur en commençant de plus gros diamètres au plus petit
4. Malaxer les matériaux à l'état sèche pendant 30 secondes

5. Ajouter 10% d'eau du gâchage et malaxer pendant 30 secondes
6. Ajouter le reste d'eau du gâchage et malaxer pendant 1 minute et 30 secondes



Figure 2 5: Matériaux du béton

2.4 Géométrie et conservation des éprouvettes :

Les éprouvettes utilisées pour les essais de compression sont cylindriques, de diamètre $D=16\text{cm}$ et de hauteur $H=32\text{cm}$, et les éprouvettes utilisées pour les essais de flexion quatre points sont de forme prismatique, de largeur de $B=8\text{cm}$ (éprouvettes modifiées) et une hauteur de $H=10\text{cm}$ et d'une longueur $L=40\text{cm}$, selon la norme NF EN 12390-5, pour le teste de flexion à quatre points, deux séries de poutres ont été préparées, la première est avec une entaille d'épaisseur $e=3\text{mm}$ et d'une hauteur $h=4\text{cm}$, tandis que la deuxième série ne possède aucune entaille. Les éprouvettes sont coulées dans des moules en acier, et conservées au laboratoire à une température de 25°C pendant 24 heures, après décoffrage, les éprouvettes sont conservées dans l'eau jusqu'au jour du teste qui est l'âge de 28 jours.



Figure 2 6: conservation des éprouvettes

2.5 Essai sur le béton frais :

L'essai que nous avons réalisé qui nous permet de mesurer l'ouvrabilité du béton est l'essai d'affaissement au cône d'Abrams selon la norme NF P 18-451

2.5.1 Affaissement au cône d'Abrams :

Pour réaliser cet essai une plaque et un cône d'Abrams sont utilisés :

- La plaque est en acier et a une surface dure et non-absorbante ;
- Le cône d'Abrams est un cône en acier galvanisé. Il a un diamètre intérieur à sa base de 200 mm, un diamètre intérieur à son sommet de 100 mm et une hauteur de 300 mm². Il porte le nom de son inventeur Duff Abrams.
- Une tige d'acier lisse de diamètre 16 mm et à extrémité arrondie.

L'essai se déroule en suivant les étapes suivantes :

- Le cône d'Abrams est placé puis fixé sur la plaque ;
- Le cône est rempli avec du béton frais en trois fois. À chaque fois, chaque couche est piquée par 25 coups à l'aide de la tige ;
- Le cône est arasé avec une tige ;
- Le cône est levé immédiatement, verticalement et doucement en le tournant un peu pour le démouler ;
- L'affaissement du béton frais est mesuré.

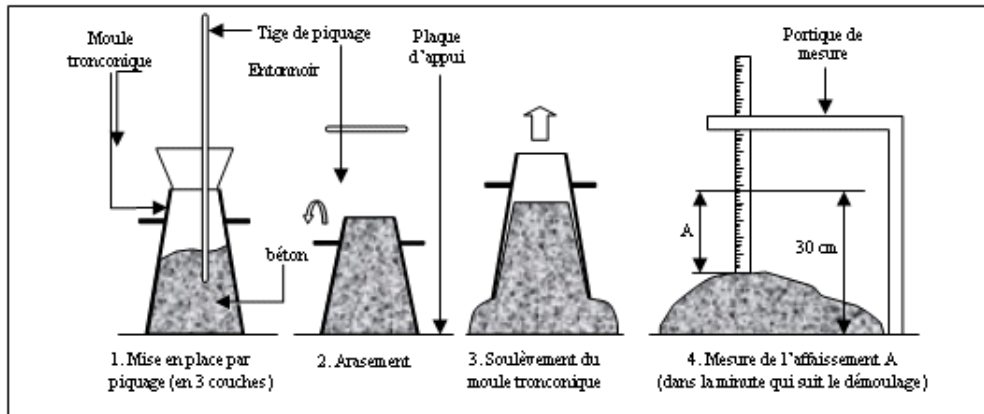


Figure 2 7: Description d'essai d'affaissement de cône d'abrams



Figure 2 8: Mesure d'affaissement

Affaissement de béton 100% naturel : « 8.5cm », dosage=400Kg/m³

Affaissement de béton 25% recyclé : « 7cm », dosage=400Kg/m³

Affaissement de béton 50% recyclé : « 5cm », dosage=400Kg/m³

Affaissement de béton 75% recyclé : « 3.5cm », dosage=400Kg/m³

2.6 Essai sur le béton durci :

Les essais sur le béton durci sont réalisés sur base de la norme (NBN EN 196-1) et sont de deux natures : un essai à la flexion en 4 points et un essai de compression.

Ces deux tests sont effectués au moyen d'une presse hydraulique sur des mortiers âgés de 28 jours au moyen de dispositif spécifique à chaque essai. Les éprouvettes de mortier utilisées pour ces tests destructifs sont maintenues dans la chambre humide (90 % d'humidité relative et une température de 20 ± 1 C°) entre le démoulage et le jour auquel les tests sont réalisés.

2.6.1 Essai non destructif :

La méthode des ultrasons consiste à mesurer le temps de déplacement d'une impulsion ultrasonique traversant le béton à tester. Le temps de déplacement de l'onde entre l'émetteur et le récepteur est mesuré électroniquement. La longueur du trajet entre les transducteurs divisés par le temps de déplacement donne la vitesse moyenne de propagation des ondes.

Trois mesures sont prises au centre des surfaces latérales de chaque cylindre, dans une direction perpendiculaire à la surface du béton comme montré sur la Figure 2.8. Pour assurer un couplage acoustique entre les transducteurs et la surface à tester une fine couche de couplant est appliquée sur le transducteur et sur la surface.



Figure 2.9: Mesure de vitesse de propagation des ondes ultrasonique

2.6.2 Essai destructif :**2.6.2.1 Essai de compression :**

Un essai de compression est réalisé sur des éprouvettes cylindriques afin de déterminer la résistance à la compression moyenne du matériau, ainsi que son module d'élasticité longitudinal, ou module d'Young moyen.

Cet essai consiste à appliquer une contrainte de compression sur les éprouvettes cylindriques posées verticalement (figure 2.9). Les éprouvettes sont au préalable surfacées afin que le contact avec les plateaux de la presse engendre le moins de frottements possible. L'objectif est d'appliquer une contrainte homogène dans toute la section durant l'essai. Le risque de voir apparaître des concentrations de contraintes, pouvant causer une rupture prématurée de l'éprouvette, est ainsi limité. Le surfacage permet ainsi d'assurer la reproductivité et la fiabilité de l'essai et surtout de diminuer l'effet de frottement. Cet effet est dû à la diminution de l'effet de Poisson due aux frottements entre les plateaux de la presse et l'éprouvette. Les parties en contact

se retrouvent ainsi en tri-compression, or une éprouvette en béton résistera mieux à une sollicitation en tri-compression qu'en compression uni axiale. L'objectif étant ici d'estimer la résistance à la compression unie axiale, il faut logiquement essayer de diminuer au maximum ce biais.



Figure 2 10: Essai de compression uni axial

2.6.2.2 Essai de flexion quatre points sur des poutres avec entaille et sans entaille :

L'essai de flexion consiste à déformer une éprouvette rectangulaire reposant sur deux appuis [Redjel, (1987)] et [Richards., al 1965]. Concernant la flexion quatre points le montage couramment utilisé consiste à transmettre les charges par l'intermédiaire d'une poutre de charge reposant sur deux galets sur la partie supérieure de l'éprouvette. C'est le cas des poutres et du chargement définis sur la figure 2 11.

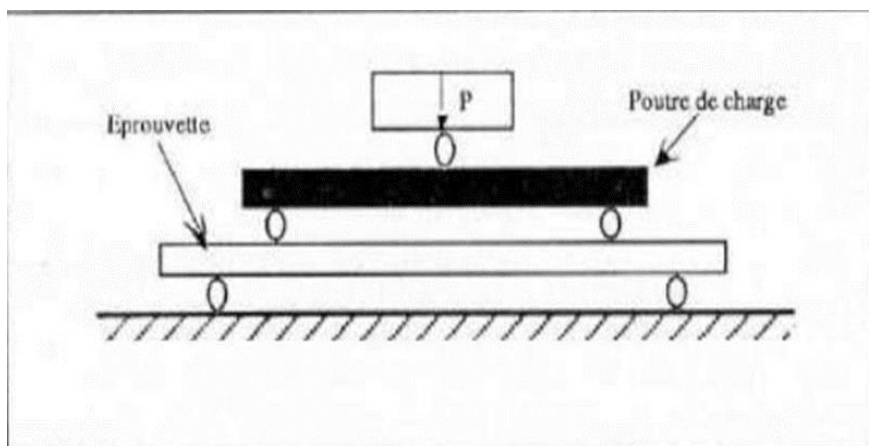


Figure 2 11: Montage de flexion à 4 point

Dans cet essai, deux types de cubes prismatiques (80 mm x 100 mm x 400 mm) (poutres avec entailles et sans entailles) selon la norme [NF EN 12390-5], ont été utilisés à l'âge de 28 jours.

La charge est appliquée à une vitesse constante jusqu'à la rupture de l'éprouvette en deux prisme.

- **Poutres avec entaille :**

C'est des poutres réalisées avec un entaille à mi- portée. La réalisation d'une entaille dans la poutre induit un changement soudain de la section transversale, qui influence significativement l'état de contrainte et peut entraîner une réduction, considérable de la résistance. Cette entaille est réalisée afin de localiser la zone de rupture.

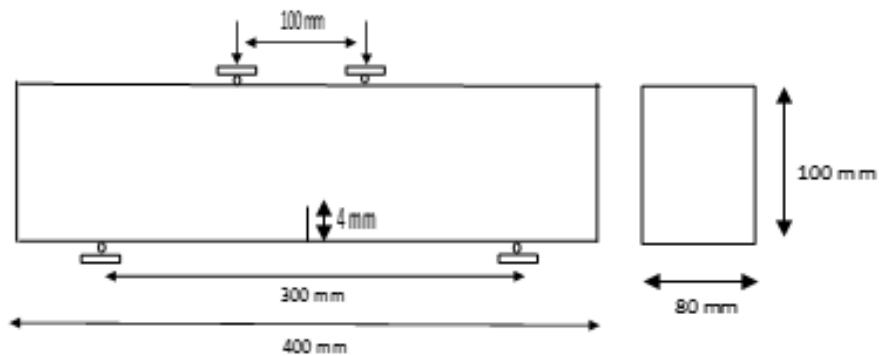


Figure 2 12: Géométrie des poutres avec entaille.

- **Poutres sans entaille :**

C'est des cubes prismatiques réalisés sans défaut, comme montré dans la figure ci-dessous :

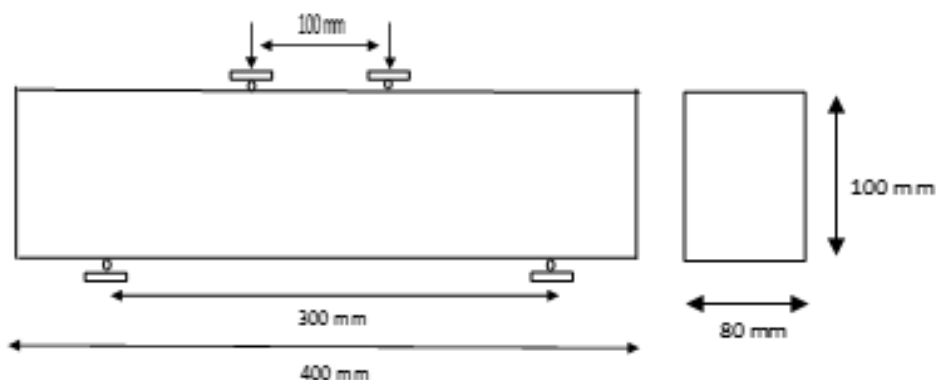


Figure 2 13: Géométrie des poutres sans entaille



Figure 2 14: dispositif d'essai de flexion quatre points

2.7 Conclusion :

L'étude expérimentale présentée dans ce chapitre porte sur les propriétés physiques et mécaniques des béton recyclés (la résistance à la compression et à la flexion, le module de Young, Vitesse Ondes Ultrasonique). Les granulats recyclés (GR) ont montré des masses volumiques inférieures et une absorption d'eau plus élevée par rapport au granulat naturel (GN). L'absorption d'eau élevée est due à la présence du mortier adhérent à la surface du granulat naturel (GN), qui présente une structure poreuse. En outre, le granulat recyclé (GR) contient des fissures en raison du processus de concassage.

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, les résultats de la recherche expérimentale sont présentés et analysés.

Les résultats présentés sont les résultats des propriétés à l'état frais (affaissement) et les propriétés à l'état durci telles que les résistances à la compression et à la flexion ainsi que la densité des GN et les GR dans le béton.

Ensuite, une technique ultrasonique pour estimer la porosité et la connectivité des pores dans ces bétons est présentée, cette méthode est basée sur l'analyse des vitesses des ondes ultrasoniques en fonction des porosités de ces bétons.

Enfin, une analyse pour les propriétés de résistance et de durabilité est effectuée.

3.2 Résultats et discussion :

3.2.1 Béton à l'état frais :

L'affaissement peut prendre différentes formes :

- Un effondrement complet du béton ;
- Un affaissement par cisaillement, la partie supérieure du béton cisaille et glisse latéralement ;
- Un véritable affaissement, le béton s'abaisse simplement, en gardant plus ou moins de forme.

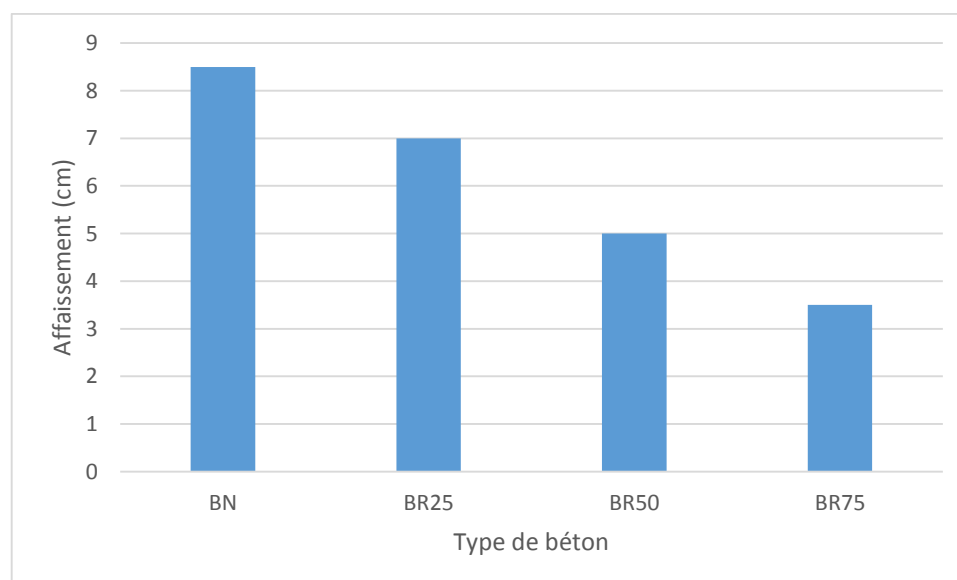


Figure 3 1: affaissement au cône d'abrams

3.2.2 Résultats de la compression :

Cette résistance mécanique calculée à la compression est une caractéristique essentielle du matériau béton. Par conséquent, sa détermination a été suivie pour toutes les compositions de béton étudiées dans ce projet voir la figure 3.2

Cette résistance mécanique a été calculée à l'âge de 28 jours par une moyenne des résistances d'une série de trois échantillons cylindriques 16x32cm.

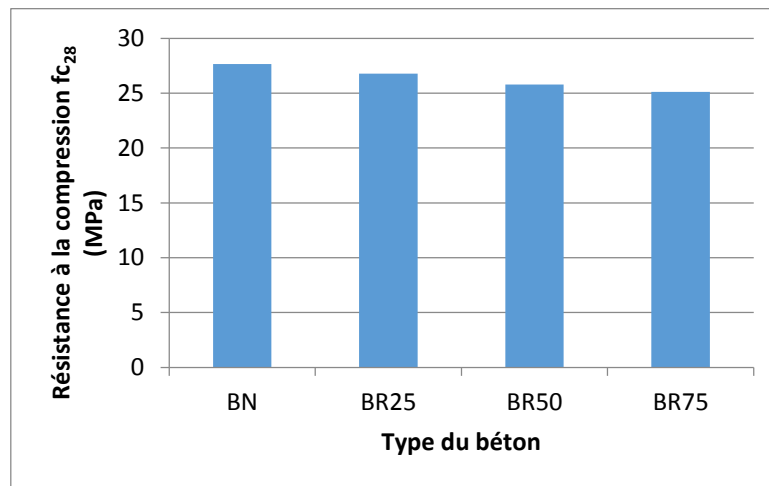


Figure 3 2: Résultats de la compression

La figure 3.3 montre la courbe contrainte-déformation de tous les échantillons, le comportement est déterminé par l'essai de compression uni axial, d'après cette figure les courbes de comportement présentent trois parties, la première est la partie linéaire et la deuxième est la partie non linéaire de la branche ascendante, et la troisième partie représente la branche descendante, on remarque que la courbe de comportement du béton change avec l'incorporation des granulats recyclés (GR), où on constate une influence des granulats recyclés (GR) sur le béton recyclé, on observe que l'augmentation du taux de remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés induit une réduction du module élastique initial (la tangente), et aussi une réduction de la contrainte au pic, on remarque aussi que l'augmentation du taux de remplacement fait augmenter la déformation au pic, et aussi la courbure de la phase post-pic du béton recyclé présente un aplatissement par rapport à celle du béton naturel (BN), cela peut être justifié par la diminution de la résistance du béton lorsque on remplace les granulats naturels par des granulats recyclés (GR), ainsi que la diminution du module élastique du béton recyclé, aussi la présence d'interfaces entre le nouveau mortier-granat naturel (GN), ancien mortier-granat d'origine, ancien mortier-nouveau mortier induit le développement des microfissures au niveau de ces interfaces.

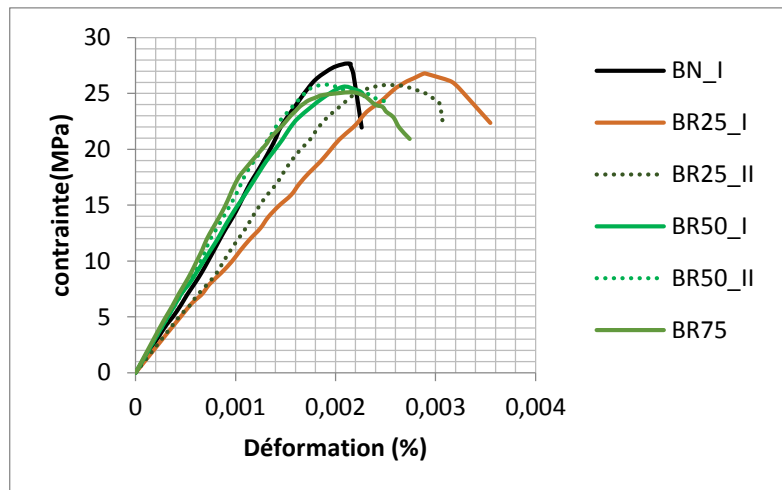


Figure 3 3: courbe contrainte déformation

Les images présentées en figure 3 4 et figure 3 5 présentent les échantillons du béton à la fin de l'essai de compression, au niveau du béton naturel (BN) on observe des fissures principales qui traversent le long du cylindre et aussi des fissures fines, toutes les fissures sont verticales et parallèles à la charge de compression, et la partie supérieure de l'échantillon ne présente aucun endommagement. Le béton recyclé BR25 dont 25% des granulats naturels sont substitués par des granulats recyclés (GR), les fissures sont légèrement influencées par la présence des (GR), dont on remarque une petite augmentation de l'ouverture des fissures principales, et aussi de leur nombre, et des fissures fines apparaissent au niveau de la partie supérieure de l'échantillon. Au niveau des échantillons BR50 et BR75, l'ouverture des fissures est très remarquable, et des fissures horizontales perpendiculaires au sens du chargement commencent à apparaître, et des fissures sont développées dans la partie supérieure de l'échantillon.

On conclut que l'incorporation des granulats recyclés induit un changement au niveau de la propagation des fissures, les bétons recyclés (BR) développent des fissures superficielles différentes à celles du béton naturel (BN), ceci peut être expliqué par le chemin que les fissures suivent, au niveau du béton naturel (BN), les fissures passent généralement par les zones faibles qui sont l'interface entre granulat naturel-nouveau mortier, mais au niveau du béton recyclés les fissures peuvent se développer dans trois interfaces, granulat naturel-nouveau mortier, ancien mortier-nouveau mortier, granulat d'origine-ancien mortier.



BN

BR25

BR50

BR75

Figure 3 4 : Propagation des fissures suivant le sens de compression.



BN

BR25

BR50

BR75

Figure 3 5: Propagation des fissures dans la face supérieure des échantillons.

3.2.3 Résultats de la flexion :

Les essais des résistances à la flexion ont été effectués selon la norme [NF EN 12390-5]. Deux prismes de poutre en béton (80 mm x 100 mm x 400mm) ont été utilisés poutres sans entaille et poutres avec entaille voire la figure 3 6

Les valeurs de la résistance à la flexion sont obtenues à l'âge de 28 jours.

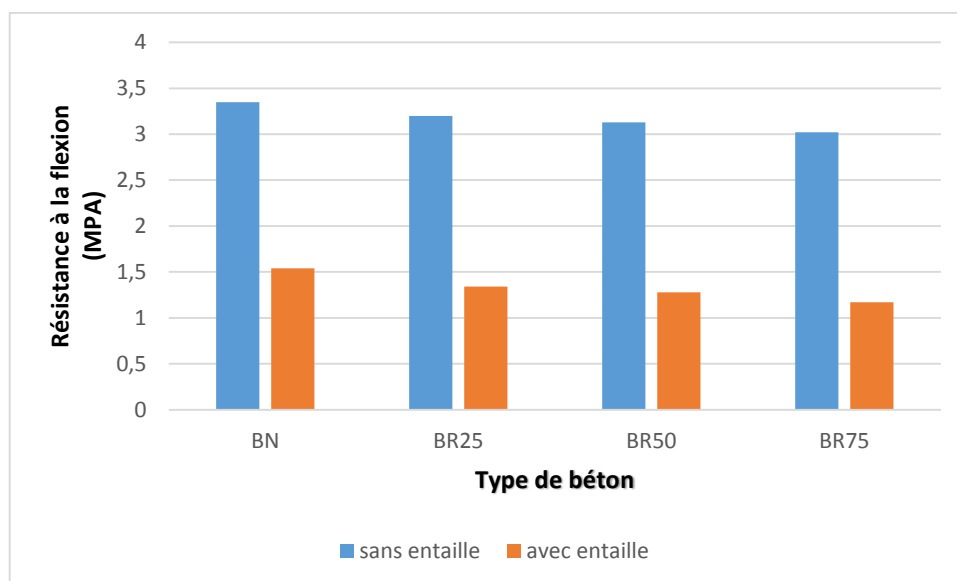


Figure 3 6 : Résistance à la flexion des poutres Sans et avec entaille.

Dans la figure 3 6, Les résultats de la résistance à la flexion ont montré que tous les bétons produits en utilisant les granulats recyclés (BR) présentaient des résistances légèrement inférieures à celles de béton naturel (BN).

La résistance à la flexion du BR75 est inférieure de 11.3% en comparaison à celle du béton naturel (BN) par rapport aux poutres sans entaille. Ces résultats étaient similaires à ceux rapportés par [Katz (2003)] qui a constaté une diminution de 11.5% du BR avec du ciment Portland ordinaire.

La résistance à la flexion du RC75 est inférieure de 32.5% en comparaison à celle du béton naturel (BN) cas des poutres avec entaille.

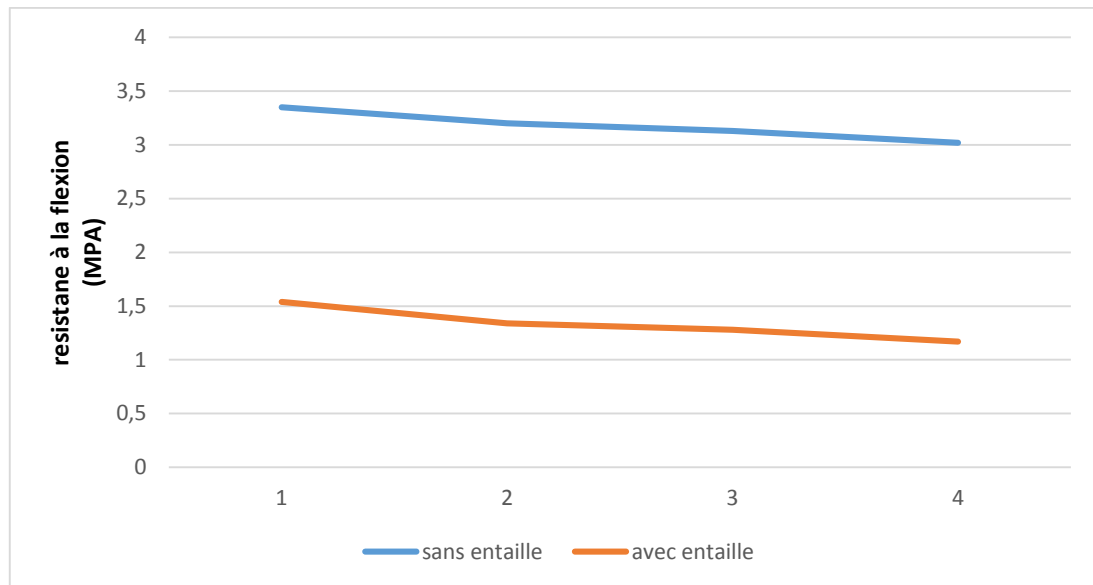


Figure 3 7: Comparaison entre les poutres sans entaille et les poutres avec entaille

La comparaison entre les poutres de béton avec entaille et les poutres de béton sans entaille a été évaluée sur la base du taux de diminution.

Le taux de diminution de la résistance à la flexion des deux types des poutres en bétons pour les classes de substitutions en (GN) par les (GR) est montré sur la Figure 3 7

La diminution en pourcentage de la résistance à la flexion des deux types de poutres a été calculée par rapport à la résistance à la flexion à 28 jours.

Nous rappelons ici que l'idée d'utiliser deux types de poutres en béton (poutres avec entaille et poutres sans entaille) est de déduire l'influence de l'entaille sur les poutres du béton. Comme les poutres avec entaille utilisé dans cette étude a donné des taux de diminution en résistance à la flexion loin de celle des poutres sans entaille, donc il faut avoir des poutres sans défaut.



BN



BR 25



BR 50



BR 75

Figure 3 8 : Propagation des fissures dans les poutres de flexion

Les fissures de flexion sont détectées au milieu des poutres pour un niveau de chargement Relativement faible, dans toutes les poutres testées les fissures ont commencé comme des fissures de flexion dans la face inférieure et sont étendues en diagonale vers la face supérieure

de la poutre, la déformation verticale au milieu des poutres ne dépasse pas 6mm, voire la figure 3 8

On remarque qu'il n'y a aucune différence entre la déformation verticale du béton préparé avec des granulats naturels GN et le béton qui contient des granulats recyclés (GR)

3.2.4 Module élastique :

Le module de Young est une propriété importante du béton. Il est largement utilisé pour calculer la déformation des structures.

Le tableau 3 1 rapporte les valeurs du module de Young obtenues expérimentalement. Pour minimiser les effets de la différence limitée en résistance à la compression des différents bétons, la valeur de module d'élasticité soit normalisés par rapport à chaque béton.

Tableau 3 1: module de Young

	Euro code 2	Wu 2018	tg α	BAEL
BN	30882,0939	25868,692	14202,381	33266,7272
BR25	30158,1456	23466,5457	11517,7895	32486,8775
BR50	30165,9485	21977,2076	15631,2857	32495,2829
BR75_I	29902,3223	20210,8971	16429,2793	32211,3003

La plupart des études mentionnent une baisse dans le module d'élasticité avec l'augmentation du taux de remplacement des granulats naturels par les granulats recyclés.

[Bravo et al., 2015] ont obtenu des résultats qui appuient cette affirmation. Par ailleurs, selon cette étude, la composition du granulat recyclé est le facteur qui a le plus d'influence sur le module d'élasticité, voir la Figure 3 9.

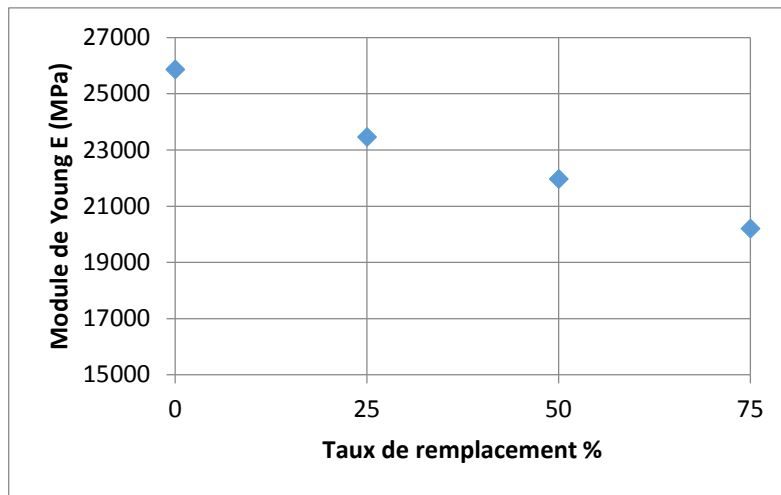


Figure 3 9: Module de Young en fonction de taux de remplacement des GN par des GR.

3.2.5 Ultrason :

L'essai de vitesse des ondes ultrasoniques (VOU) comportent fondamentalement la mesure de la vitesse de l'onde électronique à travers le béton. Cet essai est utilisé pour diagnostiquer la qualité du béton dans la limite de l'uniformité, la détermination de la fissuration, la résistance, l'estimation et l'évaluation de la détérioration du béton.

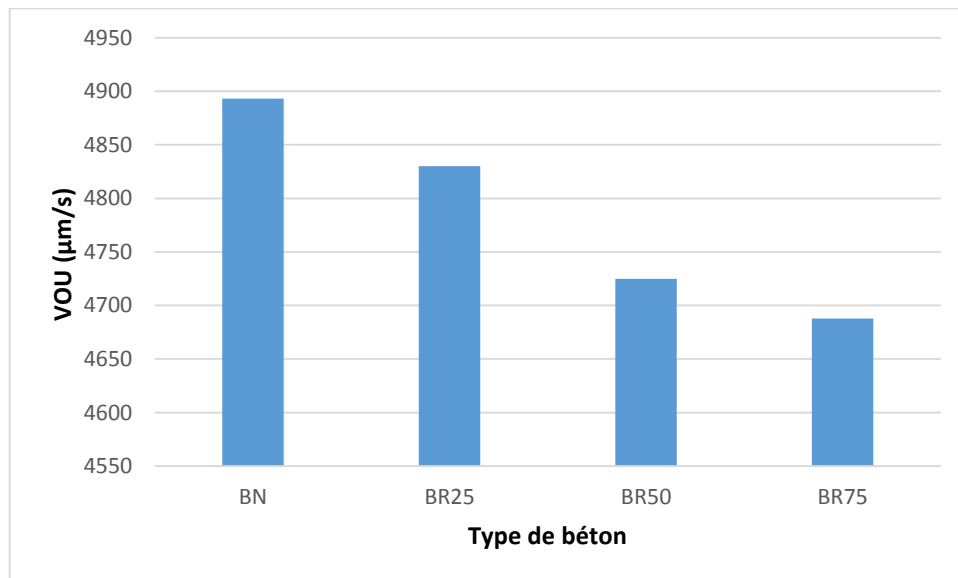


Figure 3 10: Vitesse ultrason.

La Figure 3 10 montre l'effet des granulats recyclés (GR) sur la vitesse des ondes ultrasoniques de différentes compositions de béton. Les valeurs des vitesses ondes ultrasonique (VOU) diminuent avec l'augmentation du pourcentage des (GR) dans les compositions de béton.

Pour une substitution de 25% des (GN) par des (GR), on remarque une légère diminution de pourcentage de diminution de (VOU) et pour une substitution de 50 à 75% des (GN) par des (GN) on remarque une diminution importante.

Ces pourcentages de diminutions sont semblables pour tous les états, [Kou et al. (2012) et Rao et al. (2011)] ont trouvés des variations de vitesses ultrasoniques semblables qui sont respectivement de 8% et de 10%, par contre [Soares et al. (2014)] ont trouvé une variation de 5.4% due aux qualités de leurs granulats utilisés. [Kwan et al. (2012)] ont observé une diminution de la (VOU) dans le béton dû au remplacement du (GN) par les (GR).

Les valeurs des (VOU) de tous les types de bétons étaient dans l'intervalle de 4600- 4950 m/s après une cure de 28 jours.

3.2.6 Densité :

En comparaison avec un granulat naturel (GN), le granulat recyclé (GR) a généralement une densité plus faible en raison de sa nature poreuse, qui est due au mortier adhérent. En raison de la faible densité du (GR), la densité du béton produite avec ce granulat diminue aussi.

Lorsque le (GN) est remplacé à 75% de (GR), des études ont trouvé une baisse de la masse volumique d'environ 5% à 10% [Ferreira et al. 2011]. Bien que cette diminution de densité ne soit pas négligeable, le béton résultant en générale n'est pas classé en béton à faible masse volumique. Bien que la masse volumique réduite ne soit pas une qualité négative pour le béton, elle est souvent due à l'augmentation des vides, ce qui peut entraîner des problèmes de résistance et de perméabilité.

Selon [Fathifazl], cette baisse de masse volumique serait due à la plus grande teneur en mortier total (mortier résiduel + nouveau mortier) dans le béton avec granulat recyclé (GR) que le béton avec granulat naturel (GN) [Fathifazl *et al.*, 2009].

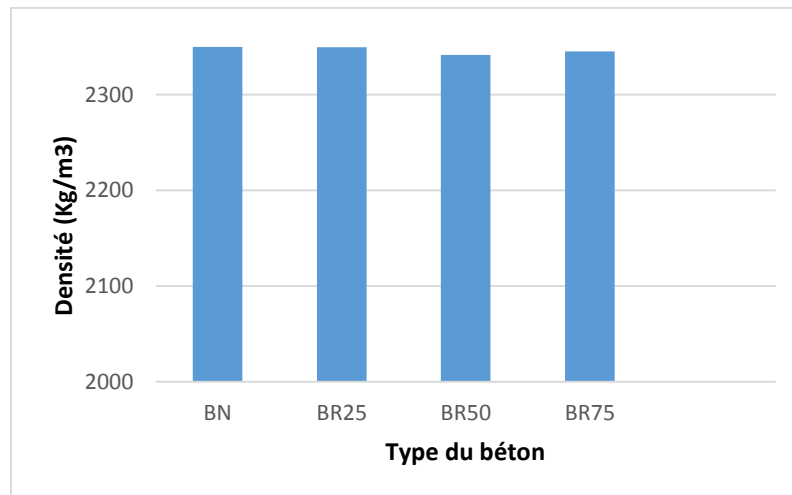


Figure 3 11: Masse volumique en fonction de taux de remplacement.

3.3 Conclusion :

D'une manière générale, on déduit que les propriétés mécaniques des granulats issus de la récupération sont inférieures à celles des granulats naturels, aussi les caractéristiques physiques comme l'absorption et la porosité des granulats recyclés sont supérieures à celles des granulats naturels, et cette diminution des propriétés a un rapport direct avec la pâte cimentaire attaché aux granulats recyclés, en revanche si les granulats recyclés seront traités en faisant diminuer la quantité de la pâte cimentaire attachée au granulats et aussi en complétant les pores et les vides des granulats recyclés leurs propriétés physiques et mécaniques s'améliorent et se rapprochent des propriétés des granulats naturels.

En revanche, les propriétés du béton préparé avec des granulats issus de la récupération sont généralement inférieures à celles du béton préparé avec des granulats naturels, ceci est dû à la qualité des granulats recyclés utilisés dans la confection du béton, mais les propriétés du béton recyclé peuvent être améliorées en utilisant un pourcentage de remplacement optimal.

Aussi en utilisant des ajouts comme la cendre volante ou des fibres pour améliorer l'adhérence entre la matrice cimentaire et le granulat recyclés.

Conclusion général

D'après la recherche bibliographique, le matériel de production d'agrégats recyclés n'est pas très différent de celui de la production d'agrégats naturels. Le concasseur produit une bonne distribution de la forme des grains d'agrégats recyclés comparables à celle des agrégats naturels.

- A cause de l'existence d'une quantité non négligeable de mortier inerte d'ancien béton dans les agrégats recyclés, l'absorption d'eau est beaucoup plus grande que celle des granulats naturels. Par contre la masse volumique des agrégats recyclés est plus petite que celle des agrégats naturels
- La confection, la mise en œuvre du béton recyclé (surtout ceux d'agrégats de béton concassé) sont très comparables à ceux du béton ordinaire à base des granulats naturels.
- Les densités des bétons recyclés, frais et durci, sont plus faibles que celles du béton ordinaire.
- La méthode d'estimation de la résistance à la compression du béton ordinaire par l'essai indirect VOU semble être fiable pour le béton recyclé.
- Comme pour la compression, la résistance à la flexion des bétons recyclés chute en fonction du pourcentage des granulats recyclés.
- En ce qui concerne le module d'élasticité, nous notons que le béton des granulats de démolition de béton concassé présente un faible module d'élasticité, cela s'explique par la mauvaise adhérence entre la pâte de ciment et les agrégats.
- Le béton à base de granulat recyclé absorbe beaucoup d'eau par rapport au béton ordinaire.
- La perméabilité à l'eau du béton recyclé peut atteindre le double de celle du béton ordinaire.

Références

Références

- Abbas, A. (2007). *Durability of Green Concrete as a Structural Material*. Doctor of philosophy in Civil Engineering, Carleton University,
- Abd Elhakam, A., Mohamed, A. E. et Awad, E. (2012). Influence of self-healing, mixing method and adding silica fume on mechanical properties of recycled aggregates concrete. *Construction and Building Materials*, volume 35, p. 421-427.
- Baofan, C. (2013). Basic mechanical properties and microstructural analysis of recycled concrete. *Journal of Wuhan University of Technology - Materials Science Edition*, volume 28, numéro 1, p. 104-9.
- Bravo M, J De Brito, J Pontes, L Evangelista - Journal of cleaner production, 15 July 2015 – Elsevier This research aims at analysing the mechanical performance of concrete with recycled aggregates (RA) from construction and demolition waste (CDW) from various locations in Portugal. Volume 99, Pages 59-74.
- Chakradhara Rao, M., Bhattacharyya, S. K. et Barai, S. V. (2011). Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, volume 44, numéro 1, p. 205-220.
- Corinaldesi, V. (2010). Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, volume 24, numéro 9, p. 1616-1620.
- Casuccio, M., Torrijos, MC., Giaccio, G., and Zerbino, R. 2008. Failure mechanism of recycled aggregate concrete. *Constr Build Mater* 22(7):1500–1506.
- De Juan, M. S. et Gutierrez, P. A. (2009). Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction & Building Materials*, volume 23, numéro 2, p. 872-7.
- De Oliveira, M. B. et Vazquez, E. (1996). Influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete. *Waste Management*, volume 16, numéro 1-3, p. 113-117.
- Etxeberria, M., Vazquez, E., Mari, A. et Barra, M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, volume 37, numéro 5, p. 735-742.
- EN 197-1. Avril 2012. AFNOR. Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.

Références

- Fathifazl, G., Abbas, A., Razaqpur, A. G., Isgor, O. B., Fournier, B. et Foo, S. (2009). New mixture proportioning method for concrete made with coarse recycled concrete aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, volume 21, numéro 10, p. 601-611.
- Fathifazl, G. (2007). *Structural performance of Steel Reinforced Recycled Concrete*. Doctor of Philosophy in Civil Engineering, Carleton University,
- Ferreira, L., Barra, M. et de Brito, J. (2011). Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties. *Magazine of Concrete Research*, volume 63, numéro 8, p. 617-27.
- Katz, A. (2003). Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Cement and Concrete Research*, 33(5), 703–711.
- Kou, S. C., Poon, C. S. et Dixon, C. (2007). Influence of fly ash as cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, volume 19, numéro 9, p. 709-717.
- Kou, S., Poon, C. et Etxeberria, M. (2011). Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete. *Cement and Concrete Composites*, volume 33, numéro 2, p. 286-291.
- Kou, S. C., Poon, C. S. et Chan, D. (2008). Influence of fly ash as a cement addition on the hardened properties of recycled aggregate concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, volume 41, numéro 7, p. 1191-1201.
- Kou, Srao, C., Poon, CS., and Wan, HW (2012). Properties of concrete prepared with low-grade recycled aggregates. *Constr Build Mater*, 36, 881–9.
- Kwan, W. H., Ramli, M., Kam, K. J., and 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.
- Lopez-Gayarre, F., Serna, P., Domingo-Cabo, A., Serrano-Lopez, M. et Lopez-Colina, C. (2009). Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria on recycled concrete properties. *Waste Management*, volume 29, numéro 12, p. 3022-3028.
- Malesev, M., Radonjanin, V. et Marinkovic, S. (2010). Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production. *Sustainability*, volume 2, numéro 5, p. 1204-25.

Références

- Martinez-Lage, I., Martinez-Abella, F., Vazquez-Herrero, C. et Perez-Ordóñez, J. L. (2012). Properties of plain concrete made with mixed recycled coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, volume 37, p. 171-176.
- NBN EN 196-1. Septembre 2016. AFNOR. Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances.
- NF EN 197-1. avril 2012. AFNOR. Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.
- NF EN 933-1. mai 2012. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage.
- NF EN 206/CN. décembre 2014. Spécifications, performances, production et conformité.
- NF EN 1097-2. juin 2010. AFNOR. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques de granulats - Partie 2 : méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation.
- NF EN 12390-5. Avril 2012. AFNOR. Essais pour béton durci - Partie 5 : résistance à la flexion sur éprouvettes.
- NF P 18-560. Septembre 1990. AFNOR. Granulats - Analyse granulométrique par tamisage.
- NF P 18-451. Janvier 2019. AFNOR. Bétons - Exécution des structures en béton - Règles spécifiques pour les BFUP.
- Padmini, A. K., Ramamurthy, K. et Mathews, M. S. (2009). Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. *Construction & Building Materials*, volume 23, numéro 2, p. 829-36.
- Rahal, K. (2007). Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Building and Environment*, volume 42, numéro 1, p. 407-415.
- Rao, A., Jha, K. N. et Misra, S. (2007). Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, volume 50, numéro 1, p. 71-81.
- Redjel.B : "Mécanique et mécanisme de rupture dans les matériaux composites SMC". Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Compiègne, Division Polymères et Composites, Génie Mécanique, 30 Juin 1987.

Références

- Richards C.W "Sciences des matériaux de l'ingénieur". Stanford University, traduit par G. Lemer, Editions Dunod, Paris 1965.
- Rao, CM., Bhattacharyya, SK., Barai ,SV. 2011. Influence of field recycled aggregate on properties of concrete. *Mater Struct*, 44(1), 205–220.
- Safiuddin, M., Alengaram, UJ., Salam, MA., Jumaat, MZ., Jaafar, FF., and Saad, HB. (2011). Properties of high-workability concrete with recycled concrete aggregate. *Mater Res* 14(2):248–255
- Sagoe-Crentsil, K., Brown, T. et Taylor, A. H. (2001). Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*, volume 31, numéro 5, p. 707-712.
- Soares, D., de Brito, J., Ferreira, J., and Pacheco, J. 2014. In situ materials characterization of full-scale recycled aggregates concrete structures. *Construction and Building Materials*, 71, 237–245.
- Tabsh, S. W. et Abdelfatah, A. S. (2009). Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Construction & Building Materials*, volume 23, numéro 2, p. 1163-7.
- Tam, V. W. Y., Gao, X. F. et Tam, C. M. (2005). Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cement and Concrete Research*, volume 35, numéro 6, p. 1195-1203.
- Tam, V. W. Y. et Tam, C. M. (2008). Diversifying two-stage mixing approach (TSMA) for recycled aggregate concrete: TSMA and TSMA^{Asc}. *Construction and Building Materials*, volume 22, numéro 10, p. 2068-77.
- Tarn, V. W. Y., Gao, X. F., Tarn, C. M. et Chan, C. H. (2008). New approach in measuring water absorption of recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, volume 22, numéro 3, p. 364-9.
- Tavakoli, M., and Soroushian, P. 1996. Strengths of recycled aggregate concrete made using field-demolished concrete as aggregate. *Materials Journal*, 93(2), 182-190.
- Topcu, I. B. et Sengel, S. (2004). Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*, volume 34, numéro 8, p. 1307-1312.
- XP P 18-540, Octobre 1997. AFNOR. Granulats - Définitions, conformité, spécifications.
- Yang, j., Du, Q., and Bao, y. (2011). Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks. *constr build mater* 25(4):1935–1945.

Références

- Yang, K., Chung, H. ET Ashour, A. F. (2008). Influence of type and replacement level of recycled aggregates on concrete properties. *ACI Materials Journal*, volume 105, numéro 3, p. 289-296.
- Zega C, Villagrán-Zaccardi Y, Di Maio A (2010) Effect of natural coarse aggregate type on the physical and mechanical properties of recycled coarse aggregates. *Materials and Structures* 43(1-2):195–202.