

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT GENIE CIVIL



FILIERE : GENIE CIVIL
OPTION : MATERIAUX

N° :.....

Mémoire présenté pour l'obtention
du diplôme de Master académique

Par: BENSAOUCHE Boukhalfa & MABROUKI Khaoula

Intitulé:

État de l'art sur les bétons à granulats recyclés

Soutenu devant le jury composé de:

Dr. BEN YAHIA Abdesselem	Université de M'sila	Président
Dr. CHIKOUCHE Mohamed Aziz	Université de M'sila	Examineur
Dr. SILINE Mohammed	Université de M'sila	Rapporteur
Mr. ALLAL Meftah	Université de M'sila	Co-Rapporteur

Année universitaire : 2021 / 2022

Sommaire :

Introduction générale	3
Chapitre I : Granulats naturels et granulats recyclés	
Introduction	5
1. Définition	6
2. Intérêt des granulats dans le béton	7
Intérêt économique	7
Intérêt technique	7
3. Les différents types de granulats	8
3.1. Granulats naturels	8
3.1.1. Les roches sédimentaires	8
3.1.2. Roches éruptives	9
3.1.3. Roches métamorphiques	9
3.2. Granulats artificiels	10
3.3. Granulats recyclés	11
4. Élaboration des granulats recyclés	14
4.1. Les déchets de BTP	14
4.2. Processus de recyclage	15
5. Caractéristiques des granulats recyclés	18
5.1. Forme, allure et distribution granulaire	20
5.2. Masse volumique:	21
5.3. Absorption d'eau	21
5.4. Porosité	22
5.5. Composition chimique et minéralogique	23
5.6. Teneur en pâte de ciment	23
5.7. Module de finesse et propreté de sable	24
5.8. Comportement mécanique	25
6. Conclusion	26
Chapitre II : Effets des granulats recyclés sur les bétons	
Introduction	28

1. Effets des granulats recyclés sur les propriétés des bétons	28
1.1. A l'état frais	28
1.1.1. Propriétés rhéologiques	28
1.1.2. Ouvrabilité	29
1. 1.3. Autres	30
1.2. A l'état durci	31
1.2.1. Propriétés mécaniques	31
1.2.1. Propriétés de transfert	32
1.2.1. Propriétés de durabilité	34
2. Paramètres influant sur le rendement des GR	37
2.1. Forme, texture et distribution granulaire	37
2.2. Influence du mortier attaché	38
2.3. Influence d'autres paramètres	38
3. Amélioration du rendement des GR : traitement des GR	39
3.1. Compensation de l'eau absorbée par les GR	39
3.1.1. Méthode de pré-saturation	39
3.1.2. Méthode de compensation	39
3.1.3. Méthode de mélange en deux étapes	39
3.1.4. Méthode du mortier équivalent	40
4. Méthodes de traitement des GR	40
Chapitre III : Synthèse bibliographique sur les bétons et les mortiers à base de granulats recyclés	
Introduction	43
1. Étude de Goufi et al	43
2. Étude de KPAVODE Gbèdodé Sophie	45
3. Étude de khelef, Gharbi et Rouiha	47
4. Étude de MAMERY Serifou	49
5. Étude de Bensafi et Belkacem	51
6. Étude de BOUDALI Sara	53
7. Étude de de Labachi Souad	56

8. Article de Çakır Ö et Dilbas H	57
9. Article de Raman J.V.M et Ramasamy V	57
10. Article de Wardeh G, Ghorbel E et Gomart H	59
Conclusion générale	62
Références Bibliographiques	63

Liste des figures

Figure I.1. Débris de la démolition des construction

Figure I.2. Des granulats

Figure I.3. Granulats naturels

Figure I.4. Roches sédimentaires

Figure I.5. Roches éruptives

Figure I.6. Roches métamorphiques.

Figure I.7. Laitier de haut fourneau; (a) sa production . (b) sa forme

Figure I.8. Plate forme mobile de recyclage des déchets du BTP: (1) chargement des déchets, (2) concassage, (3) criblage et (4) différentes coupures granulométriques de granulats recyclés

Figure I.9. Exemple de granulats recyclés

Figure I.10. Exemple de débris et déchets à recycler

Figure I.11. Différentes classifications des granulats

Figure I.12. Processus de recyclage d'une installation de dernière génération

Figure I.13. Schéma d'un granulat naturel et d'un granulat recyclé

Figure I.14. Granulométrie des granulats recyclés en fonction du concasseur utilisé

Figure I.15. Effet de la teneur en mortier attaché sur l'absorption d'eau des granulats recyclés

Figure I.16. Essai de résistance à l'abrasion d'un granulat recyclé (Los Angeles)

Figure II.1. Evolution de l'affaissement en fonction du temps et du % d'incorporation des GR dans le béton

Figure II.2.Présentation de l'ancienne ITZ et la nouvelle ITZ d'un GR

Figure. II.3. Résistance à la compression des bétons en fonction du taux de substitution des granulats recyclés (BR : béton de référence, S30G30 : béton avec 30 % de sable, 30 % de gravillons substitués, G100 : béton avec 100 % de gravillons substitués)

Figure. II.4. Taux d'absorption d'eau pour le béton à BR et celui ordinaire

Figure. II.5. Porosité accessible à l'eau pour des bétons à différents taux de substitution après 90 j (BR : béton de référence, S30G30 : 30% de substitution, G100 : 100%)

Figure. II.6. Effet de la teneur des GR sur la profondeur de carbonatation (BR : béton de référence, S30G30 : 30 % de substitution, G100 : 100 % de substitution)

Figure. II.7. Influence de la carbonatation sur le béton à GR

Figure. II.8. Différence entre la forme d'un GN et celle d'un GR

Figure. II.9. Méthode de malaxage pour la méthode de pré saturation

Figure. II.10. Méthode de malaxage pour la méthode en 2 étapes

Liste des figures

Figure III.1. Distributions granulométriques du sable, GN et GR

Figure III.2. Valeurs de résistance à la compression des 2 bétons

Figure III.3. Evolution de la résistance à la compression des micro-bétons dans le temps

Figure III.4. Evolution de la résistance à la traction des micro-bétons dans le temps

Figure III.5. Distributions granulométriques des matériaux de départ

Figure III.6. Influence du taux de substitution du SR par du SN sur l'ouvrabilité des bétons

Figure III.7. Influence du taux de substitution du SR par du SN sur la résistance à la compression des bétons à 7, 14 et 28 jours.

Figure III.8. Résistance résiduelle à la compression (en bars) des éprouvettes de béton après exposition à une température de 300 °C

Figure III.9. Résistance résiduelle à la compression (en bars) des éprouvettes de béton après exposition à une température de 600 °C

Figure III.10. Agrégats utilisés (naturels et recyclés)

Figure III.11. Fines utilisés comme ajouts cimentaires: (a) pouzzolane naturelle PN. (b) poudre de fine recyclé PFR

Figure III.12. Plan expérimental de l'étude

Figure III.13. Valeurs d'étalement des BAPs et des BSAPs à base de GR

Figure III.14. Résistance à la compression des différents bétons.

Figure III.15. Résultats de résistance à la compression des différents mélanges.

Figure III.16. Résultats de résistance à la compression.

Figure III.17. Résultats de résistances à la flexion et à la traction.

Liste des Tableaux

Tableau I.1. Classes granulaires selon la norme XP P18-540

Tableau I.2. Avantages et inconvénients des différents types de concasseurs

Tableau I.3. Constituants des gravillons recyclés selon NF 206-1/CN

Tableau I.4. Taux de substitution par type de granulat recyclé en % par rapport à la masse totale de gravillon ou de sable, selon NF 206-1/CN

Tableau I.5. Valeurs de masse volumique selon la fraction granulaire du granulat

Tableau I.6. Valeurs de porosité en fonction des fractions granulaires des granulats

Tableau I.7. Classification des sables fonction du module de finesse (NF EN 12620) (Afnor, Norme NF EN 12620, 2003)

Tableau I.8. Valeurs du coefficient de Los Angeles selon le type de granulats

Tableau III.1. Caractéristiques physiques et mécaniques des granulats

Tableau III.2. Résultats d'ouvrabilité des bétons et micro-bétons étudiés

Tableau III.3. Compositions des mélanges des bétons étudiés.

Tableau III.4. Compositions des mélanges des bétons étudiés

Introduction générale:

Introduction générale:

Le domaine du génie civil est basé sur la construction. Nous sommes dans l'obligation de construire sans cesse, nos bâtiments, nos établissements, nos ouvrages, nos routes, etc. Cette action de construction, parfois accélérée, bien qu'elle améliore notre cadre de vie et assure un meilleur confort pour nos activités, elle pose des problèmes pour certains. Les acteurs dans ce domaine savent bien qu'avec l'augmentation du rythme de construire par l'homme, les problèmes d'ordre environnemental s'aggravent. Les usines de fabrication de ciment produisent plus de ciment et libèrent dans l'atmosphère encore plus de CO₂; les usines et les chantiers qui fabriquent le béton provoquent une activité intense des centrales à béton et des camions de son transport ce qui consomme plus d'énergie et affecte encore plus l'environnement. Mais le problème qui peut présenter un grand risque pour les futures générations c'est l'épuisement des ressources naturelles nécessaires pour l'exploitation ou la fabrication des matériaux de construction.

Les granulats, sable et gravier, sont initialement d'origine naturelle. Ils proviennent soit des gisements de calcaire et des sédiments de différents types: rivière, Oued, mer, etc. L'exploitation massive de ces ressources non renouvelables, implique l'apparition de grands problèmes écologiques. Face à cette situation il a fallu trouver, depuis plusieurs années, d'autres moyens pour construire encore mais consomme moins de ressources naturelles. La solution a été dans l'exploitation, la valorisation et le recyclage de certains déchets compatibles avec le béton, tels que les débris de démolitions des anciennes constructions. En effet cette action a un double avantage: elle offre une solution pour les municipalités qui souffrent de la difficulté de se débarrasser de ces déchets vu leur énorme volume, comme elle présente une ressource alternative pour l'approvisionnement de nos chantiers en termes de granulats de toutes dimensions.

Les granulats issus de l'exploitation des déchets de démolition de construction s'appellent granulats recyclés. Leur utilisation a fait l'objet de plusieurs travaux de recherches, de thèses et d'articles, où des résultats satisfaisants et encourageants ont souvent été déclarés.

Ce mémoire, qui entre dans le cadre du projet de fin d'étude "**PFE**" de notre formation en Master de génie civil, présente une recherche bibliographique sur les principaux résultats, obtenus lorsqu'on fait remplacer dans le mortier ou le béton, les granulats naturels par des granulats recyclés. Cette synthèse est organisée en trois chapitres dont le premier est destiné à la définition des granulats, leurs types et leurs propriétés principales.

Introduction générale

Le deuxième chapitre a été consacré à la présentation approfondie de l'effet des granulats recyclés. Il est bien connu qu'en raison de leur composition, les granulats recyclés ont des caractéristiques différentes, voire moins performantes, que celles des granulats naturels. Ces granulats sont généralement entourés par une couche de pâte de ciment, ce qui affecte leurs propriétés physicomécaniques et de durabilité. Les granulats recyclés sont plus poreux, ils ont une absorption plus élevée, comme ils contiennent des hydrates (C-S-H et Portlandite) et présentent des zones de faiblesse mécanique (zones de transition entre le granulat recyclé et la nouvelle pâte du ciment). La connaissance de toutes ces lacunes peut aider à choisir une méthode de traitement pour améliorer la rentabilité des ces granulats dans le béton.

Dans le dernier chapitre nous avons essayé de présenter une synthèse sur quelques travaux, menés dans les universités mondiales et celles algériennes ces dernières années, à propos ce sujet de granulats recyclés.

Le lecteur de ce mémoire pourra prendre une idée assez simplifiée sur les granulats recyclés, leurs avantages, leurs inconvénients ainsi que leurs caractéristiques principales.

CHAPITRE I:

Granulats naturels et granulats recyclés

Introduction :

Au cours de son évolution, l'homme a cherché à aménager et à choisir ses matériaux en fonction de ses besoins. Pour ses besoins d'habitation, de transport et de vie, il lui a fallu une exploitation massive des matières premières. À l'heure actuelle, le secteur de construction nécessite la mise en œuvre de grandes quantités de matériaux [BRA 14]. Ces matériaux, tels que le ciment, le sable, le gravier, le béton, l'acier, le bois, etc., proviennent souvent des ressources naturelles, comme ils s'obtiennent parfois après un processus de fabrication et d'industrie [SIL 16].

Le béton est l'un des matériaux les plus utilisés dans le monde; il est également le matériau de construction le plus important en termes de volume et de circulation. D'autre côté, nos villes connaissent une accélération de la démolition des anciennes structures en béton, ce qui mène par voie de conséquence, à une accumulation importante de déchets et de granulats stockés, comme le montre la **figure I.1**. Face à cette situation, il est devenu nécessaire de développer de nouvelles approches de construction qui limitent leurs impacts environnementaux et prennent en compte le cycle de vie des matériaux utilisés. Parmi les solutions proposées actuellement, on procède à la récupération et à la valorisation de ces déchets issus de la démolition des anciennes bâtisses, ce qui a un double avantage: on préserve les ressources naturelles d'un côté et on libère ces sites de stockage de l'autre côté [BRA 14].



Figure I.1. Débris de la démolition des constructions.

1. Définition :

Le granulat est une pierre ou fragment de roche, de différentes natures et grosseurs, produit par l'érosion ou le broyage (concassage) d'une roches. En génie civil, les granulats sont utilisés dans les travaux de construction (ils entrent dans la composition du béton), les travaux de BTP, de décoration intérieure ou extérieure (Fig. I.2). Pour le béton, les granulats forment son squelette et représentent environ 80 % de son poids total. Ils sont constitués de sable (fin et grossier) et de gravier. La désignation des granulats (d/D) se fait en fonction de leur plus petite " d " et leur plus grande dimension " D " (**Exp:** 0/5 pour le sable et 8/15 pour le gravier). D'une manière générale, les granulats sont des matériaux inertes, cependant ils doivent satisfaire certaines exigences de qualité avant d'être utilisés dans la formulation du béton.



Figure I.2. Des granulats.

Selon la norme française XP P18-540 (1997), un granulat est un ensemble de grains dont les dimensions sont comprises entre 0 mm et 125 mm. Les granulats courant ont une masse volumique réelle de l'ordre de 2 t/m^3 , cependant des valeurs nettement inférieures caractérisent les granulats légers.

Il est important de souligner que le terme "granulat" est parfois confondu avec le terme "agrégat". En réalité, les granulats se trouvent agglomérés dans un mélange et entourés par du ciment pour former ce que nous appelons "agrégats". De ce fait, le granulat est un ensemble homogène de grains contrairement à l'agrégat qui est plutôt un ensemble hétérogène de substances solidement liées comme le béton ou le mortier.

Indépendamment de leur type et leur classification, les granulats provenant d'une ressource naturelle sont dits granulats naturels (Fig. I.3). Selon le gisement dont ils proviennent, on distingue les granulats alluvionnaires (d'Oued) et les granulats de roches massives (gisement et carrières). Les dépôts alluviaux se situent dans les lits des Oueds et rivières, dans leurs basses vallées ou dans des terrasses déposées au cours des temps géologiques. Les matériaux alluvionnaires sont meubles et leur extraction peut être réalisée à un faible coût. Les roches massives sont extraites dans des carrières d'où elles doivent être abattues à l'explosif avant de subir les opérations d'élaboration [BER 14].



Figure I.3. Granulats naturels.

2. Intérêt des granulats dans le béton:

L'utilisation des granulats dans le béton présente deux intérêts:

- **Intérêt économique** : elle permet la réduction de la quantité du liant (ciment, bitume, etc.) dans la matrice ce qui baisse le coût de fabrication du fait de la différence entre le prix du liant avec celui des granulats.
- **Intérêt technique** : Comme les granulats sont des matériaux inertes, leur incorporation dans la matrice cimentaire (mortier ou béton) limite les variations dimensionnelles du béton, en particulier son retrait. D'autre part et vue leur dureté, les granulats, notamment les graviers, participent et améliorent la résistance à la compression du béton.

3. Les différents types de granulats :

Les granulats sont classés selon plusieurs critères: selon leur origine (nature), selon leur granulométrie ou selon leur poids. Commençant par la première classification dans laquelle on distingue entre granulats naturels, artificiels et recyclés.

3.1. Granulats naturels :

Ce sont des granulats, d'origine minérale, issus de roches meubles (alluvions fluviales ou marines) ou massives (roches sédimentaires, éruptives, métamorphiques, etc.), [TOU 19]. Les granulats alluvionnaires sont roulés dont la forme est acquise par érosion, tandis que la forme des granulats naturels provenant des gisements rocheux est angulaire suite à leur concassage au carrière. L'exploitation de ces granulats naturels ne nécessite aucun traitement thermique ou chimique, sauf ces processus mécaniques de concassage, broyage et criblage [INF 18].

3.1.1. Les roches sédimentaires :

Selon le géologue Belge Frédéric Bouvalain [BOU 21], la sédimentologie est la science qui vise à étudier les sédiments, alors que l'étude des milieux sédimentaires anciens après la transformation des sédiments en roches, s'appelle la pétrologie sédimentaire. Ces disciplines servent en l'identification des processus de dépôt, des milieux de dépôt, à étudier leur évolution dans le temps, à reconstituer la structure des différents milieux au sein des bassins de dépôt et à étudier le moment où les sédiments ont évolué (par compactage, diagenèse, ...). L'auteur ajoute que la sédimentologie est considérablement importante du fait que près de 90% de la surface terrestre est recouverte de sédiments ou constituée de roches sédimentaires dans les proportions suivantes : argile : 63%; grès : 22% et calcaire : 15%. Bouvalain a noté également que les roches sédimentaires ne représentent que 1/20 du volume de la croûte superficielle (16 km d'épaisseur). Les roches sédimentaires sont meubles ou consolidées, mais généralement stratifiées. Elles peuvent être classées d'après leur origine en détritique, chimique ou biochimique. Selon leur composition chimique et/ou minéralogique, les roches sédimentaires peuvent être siliceuses (quartzeuses), argileuses (alumino-silicatées), carbonatées (calcaire), ...etc. (Fig.I.4).

Les roches sédimentaires sont souvent déposées dans le lit des Oueds, des rivières, des lacs, des mers et des océans. Elles sont principalement consolidées, sans subir de transformations chimiques importantes, par la simple précipitation de la silice, du calcium ou parfois du magnésium dissous [BER 14].



Figure I.4. Roches sédimentaires

3.1.2. Roches éruptives:

Les roches éruptives constituent la majeure partie des roches continentales et celles des zones océaniques. Ces roches se forment quand un magma se refroidit et se solidifie d'où on les appelle parfois roches magmatiques (Fig. I.5). On distingue, en fonction de la vitesse de refroidissement, les granits (refroidissement lent), les porphyres (refroidissement lent puis très rapide) et les basaltes (refroidissement très rapide).



Figure I.5. Roches éruptives

3.1.3. Roches métamorphiques :

Elles sont une sorte de transformation des autres roches, en raison des variations des paramètres physico-chimiques du terrain dans lequel elles évoluent, notamment la pression, la température et la teneur en eau. En général, les roches magmatiques donnent des gneiss, alors que les roches sédimentaires donnent des ardoises (schistes), des micaschistes et même des gneiss quand les transformations sont importantes (Fig. I.6).



Figure I.6. Roches métamorphiques.

3.2. Granulats artificiels :

Sont considérés comme granulats artificiels, les matériaux expansés par action thermique d'argiles, schistes, laitiers, cendres volantes et verres. Ces matériaux, dites également sous produits "By-products", proviennent donc de la transformation thermique de roches, minerais et déchets [BER 14] avant d'être utilisés comme granulats pour la préparation des bétons et des chaussées de routes. Du fait de leur masse volumique, remarquablement basse ($<1 \text{ g/cm}^3$), ils conviennent parfaitement pour les bétons légers. Cependant leur porosité, considérablement haute, provoque une forte absorption d'eau (10 à 15 %), ce qui nécessite la prise des précautions lors de l'utilisation de ces granulats [TOU 02]. Comme exemples de ces granulats on peut citer:

- La bauxite calcinée, obtenue par traitement thermique de minerais d'aluminium à environ 1600 °C. Avec l'augmentation de la température (vers 2 000 °C), il se forme du corindon donnant naissance à des granulats très durs et abrasifs
- Le laitier de hauts fourneaux qui est un sous-produit de fabrication de la fonte et des aciers [DJA 21, SIL 22]. Le laitier peut être cristallisé si son refroidissement s'effectue lentement, comme il peut s'agir d'un laitier granulé si le refroidissement se fait brutalement à l'eau (Fig. I.7). Ces produits donnent une roche composée de silicates et d'alumine calciques. Les sous-produits d'aciéries sont en général plus denses et plus résistants, mais présentent un risque de présence de chaux instable lorsque le produit élaboré est récent [TOU 02]. C'est le laitier cristallisé qui a généralement le même usage que les granulats naturels, le laitier granulé est considéré plutôt un liant qu'un granulats du fait de son caractère hydraulique [MEH 21, 22].
- Les sous-produits provenant des centrales thermiques: dans les anciennes centrales électriques on trouve comme résidus de la combustion de houille le mâchefer, dans les centrales modernes, on récupère les cendres volantes [MAM 13].

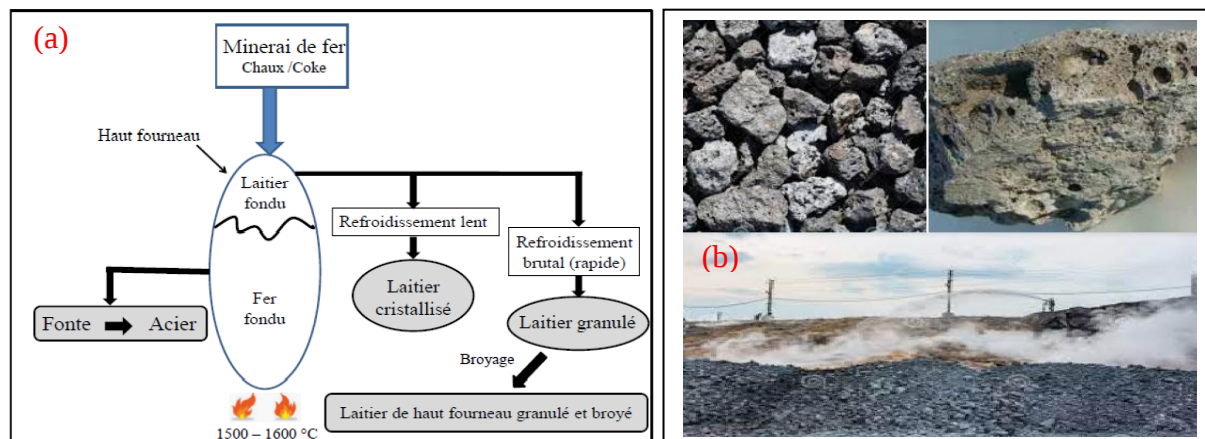


Figure I.7. Laitier de haut fourneau; (a) sa production [DJA 21], (b) sa forme.

3.3. Granulats recyclés :

Les granulats recyclés sont principalement obtenus après traitement de l'ensemble des matériaux utilisés précédemment pour la réalisation d'une construction, tels que le béton, les maçonneries et tout autre débris résultant de la démolition d'une construction (bâtiment, route, etc.) [TOU 19]. Ces granulats "traités et présélectionnés" vont subir par la suite des opérations de concassage et criblage sur les plateformes de recyclage (Fig. I.8). Les granulats recyclés sont aussi le résultat de déchets provenant de surplus et de chutes de matériaux lors de la phase de construction [SIM 19], mais cette ressource reste très limitée par rapport à la précédente.



Figure I.8. Plate forme mobile de recyclage des déchets du BTP: (1) chargement des déchets, (2) concassage, (3) criblage et (4) différentes coupures granulométriques de granulats recyclés [HOO 21].

Les granulats recyclés sont des mélanges hétérogènes de plusieurs matériaux. Ils sont généralement constitués, en majeure partie, de granulats de béton recyclé. Néanmoins, la présence de certaines proportions de corps étrangers est à prévoir, comme le témoigne la figure I.9. La qualité de ces granulats dépend fortement, selon Hoong [HOO 21], de l'origine des déchets entrants et de la qualité du tri réalisé sur le site de déconstruction.



Figure I.9. Exemple de granulats recyclés [HOO 21].

Avant ces étapes de concassage et de criblage, l'opération de démolition et de déconstruction est très délicate. Pablo Tores [TOR 20] a noté qu'avant d'arriver à ce stade de concassage et de criblage, le cisailage des ferrailles et la réduction des plus gros éléments est nécessaire. Pour cela, des opérations de sélection et de triage doivent être effectuées pour enlever les impuretés. Des gros débris, comme les plaques de métal, les armatures, les éléments en bois, en papier ou en plastique, etc., sont enlevés à la main avant l'entrée des matériaux au concasseur primaire. L'opération de séparation des impuretés légères, se fait selon le même auteur suivant deux procédés: l'épuration à l'air et l'épuration par voie humide. Les granulats sont entraînés à l'aide d'un courant d'air, dans la première méthode, alors qu'une épuration par voie humide est utilisée pour séparer les granulats dans la deuxième méthode (Fig. I.10).



Figure I.10. Exemple de débris et déchets à recycler [TOR 20].

Le recyclage des débris de démolition et l'utilisation des granulats recyclés résultants sont très répandus dans plusieurs pays. Mistri et al, [MIS 20] ont donné quelques exemples de recyclage des déchets de construction: 80% au Danemark, 75% aux Pays-Bas, 65% au Japon, entre 40 et 60% en Allemagne, etc. Marie Sering [SER 20] ajoute que la production et la réutilisation effective des granulats recyclés varie d'un pays à l'autre. Pour certains pays, y

compris l'Algérie, malgré les grandes quantités de ces déchets de déconstruction, ces matériaux restent pour longtemps stockés et non réutilisés. Selon l'auteur, 100 millions de tonnes de granulats recyclés sont produits chaque année aux USA, mais cette énorme quantité reste non réutilisée dans la construction, sauf pour des applications routières ou comme matériau de remplissage.

La valorisation et la réutilisation de ces débris de démolition peut garantir plusieurs avantages selon Mamery [MAM 13], à savoir:

- Une économie des ressources naturelles.
- Une réduction du transport des matériaux, ce qui implique une réduction de la consommation d'énergie et des émissions de dioxyde de carbone (CO₂).
- Une solution très rapide et très effective permettant l'élimination d'un obstacle gênant pour la vie normale des habitants.
- Une réduction des quantités de débris et matériaux mis en décharge, ce qui présente un avantage d'ordre environnemental, écologique et économique.
- D'un point de vue environnemental, le recyclage des débris de démolition contribue à réduire l'impact du gaz à effet de serre, car: (i). Pour une utilisation à grande échelle, le recyclage permet de réduire la quantité de CO₂ liée au transport des granulats. (ii). Le béton à granulats recyclés est capable de piéger le CO₂ par son action de carbonatation. (iii). La récupération et le recyclage des fines, après leur traitement, dans la production des liants tels que le ciment, présentera un avantage pour l'environnement en minimisant le dégagement de CO₂ provoqué par l'industrie cimentaire.

Les granulats peuvent être classés également en fonction de leur grosseur, où les dimensions "d" (la plus petite) et "D" (la plus grande) font la distinction. Cette classification est donnée par la norme XP P18-540 selon le **tableau I.1**:

Tableau I.1. Classes granulaires selon la norme XP P18-540.

Désignation	Spécifications pour d et D :
Fillers	$D < 2 \text{ mm}$ avec au moins 70 % de passant à 0,063 mm
Sablon	$D \leq 1 \text{ mm}$ avec moins de 70 % de passant à 0,063 mm
Sable	$1 < D \leq 6,3 \text{ mm}$
Grave	$D > 6,3 \text{ mm}$
Gravillon	$d \geq 1 \text{ mm}$ et $D \leq 125 \text{ mm}$

Ballast	$d \geq 25 \text{ mm}$ et $D \leq 50 \text{ mm}$
---------	--

L'autre classification donnée par la même norme (XP P18-540) s'intéresse beaucoup plus par le poids volumique des granulats. Elle précise que les granulats, quelles que soient leur provenance et leur grosseur sont classées en deux catégories: légers lorsque le poids volumique est inférieure à 2 t/m^3 et courants lorsque cette masse volumique est supérieure ou égale à 2 t/m^3 . La **figure I.11** propose une présentation globale des différents types de granulats selon les trois classifications.

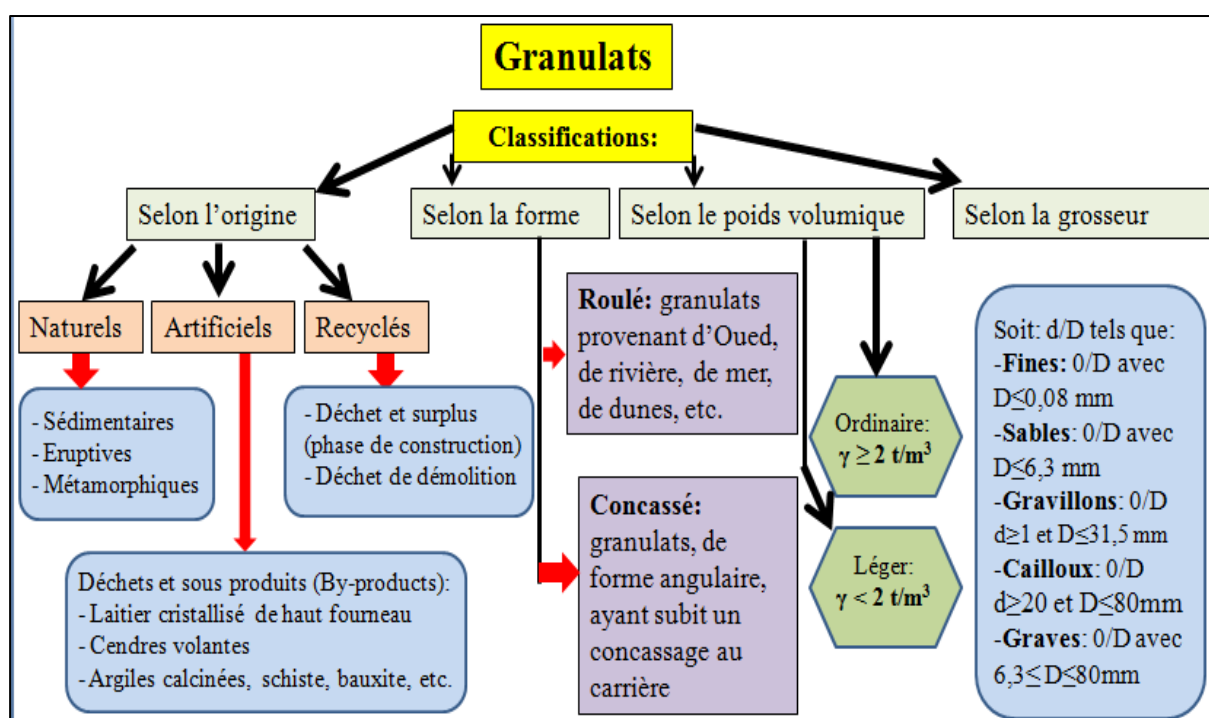


Figure I.11. Différentes classifications des granulats.

4. Élaboration des granulats recyclés :

4.1. Les déchets de BTP :

Les déchets de bâtiment et travaux publics "BTP" sont des déchets très mélangés mais qui sont généralement inertes et ne présentent aucune menace sur l'environnement. Ces déchets d'après [KHO 18] sont soit de démolition soit de construction. Les déchets de démolition proviennent des travaux de démolition, de restauration et de réparation des structures de bâtiments ou plus généralement des applications en génie civil. Khoury Eliane [KHO 18] a proposé une classification de ces déchets (de démolition) en quatre catégories : **déchets non pierreux** (acier, fer, aluminium, cuivre, verre, bois, plastique etc.), **déchets pierreux** (béton, mortier, céramiques, agrégats et mélanges de ceux-ci, **déchets dangereux** (matériaux

contenant de l'amiante, plomb, zinc, peinture, vernis, batteries, tubes fluorescents, lubrifiants, huiles, graisses, installations de climatisation, etc.) et **autres** (matière organique). Par ailleurs, le même auteur ajoute que les déchets de construction sont produits à l'occasion des travaux sur les chantiers de BTP. A leur tour, les déchets de construction ont été divisés par Khoury Eliane [KHO 18] en cinq catégories: **des sols** (sables, argile, pierre, boue etc.), **des emballages des matériaux de construction** (palettes en bois, plastique, carton, etc.), **des restes de matériaux de construction et des déchets dangereux** (sols contaminés et déblais de dragage, additifs, adhésifs, etc.) et **autres**.

Serifou Mamery [MAM 13] a rapporté que les producteurs de granulats recyclés ont, aujourd'hui, une politique de sélection des débris et des matériaux de démolition. Couramment, on trouve cinq catégories de matériaux, issus d'une démolition, en fonction de leur nature :

- Les bétons armés sans enduit ni plâtre.
- Les matériaux composés de briques, de tuiles, de graves, de pierres et de blocs rocheux, etc.
- Les matériaux mélangés avec une faible teneur en plâtre, bois, plastique, etc.
- Les mauvais matériaux avec une teneur en bois, plâtre et plastique supérieure à 10 %.
- Les autres matériaux n'entrant pas dans les catégories précédentes.

Il est bien connu que les granulats recyclés proviennent principalement des travaux de démolition et des déchets de production de béton. L'auteur ajoute que la production des granulats recyclés à partir des déchets de production de l'industrie du béton est basée sur deux ressources fondamentales:

- Les déchets de construction: ce sont les débris de béton qui se forment lors de sa production (chutes de béton, nettoyage du matériel de fabrication, de mise en œuvre et du transport du béton. Il en résulte des gâchés de béton mal formulés et/ou non utilisés.
- Les éléments en béton défectueux, non conformes, mal confectionnés ou partiellement cassés ainsi que les éléments (éprouvettes par exemples) ayant subi des essais de résistance à la rupture.

4.1. Processus de recyclage :

Selon Guerzou Tourkia [TOU 19], les granulats recyclés sont élaborés dans des installations spéciales, dont le processus à suivre est quasiment le même que celui adopté pour l'élaboration des granulats naturels à savoir: concassage, criblage et éventuellement lavage.

Chapitre 01 : Granulats naturels et granulats recyclés

Cependant, un prétraitement particuliers doit être exécuté pour ce type de granulats dans lequel il faut prévoir l'enlèvement des armatures (cisaillage des ferrailles) et la réduction de la taille des plus gros éléments [NEL 15]. Guerzou Tourkia [TOU 19] estime que le concasseur à percussion peut offrir une meilleure réduction de la granulométrie (avec une faible proportion d'éléments fins) tout en assurant une séparation facile entre le béton et ses armatures.

D'une manière générale, l'élaboration des granulats recyclés se réalise sur des stations, dites de recyclage, qui sont soit mobiles soit stationnaires (fixes). Il convient de souligner que les stations mobiles sont moins performantes, que celles fixes, puisque la masse de l'installation est limitée dans le but de faciliter son déplacement et son transport. Deux étapes sont à prévoir, selon [SIM 19] dans le cadre du processus de recyclage des déchets de construction et de démolition afin d'élaborer des granulats : le broyage et le criblage. Le broyage vise à réduire la taille des déchets en utilisant trois types de broyeurs à savoir: broyeur à percussion, à mâchoires et à cône, dont une petite comparaison est donnée sur le **Tableau I.2**. Le criblage permet d'enlever les matériaux indésirables des granulats obtenus par le concassage comme par exemple le plastique, le bois ou encore le métal. Après ces deux étapes, les déchets sont broyés et nettoyés. La **figure I.12** présente le processus de recyclage sur une installation de recyclage de dernière génération. L'élaboration des granulats recyclés a été présentée avec plus de détail dans les travaux de [LOU 11, NEL 15, KHO 18, TOU 19, KHE 21].

Tableau I.2. Avantages et inconvénients des différents types de concasseurs [SIM 19].

Type de concasseur	Avantages	Inconvénients
Percussion	- Grand facteur de réduction (relation entre la taille des particules entrantes et sortantes). -Produit des granulats avec une bonne géométrie et une bonne résistance.	-Produit plus de particules fines. -Produit une intervalle de tailles particules plus étendu.
Mâchoires	Permet de traiter de grands morceaux de béton armé Produit des granulats dans une gamme de taille plus étroite	-Produit des granulats avec une mauvaise géométrie et une mauvaise résistance
Cône	Produit moins de particules fines Produit des granulats dans une gamme de taille plus étroite Bon compromis entre le facteur de réduction et la production de particules fines	-Produit des granulats avec une mauvaise géométrie et une mauvaise résistance

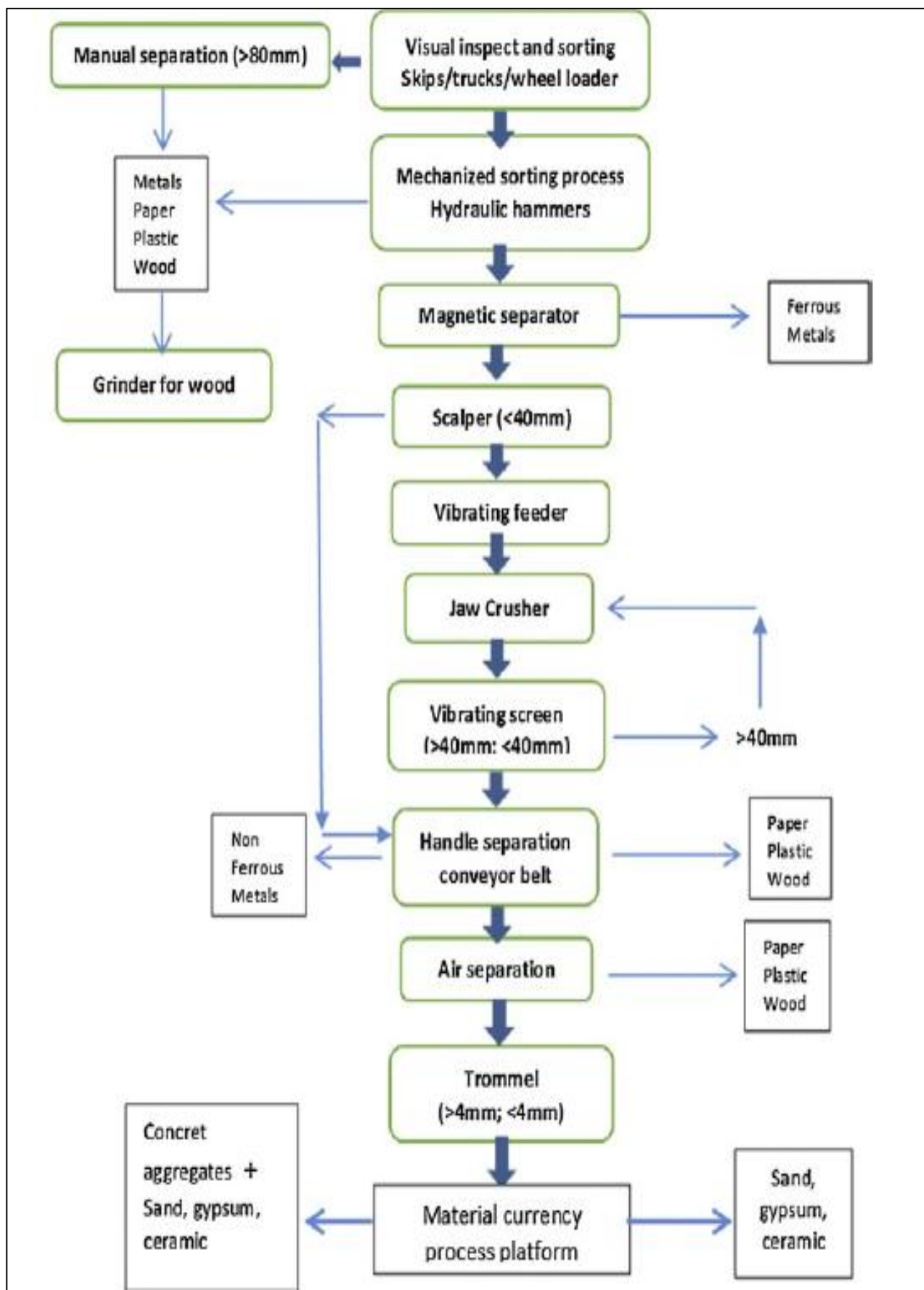


Figure I.12. Processus de recyclage d'une installation de dernière génération [SIM 19]

5. Caractéristiques des granulats recyclés :

Les qualités et les performances d'un béton dépendent en grande partie des matériaux utilisés pour sa formulation, notamment les granulats. L'utilisation des granulats recyclés pour la confection du béton doit être précédée par l'évaluation de la conformité de ces granulats à certaines exigences. A notre connaissance, il n'existe pas pour le moment une norme spécifique qui donne ces exigences pour ce type de granulats. Cependant, certaines normes existantes peuvent combler ce vide et être utilisées comme référence pour l'élaboration, l'évaluation et le contrôle des granulats recyclés. Khoury Eliane [KHO 18] a rapporté que la norme NF 12620 (2003) spécifie les caractéristiques des granulats naturels, artificiels ou recyclés qui sont utilisés pour la confection du béton ainsi que les mélanges de ces granulats. Selon cette norme, le granulat recyclé est un granulat provenant de la transformation des matériaux inorganiques qui ont été utilisés précédemment dans une construction. L'auteur a ajouté que le complément national (Français) CN de la norme NF 206-1 (2004), impose que les granulats recyclés utilisés dans le béton doivent être conformes aux spécifications des normes NF 12620 (2003) et XP P 18-545 (2004). Les gravillons recyclés, classés en trois catégories selon cette norme à savoir: **Type 1: CR_B**; **Type 2: CR_B ou CR_C**; **Type 3: CR_B ou CR_C ou CR_D**; sont définis à partir de leur classification et de la fréquence d'essais associée (Tableau I.3).

Tableau I.3. Constituants des gravillons recyclés selon NF 206-1/CN [KHO 18].

Code	Constituants principaux catégorie NF EN 12620 + A1	Constituants secondaires				Types de fréquence d'essai ^a	
		Catégories NF EN 12620 + A1				Temporelle	Quantitative (en tonne)
CR _B	RCU ₅₅	Rb ₁₀₋	Ra ₁₋	XRg _{0.5-}	FL _{0.2-}	2/mois	1/2000
CR _C	RCU ₅₀	Rb ₁₀₋	Ra ₁₋	XRg ₁₋	FL ₂₋		
CR _D	RCU ₇₀	Rb ₃₀₋	Ra ₁₀₋	XRg ₂₋	FL ₂₋		
^a Tout lot de granulat recyclé et dont la production est inférieure aux fréquences d'essais du Tableau NA.2 doit faire l'objet d'un essai minimum de classification des constituants. La notion de lot est définie par la norme NF P 18-545.							

NOTE Glossaire spécifique aux granulats recyclés :

— Rc béton, produits en béton, mortier, éléments de maçonnerie en béton contenus dans un granulat recyclé ;

— Ru granulats non liés, pierre naturelle, granulats traités aux liants hydrauliques contenus dans un granulat recyclé ;

— Rcu correspond à Rc + Ru ;

— Rg verres contenus dans un granulat recyclé ;

— Rcug correspond à Rc + Ru + Rg ;

— Ra matériau bitumineux contenu dans un granulat recyclé ;

— Rb éléments en argile cuite (briques et tuiles), éléments en silicate de calcium, béton cellulaire non flottant contenus dans un granulat recyclé ;

— X argiles, sols, métaux ferreux et non ferreux, bois, plastiques, caoutchouc non flottants, plâtre contenus dans un granulat recyclé ;

— XRg correspond à X + Rg ;

— FL matériau flottant (exprimé en volume) contenu dans un granulat recyclé.

Chapitre 01 : Granulats naturels et granulats recyclés

Le complément national CN de la norme NF 206-1 (2004), préconise également que le taux d'incorporation des granulats recyclés dans le béton doit être limité, et cela en fonction de la classe d'exposition du béton, comme le montre le **Tableau I.4**.

Tableau I.4. Taux de substitution par type de granulat recyclé en % par rapport à la masse totale de gravillon ou de sable, selon NF 206-1/CN.

Type de granulat recyclé	Classe d'exposition			
	X0	XC ₁ , XC ₂	XC ₃ , XC ₄ , XF ₁ , XD ₁ , XS ₁	Autres classes d'exposition
Gravillon de type 1	60	30	20	0
Gravillon de type 2	40	15	0	0
Gravillon de type 3	30	5	0	0
Sable	30	0	0	0

Selon ce tableau, le remplacement des granulats naturels par les granulats recyclés est plafonné à 60%, lorsqu'il s'agit de la fabrication d'un béton dont les armatures ne sont pas exposées à des risques de corrosion ou d'attaques chimiques, c'est à dire la classe d'exposition la plus basse (X0). Pour d'autres classes où le risque est majeur, la norme n'autorise pas l'utilisation des granulats recyclé pour la fabrication du béton.

Avant de citer les principales caractéristiques des granulats recyclés, il s'avère très utile de spécifier le type de granulat concerné. Selon plusieurs auteurs, dont Simon Henri [SIM 19], les granulats recyclés peuvent être classés selon leur provenance en quatre catégories:

- Les granulats provenant des débris de béton (démolition de structures en béton et béton armé).
- Les granulats provenant des débris de maçonnerie (démolition des bâtiments en brique).
- Les granulats d'hydrocarbonés (démolition des voiries en béton bitumineux).
- Les granulats de débris mixtes (déchets de construction et de démolition non traités).

Dans le reste de ce travail, nous nous intéressons beaucoup plus par les granulats de la première catégorie, c'est-à-dire, les granulats recyclé de béton.

5.1. Forme, allure et distribution granulaire:

Deodonne Kunwufine [DEO 15] a rapporté qu'à l'issue du concassage, les granulats recyclés ainsi obtenus sont de granulométries différentes et cela dépend du type de concasseur utilisé, mais aussi de la qualité du béton de départ. La Figure I.13 compare l'allure d'un granulats naturel et un granulats recyclé [BAI 20], où les formes sont clairement différentes du fait de la présence de l'ancienne pâte de ciment autour du granulats dans le cas du granulats recyclé. Cette différence causera, selon [SER 20], une mise en oeuvre différente dans le béton.

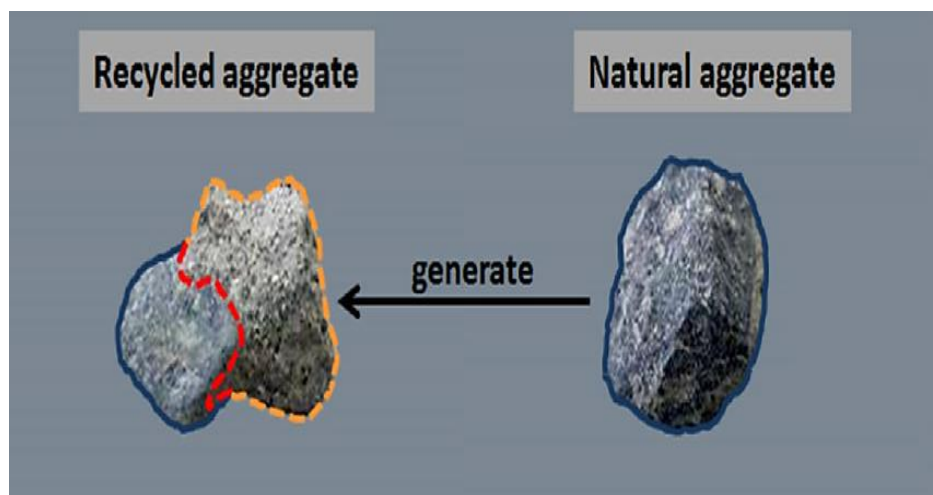


Figure I.13. Schéma d'un granulats naturel et d'un granulats recyclé [BAI 20].

Simon Henry [SIM 19] pense que lorsque le broyage des débris de démolition de béton se fait au moyen de concasseur à mâchoires, il y aura plus de granulats grossiers que dans le cas où un concasseur à percussion est utilisé, comme l'illustre la figure I.14.

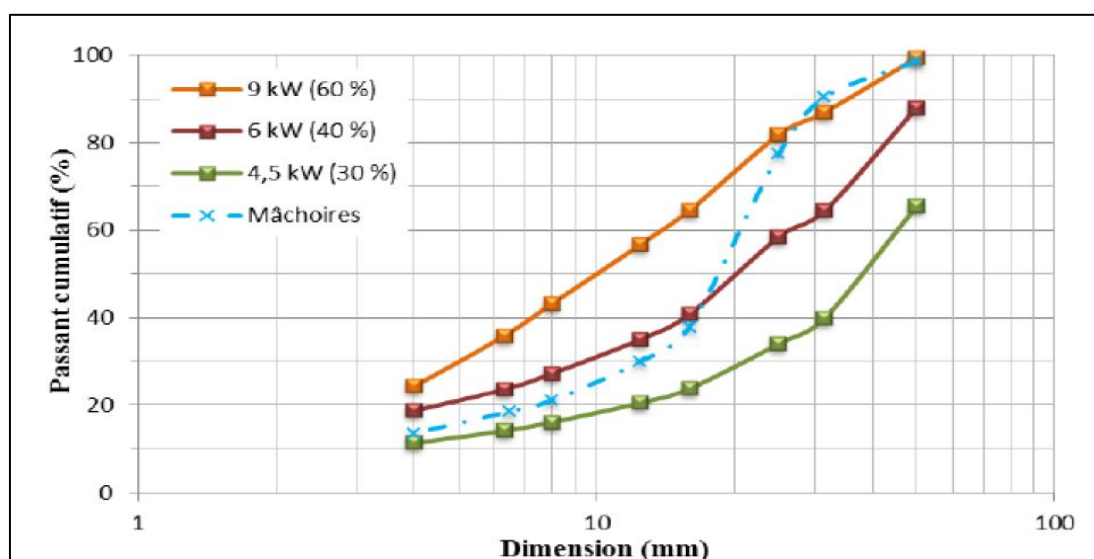


Figure I.14. Granulométrie des granulats recyclés en fonction du concasseur utilisé [SIM 19].

5.2. Masse volumique:

Il est bien connu que la masse volumique des granulats recyclés est plus petite que celle des granulats naturels [DEO 15, KHO 18, SIM 19, TOU 19]. Les recherches publiées ont rapporté que la valeur de cette propriété se situe généralement entre 1,9 et 2,4 t/m³, ce qui est bien inférieur aux valeurs connues pour les granulats naturels (environs de 2,75 t/m³). La cause principale de cette baisse dans la masse volumique de ces granulats par rapport aux granulats naturels est la présence du mortier résiduel autour de ces granulats. Il est bien connu que le mortier renferme une masse volumique inférieure que celle du granulat, ce qui implique une réduction dans la masse volumique du granulat recyclé du fait qu'une bonne partie de son volume n'est qu'un mortier résiduel. Sereng Marie [SER 20] a rapporté que la masse volumique des granulats recyclés, qui est fortement liée à leur porosité à la quantité de mortier attaché, diminue avec leur fraction granulaire (Tab. I.5).

Tableau I.5. Valeurs de masse volumique selon la fraction granulaire du granulat [MEF 13].

Type de granulat	Fraction granulaire	Masse volumique (Kg/m ³)
Naturel	5 - 10 mm	2660
	10 - 20 mm	2540
Recyclé	5 - 10 mm	2280
	10 - 20 mm	1980

5.3. Absorption d'eau:

L'absorption d'eau présente la quantité d'eau absorbée par le granulat recyclé du fait de la pénétration de l'eau à travers ses pores connectés [DEO 15, SIM 19, TOU 19]. Plusieurs chercheurs ont rapporté que l'absorption d'eau des granulats recyclés dépend de l'absorption d'eau de ses constituants (la pâte de ciment et le granulat naturel) ainsi que de leurs proportions dans le granulat recyclé. Khoury Eliane [KHO 18] a rapporté que la pâte de ciment qui enveloppe le granulat naturel dans un granulat recyclé est beaucoup plus poreuse que le granulat naturel, ce qui fait conclure que la qualité et la quantité de cette pâte sont à l'origine des grandes valeurs de porosité des granulats recyclés par rapport aux granulats naturels. Les valeurs d'absorption des granulats recyclés se trouvent généralement entre 3 et 10%, largement en dessus des valeurs d'absorption couramment déclarées pour les granulats naturels (entre 1 et 5%) [TOU 19]. A son tour, Sereng Marie [SER 20] a souligné que l'absorption d'eau du granulat recyclé, qui influe sur l'ouvrabilité du béton résultant, est fortement liée à sa porosité et donc à sa teneur en mortier attaché. Il a montré que l'absorption d'eau augmente lorsque la teneur en mortier attaché augmente (Figure I.15).

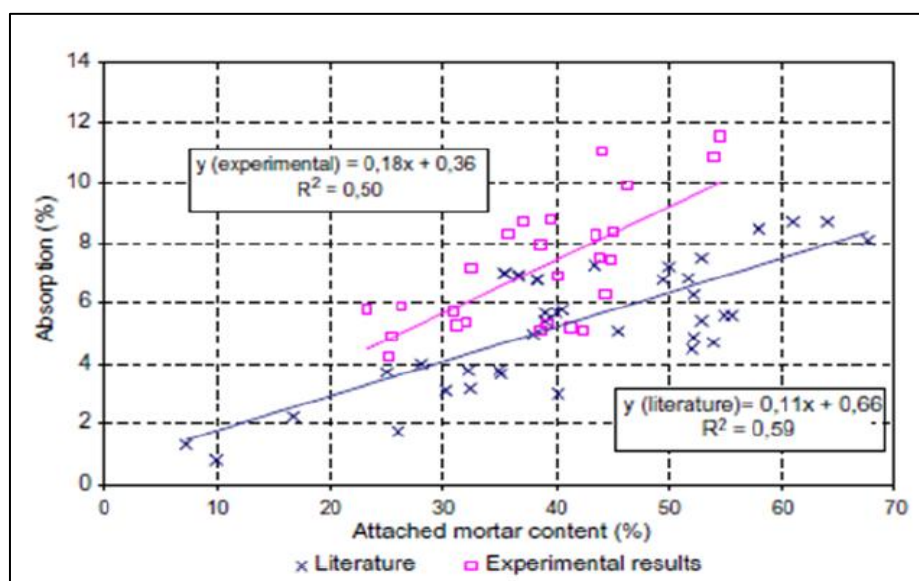


Figure I.15. Effet de la teneur en mortier attaché sur l'absorption d'eau des granulats recyclés [JUA 09].

5.4. Porosité:

La porosité d'un granulat recyclé dépend de sa taille, de la nature et de la qualité de son mortier attaché, selon [SER 20]. L'auteur a ajouté que la porosité du granulat recyclé est logiquement supérieure à celle du béton parent du fait de son concassage. Il a souligné également que la porosité initiale du béton parent influe significativement sur la porosité du granulat recyclé résultant. Il est tout à fait acceptable que la porosité d'un granulat recyclé obtenu à partir d'un béton parent qui a un E/C très élevé ou qui a été formulé à partir des granulats calcaires de forte porosité, est plus élevée que la porosité d'un granulat recyclé obtenu à partir d'un béton parent élaboré avec un faible rapport E/C ou avec des granulats siliceux qui sont souvent moins poreux [SER 20]. En plus de son effet sur la carbonatation naturelle et donc la formation des carbonates de calcium CaCO_3 , la porosité affecte significativement l'absorption du granulat recyclé; plus le granulat recyclé est poreux, plus son coefficient d'absorption est grand. Deodonne Kunwufine [DEO 15] a ajouté que la porosité diminue avec la taille des granulats, comme le montre les résultats du Tableau I.6.

Khoury Eliane [KHO 18] a constaté que dans la pâte adhérente d'un granulat recyclé, deux types de pores sont à prévoir: les pores capillaires et les pores des hydrates. Il a rapporté que le mortier de ciment bien carbonaté présente un volume de pores plus important dans la plage de taille de pores de 2 à 7 nm par rapport au mortier non carbonaté. D'autre part, plus les pores sont liés et interconnectés, plus la porosité est importante et plus l'absorption d'eau est élevée.

Tableau I.6. Valeurs de porosité en fonction des fractions granulaires des granulats [SER 20].

Type de granulat		Fraction granulaire	Porosité (%)
Naturel	[GOM 02]	5 - 12 mm	2,8
		12 - 20 mm	2,7
Recyclé	[GOM 02]	5 - 10 mm	14,9
		10 - 20 mm	13,4
Naturel	[ABB 09]	///	2,4
Recyclé		///	8,1 et 12,3

5.5. Composition chimique et minéralogique:

Selon Deodonne Kunwufine [DEO 15], la détermination de la composition chimique et minéralogique des granulats recyclés vise oprincipalement à déterminer:

- La teneur en sulfates (SO_3) car un % trop élevé de SO_3 conduit à un risque de formation d'ettringite secondaire. Il est à noter que la présence du plâtre dans le béton parent, peut causer la présence des sulfates dans les granulats recyclés.
- La teneur en chlorure (Cl) car elle peut provoquer la corrosion prématurée des armatures. La présence de Cl^- dans les granulats recyclés peut être causée par l'utilisation d'un béton en provenance d'une zone maritime.
- Le % de la silice réactive (SiO_2) et les alcalins (Na_2O , K_2O) car la réaction entre ces composants conduira à la formation d'un gel d'alcali silice, expansif et très nuisible à la durabilité du béton formulé à base de ces granulats recyclés.

L'auteur a signalé que la norme NF 1744-1 (1998) définit les méthodes d'analyse chimique des granulats, alors que la norme NF 12620 (2003) définit leurs appellations et donne quelques valeurs seuils. L'auteur a remarqué qu'à partir de ces normes, seulement le % total de soufre qui a été limité à 1% pour les granulats recyclés. Les % en sulfates solubles dans l'eau, en Cl^- définissent une désignation des granulats sans qu'un seuil ne soit imposé. Par ailleurs, une valeur maximale de 0,01% et de 0,8% respectivement pour les teneurs en Cl^- et en sulfate soluble dans l'eau sont préconisées.

5.6. Teneur en pâte de ciment:

Khoury Eliane [KHO 18] estime qu'après concassage du béton, une partie de la pâte de ciment reste attachée sur les granulats naturels d'origine. La qualité et la quantité de cette pâte de ciment sont à l'origine des propriétés physiques médiocres du granulat recyclé résultant (faible densité, absorption élevée, ...) par rapport au granulat naturel. Pour le moment, il n'y a

pas une valeur normalisée pour la teneur du granulat recyclé en cette pâte de ciment. La quantification de cette teneur est souvent très difficile à réaliser expérimentalement. Les méthodes existantes qui permettent de mesurer cette teneur sont des méthodes soit thermiques soit chimiques. Les méthodes thermiques utilisées pour les granulats recyclés sont basées sur le détachement progressif de l'ancienne pâte de ciment de la surface du granulat par un refroidissement brusque après un chauffage à 500°C. Celui-ci conduit à une dilatation différentielle entre le granulat naturel et la pâte de ciment qui l'entoure. Les méthodes chimiques consistent à dissoudre de manière sélective la pâte de ciment adhérente par différentes solutions acides (acide nitrique, acide chlorhydrique, etc.) selon la nature du granulat naturel dans le granulat recyclé [KHO 18].

5.7. Module de finesse et propreté de sable:

Lorsque un granulat recyclé est utilisé comme un sable dans la formulation d'un béton, son module de finesse et sa propreté doivent être déterminés. Il est bien connu que le module de finesse d'un sable se calcule à partir de sa courbe de distribution granulométrique. Le résultat obtenu va permettre de classer ce sable recyclé comme indiqué sur le **Tableau I.7**.

Tableau I.7. Classification des sables fonction du module de finesse (NF EN 12620) (Afnor, Norme NF EN 12620, 2003) [DEO 15].

Module de finesse selon la norme Française EN 12620		
CF : sable à gros grains	MF : sable à moyen grains	FF : sable à grains fins
4,0 à 2,4	2,8 à 1,5	2,1 à 0,6

Dans la littérature, le sable recyclé est largement utilisé pour la formulation des bétons. Le module de finesse de ces sables varie d'un auteur à un autre, mais une valeur un peu plus grande que celle d'un sable naturel a été souvent rapportée (3,3 contre 2,4) [DEL 18], ce qui cause souvent un manque d'ouvrabilité du béton résultant [GOM 02]. La finesse d'un sable recyclé peut être exprimée également, selon [DEO 15] selon sa proportions en éléments fins, dont le diamètre est inférieur à 63 µm. La teneur d'un sable recyclé en ces fines varie entre 0,5 et 8%. Ces teneurs sont étroitement liées au processus de concassage et d'élaboration du granulat recyclé, mais elles restent souvent inférieures à la valeur de 16 % qui est la limite supérieure définie dans la norme XP P 18 545, selon le même auteur.

La propreté du sable recyclé, mesurée suivant l'essai de l'équivalent de sable (NF P18-598) ou le VBS (NF P94-068), exprime surtout sa teneur en fines argileux. Il est fortement recommandé d'utiliser un sable recyclé ayant un équivalent de sable supérieur à 70%, car un grand risque de retrait est à prévoir lorsque cette valeur est inférieure à 60% [DEO 15].

5.8. Comportement mécanique:

L'objectif d'étudier le comportement mécanique d'un granulats recyclé est de connaître sa résistance et sa dureté. L'un des essais les plus connus pour caractériser la dureté d'un granulats recyclé est l'essai de résistance à l'abrasion (ou fragmentation), couramment connu sous le nom de l'essai Los Angeles (NF P18-573). En réalisant cet essai, le mortier résiduel lié au granulats d'origine se détache de celui-ci sous l'effet de l'abrasion (Fig. I.16), cela conduit à une forte perte de masse, ce qui est à l'origine des grandes valeurs du coefficient Los Angeles rapportées généralement pour les granulats recyclés par rapport aux granulats naturels selon Tourkia Guerzou [TOU 19]. Un coefficient de Los Angeles élevé signifie que le granulats est peu résistant [DEO 15]. Le tableau I.8 donne une idée sur les valeurs couramment obtenues pour le coefficient de Los Angeles des granulats recyclés en comparaison avec celles enregistrées pour les granulats naturels.

Le comportement mécanique peut également être évalué à partir de l'essai de résistance à l'usure dite essai de Micro Deval (NF P18-572). Une valeur élevée de l'essai de Micro Deval signifie aussi que le granulats est peu résistant. Deodonne Kunwufine [DEO 15] a rapporté que généralement un granulats naturel de nature siliceux résiste mieux à l'usure qu'un granulats recyclé dont la résistance est proche de celle de granulats naturels calcaires.

Tableau I.8. Valeurs du coefficient de Los Angeles selon le type de granulats [DEO 15].

Type de granulats	Coefficient de Los Angeles (%)
Granulats naturel	14,3
Granulats recyclé	34,1



Figure I.16. Essai de résistance à l'abrasion d'un granulats recyclé (Los Angeles) [TOU 19].

6. Conclusion :

Les granulats recyclés sont largement étudiés et utilisés pour la formulation des bétons et mortiers à travers le monde. Ils présentent une solution environnementale vis à vis les problèmes de stockage, de recyclage et de valorisation des déchets de démolition des ouvrages et constructions de génie civil. Ils présentent également une alternative envers l'épuisement ou le coût élevé des granulats naturel dans certaines région de la planète.

Ce pendant, pour être efficacement utilisés, les granulats recyclés doivent répondre à certaines exigences et recommandations dont la majeure partie n'est que le résultats des recherches effectuées aux sein des laboratoires universitaires, en l'absence des normes spécifiques à ce type de granulat.

Le plus souvent, les granulats recyclés sont obtenus soit d'un béton initial, nommé béton parent, soit d'un mélange hétérogène contenant du béton, de la brique, de l'acier, etc. Indépendamment de son origine, un granulat recyclé présente généralement des faibles performances et caractéristiques par rapport au granulat naturel, ce qui est principalement dû à la présence d'une pâte de ciment autour du granulat naturel formant le granulat recyclé. Pour améliorer la qualité d'un granulat recyclé on procède souvent à des traitements de différentes natures pour ce granulat recyclé avant d'être utiliser pour la formulation du béton.

CHAPITRE II:

Effets des granulats recyclés sur les bétons

Introduction :

Actuellement, le béton est le matériau de construction le plus fabriqué et consommé à travers le monde. Certaines ressources affirment qu'environ 5 milliards de M^3 de béton sont produites chaque année à l'échelle mondiale pour répondre aux besoins de réalisation et de construction des ouvrages de toutes natures : bâtiments, ponts, routes, tunnels, barrages, centrales thermiques et nucléaires, etc.

Le béton est un mélange de ciment, de sable, de gravier et d'eau. Certains de ces matériaux sont actifs (ciment et eau) et participent dans l'hydratation en aboutissant à la formation de ce que nous appelons les produits d'hydratation, alors que certains d'autres ne le sont pas et sont donc considérés comme inertes (les agrégats : sable et gravier).

Généralement, les caractéristiques du béton sont étroitement liées aux caractéristiques de ses composants. Les granulats recyclés, connus par leur forte absorption peuvent influencer donc d'une manière non négligeable sur le béton. Les recherches effectuées sur les bétons à base de granulats recyclés de toutes natures ont traité ce point et rapporté certaines précautions à prendre en considération pour ne pas causer une chute drastique dans les performances du béton. Ce chapitre sera consacré aux principaux résultats obtenus lors de l'incorporation des granulats recyclés dans le béton et les méthodes les plus connues pour améliorer le rendement et les performances de ces matériaux.

1. Effets des granulats recyclés sur les propriétés des bétons :

1.1. A l'état frais :

1.1.1. Propriétés rhéologiques :

Boudali S. [BOU 18] a rapporté que la maniabilité est l'une des caractéristiques rhéologiques importante du béton frais, du fait qu'elle caractérise son pouvoir à remplir le coffrage et à bien enrober les armatures. Les performances rhéologiques d'un béton à base de GR dépendent considérablement des propriétés de ces GR.

D'après Tourkia G. [TOU 19], les propriétés rhéologiques du béton se changent dès qu'on procède à la substitution partielle ou totale des GN par des GR; une perte de maniabilité est souvent prononcée.

C'est pour ça, la formulation de ce type de béton est généralement fonction de sa consistance initiale exprimée surtout à travers l'affaissement au cône d'Abrams. L'expérience a montré que pour atteindre la même consistance, et donc le même affaissement, qu'un béton ordinaire de

formulation identique, le béton à GR se caractérise toujours par son dosage en eau plus forts que pour les bétons ordinaires. Pour réduire les effets indésirables de cette action d'addition de l'eau, que cause principalement l'absorption d'eau par les granulats recyclés, l'utilisation d'adjuvants est fortement requise. Cependant, certains auteurs préconisent de pré-saturer les GR (via leur immersion dans l'eau) avant leur utilisation dans le béton.

L'influence des granulats recyclés sur le comportement rhéologique d'un béton peut être constatée à travers sa prise plus rapide que celle du béton ordinaire. On admet que la réduction du rapport **Eau efficace/ciment**, et la présence d'alcalins que peut contenir les GR conduisent généralement à une réduction du temps de prise.

D'autre part, la réduction du rapport **Eau efficace/ciment** peut conduire à une meilleure hydratation et donc un dégagement plus important de la chaleur d'hydratation. Les GR surtout s'ils sont de qualité médiocre et contiennent beaucoup de fines, peuvent engendrer l'apparition progressive du retrait plastique. Ce retrait est proportionnel aux conditions climatiques, au ressuage et au mode de cure du béton. Le béton à GR présente souvent un retrait plastique plus important à cause de la présence de fine en quantité importante et l'absorption différée d'eau par ses granulats (GR) [TOU 19].

I.1.2. Ouvrabilité:

L'ouvrabilité d'un béton frais est, selon [SIM 19], la propriété qui caractérise sa fluidité. L'évaluation de cette propriété est indispensable pour une bonne mise en œuvre du béton, en particulier dans le cas d'un béton à base de GR. Il a été souvent rapporté que l'ouvrabilité des bétons à base de GR est inférieure que celle des bétons ordinaires. La diminution de l'ouvrabilité des bétons à base de GR par rapport aux bétons ordinaires s'explique par l'absorption des GR et leur forme plus anguleuse, comparée aux GN. La forte absorption d'eau est due à la présence de l'ancien mortier attaché aux granulats recyclés. Ceci se traduit par une baisse de la maniabilité qui accompagne la présence élevée de mortier attaché aux granulats recyclés. Les travaux de recherche qu'on trouve dans la littérature soulignent que pour ajuster l'ouvrabilité du béton, la forte absorption des GR exige l'ajout d'une quantité d'eau supplémentaire. Les chercheurs utilisent généralement le test d'affaissement pour évaluer l'ouvrabilité d'un béton. Ils affirment selon [BOU 18] que l'affaissement des bétons à GR est généralement inférieur à celui du béton ordinaire, comme l'indique la Figure II.1.

Cependant, certaines recherches, selon [SIM 19], ont montré que l'humidité des GR au moment de la formulation des mortiers et bétons affecte leur ouvrabilité. Selon le même

auteur, il a été rapporté que l'étalement d'un mortier formulé à partir de GR secs a été plus important que celui obtenu pour le mortier à base de GR saturés pour un même rapport E/C. Les chercheurs pensent que l'absorption des GR secs dans le mortier est plus faible, ou bien que cette absorption se fait lentement par rapport à l'absorption déterminée par les méthodes standards (NF 1097-6 par exemple). Dans ce cas, partie des pores des GR secs est bouchée par des grains de ciment ce qui empêche l'absorption de l'eau par ces granulats.

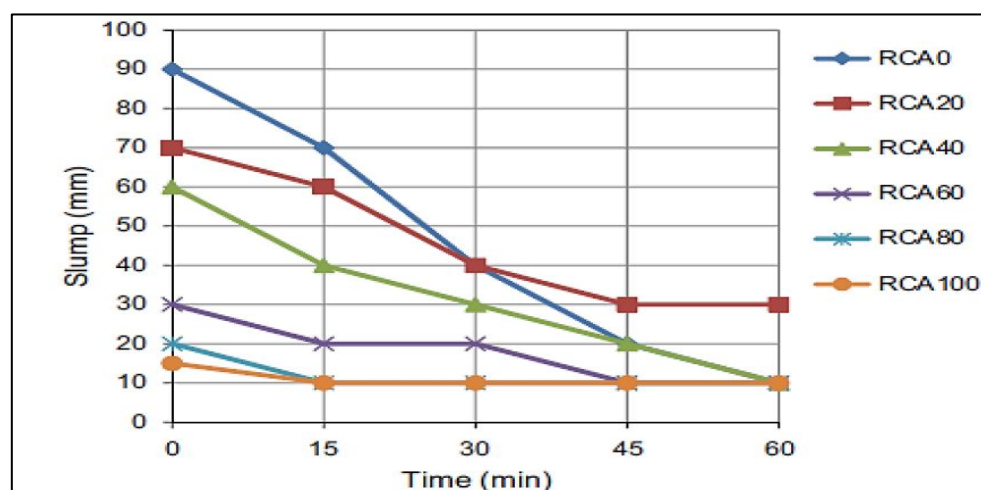


Figure II.1. Évolution de l'affaissement en fonction du temps et du % d'incorporation des GR dans le béton [SER 20].

I.1.3. Autres:

D'après Boudali S [BOU 18], la propriété d'air occlue dans un béton à GR doit être étudiée, du fait que la présence des bulles d'air emprisonnées dans le béton influence positivement les propriétés de ce béton à l'état frais et durci. Il a été rapporté que la teneur en air du béton à GR est plus élevée que celle du béton à GN. Ceci est dû à la forte porosité des GR par rapport aux GN.

La densité du béton est également une propriété de grande importance. Il a été souvent constaté que les bétons à GR présentent une densité largement inférieure à celle constatée pour les bétons à GN, ce qui s'explique également par la porosité et l'hétérogénéité des GR par rapport aux GN.

En termes de zone interfaciale (zone entre la pâte de ciment et le granulat généralement notée ITZ), le béton ordinaire contient une seule ITZ, tandis que le béton à GR contient deux ITZ. La première est localisée entre l'ancien mortier adhérent et l'ancien GN, alors que la deuxième est présente entre le nouveau mortier et l'ancienne pâte de ciment. Ces zones doivent être soigneusement contrôlées pour pouvoir bien étudier la perméabilité et la résistance du béton.

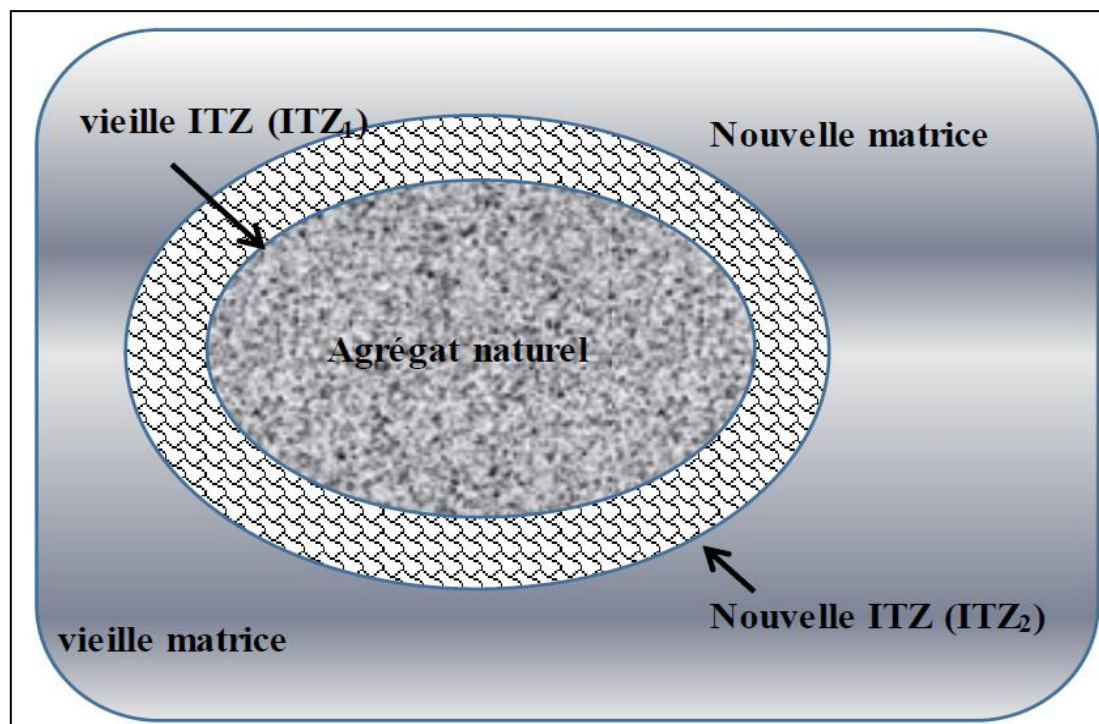


Figure II.2.Présentation de l'ancienne ITZ et la nouvelle ITZ d'un GR [BOU 18].

1.2. A l'état durci :

1.2.1. Propriétés mécanique :

La résistance à la compression des bétons à base de GR est influencée par plusieurs paramètres, en particuliers leur teneur en GR et leur rapport E/C [SER 20], comme c'est présenté sur la Figure II.3. L'auteur a souligné que le % des GR dans le béton affecte sa résistance à la compression de sorte qu'à des faibles teneurs en GR, la réponse mécanique augmente. Cette baisse de résistance se trouve accompagnée d'une forte porosité et d'une grande absorption d'eau pour les bétons à GR par rapport aux bétons à GN. À cela s'ajoute le fait que l'eau présente dans les GR ayant une forte absorption d'eau peut être libérée au moment de la vibration du béton, entraînant ainsi une augmentation du rapport E/C et donc une augmentation de sa porosité et une baisse dans sa résistance à la compression.

Pareillement, Tourkia G. [TOU 19] a noté que la résistance à la compression des bétons à base de GR peut être de 5 à 40 % plus faible que celle d'un béton à base de GN. De façon générale, il a été souvent rapporté que la résistance à la compression dépend :

- De la teneur du béton en GR qui présente le pourcentage de remplacement des GN par les GR pour un rapport E/C constant. La résistance à la compression diminue très peu pour des faibles taux de remplacement ($\geq$ ou égal à 25%). Cette baisse s'explique par la forte porosité et la mauvaise interface granulats/liant des bétons à GR.

- Du rapport E/C choisi pour le béton à GR.
- De la qualité du béton parent.
- De la nature des additions minérales utilisées.
- Des conditions de cure.
- Du type de ciment.
- De la méthode d'élaboration du béton à GR notamment en termes de malaxage. Le procédé ASTM (pré-malaxage des granulats et eau incorporée en plusieurs étapes) conduise à des résistances à la compression plus importantes.

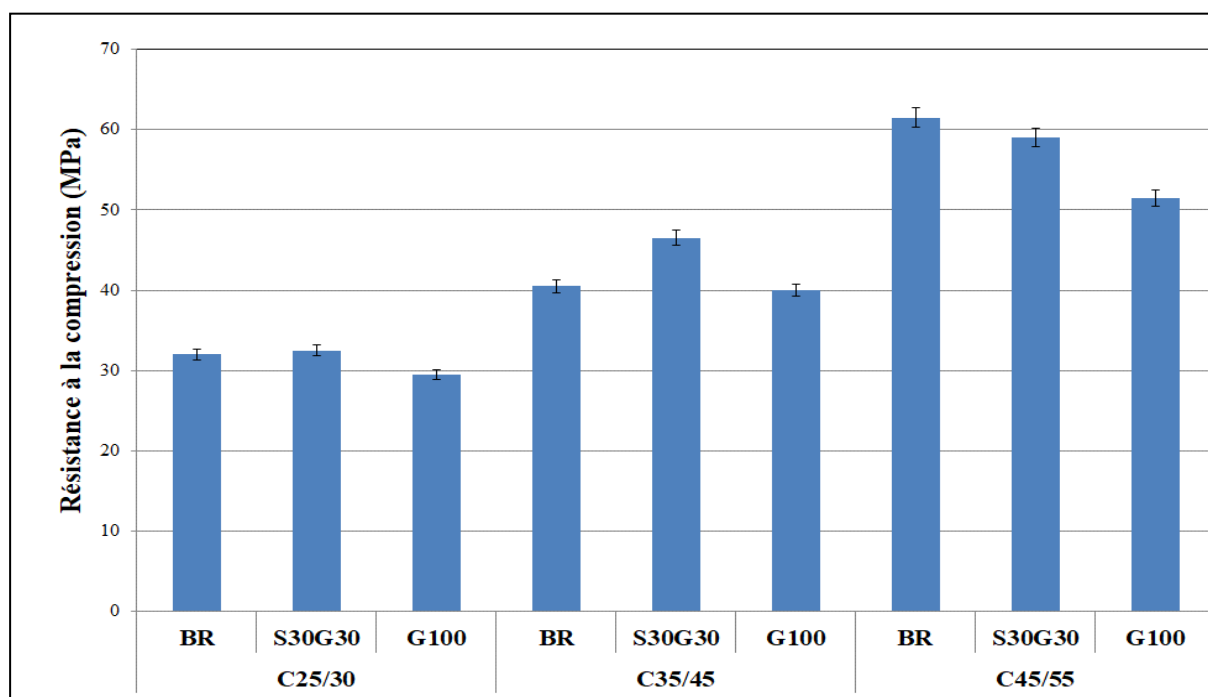


Figure. II.3. Résistance à la compression des bétons en fonction des % des GR. (BR : béton de référence, S30G30 : béton avec 30 % de sable, 30 % de gravillons substitués, G100 : béton avec 100 % de gravillons substitués) [SER 20].

1.2.2. Propriétés de transfert :

Les propriétés de transfert d'un béton désignent sa résistance à la pénétration et la propagation d'un liquide ou d'un gaz. Généralement, pour étudier les propriétés de transfert d'un béton on mesure sa perméabilité, sa porosité et son absorption. Selon [BOU 18], dans un béton on distingue entre la perméabilité de la pâte de ciment et celle de ses granulats. La perméabilité de l'ancienne pâte qui entoure l'ancien GN est due au réseau poreux à l'intérieur de cette pâte et au niveau de la zone de contact pâte de ciment – granulat (ITZ). La perméabilité due aux GR contenus dans le béton à GR est liée à la source de ces granulats (déchets de construction,

de démolition, etc.). Dans tous les cas, il est couramment accepté qu'un béton à GR donne lieu à une perméabilité supérieure à celle du béton traditionnel de 10-45%.

De même, l'absorption d'eau d'un béton durci à GR est généralement supérieure à celle d'un béton à GN comme l'indique la **Figure II.4**. Au cours du durcissement du béton, la vaporisation de l'eau provoque sa porosité. Il s'agit de l'eau qui n'a pas été utilisée en l'hydratation du ciment et l'eau ajoutée à cause de l'absorption des GR contenus dans le béton à GR. Selon [BOU 18], une série de tests a été effectuée pour examiner la porosité d'un béton à base de GR à 7, 28 et 90 jours de durcissement, pour les comparer avec les résultats obtenus pour des bétons identiques obtenus à partir de GN. Les résultats ont indiqué que le remplacement des GN par des gros GR a augmenté la porosité de béton.

À son tour, [SER 20] a rapporté que la porosité des bétons à GR est souvent plus grande que celle des bétons à GN, car la présence des GR affecte considérablement la compacité de la pâte de ciment. La **Figure II.5** confirme cette hypothèse du fait que la porosité accessible à l'eau (P en %) augmente par rapport au béton de référence (BR) quelque soit la classe de béton (qui varie en fonction du type et % de GR qui remplace les GN). Il a été souligné que la porosité de ces bétons à GR est affectée par la porosité des GR, qui elle-même est affectée par la teneur en mortier attaché. De plus, l'élaboration des GR et leur concassage, peut engendrer des fissures, ce qui endommage clairement leur surface conduisant ainsi à une forte pénétration de l'eau entre les granulats et la pâte de ciment.

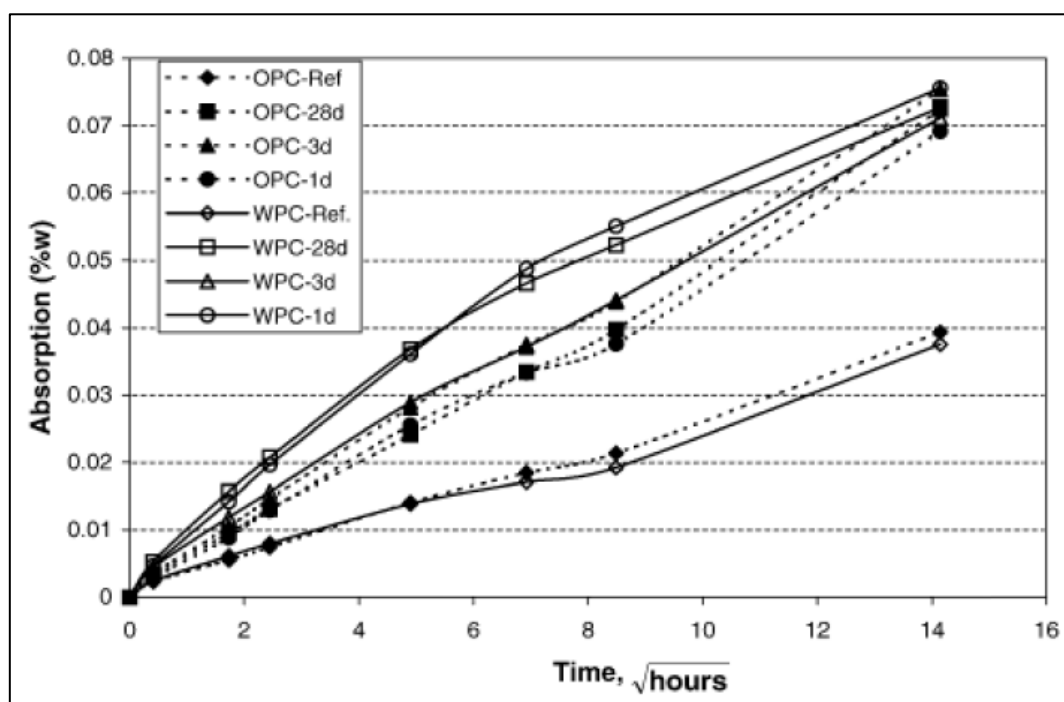


Figure II.4. Taux d'absorption d'eau pour le béton à BR et celui ordinaire [BOU 18].

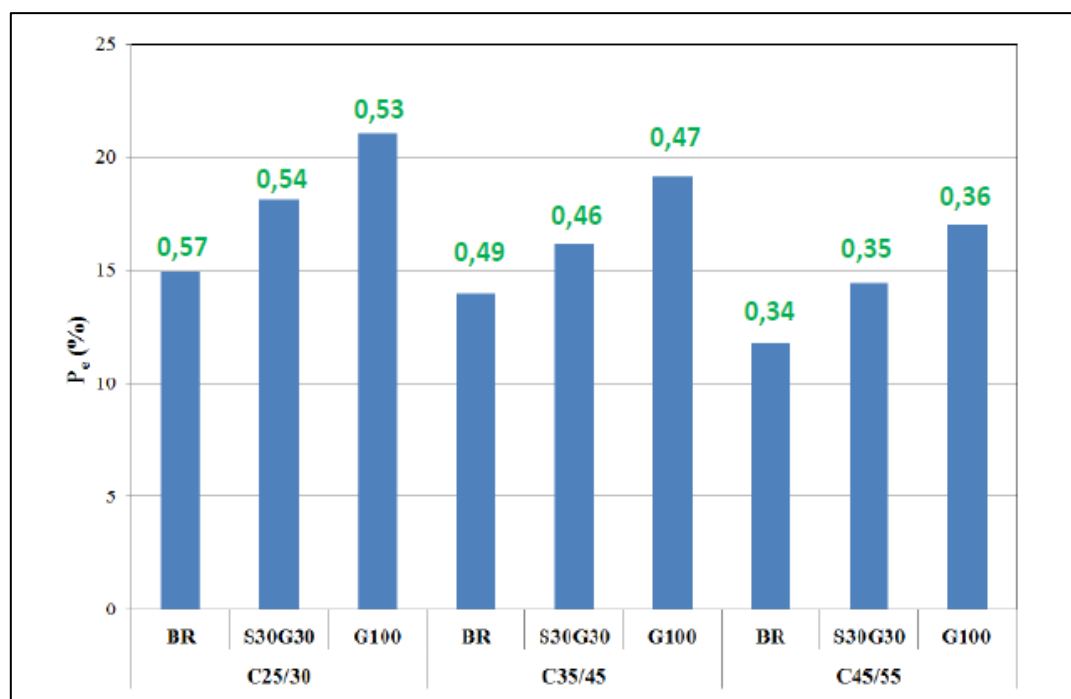


Figure II.5. Porosité accessible à l'eau pour des bétons à différents taux de substitution après 90 j (BR : béton de référence, S30G30 : 30% de substitution, G100 : 100%) [SER 20].

Comme la perméabilité est liée à la connectivité des pores, elle augmente avec l'augmentation du taux d'incorporation des GR dans le béton [SER 20]. L'auteur pense que la perméabilité du béton à GR est liée également à son rapport E/C, donc elle légèrement affectée dans le cas des bétons à GR de faibles rapports E/C. Donc, il est fortement possible de réduire la perméabilité d'un béton à GR en diminuant tout simplement son rapport E/C. En conclusion, la forte porosité des bétons à GR influe négativement sur leur coefficient d'absorption d'eau qui augmente avec le taux de substitution des GR et avec leur rapport E/C. L'incorporation des GR provoque l'augmentation de l'absorption d'eau à cause du mortier attaché de ces granulats et à des procédés de leur concassage. Les mêmes conclusions ont été rapportées par P.P. Torres [TOR 20].

1.2.3. Propriétés de durabilité :

D'après [SER 20], l'augmentation de la porosité dans le béton à GR augmente son absorption d'eau, mais favorise aussi la pénétration des agents agressifs comme les ions Chlorures, ce qui provoque la corrosion des armatures et affaiblit significativement la durabilité du béton qui les entoure. Ce n'est pas tout, cette lacune induit également une augmentation de la profondeur de carbonatation, comme le montre la Figure II.6. Dans cette figure, on peut constater clairement l'effet du pourcentage de substitution des GR sur la profondeur de

carbonatation. Globalement, les propriétés de durabilité des bétons à base de GR sont affectées par les caractéristiques de ces GR, leur taux de substitution, la compacité de la matrice du nouveau béton et le rapport E/C. Ce dernier a été discuté par [TOR 20] qui a rapporté que la formulation des bétons à GR se fait généralement de la même façon que pour les bétons traditionnels. Elle commence par l'optimisation du dosage en ciment pour atteindre la résistance à la compression visée, puis l'optimisation du rapport E/C et l'éventuel dosage en superplastifiant afin d'atteindre la fluidité voulue. Ces étapes se résument comme suit :

- Pour atteindre une maniabilité donnée d'un béton à GR, une quantité d'eau supplémentaire doit être rajoutée à l'eau de gâchage.
- Comme la quantité d'eau de gâchage a été augmentée, le dosage en ciment doit être ajusté pour maintenir le même rapport E/C et préserver donc, la classe de résistance souhaitée.

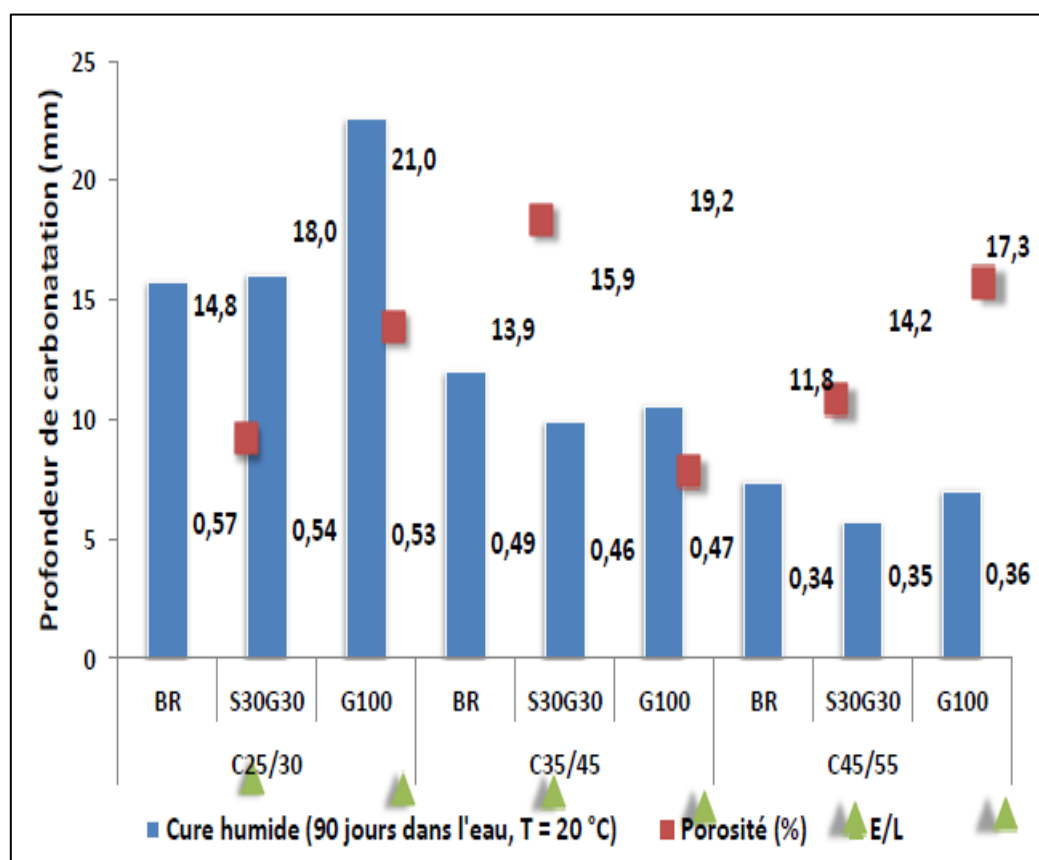


Figure II.6. Effet de la teneur des GR sur la profondeur de carbonatation (BR : béton de référence, S30G30 : 30 % de substitution, G100 : 100 % de substitution) [SER 20].

À son tour, [TOU 19] a noté que la durabilité des bétons à GR a été largement étudiée dans la littérature. Les études publiées ont concerné beaucoup de paramètres de durabilité dont les plus importants sont :

- ❖ **Absorption et perméabilité :** l'absorption, que ce soit par immersion ou par capillarité, est souvent plus grande dans le cas des bétons à GR. Cependant, la perméabilité ne se constate clairement chez les bétons à GR par rapport aux bétons traditionnels que pour des rapports E/C supérieurs à 0,55.
- ❖ **Carbonatation :** elle est considérablement affectée par l'incorporation des GR dans le béton, où sa cinétique devient de plus en plus rapide (**Fig. II.7**).
- ❖ **Migration des chlorures :** la plus part des travaux existants montrent que le remplacement des GN par les GR favorise la pénétration des chlorures. L'imprégnation de ces granulats par certaines solutions (comme le polyvinyle alcool) améliore la résistance à cette migration.
- ❖ **Résistance aux sulfates :** selon l'auteur [**TOU 19**], il a été montré que la résistance aux attaques sulfatiques d'un béton à base de GR est similaire (ou légèrement inférieure) à celle d'un béton composé de granulats traditionnels.
- ❖ **Résistance aux cycles de gel-dégel :** il est couramment admis que la résistance aux cycles de gel-dégel d'un béton à GR est inférieure à celle d'un béton à GN. Cette résistance dépend surtout du degré de saturation en eau du matériau. L'utilisation d'un entraîneur d'air améliore la durabilité de ces bétons vis-à-vis aux cycles de gel dans l'air, dégel dans l'eau, que les bétons à base de GN.



Figure II.7. Influence de la carbonatation sur le béton à GR [**TOU 19**].

2. Paramètres influant sur le rendement des GR :

2.1. Forme, texture et distribution granulaire:

Ces caractéristiques dépendent principalement de la méthode de concassage et la qualité du béton parent. La forme d'un GR diffère de celle d'un GN (**Fig. II.8**) à cause de l'ancien mortier attaché sur les GR, ce qui conduira à une mise en œuvre différente dans le béton. Il a été rapporté que la teneur en mortier attaché varie selon la taille du GR, elle augmente quand la taille des GR diminue. Cependant, le mortier attaché aux GR grossiers lors de sa production se détache au cours du temps et s'accumule dans les petites fractions granulaires [**SER 20**]. Khelef et al. [**KHE 21**] ont rapporté que la granulométrie et la taille maximale des GR influent sur leur proportion relative, les quantités d'eau et du ciment et les propriétés du béton telles que sa maniabilité, sa porosité, son retrait et sa durabilité. Selon ces auteurs, les granulats les plus désirables pour le béton sont généralement les granulats des proportions élevées en particules cubiques, cela conduit souvent à une augmentation de la compacité du squelette granulaire et une augmentation de l'adhérence pâte-granulat. Cependant, la forme et la rugosité des GR peuvent impliquer une plus grande difficulté pour les bulles d'air à s'extraire du béton pendant la vibration, ce qui a été rapporté par certains d'autres chercheurs où des teneurs en air occlus légèrement plus importantes ont été trouvées dans les bétons à GR. De même, Boudali S. [**BOU 18**] a affirmé que la texture de sable recyclé aura un effet néfaste sur la maniabilité de béton.

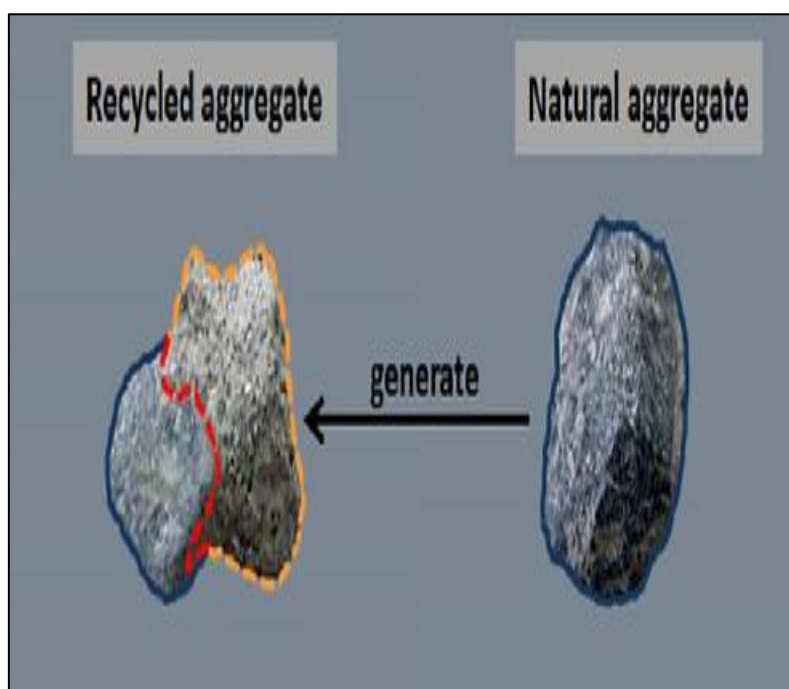


Figure II. 8. Différence entre la forme d'un GN et celle d'un GR [**SER 20**].

2.2. Influence du mortier attaché :

Selon [BOU 18] l'ancien mortier collé sur les granulats et qui n'a pas été éliminé lors du concassage est l'une des lacunes essentielles des GR. Sa quantité est très aléatoire du fait qu'elle varie selon le procédé de fabrication des GR et la qualité d'adhérence entre le GN et la pâte de ciment formant ce GR. La quantité de mortier attachée affecte considérablement la résistance à la compression du béton aux GR ainsi que sa résistance à la flexion qui diminuent avec l'augmentation de la quantité de ce mortier attaché. D'après [KHE 19], dans un GR, le mortier attaché est la cause principale de la baisse de ses caractéristiques: une plus faible densité, une absorption plus élevée avec plus de sulfates et d'alcalins. Les caractéristiques du mortier attaché dépendent principalement des performances du béton parent.

2.3. Influence d'autres paramètres :

[SER 20] a rapporté que la masse volumique des GR peut affecter les performances d'un béton à GR. Cette propriété est liée à la fraction granulaire, la porosité du GR, la quantité de mortier attaché et les données du béton parent (densité de sa pâte de ciment, densité de ses GN, proportion de la pâte dans le béton parent). Aussi les performances mécaniques des GR, telles que les coefficients Los Angeles et Micro Deval, peuvent influencer sur les propriétés du béton à GR.

À leur tour, Khelef et al. [KHE 19] ont noté que la densité des bétons à GR est plus basse que celle des bétons à GN car les GR sont plus légers. Les valeurs reportées varient généralement entre 2000 et 2200 kg/m³. Cette baisse de densité s'explique par le fait que les GR sont hétérogènes, ils contiennent en plus du GN une certaine quantité de mortier attaché dont la densité est moins importante que celle du granulat.

[BOU 18] a rapporté que la forte teneur du béton à GR en bulles d'air influence positivement sur ses propriétés à l'état frais et durci. L'auteur pense qu'un béton à GR renferme plus d'air occlus du fait de la grande porosité des GR. L'auteur pense également que la présence de deux ITZ dans un béton à GR (contre une seule ITZ dans le cas d'un béton à GN) peut être la cause d'une augmentation de sa résistance et la réduction de sa perméabilité. L'auteur ajoute également que la perméabilité d'un béton à GR dépend de la perméabilité des GN qu'il contient et de celle de l'ancienne pâte de ciment qui les entoure. Ce béton présente généralement une perméabilité de 10-45% supérieure à celle du béton ordinaire.

3. Amélioration du rendement des GR : traitement des GR :

Les GR se caractérisent par leur porosité et leur forte capacité d'absorption, indépendamment de leur type, de la provenance et de la qualité du béton parent. Cette absorption est due à la présence de la pâte de ciment qui est reconnue pour être un matériau poreux ce qui gêne l'hydratation du ciment par l'emprisonnement d'une quantité d'eau dans ces pores. La consistance du béton dans ce cas (béton à GR) nécessite une quantité supplémentaire d'eau de gâchage que celui de béton à GN. Deux solutions sont envisagées : soit on ajoute de l'eau, soit on minimise la porosité à travers des traitements spécifiés pour les GR.

3.1. Compensation de l'eau absorbée par les GR :

Selon [TOU 19], la grande absorption des GR le laisse pas assez d'eau pour le mélange du béton s'ils ne sont pas initialement humides ou saturés, ce qui impose la compensation de cette eau. Les méthodes permettant la compensation de l'eau absorbée par les GR sont :

3.1.1. Méthode de la pré-saturation :

Dans cette méthode, les GR sont mis en contact avec de l'eau pendant une durée définie avant leur introduction dans le mélange du béton (Fig. II.9) [TOU 19].

3.1.2. Méthode de compensation :

Il s'agit cette fois-ci d'ajouter une quantité d'eau pour compenser l'effet d'absorption des GR. Dans les deux cas, une quantité d'eau égale à la différence entre l'absorption et la teneur en eau des granulats recyclés a été ajoutée [TOU 19].

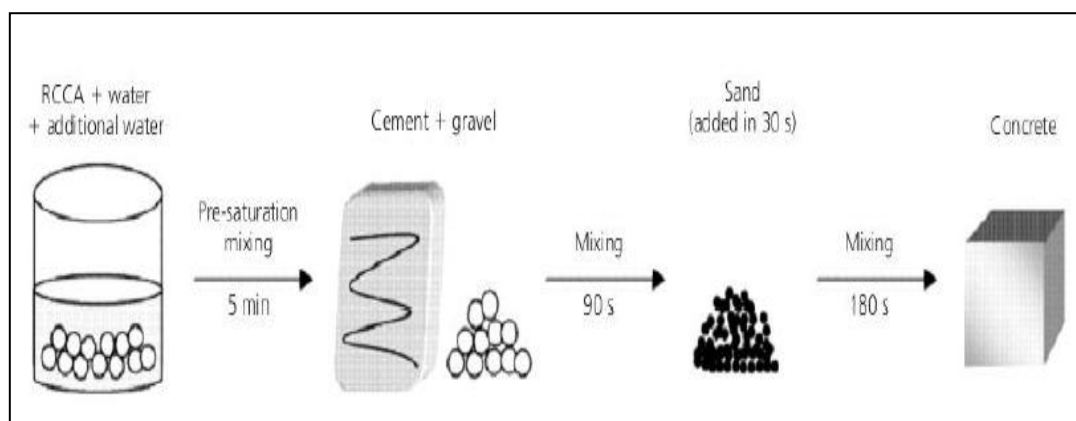


Figure II. 9. Méthode de malaxage pour la méthode de pré saturation [TOU 19].

3.1.3. Méthode de mélange en deux étapes :

Elle consiste à incorporer l'eau dans le mélange en deux étapes, pour permettre aux grains de ciment de bien s'adhérer à la surface du GR (Fig. II.10) [TOU 19].

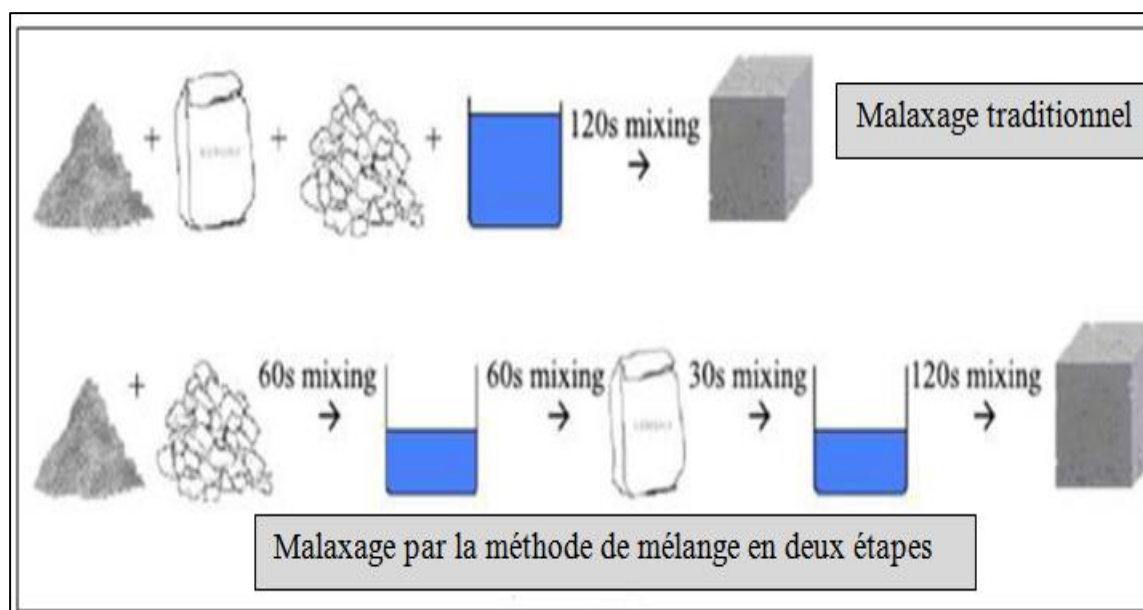


Figure II. 10. Méthode de malaxage pour la méthode en 2 étapes [TOU 19].

3.1.4. Méthode du mortier équivalent :

Cette méthode consiste à considérer le GR comme matériau composé de 2 éléments : granulat naturel et mortier attaché. La méthode cherche à formuler un béton contenant la même quantité de mortier total (mortier attaché et nouveau mortier) que le béton témoin [TOU 19]. La difficulté de cette méthode réside dans l'estimation exacte de la quantité du mortier attaché, ce qui n'est pas toujours assez évident !.

4. Méthodes de traitement des GR :

La littérature nous a montré que les propriétés des GR dépendent principalement des caractéristiques du béton parent, la méthode de fabrication et de concassage de ces granulats et leur temps et conditions de stockage. Comme la porosité de ces GR constitue un inconvénient majeur vis-à-vis de leur réutilisation dans la mesure où leur absorption de l'eau au moment du malaxage diminue l'ouvrabilité des bétons, il est de grande importance de trouver un moyen pour éliminer ou réduire cette porosité [TOU 19]. Dans ce qui suit nous allons citer quelques méthodes de traitement utilisées pour diminuer l'absorption des GR.

4.1. Traitement par carbonatation accélérée : basée sur une réaction naturelle entre la matrice cimentaire et le CO_2 présent dans l'air. De manière simplifiée, la réaction de carbonatation peut s'écrire : $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \longrightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$.

La formation des carbonates de calcium (CaCO_3) entraîne donc un remplissage des pores des GR ce qui diminue leur porosité et améliore leurs propriétés.

4.2. Traitement de surface par précipitation de carbonate microbien: cette méthode est basée sur la précipitation des carbonates issus des sources microbiennes dans un milieu de pH et température contrôlés.

4.3. Traitement par méthode mécanique : elle consiste à enlever complètement le mortier attaché lors du concassage et production des GR.

4.4. Traitement par trempage dans l'acide: elle consiste également à enlever complètement le mortier attaché des GR à suivant un procédé (en utilisant des acides).

4.5. Traitement par changement d'état de surface : les GR sont exposés pendant une longue durée aux fines de pouzzolanes ou à la fumée de silice, ce qui permettra à ces fines de pénétrer dans les pores du GR.

4.6. Traitement chimio-mécanique : basée sur la dégradation chimique combinée par exposition des GR à une solution de sulfate de sodium et à des contraintes créées en les soumettant à une action de gel et de décongélation pour séparer le mortier attaché.

4.7. Traitement thermique : l'exposition des GR aux hautes températures (500 ° C et plus) causera la séparation entre le GN et son mortier attaché.

4.8. Traitement thermique-mécanique : le mortier attaché est éliminé par la combinaison des contraintes de températures et les contraintes mécaniques générées par frottement.

4.9. L'enrichissement assisté par micro-ondes des granulats de béton recyclé : le mortier attaché est éliminé cette fois-ci par le chauffage des GR dans un micro ondes.

4.10. Traitement thermique par étuvage : le mortier attaché est éliminé dans cette méthode par le chauffage des GR dans une étuve.

4.11. Traitement thermique par cycles de chauffage et de refroidissement : le mortier attaché après exposition du GR à des cycles composés d'un palier de montée en température puis un palier de refroidissement.

4.12. Traitement par revêtement de ciment : il s'agit d'encapsuler le GR à travers sa couverture par un film de pâte de ciment (le mettre dans une capsule de ciment).

4.13. Traitement par hydrofuge : consiste en l'immersion du GR dans une solution d'agent hydrofuge. Après trempage, le GR sera séché pour que l'hydrofuge soit polymérisé.

4.14. Traitement par polymère : il s'agit dans ce cas d'encapsuler le GR à travers sa couverture par un film de polymère tel que la résine.

CHAPITRE III:

Synthèse bibliographique sur les bétons et les mortiers à base de granulats recyclés

Introduction :

Dans la littérature, on trouve facilement beaucoup de recherches qui visent à développer les effets de l'incorporation des granulats recyclés, notamment ceux issus de la démolition d'un béton, sur les propriétés des bétons et mortiers résultants à l'état frais ainsi que celui durci. Les déchets de démolition (béton parent) sont généralement utilisés comme graviers ou sable dans la formulation du béton, mais aussi comme une matière première incorporée dans le cru lors de la fabrication d'un ciment comme le confirme les auteurs de l'ouvrage scientifique: béton recyclé [DEL 18].

Dans ce chapitre, nous allons présenter les principaux résultats de certaines études qui ont été menées sur l'évaluation des propriétés des bétons formulés à partir des sables et graviers en provenance de granulats recyclés.

1. Étude de Goufi et al. [GOU 18] :

Dans cette étude, publiée dans le cadre des Rencontres Universitaires de Génie Civil à St Etienne (France) en 2018, les auteurs ont étudié la résistance à la compression, la résistance à la traction et la perte de masse d'un béton formulé entièrement à base de graviers recyclés provenant de la démolition de bâtiments. Les valeurs obtenues à partir de ces essais ont été mises en comparaison avec celles obtenues, dans les mêmes conditions, pour un béton témoin formulé 100 % à base de granulats naturels. Un seul sable (sable concassé de module de finesse de 2,95) a été utilisé pour les deux bétons, cependant deux fractions granulaires 3/8 et 8/15 ont été utilisées pour chaque type de granulat: granulat naturel GN et granulat recyclé GR. Les masses volumiques absolues ont été entre 2,65 et 2,67 g/cm³ pour les GN et entre 2,52 et 2,63 g/cm³ pour les GR. Les distributions granulométriques des différents granulats sont présentées sur la Figure III.1.

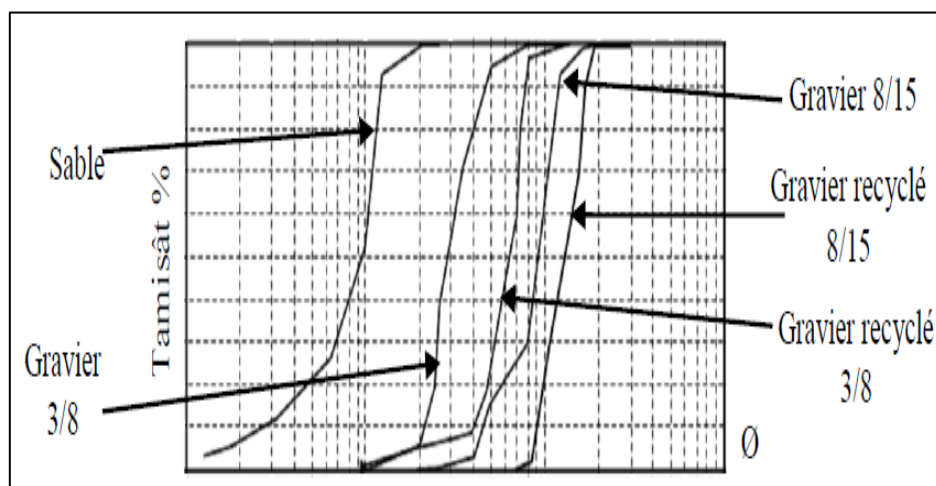


Figure III.1. Distributions granulométriques du sable, GN et GR [GOU 18].

Des éprouvettes de béton $16 \times 32 \text{ cm}^2$, ayant la même quantité de ciment, ont été préparées. Il a été constaté que pour le même rapport E/C, l'ouvrabilité du béton recyclé est plus faible que celle du béton naturel en raison de la capacité importante d'absorption des granulats recyclés. L'évaluation de l'affaissement des deux bétons via le cône d'Abrams a permis aux chercheurs, d'identifier la quantité d'eau à ajouter au béton recyclé, pour qu'il atteigne la même consistance que le béton naturel. De même, la masse volumique du béton recyclé a été plus faible que celle du béton à granulats naturels alors que leur absorption est plus importante.

En ce qui concerne la réponse mécanique des deux bétons, les auteurs ont évalué leurs résistances à la compression à 7, 28 et 45 jours, dont les résultats sont présentés sur la **Figure III.2.**

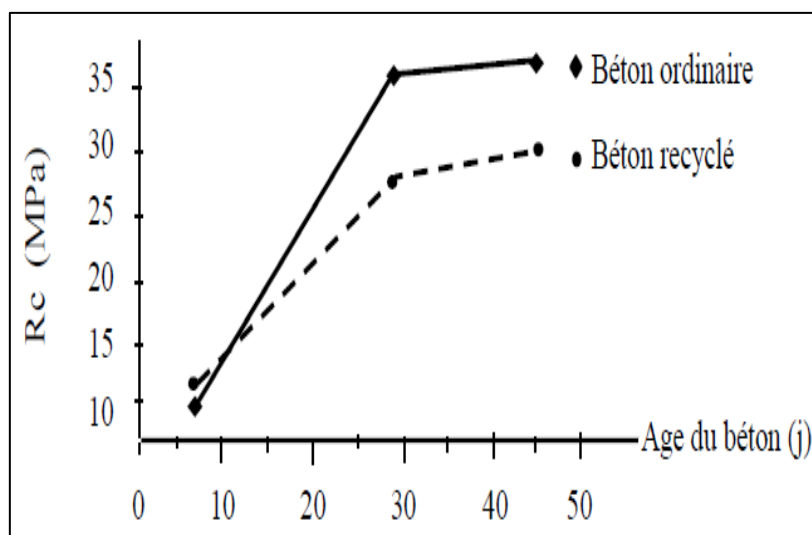


Figure III.2. Valeurs de résistance à la compression des 2 bétons [GOU 18].

Les chercheurs ont constaté que les valeurs de résistances du béton à granulats naturels ont été nettement supérieures à celles du béton à granulats recyclés. La différence entre les valeurs de résistance des deux bétons a passé de 16% au bout de 7 jours à 18% au bout de 28 jours. Ces résultats ont été attribués, selon les auteurs, à la porosité plus importante, la mauvaise qualité et mauvaise interface granulat/ciment des granulats recyclés par rapport aux granulats naturels. Le faible comportement mécanique du béton à granulats recyclés a été confirmé à travers l'évaluation du module de déformation des deux bétons. Il a été trouvé que le béton recyclé présente un module de déformation plus faible que celui du béton témoin, donc une rigidité plus faible.

Chapitre 03 : Synthèse bibliographique sur les mortiers et bétons à base de granulats recyclés

Les auteurs ont conclu que les caractéristiques du béton à base de granulats recyclés ont été clairement plus faibles que celles du béton ordinaire mais restent acceptables et peuvent être utilisés dans les bétons.

2. Étude de KPAVODE Gbèdodé Sophie [KPA 10] :

Le travail présenté dans cette étude visait de voir si c'est possible d'utiliser les granulats recyclés, issus de déchets d'éprouvettes de béton de graviers roulés, comme agrégats pour la confection des micro-bétons. Pour ce faire, l'auteur s'est intéressé en premier lieu par la caractérisation de ses granulats. Les résultats présentés sur le **Tableau III.1** montrent que les GR avaient une grande absorption d'eau. A travers un plan expérimental riche et consistant, les caractéristiques physiques et mécaniques des bétons à base de GR ont été déterminées et comparées à celles de bétons témoins (bétons à base de GN). La résistance au feu et la durabilité de ces matériaux ont été aussi étudiés.

Tableau III.1. Caractéristiques physiques et mécaniques des granulats.

Caractéristiques	Type de granulats					
	GN (5/25)	GR (5/25)	GN (0/6,3)	GR (0/6,3)	Sable 2 (0/5)	Sable 1 (0/5)
Densité apparente	1,64	1,42	1,54	1,45	1,57	1,54
Densité brute	2,52	2,29	2,50	2,33	2,21	2,40
% d'absorption	0,63	4,62	2,48	5,30	6,80	2,02
% d'usure	37,07	40,00	21,31	30,87	/	/

L'auteur a préparé des éprouvettes prismatiques (4*4*16 cm) de micro-béton (400 g de ciment, 580 g de sable, 770 g de gravier (0/6,3), 190 g d'eau pour le micro-béton à base de GN contre 225 g pour le micro-béton à base de GR) et des éprouvettes cylindriques (16*32 cm) de béton (400 g de ciment, 599,55 g de sable, 1113,45 g de gravier, 187 g d'eau pour le béton à base de GN contre 208 g pour le béton à base de GR) pour réaliser son plan expérimental et pouvoir comparer entre les GR et GN dans les deux types de béton.

Tableau III.2. Résultats d'ouvrabilité des bétons et micro-bétons étudiés.

	Béton à base de GR	Béton témoin (à base de GN)
Micro-bétons		
E/C	0,56	0,48
Etalement	14,5	15,75
Consistance	Ferme	Ferme

Bétons		
E/C	0,52	0,48
Affaissement (cm)	5,93	7,15
Consistance	Plastique	Plastique

Les résultats ont montré que les GR avaient une absorption plus grande que les GN, ce qui a conduit à une légère diminution dans les paramètres d'ouvrabilité des bétons et des micro-bétons à base de GR, comme l'indique le **Tableau III.2**, malgré leur fort dosage en eau, comparativement à ceux à base de GN.

En termes de résistance, les micro-bétons témoins avaient présenté des résistances à la compression un peu plus grandes que celles des micro-bétons à base de GR (Fig. III.3), pareillement à ce qui a été trouvé pour les bétons à 28 jours (26,04 MPa pour le béton à base de GR contre 30,5 MPa pour le béton témoin), ce qui est dû, selon l'auteur, à la grande absorption d'eau des GR et leur fragilisation par rapport aux GN. Une différence moins évidente a été remarquée pour les résultats de la résistance à traction (**Fig. III.4**).

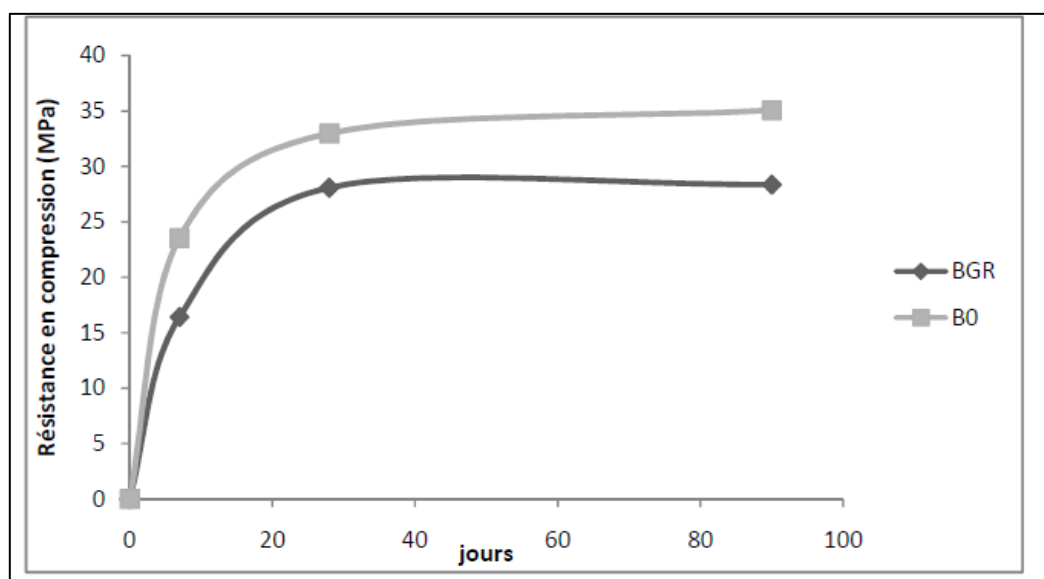


Figure III.3. Evolution de la résistance à la compression des micro-bétons dans le temps.

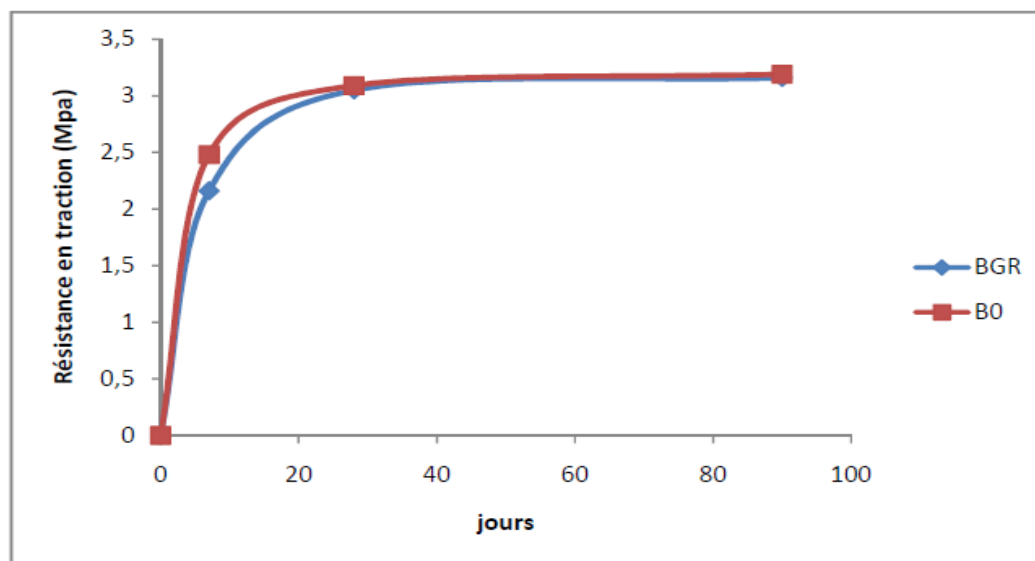


Figure III.4. Evolution de la résistance à la traction des micro-bétons dans le temps.

3. Étude de khelef, Gharbi et Rouiha [KHE 21]:

Dans cette étude, réalisée dans le cadre d'un mémoire de Master à l'université d'El Oued, les auteurs ont utilisé des granulats naturels (0/5, 3/8 et 8/15) et des granulats recyclés, issus de concassage des éprouvettes de béton durci, de classes granulaires 0/5, 5/10 et 10/16. L'étude s'est intéressée par la recherche de l'effet de remplacement du sable recyclé, dans les mélanges de béton à base de granulats recyclés, par du sable naturel avec des taux de substitution de 25%, 50%, 75% et 100%. Après avoir déterminé les différentes caractéristiques des matériaux de départ (ciment, sable naturel SN, sable recyclé SR, gravier naturel GN et gravier recyclé GR) notamment les distributions granulométriques présentées sur la **Figure III. 5**, les auteurs ont tracé leur plan expérimental dans lequel des bétons ont été formulés sur la base de différents mélanges de granulats avant de subir des essais de caractérisation à l'état frais comme à l'état durci. Six (06) bétons ont été formulés à savoir:

- ❖ **BT** : béton témoin à base de 100% granulats naturels.
- ❖ **BR0** : béton à base de 100% granulats recyclés.
- ❖ **BR25** : Béton à gravier 100% recyclés, et sable recyclé substitué à 25% du sable naturel.
- ❖ **BR50** : Béton à gravier 100% recyclés, et sable recyclé substitué à 50% du sable naturel.
- ❖ **BR75** : Béton à gravier 100% recyclés, et sable recyclé substitué à 75% du sable naturel.
- ❖ **BR100** : Béton à gravier 100% recyclés, et 100% Sable naturel.

A l'état frais, les auteurs ont testé l'affaissement des différents bétons à l'aide du cône d'Abrams ainsi que leur densité. Cependant les essais de résistance à la compression et à la flexion, d'absorption et de porosité ont été réalisés sur les bétons durcis.

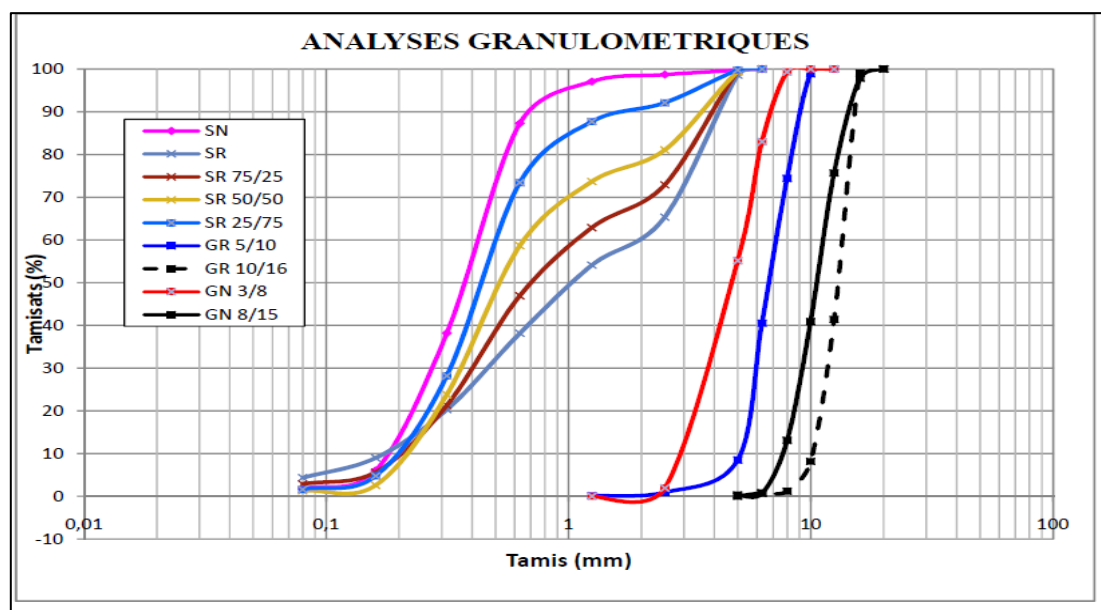


Figure III.5. Distributions granulométriques des matériaux de départ.

Selon les résultats obtenus, les auteurs ont constaté que la substitution de sable recyclé par le sable naturel influe considérablement l'ouvrabilité du béton et donc son affaissement. L'utilisation des granulats recyclés (GR) a causé une diminution remarquable dans l'affaissement du béton. Cependant, le remplacement partiel ou total du sable recyclé SR par du sable naturel SN a remarquablement changé les choses. Les auteurs ont rapporté que l'ouvrabilité du béton a augmenté proportionnellement à l'augmentation du pourcentage de substitution du SR par le SN (Fig. III.6). La même tendance a été constatée en termes de densité de béton et de résistance à la compression (Fig. III.7).

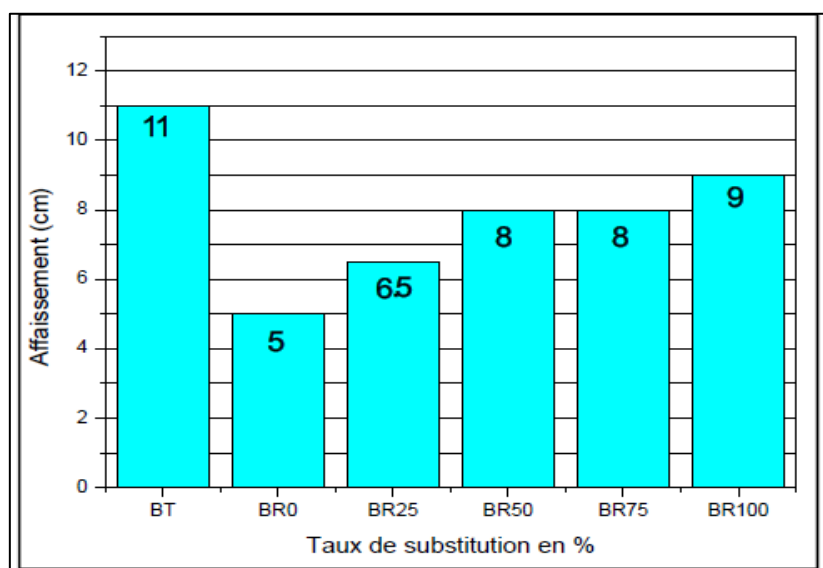


Figure III.6. Influence du taux de substitution du SR par du SN sur l'ouvrabilité des bétons.

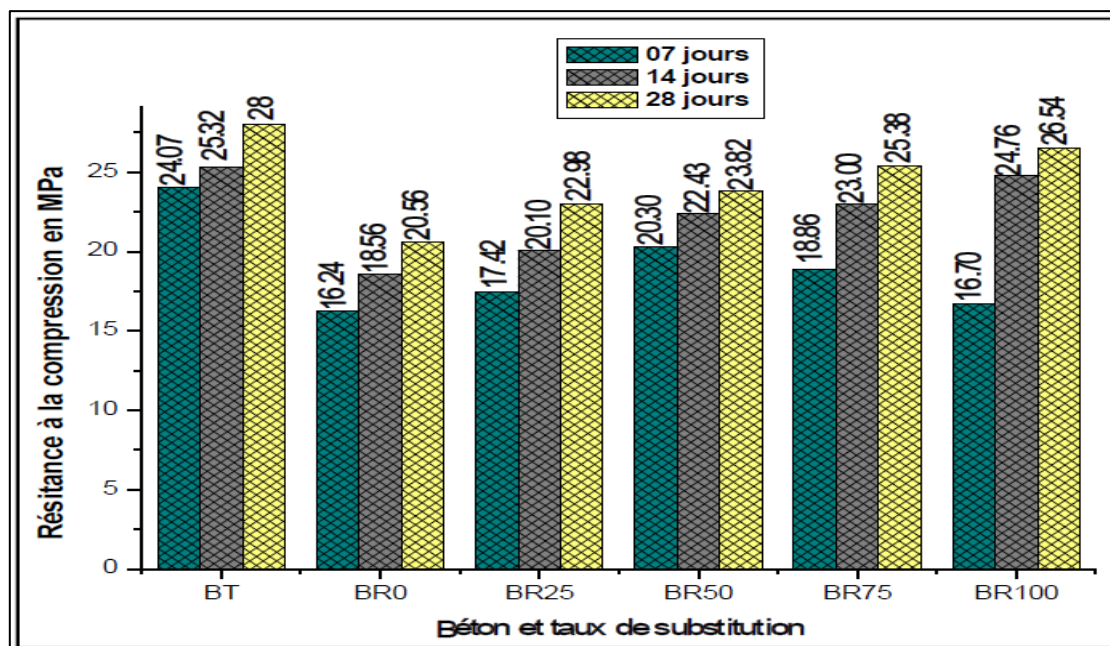


Figure III.7. Influence du taux de substitution du SR par du SN sur la résistance à la compression des bétons à 7, 14 et 28 jours.

Les auteurs ont justifié cette baisse dans les propriétés mécaniques des bétons à granulats recyclés par le fait que ces bétons sont moins compacts et du fait de la présence d'une faible adhérence au niveau de l'interface entre le granulat recyclé et la nouvelle pâte de ciment. Cependant, le remplacement du sable recyclé par le sable naturel affecte positivement la résistance à la compression du béton. D'une manière générale dans les bétons à base de granulats recyclés, les propriétés mécaniques augmentent avec le taux de remplacement du SR par le SN.

4. Étude de MAMERY Serifou [MAM 13] :

Les travaux présentés dans cette étude ont concerné l'utilisation de différents types de granulats (granulats naturels, granulats recyclés en provenance de ciment durci, pneus usagés, verres concassés et graviers recyclés de retour de toupie) pour la formulation des bétons. Le remplacement des granulats naturels par les différents types de granulats recyclés a été total (100% de remplacement) et partiel (5, 10, 15, 20, 25 et 30 % de remplacement).

Les auteurs ont étudié l'influence du type et de la quantité u granulat recyclés sur les performances des bétons confectionnés. Les mélanges de béton ont été conçus avec un mortier, identique dans tous les cas, dans lequel le pourcentage massique des granulats augmentait progressivement (les pourcentages de granulats par rapport à la masse totale sèche des granulats et du mortier ont été 20%, 25%, 30% et 50%). Le **Tableau III.3** donne les formulations des bétons étudiés. Les auteurs ont testé les performances physicomécaniques des

Chapitre 03 : Synthèse bibliographique sur les mortiers et bétons à base de granulats recyclés

bétons formulés l'état frais (affaissement et) et durci (résistance à la compression, à la traction et à la flexion, module d'élasticité dynamique, porosité, absorption et densité).

Tableau III.3. Compositions des mélanges des bétons étudiés.

	Proportion massique de granulats (%)			
	20	25	30	50
Quantité de granulat (kg)	8	11	14	32
Quantité de sable (kg)	16	16	16	16
Quantité de ciment (kg)	16	16	16	16
Quantité d'eau (l)	6	6	6	6
Rapport eau/ciment (E/C)	0,37	0,37	0,37	0,37

L'étude a montré que la substitution des granulats naturels par des concassés de ciment durci, de verre, de pneu découpé et de retour de toupie engendrait des différences importantes dans les propriétés du béton. Les résultats obtenus ont permis de tracer les conclusions suivantes :

□ **Granulats recyclés issus de découpage des pneus usagés :**

Les essais réalisés ont montré que l'incorporation de ces granulats a été très préjudiciable vis-à-vis des résistances à la compression qui diminuaient avec l'augmentation de la teneur de ce type de granulats dans le béton. Cette chute de résistance a été attribuée à la faible adhérence de ces granulats avec la matrice cimentaire.

□ **Granulats recyclés issus de concassage de verre :**

Il est bien connu que l'utilisation des granulats de verre dans le béton est une cause de l'alcali-réaction, ce qui peut aboutir à des désordres de gonflement et de fissuration dans le béton. En plus de ça, les auteurs ont rapporté une chute progressive dans la résistance du béton avec l'augmentation de sa teneur en granulats de verre concassé. Cet inconvénient a été lié à la mauvaise adhérence entre la matrice du béton et les granulats de verre.

□ **Granulats recyclés issus de concassage du ciment durci :**

Les granulats en provenance du ciment durci concassé ont abouti à des bétons de caractéristiques très proches de celles obtenues pour les bétons témoins confectionnés avec des granulats naturels. Les auteurs ont enregistré pour les bétons à base de ces granulats un comportement qui a suivi la même tendance que celui du béton témoin.

□ **Granulats recyclés en provenance du retour de toupie :**

Chapitre 03 : Synthèse bibliographique sur les mortiers et bétons à base de granulats recyclés

Les auteurs ont constaté que ces granulats avaient des caractéristiques physiques proches de celles des granulats de déchets de démolition avec une absorption d'eau un peu plus forte. Les bétons à base de ce type de granulats ont présenté des faibles résistances mécaniques par rapport au béton témoin. De plus, la substitution du sable influe plus fortement sur les propriétés physiques que la substitution du gravier. Il est noté que le retour de toupie est un granulat de déchets de production de l'industrie du béton. Ces débris de béton résultent du nettoyage des installations de fabrication, des excédents de commande et du transport du béton frais.

D'une manière générale, l'étude a abouti à conclure que la résistance à la compression de tous les bétons à base de granulats recyclés baisse avec l'augmentation de la quantité de granulats recyclés. Cependant, le remplacement partiel ou total des granulats naturels par des granulats recyclés offre une nouvelle source d'approvisionnement et permet d'économiser les ressources naturelles.

5. Étude de Bensafi et Belkacem [BEL 18]

L'objectif de cette étude a été d'étudier le comportement mécanique du béton à base des granulats recyclés (déchet de brique) sous l'effet de la température afin de profiter de ses qualités, sachant tous que la résistance au feu est faible pour le béton ordinaire.

Les bétons formulés ont été des bétons à base de sable naturel et des granulats naturels de classe granulaire 3/8 substitués partiellement ou totalement par des granulats recyclés de brique comme l'indique le **Tableau III.4**. Les auteurs ont particulièrement étudié la résistance au feu de ces bétons à travers l'évaluation de leurs résistances résiduelles après l'exposition à des températures de 300 et 600 °C pendant 2 heures.

Tableau III.4. Compositions des mélanges des bétons étudiés.

Type de granulat	Granulat naturelle		Granulat recycle
	Sable naturelle	Gravillon naturelle 3/8	Gravillon recycle 3/8
BO	x	x	
B-N-R 30%	x	x	x
B-N-R 50%	x	x	x
B-N-R 70%	x	x	x
B-N-R 100 %	x		x

Chapitre 03 : Synthèse bibliographique sur les mortiers et bétons à base de granulats recyclés

Les résultats ont montré que les valeurs de porosité ont été de 10,54 ; 14,76 ; 16,18 ; 18,79 et 21,4 % pour les bétons BO, BNR 30%, BNR 50%, BNR 70% et BNR 100% respectivement. Cependant, l'utilisation du brique concassé avait un effet positif en termes de résistance à la compression comme l'indique la **Figure III.8** et la **Figure III.9**.

À partir de ces résultats, les auteurs ont pu conclure que le béton à base de brique concassée avait une plus grande résistance au feu que le béton témoin confectionné à base de granulats naturels. Il a été souligné que les granulats à base de brique concassée conviennent bien pour les bétons réfractaires, qui sont en général, utilisés pour la confection d'ouvrages soumis à des températures élevées tels que revêtements des chaudières, cheminées, conduites de fumées, de sols d'usines sidérurgiques, de parties de fours ...etc.

Les auteurs ont signalé également l'inconvénient majeur de ces granulats en notant que le béton à base de brique concassée est plus poreux et donc plus perméable. Si les briques contiennent des sels solubles, il peut y avoir une corrosion et une efflorescence dans le béton.

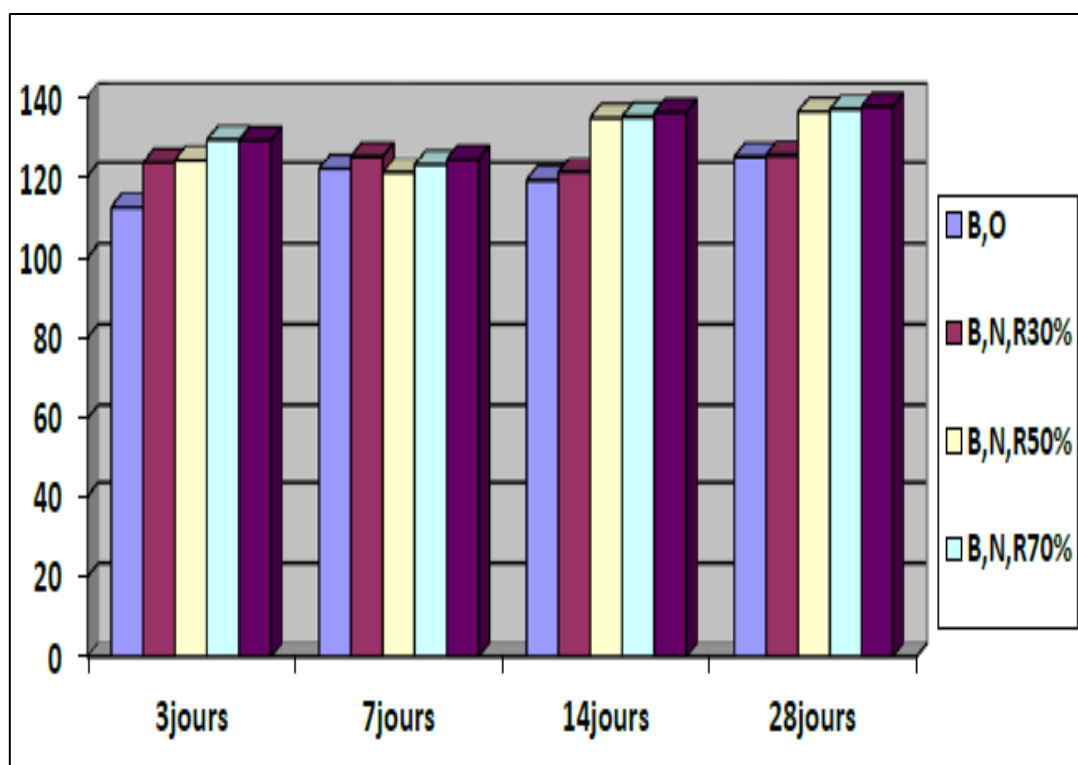


Figure III.8. Résistance résiduelle à la compression (en bars) des éprouvettes de béton après exposition à une température de 300 °C.

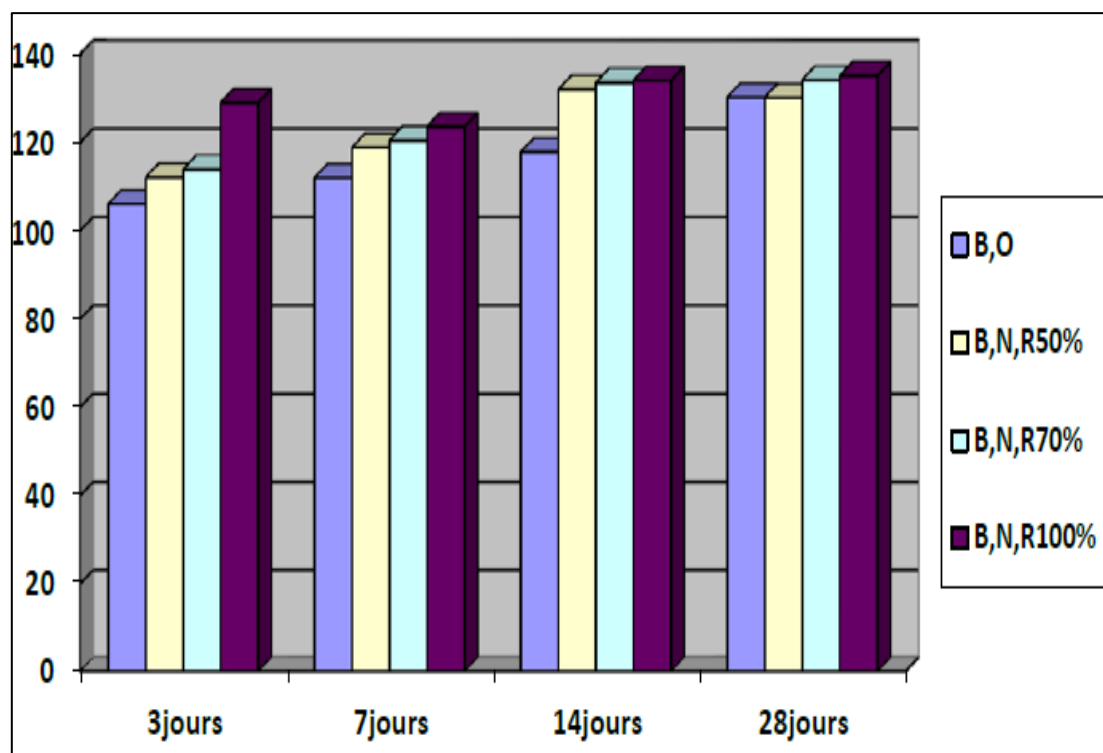


Figure III.9. Résistance résiduelle à la compression (en bars) des éprouvettes de béton après exposition à une température de 600 °C.

6. Étude de BOUDALI Sara [BOU 18] :

Cette étude, réalisée à l'occasion d'une thèse doctorale à l'Université Mohamed Boudiaf d'Oran, a été menée dans le but de trouver de valoriser les déchets de construction et de démolition, en intégrant ces granulats recyclés GR dans le béton autoplaçant. Deux types de béton ont été examinés au cours de ce travail : béton autoplaçant BAP et béton de sable autoplaçant BSAP. Les déchets de béton du laboratoire des travaux publics à l'ouest de l'Algérie ont servi à l'élaboration des échantillons. Le travail a visé l'étude de la durabilité du BAP à base de GR et du BSAP vis-a-vis l'agression de sulfate, ainsi que l'efficacité de l'utilisation de la poudre des fines recyclé et les agrégats recyclé et le comparer avec d'autres matériaux (pouzolane naturelle et graviers naturels GN). Les auteurs ont utilisé deux fractions de GN 3/5 et 5/15, un mélange de sable composé de: sable naturel (0/3) et sable de concassage de (0/5), ainsi que des GR (3/5 et 5/15) (Figs. III. 10 et III.11).



Figure III.10. Agrégats utilisés (naturels et recyclés).

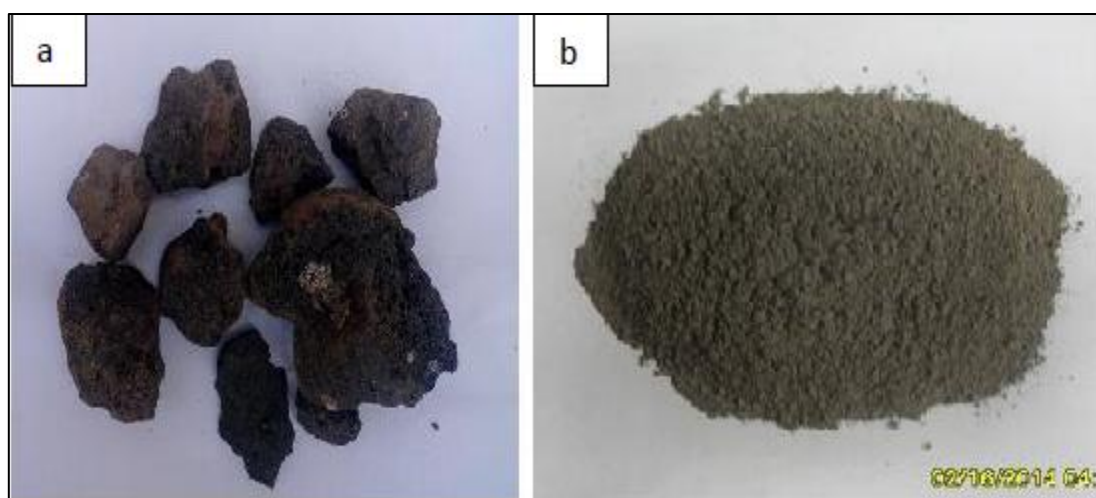


Figure III.11. Fines utilisés comme ajouts cimentaires: (a) pouzzolane naturelle PN.
(b) poudre de fine recyclé PFR.

Dans un premier lieu, les auteurs ont étudié le comportement (état frais et durci) des BAPs et BSAPs produits avec différents pourcentages de GR et un rapport E/C constant ($E/C = 0.5$). Après, l'étude a abordé la mise en évidence de l'efficacité de l'incorporation de la PFR et des GR dans la production des BAPs et BSAPs vis-à-vis l'attaque sulfatique. En dernier lieu, les auteurs ont étudié la morphologie et la microstructure des BAPs et des BSAPs en utilisant la diffraction des rayons X (DR), l'analyse thermogravimétrique (ATG) et l'observation au microscope électronique à balayage (MEB) (**Fig. III.12**).

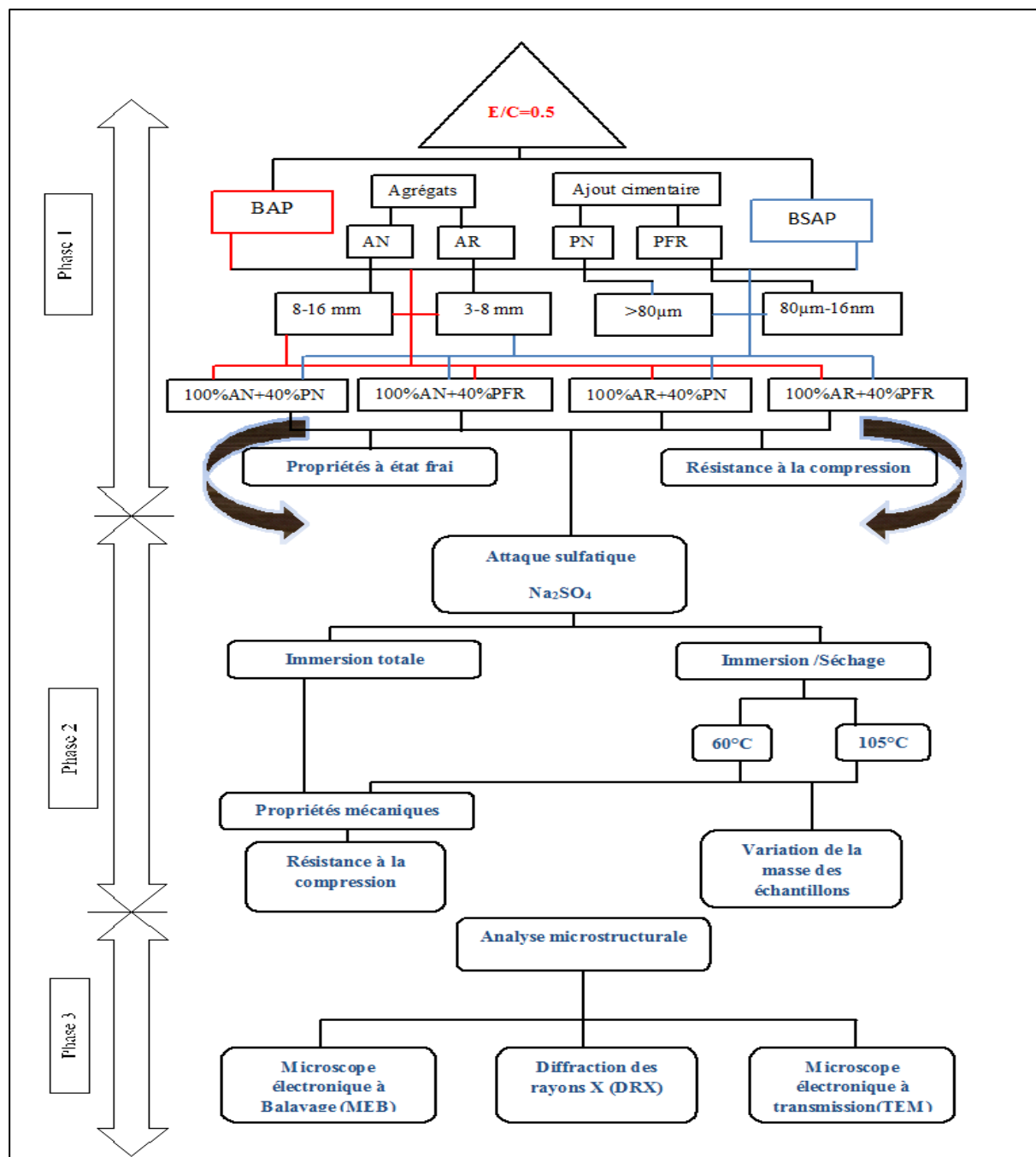


Figure III.12. Plan expérimental de l'étude.

À travers ses résultats, l'étude a permis de tirer les conclusions suivantes :

- L'incorporation de PFR comme substitut à la PN a augmenté l'ouvrabilité du BAP (Figure III.13).
- L'étalement du BSAP à base de GR et de PFR a été plus important que ceux du BAP et du BSAP à base de GN et de PFR.
- Le remplacement des GN par des GR de la même taille n'affecte pas la résistance à la compression du béton.

- L'incorporation de la PFR dans le béton accélère l'hydratation de ciment au jeune âge ce qui conduit à développer la résistance mécanique du BAP à base de GR comparativement à celle du BAP à base de GN.
- La PFR joue un rôle très important sur la densification de la microstructure de la matrice cimentaire et sur le remplissage des pores dans le béton. Par conséquent, la résistance à la compression de BAP à base de GR est améliorée. Le taux de 40% de remplacement du PN par la PFR dans les BAPs et BSAPs à base de GR influence positivement leurs résistances à la compression.
- Les spectres d'ATG et de l'analyse granulométrique laser ont montré la présence de la portlandite dans la PFR. Ainsi, la finesse de cette dernière est plus élevée que celle du ciment et de la PN. Cela a reflété les résistances les plus élevées de quelques bétons dans le milieu sulfatique.

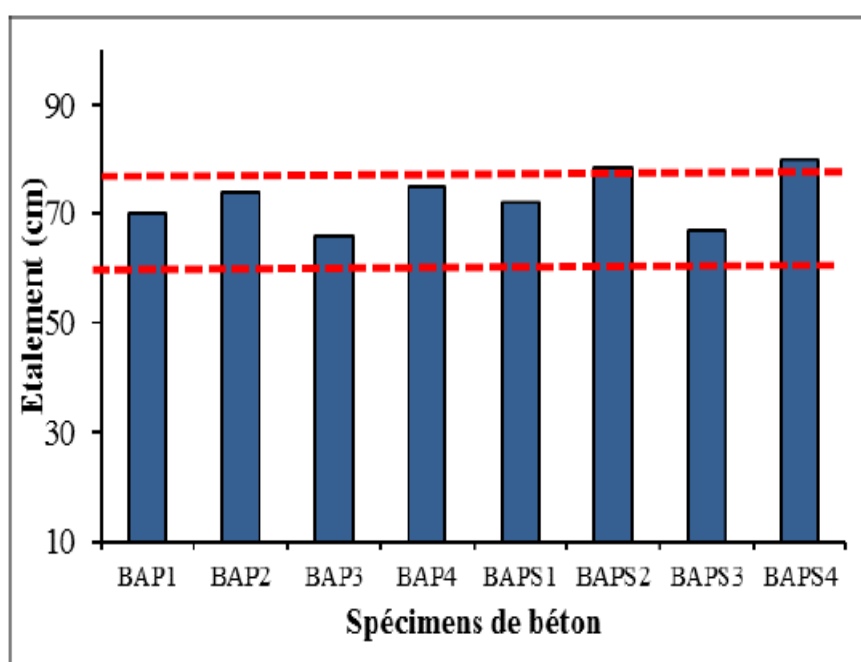


Figure III.13. Valeurs d'étalement des BAPs et des BSAPs à base de GR.

7. Étude de Labachi Souad [LAB 21]:

L'objectif de cette étude a été de valoriser les déchets de béton en tant que sable recyclé dans le mortier et d'évaluer l'évolution de sa réponse mécanique avec le temps. Pour ce faire, le sable d'un mortier témoin normalisé (formulé selon la norme NF 196-1 où 1350 g de sable, 450 g de ciment et 225 g d'eau ont été mélangés) a été remplacé à des taux de 20, 40, 60, 80 et 100% par un sable recyclé issu du concassage de béton. Certaines propriétés physiques et

mécaniques telles que l'ouvrabilité, la résistance à la compression, la résistance à la traction, la porosité et la perméabilité à l'eau ont été évaluées.

Les résultats ont montré que la résistance à la compression (Fig. III.14) a été en augmentation avec l'augmentation du taux de remplacement du sable naturel par le sable recyclé jusqu'à la valeur de 80% puis une légère diminution a été enregistrée pour le mortier préparé à base de 100% de sable recyclé.

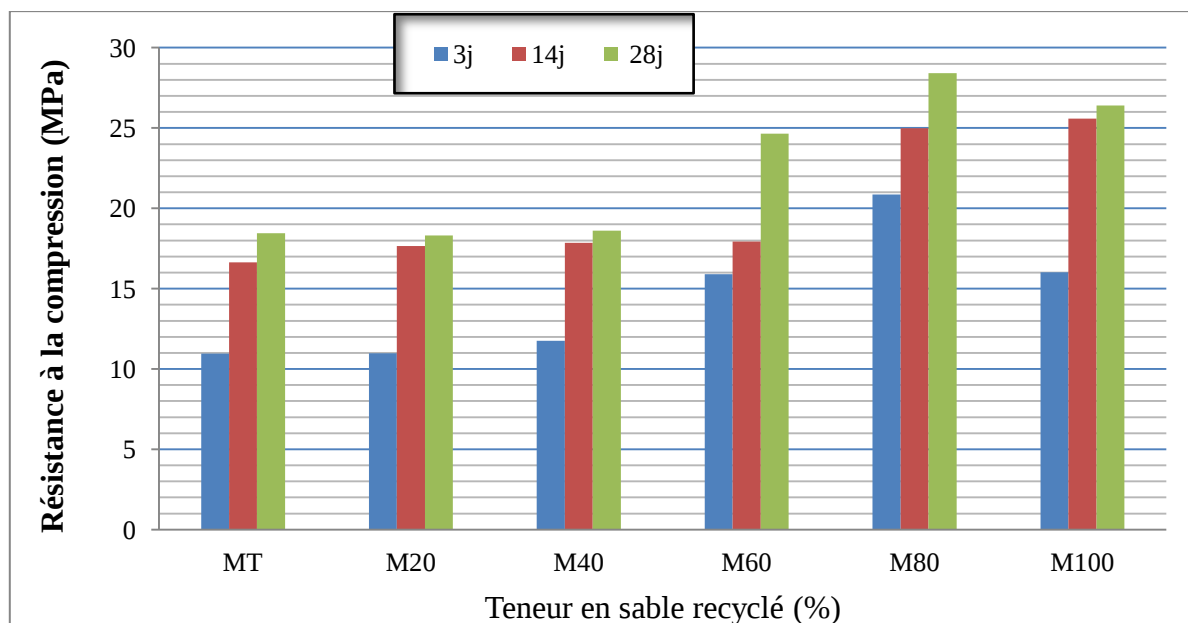


Figure III.14. Résistance à la compression des différents bétons.

L'auteur a signalé que malgré que les granulats recyclés soient connus de leur forte absorption et leur faible interface "granulat - pâte" fragile ce qui conduit généralement à une diminution dans la résistance mécanique, les résultats de cette étude ont montré que l'incorporation des granulats recyclés en tant que sable avait un effet positif clair et persistant sur la réponse mécanique de 3 à 28 jours. Ce résultat a été attribué à l'effet physique de la combinaison entre le sable naturel et le sable recyclé qui améliore la compacité des mélanges de mortier. Les mêmes tendances de résultats ont été constaté concernant les résistances à la traction par flexion.

8. Article de Çakır Ö et Dilbas H [ÇAK 21]:

Selon les auteurs, la durabilité du béton d'un béton à granulats recyclé pour laquelle la perméabilité est le facteur clé, a présenter toujours un souci pour ces béton. Ceci est dû à leur mortier attaché qui a des fissures, une structure poreuse et une absorption d'eau plus élevée causant une plus mauvaise durée de vie du béton. Tandis que l'utilisation d'agrégats plus denses

peut réduire cette perméabilité. De plus, l'utilisation d'additions minérales (comme la fumée de silice) à un ratio optimal dans les mélanges présente une amélioration de ces performances à cause de leurs effets physique (de remplissage) et chimique (C-S-H additionnel). Le travail s'est basé sur la suppression ou la diminution de ce mortier attaché pour l'élaboration d'un granulat recyclé traité.

Dans le sujet de traitement des granulats par abrasion mécanique, la méthode de broyage (Ball Milling Method) et spécialement celle optimisée est très répondue et donne des résultats satisfaisants malgré la petite quantité de mortier attaché (< 10 %) généralement restante. Pour répondre à cette lacune, les auteurs ont décidé d'utiliser dans cette étude, en plus de la fumée de silice des fibres de basalt. Pour réaliser le programme expérimental, les auteurs ont étudié comme propriétés physiques de béton, la masse volumique et le degré d'absorption d'eau et comme propriété mécanique la résistance à la compression à 28 jours. Cependant en termes de durabilité, les tests de profondeur de pénétration d'eau, de diffusion des ions chlorure et l'absorption d'eau ont été réalisés. Vu le grand nombre de variantes, une modélisation numérique a été établie en utilisant le programme TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) afin d'en tirer les meilleures variantes.

Selon les résultats des tests, il a été constaté que les performances des bétons à base de granulats recyclés traités ont légèrement diminué par rapport à celles de béton témoin (à base de granulats naturels) et que le traitement des granulats par cette méthode optimisée de broyage a entraîné une amélioration significative de performances par rapport aux bétons à granulats recyclés non traités. Les auteurs ont conclu aussi que le TOPSIS est une méthode utile pour la modélisation et la détermination de la meilleure variante de formulation de béton.

9. Article de Raman J.V.M et Ramasamy V [RAM 21]:

Dans cette étude, les déchets de démolition de construction ont été utilisés comme granulats recyclés. Six mélanges de béton à base de granulats naturels, granulats recyclés traités par traitement mécanique, granulats recyclés traités à l'aide de l'acide sulfurique (H_2SO_4) et granulats recyclés traités à l'aide de l'acide chlorhydrique (HCl) ont été préparés.

La technique chimique utilisée pour le traitement des granulats recyclés consistait à les faire immerger dans des solutions de H_2SO_4 et de HCl de concentrations de 0,1 M pendant une durée de 24 h à température ambiante. Après 24 h d'immersion, le granulat recyclé a été retiré des solutions chimiques afin de subir un petit lavage mécanique dans une machine à abrasion (Los Angeles) avant d'être tamisés puis séchés et nettoyés à l'eau ordinaire pour enlever l'ancien mortier. Le traitement mécanique se fait d'une façon intensive dans la machine de Los

Angeles. L'étude s'est concentrée sur l'évolution de la résistance mécanique d'absorption et d'alcalinité ont été suivies.

Selon les résultats, la résistance à la compression des bétons à base de granulats traités a été améliorée de 7,78 à 25,79% par rapport au béton de granulats recyclés non traité (comme le montre la [Figure III.15](#)). De même, la résistance à la traction a été améliorée de 5,22 à 18,80% alors que la résistance à la flexion a été améliorée de 4,91 à 25,24% à 28 jours. La valeur d'alcalinité du béton a été faite où le pH de tous les bétons a été entre 11,9 à 12,24 (ce qui est la normale). Lors du test de séchage, les valeurs sont améliorées de 6,07 à 28,88% à 28 jours par rapport au béton de granulats non traité. Dans le test d'absorption d'eau, le granulat traité a abouti à des résultats 4,84 à 31,06% fois meilleurs que ceux obtenus pour des granulats non traité. L'étude a montré que le traitement des granulats abouti généralement à l'amélioration des performances des granulats recyclés, en particulier dans le cas de traitement mécanique.

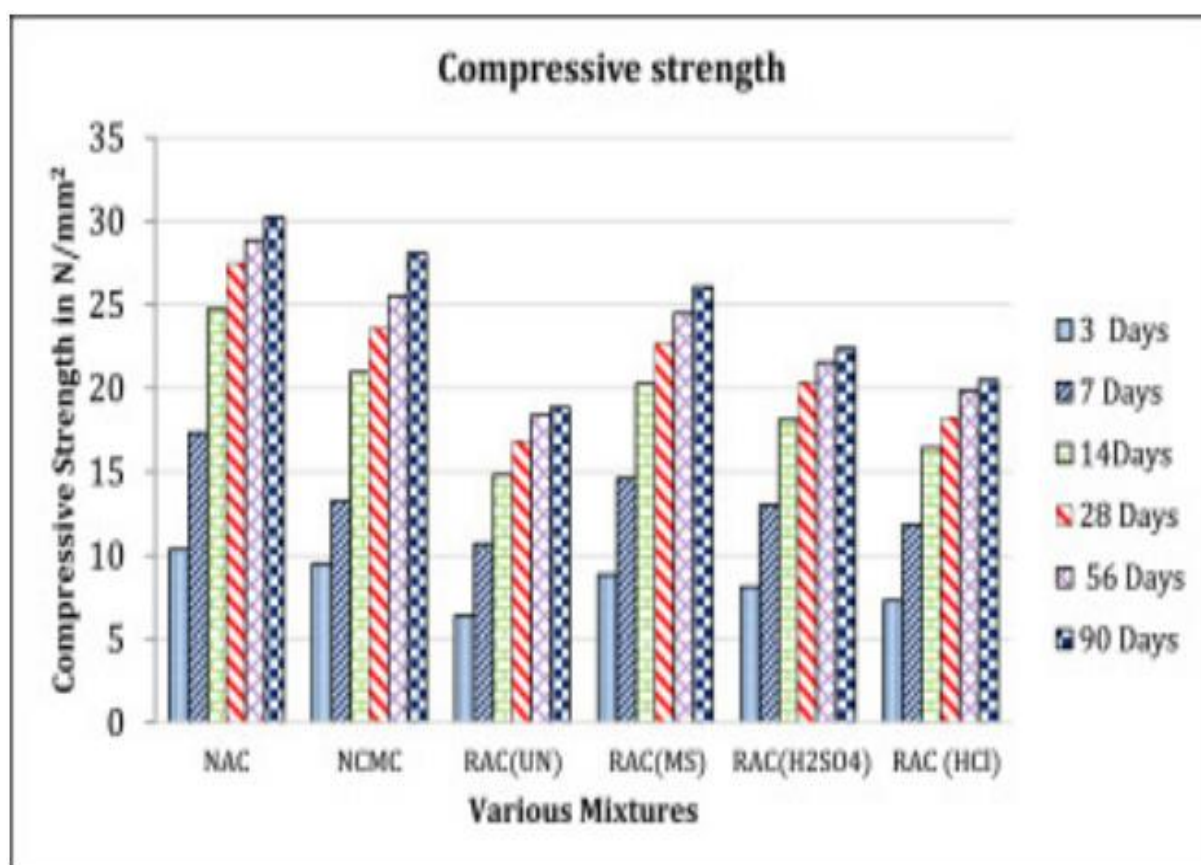


Figure III.15. Résultats de rsistance à la compression des différents mélanges [[RAM 21](#)].

10. Article de Wardeh G, Ghorbel E et Gomart H [[WAR 14](#)]:

L'étude publiée dans cet article a concerné l'étude des propriétés fraîches et durcies des bétons contenant 0, 30, 65 et 100 % de granlas recyclés à la palce de granulats naturels. Des bétons

Chapitre 03 : Synthèse bibliographique sur les mortiers et bétons à base de granulats recyclés

fluides de classe S4 et e classe de résistance C35 ont été formulés. La méthode de formulation a été basée sur l'optimisation de la pâte cimentaire et du squelette granulaire. Les auteurs ont testé les résistances à la compression et à la flexion des bétons, leurs modules d'élasticité leur porosité à l'eau ainsi que leur absorption. Les résultats (Figs. III 16-17) ont montré que le module d'élasticité et la résistance à la traction diminuent alors que la déformation maximale en compression augmente. La validité des formules analytiques proposées par l'Eurocode 2 est également vérifiée. Les résultats obtenus ont montré que ces formules ne présentent pas adéquatement les propriétés ainsi que la courbe contrainte-déformation des matériaux testés. Les auteurs ont proposé des nouvelles expressions pour prédire le module d'élasticité et la déformation maximale à partir de la résistance à la compression en béton naturel.

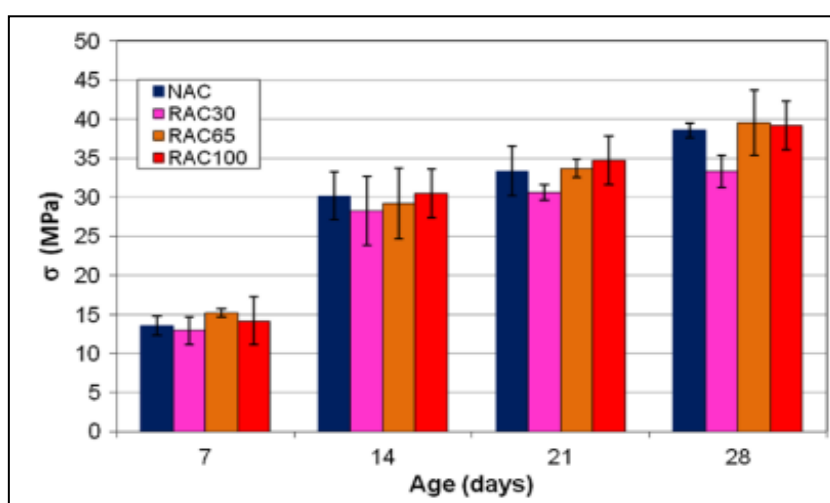


Figure III.16. Résultats de résistance à la compression.

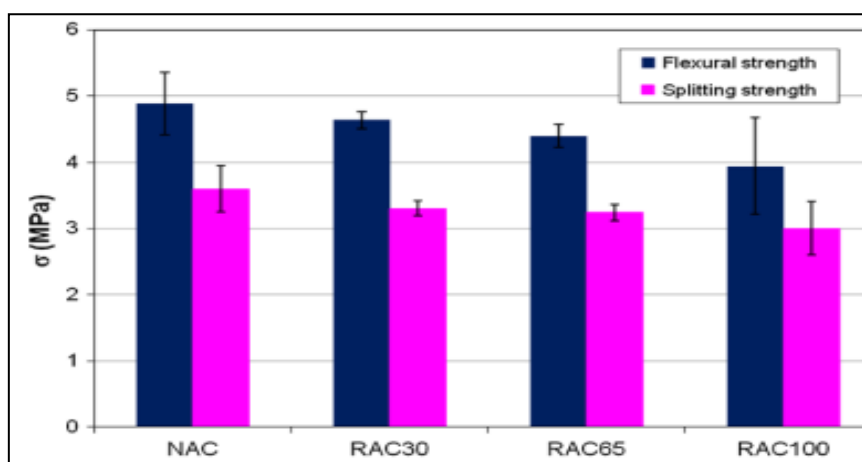


Figure III.17. Résultats de résistances à la flexion et à la traction.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale:

Le travail présenté dans ce mémoire nous a permis de dégager une idée très approfondie sur les types, les provenances et les caractéristiques des granulats recyclés. L'inconvénient majeur de ces matériaux réside dans leur absorption d'eau qui peut affecter considérablement les propriétés physicomécaniques et de durabilités des mortiers et des bétons résultant.

L'absorption d'eau des granulats recyclés se constate principalement par une perte d'ouvrabilité du béton frais. La forte absorption d'eau par ces granulats peut affecter le comportement vis-à-vis du retrait plastique ce qui conduira à la fissuration du béton, une perte de sa compacité et une chute de sa résistance. Il est donc important de connaître la cinétique d'absorption d'eau de ces granulats pour réduire, voire éliminer, cet inconvénient.

La connaissance du comportement des granulats recyclés permet de prévoir leur comportement dans le béton et les performances de ce dernier. Une bonne caractérisation de ces granulats est souvent indispensable, en particulier en termes d'absorption, de densité et des caractéristiques mécaniques.

La synthèse bibliographique présentée dans ce travail a montré qu'il est possible et très avantageux de remplacer partiellement ou totalement les granulats naturels par les granulats recyclés. Cette substitution permettra, malgré la perte souvent constatée dans les performances physicomécaniques des bétons formulés, de se débarrasser de ces déchets, de préserver les ressources naturelles et de réduire les problèmes environnementaux liés à leur extraction.

Nous espérons que ce manuscrit pourra présenter une contribution dans la bibliothèque de notre université et qu'il pourra aider nos futurs étudiants dans leurs travaux de recherche en Master et Doctorat.

Références:

- [ABB 09] Abbas A, Fathifazl G, Fournier B, Isgor O.B, Zavadil R, Razaqpur A.G, Foo S. Quantification of the residual mortar content in recycled concrete aggregates by image analysis. *Materials Characterization*, 60 (2009) 716-728.
- [BAI 20] Bai G, Zhu C, Liu C, Liu B. An evaluation of the recycled aggregate characteristics and the recycled aggregate concrete mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 240 (2020) 1-10.
- [BEN 18] Bensafi B, Belkacem O.S. Valorisation des Bétons à base de granulats recyclés (granulats de brique) sous l'effet de température. Mémoire de Master, Université d'Ain Temouchent, (2018).
- [BER 14] Berthier J. Granulats et liants routiers. Techniques de L'ingénieur, C903 (2014).
- [BOU 18] Boudali S. Durabilité des bétons autoplaçants à base de granulats recyclés. Thèse de Doctorat, Université d'Oran, Algérie (2018).
- [BOU 21] Bouvalain F. Une introduction aux processus sédimentaires. Cours à l'université de Liège. <http://www.geolsed.ulg.ac.be/processus/processus.html>
- [BRA 14] Braymand S, Roux S, Kuwufine D, Mihalcea C.C, Feugeas F, Fond C. Les granulats recyclés de bétons: un matériau à fort potentiel de valorisation dans les bétons. Colloque 01 écomatériaux: 24-28 Novembre 2014, Montpellier, France.
- [ÇAK 21] Çakır Ö, Dilbas H. Durability properties of treated recycled aggregate concrete: Effect of optimized ball mill method. *Construction and Building Materials*, 268 (2021) 121776.
- [DEL 18] De Larrard F, Colina H. Le béton recyclé. Marne-la-Vallée : Ifsttar. Ouvrages scientifiques, 2018.
- [DEO 15] Deodonne K. Etude des caractéristiques physico-chimiques des bétons de granulats recyclés et de leur impact environnemental. Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg, 2015.
- [DJA 21] Djaidja S. Valorisation du laitier granulé algérien dans les matériaux de construction : Recherche bibliographique. Mémoire de master, Université de M'sila, 2021.
- [GOM 02] Gomez-Soberon J.M.V. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate : An experimental study. *Cement and Concrete Research*, 32 (2002) 1301-1311.

Références Bibliographiques

- [GOU 18] Goufi N, Idir R, Kerdal D, Abidelah A, Kaid N. Analyse des caractéristiques physiques et mécaniques de bétons de granulats recyclés de béton pour la valorisation de ce type de granulats. *Academic Journal of Civil Engineering*, 36 (1) (2018) 150-154.
- [HOO 21] Hoong JD.L.H. Contribution à la valorisation de granulats recyclés: développement d'une méthode d'identification et de quantification automatisée basée sur le *deep learning* et évaluation de leur capacité de stockage de CO₂. Thèse de Doctorat, Université de La Rochelle, 2021.
- [INF 18] Site internet: www.infociments.fr «caracteristiques et types de granulats», Février 2018.
- [JUA 09] Juan M.S.D, Gutiérrez P.A. Influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 23 (2009) 872-877.
- [KHE 21] Khelef N, Gharbi D, Rouiha F. Contribution à l'évaluation des caractéristiques mécaniques et microstructurales du béton à base de granulats naturels et démolis. Mémoire de Master, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-oued, 2021
- [KHO 18] Khoury E. Maîtrise de l'eau efficace dans les bétons de granulats recyclés. Thèse de Doctorat, Université de Lille, 2018.
- [KPA 10] KPAVODE G.S. Possibilités d'utilisation des granulats recyclés issus des bétons de déconstruction : cas des graviers roulés. Mémoire d'ingénieur, Université d'Abomey-Calavi (UAC), Benin (2010).
- [LAB 21] Labachi S. Optimisation de la teneur du sable recyclé dans les mélanges binaires des mortiers. Mémoire de master, Université de Biskra, 2021.
- [LOU 11] Loumachi L. Effet des granulats de la région de Biskra sur les propriétés du béton et les méthodes de formulation de mélange. Thèse de Doctorat, Université de Biskra, 2011.
- [MAM 13] Mamery S. Béton à base de recyclats : influence du type de recyclats et rôle de la formulation. Thèse de Doctorat, université de Boreaux 1, 2013.
- [MEH 21] Mehsas B, Zeghichi L, Siline M. Approche d'optimisation et influence des paramètres de composition et de durcissement sur la résistance à la compression de la pâte Géopolymère Métakaolin/Laitier. *Academic Journal of Civil Engineering* 39 (1), 83-86.
- [MEH 22] B Mehsas, M Siline, L Zeghichi. The effect of using low reactive metakaolin on performances of geopolymer binder. *Innovative Infrastructure Solutions* 7 (3), 1-12.
- [MEF 13] Meftteh H, Kebaïli O, Oucief H, Berredjem L, Arabi N. Influence of moisture conditioning of recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete. *Journal of Cleaner Production*, 54 (2013) 282-288.

Références Bibliographiques

- [MIS 20] Mistri A, Bhattacharyya S.K, Dharmi N, Mukherjee A, Barai S.V. A review on different treatment methods for enhancing the properties of recycled aggregates for sustainable construction materials. *Construction and Building Materials*, 233 (2020) 1-12.
- [NEL 15] Nelfia L.O. Incorporation de fines issues de granulats recyclés dans la fabrication de nouveaux liants hydrauliques . Thèse de Doctorat, Université de La Rochelle, 2015.
- [SER 20] Sereng M. Amélioration des propriétés des granulats recyclés par stockage de CO₂: étude de la faisabilité préindustrielle. Thèse de Doctorat, Université de Paris Est, 2020.
- [RAM 21] Raman J.V.M, Ramasamy V. Augmentation of dissimilar Technique for Enhancing the Concrete properties with Recycled Coarse Aggregate and Manufactured Sand Augmentation of dissimilar techniques for enhancing the concrete properties with recycled coarse aggregate and manufactured san. *Journal of Materials Research and Technology*, 14 (2021) 1180–1190.
- [SIL 16] Siline M. Etude de l'endurance des matériaux composites sous l'effet de changement des températures dans les conditions extrêmes. Cas: performance des matériaux pouzzolaniques. Thèse de Doctorat, Université de M'sila, 2016.
- [SIL 22] Siline M. Efficiency of incorporating Algerian ground granulated blast furnace slag as a supplementary cementitious material: a review. *Innovative Infrastructure Solutions*, 7:121 (2022).
- [SIM 19] Simon H. Prétraitement des granulats recyclés au moyen de la carbonatation accélérée pour la fabrication de mortiers. Mémoire de Master, université de Liège, 2018-2019.
- [TOR 20] Torres P.P. Modélisation du comportement à long terme des bétons de granulats recyclés. Thèse de Doctorat, Université de Cergy Paris, 2020.
- [TOU 19] Tourkia G. Influence de la pré-saturation des granulats recyclés sur le comportement de béton ordinaire. Thèse de Doctorat, université de Mostaganem, 2019.
- [TOU 02] Tourenq C. Granulats: Sables, graviers et concassés de carrières. *Technique de l'ingénieur*, C 902 (2002).
- [WAR 14] Wardeh G, Ghorbel E, & Gomart H. Mix Design and Properties of Recycled Aggregate Concretes: Applicability of Eurocode 2. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 9 (1) (2014).

