

**RÉDACTION**

**Rédacteur en chef**

François BUYLE-BODIN,  
université de Lille

**Représentant**

**l'Association Française  
de Génie Civil AFGC**

Jean-Marc TANIS (EGIS),  
président du CA  
Bruno GODART (LCPC), président du Comité  
des Affaires Générales  
Patrick GUIRAUD (Cimbéton),  
vice-président du CAG  
Thierry KRETZ (SETRA),  
Président du Comité Scientifique et Technique

**Représentant l'Association**

**Universitaire de Génie Civil AUGC**

Fabrice GATUINGT

(ENS Cachan)

Président du CA

Christophe PETIT, président du conseil  
scientifique

Hélène CARRÉ (université de Pau),

chargée du prix jeunes

chercheurs René Houpert

Jean-Jacques ROUX (INSA Lyon),

Président du comité scientifique

des 30<sup>es</sup> rencontres de l'AUGC de Chambéry

**Représentant le LCPC**

Jean-Luc CLÉMENT, direction scientifique

**Représentant la SMA-BTP et le GIS MRGenCi**

(maîtrise des risques en génie civil)

Vincent MELACCA

**Représentant l'Union des Ingénieurs et  
Scientifiques Francophones UISF**

Élie ABSI, président

Gilbert GIACOMONI (École des Mines de Paris),  
responsable des publications

François BOUVIER, ingénieur ECP, architecte  
et urbaniste

**ABONNEMENT :**

Editions ESKA

<http://www.eska.fr>

12, rue du Quatre-

Septembre - 75002 PARIS

Tél. : 01 42 86 55 65 - Fax : 01 42 60 45 35

**FABRICATION :** AGPA EDITIONS

4, rue Camélinat - 42000 Saint-Etienne

Tél. : 04 77 43 26 70 - Fax : 04 77 41 85 04

E-mail : agpaedit@wanadoo.fr

**PUBLICITÉ - À la rédaction**

**IMPRESSION :**

Dupli-Print à Domont

N° 209503

# sommaire

## éditorial

### Matériaux de construction

Transfert d'humidité dans les murs massifs en terre cuite, influence des enduits .....	7
<i>Michel KORNMANN, Daniel PALENZUELA, Olivier DUPONT</i>	
Application de la polarisation au décoffrage des éléments en béton - Étude de faisabilité.....	18
<i>N. GOUDJIL, Y. VANHOVE, C. DJELAL, H. KADA</i>	
Pérennisation des Ouvrages en Génie Civil : Diagnostic et Inspection des Bétons d'Egouts .....	25
<i>Mehena OUALIT, Med Tahar ABADLIA, Raoul JAUBERTHIE</i>	

### Articles proposés par des auteurs étrangers évalués par les comités de lecture des associations partenaires des Annales du BTP (CNISF et AUGC)

Caractéristiques du béton à base de granulats recyclés Etude expérimentale.....	32
<i>Pierre MATAR, Rouba EL DALATI</i>	
Évaluation des performances des nœuds poteau-poutre en béton armé renforcés par tissu de fibres de carbone .....	40
<i>L. HAKIMI, M. IDDIR</i>	
Caractérisation géométrique des barres d'acier pour béton armé par des méthodes expérimentales .....	47
<i>Moncef MAKNI, Atef DAOUD</i>	

<b>abstracts — résumés</b> .....	4
<b>annonces de colloques</b> .....	53
<b>bulletin d'abonnement</b> .....	2
<b>recommandations aux auteurs</b> .....	couv 3

# CARACTÉRISTIQUES DU BÉTON À BASE DE GRANULATS RECYCLÉS ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

---

**Pierre MATAR\*, Rouba EL DALATI\*\***

\* Maître de Conférences, Docteur  
Laboratoire de Génie Civil, Faculté de Génie, Branche 2  
Université Libanaise  
Roumieh, Rue Principale  
pmat@ul.edu.lb

\*\* Maître de Conférences, Docteur  
Laboratoire de Génie Civil, Faculté de Génie, Branche 1  
Université Libanaise  
Tripoli, Rue Arz  
rdalati@ul.edu.lb

---

## CONTEXTE INDUSTRIEL

L'extraction de granulats est un secteur très important pour le BTP dont il constitue l'activité de base. Comme toute matière première naturelle, les granulats naturels sont limités en quantité et les sites exploitables risquent de ne pas suffire pour répondre à la demande. En outre, l'extraction de granulats naturels n'est pas sans impact environnemental (sur la faune et la flore).

Dans la majorité des pays, la consommation des granulats suit un accroissement constant. En conséquence, les lieux d'extraction ne cessent de s'éloigner des lieux de consommation et cette distance constitue un facteur déterminant dans le coût des granulats (coût de transport supplémentaire).

Il convient de noter aussi que la distance parcourue par les déchets de démolition lors de leur évacuation ne cesse de croître et présente un problème dont les conséquences, au niveau du bilan économique et de la pollution, sont très importantes.

L'idée de recycler les bétons est apparue dans le but principal de préserver l'environnement et de s'intégrer ainsi au

concept de développement durable. En effet, la réutilisation des bétons en tant que granulats dans des nouvelles compositions de béton permet de réduire les dépenses sur la gestion des déchets de démolition et, surtout, de protéger les gisements et les montagnes contre l'ouverture de nouvelles carrières. Les granulats provenant du recyclage de bétons peuvent remplacer une partie de granulats naturels lors de la fabrication de nouveaux mélanges de béton. Les taux de substitution des granulats naturels dans cette recherche sont 10, 20 et 30 %.

La fabrication de bétons à base d'agrégats provenant du recyclage de béton démolé comporte les étapes principales suivantes :

- la réception des bétons de démolition ;
- le découpage du béton à la cisaille ;
- la séparation des matériaux (déferraillage électromagnétique) ;
- le broyage du béton à l'aide d'une station de concassage de béton ;
- le stockage des agrégats recyclés ;
- l'utilisation des agrégats recyclés dans la fabrication de nouveaux bétons.

Des essais de laboratoire doivent être réalisés sur ces nouveaux bétons contenant d'agrégats recyclés afin de déterminer leurs caractéristiques physico-mécaniques telles que leur résistance à la compression, leur ouvrabilité, leur porosité et leur durabilité.

## 1. INTRODUCTION

L'augmentation inquiétante des quantités des déchets provenant de la construction et de la démolition, ainsi que l'extraction étendue des ressources naturelles nécessaires à la production des matériaux de construction sont sujettes aux critiques des écologistes. Toutefois, de grandes parties des déchets peuvent être partiellement recyclées. L'un des principaux déchets de construction susceptibles d'être recyclés est le béton démolé. L'idée de recycler les bétons est apparue dans le but principal de préserver l'environnement. En effet, la réutilisation des bétons en tant que granulats dans des nouvelles compositions de béton a permis de réduire les dépenses sur la gestion des déchets de construction et de démolition et, surtout, de protéger les gisements et les montagnes contre l'ouverture de nouvelles carrières (Rubaud *et al.*, 1998).

Le but de cette recherche est d'étudier expérimentalement l'influence des granulats recyclés sur les propriétés du béton telles que sa résistance à la compression, son ouvrabilité et sa porosité, ainsi que sa durabilité.

L'efficacité du recyclage du béton est conditionnée par la pureté du gisement source et les techniques de concassage, de broyage et de criblage du béton de démolition. Selon les études réalisées et les constatations faites sur le terrain, il semble que c'est le mortier du produit source qui joue le rôle prépondérant dans la qualité des constituants élaborés et dans le comportement des mélanges. C'est principalement par sa porosité que le mortier a une action plus ou moins importante. Sauf dans le cas d'emploi de granulats de base particulièrement poreux, toute la porosité du béton se retrouve dans le mortier. On peut considérer que ce mortier a une porosité supérieure à 10 %. Le second paramètre qui intervient est alors le dosage en ciment et le troisième est la quantité d'eau.

La porosité du béton et de la pâte de ciment hydraté gouverne de nombreuses propriétés du béton telles que : ses caractéristiques mécaniques, sa perméabilité (vis-à-vis de l'eau, des ions et des gaz) et sa durabilité. Plus la porosité diminue, plus les propriétés mécaniques s'améliorent et plus la perméabilité diminue. Les bétons faiblement poreux sont en général plus durables puisque leur faible perméabilité retarde la pénétration de l'eau et des autres agents potentiellement agressifs (sulfates, CO<sub>2</sub>, Cl<sup>-</sup>, etc.).

La littérature a montré que les bétons à agrégats recyclés sont poreux et présentent des valeurs de perméabilité deux fois plus élevées que celles des bétons à granulats naturels. Leurs propriétés physiques et mécaniques décroissent à mesure que le taux de substitution des granulats naturels par des granulats de recyclage augmente. La résistance à la compression diminue nettement dès que

le taux de remplacement dépasse 30 % (Gomez-Soberon, 2002).

## 2. NOMENCLATURE

BN	Béton ne contenant que des granulats Naturels
BRI/xGR1	Béton contenant x % de Granulats Recyclés de dimensions entre 8 et 16 mm (catégorie GR1) provenant de béton Incendié
BRI/xGR2	Béton contenant x % de Granulats Recyclés de dimensions entre 4 et 16 mm (catégorie GR2) provenant de béton Incendié
BRI/xGR2/yC	Béton contenant x % de Granulats Recyclés de dimensions entre 4 et 16 mm (catégorie GR2) provenant de béton Incendié avec ajout d'y % de ciment
BRS/xGR1	Béton contenant x % de Granulats Recyclés de dimensions entre 8 et 16 mm (catégorie GR1) provenant de béton Sain (non affecté par le feu)
BRS/xGR2	Béton contenant x % de Granulats Recyclés de dimensions entre 4 et 16 mm (catégorie GR2) provenant de béton Sain (non affecté par le feu)
BRS/xGR2/yC	Béton contenant x % de Granulats Recyclés de dimensions entre 4 et 16 mm (catégorie GR2) provenant de béton Sain (non affecté par le feu) avec ajout d'y % de Ciment

## 3. MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE

Quinze mélanges de béton ont été préparés. Un de ces mélanges ne contenait que des granulats naturels (béton ordinaire), alors que les autres contenaient des granulats naturels et des granulats recyclés.

Les granulats recyclés utilisés (Figures 1 et 2) sont le résultat de la démolition d'un même bâtiment, une partie duquel ayant été soumise à l'action du feu. Ainsi, sept mélanges comprenaient des granulats provenant de béton incendié (Tableau 1) et sept autres mélanges comprenaient des granulats provenant de béton « sain » (non incendié) (Tableau 2). Différents taux de granulats recyclés ont été utilisés pour la substitution des granulats naturels : 10, 20 et 30 %. Deux catégories de granulats recyclés, du point de vue dimensions, ont été utilisées : catégorie GR1 ayant des dimensions entre 8 et 16 mm et catégorie GR2 ayant des dimensions entre 4 et 16 mm. Les dimensions des granulats naturels étaient entre 5 et 16 mm.

Les mélanges de béton ont été préparés en utilisant la méthode de formulation du béton de Dreux-Gorisse (Dreux *et al.*, 1998) en prenant un dosage en ciment constant de 350 kg pour 1 m<sup>3</sup> de béton dans tous les mélanges à l'exception de deux mélanges où 10 % de ciment ont été ajoutés.

Composants du béton	BN	BRI/10G R1	BRI/10G R2	BRI/20G R1	BRI/20G R2	BRI/30G R1	BRI/30G R2	BRI/10G R2/10C
Granulats naturels 5/16 mm, kg	1240	1116	1116	992	992	868	868	1116
Granulats recyclés de béton incendié 8/16 mm (catégorie GR1), kg	0	124	0	248	0	372	0	0
Granulats recyclés de béton incendié 4/16 mm (catégorie GR2), kg	0	0	124	0	248	0	372	124
Sable, kg	580	580	580	580	580	580	580	580
Ciment, kg	350	350	350	350	350	350	350	385
Eau, l	200	250	262	275	275	275	270	260
E/C	0.57	0.71	0.75	0.79	0.79	0.79	0.77	0.68

**Tableau 1. Composition des bétons à granulats recyclés incendiés**

Composants du béton	BN	BRS/10G R1	BRS/10G R2	BRS/20G R1	BRS/20G R2	BRS/30G R1	BRS/30G R2	BRS/10G R2/10C
Granulats naturels 5/16 mm, kg	1240	1116	1116	992	992	868	868	1116
Granulats recyclés de béton incendié 8/16 mm (catégorie GR1), kg	0	124	0	248	0	372	0	0
Granulats recyclés de béton incendié 4/16 mm catégorie (GR2), kg	0	0	124	0	248	0	372	124
Sable, kg	580	580	580	580	580	580	580	580
Ciment, kg	350	350	350	350	350	350	350	385
Eau, l	200	250	262	275	275	275	270	260
E/C	0.57	0.71	0.75	0.79	0.79	0.79	0.77	0.68

**Tableau 2. Composition des bétons à granulats recyclés sains**



**Figure 1. Granulats recyclés incendiés**



**Figure 2. Granulats recyclés non affectés par l'incendie (« sains »)**

### 3.1. Essais d'affaissement

L'ouvrabilité du béton frais a été caractérisée et sa consistance a été déterminée en réalisant des essais d'affaissement au cône d'Abrams (NF P 18-451, 1981).

### 3.2. Essais de compression

Les essais de compression ont été réalisés sur des éprouvettes cylindriques de 15 cm de diamètre et de 30 cm de hauteur (NF P 18-400, 1981). Les éprouvettes ont été conservées dans un local maintenu à une température de  $20 \pm 2$  °C pendant 24 heures (NF P 18-404, 1981). L'humidité de l'air ambiant était entre 60 et 75 %. Après démoulage, les éprouvettes ont été conservées à une température pareille dans l'eau. Les essais de compression (NF P 18-406, 1981) ont été réalisés à 28 jours après le coulage du béton en utilisant une machine semi-automatique ayant une capacité maximale de 1500 kN. L'effort de compression a été appliqué progressivement, à une vitesse de mise en charge de 8,8 kN/s. Les essais ont été considérés terminés au moment de la rupture de l'éprouvette. La rupture de toutes les éprouvettes avait la forme diabolo. La résistance à la compression du béton initial dont les granulats ont été utilisés après recyclage a été déterminée en réalisant de différents essais : destructifs (essai de compression sur des carottes) (NF P 18-405, 1981) et non destructifs (essais in situ à l'aide d'un scléromètre) (NF P 18-417, 1989). La valeur moyenne de cette résistance était de 6 MPa pour le béton incendié et de 20 MPa pour le béton sain.

### 3.3. Essais de porosité

Des essais de porosité (NF P 18-554, 1979) ont été réalisés sur des cubes de béton à granulats recyclés de côté 5 cm. Pour chaque type de béton trois cubes ont été fabriqués. Les essais ont été effectués à un âge de douze jours (Figure 3). Les cubes ont été séchés jusqu'à masse constante dans un four à une température 60 °C. La masse à sec de chaque cube a été relevée. Puis les cubes étaient plongés dans l'eau et leur nouvelle masse a été relevée. La



Figure 3. Cubes de béton à granulats recyclés pour l'essai de porosité

différence entre les masses sèche et saturée d'eau représente la masse d'eau absorbée et, par suite, le volume des vides. Ainsi, on a pu déterminer le pourcentage de vides dans les cubes de béton à granulats recyclés.

### 3.4. Indice de durabilité

L'indice de durabilité des granulats provenant du recyclage de béton a été déterminé afin de pouvoir évaluer la résistance de ces granulats à l'affaiblissement et à la désintégration lors du changement de la teneur en eau. La technique utilisée est conforme aux prescriptions de la procédure d'essai suggérée par la Société internationale de mécanique des roches (Brown, 1981), ainsi que la norme de l'Association américaine pour les essais et matériaux (ASTM D4644-08, 2008). Deux séries de granulats recyclés ont été considérées : une série comportait des granulats provenant du béton incendié et l'autre série comportait des granulats provenant du béton sain. Dix échantillons de granulats pesant 40 à 60 g chacun donnant un poids total de 450 à 550 g ont été choisis pour représenter chaque série de granulats à tester.

Des essais pareils ont été également réalisés afin de déterminer l'indice de durabilité du béton à granulats recyclés. Dix échantillons de bétons à granulats recyclés pesant 40 à 60 g chacun donnant un poids total de 450 à 550 g ont été également choisis pour représenter chaque type de béton à tester.

On place les échantillons dans un tambour clos par des tamis métalliques de masse C et on place l'ensemble dans une étuve à 60 °C jusqu'à obtenir une masse constante du tambour avec ses contenus ; on note cette masse A. Puis on place le tambour dans un bocal contenant de l'eau distillée tout en respectant les instructions indiquées dans le catalogue de l'appareil. On soumet le tambour à une rotation dans l'eau durant 10 minutes. Durant la rotation les fragments du matériau utilisé se trouvent dégradés et sédimentés dans le bocal d'eau. Le tambour sera ensuite retiré du bocal et séché de nouveau jusqu'à masse constante ; la nouvelle masse sera notée B. Un simple calcul donnera ainsi l'indice de durabilité en utilisant l'équation suivante :

$$I_d = \frac{B - C}{A - C} \times 100,$$

avec :

B - C = masse sèche après l'essai,

A - C = masse sèche avant l'essai.

## 4. RÉSULTATS ET DISCUSSION DES ESSAIS

### 4.1. Rapport E/C et essais de compression

Les figures 4 et 5 présentent les valeurs du rapport eau/ciment pour les bétons à granulats recyclés incendiés et les bétons à granulats recyclés sains respectivement. Ces

deux figures montrent le besoin de l'ajout d'eau lors de l'augmentation du taux des granulats recyclés. Cet ajout d'eau était nécessaire afin d'obtenir des mélanges de béton à ouvrabilité pareille. La nécessité d'ajout d'eau est due à l'absorption d'eau par les granulats recyclés, caractéristique capable d'affecter le comportement rhéologique du béton frais. L'absorption d'eau par les granulats recyclés était également la conséquence de la présence d'une structure alvéolaire de l'ancien mortier collé aux granulats. Les alvéoles captent l'eau et la retiennent. Ainsi, afin de maintenir l'affaissement du béton entre 2.5 et 4.5 cm, intervalle correspondant à un béton ferme et envisagé dans nos essais, il était nécessaire d'ajouter de l'eau et, par conséquent, d'augmenter le rapport E/C avec l'augmentation du taux des granulats recyclés. Toutefois, on remarque une amélioration (diminution) de ce rapport lors de l'ajout de 10 % de ciment. Bien que la variation du rapport E/C de tous les bétons contenant des granulats recyclés par rapport au béton témoin soit semblable, une légère absorption d'eau supplémentaire pour les bétons contenant des granulats provenant de bétons incendiés est remarquée.

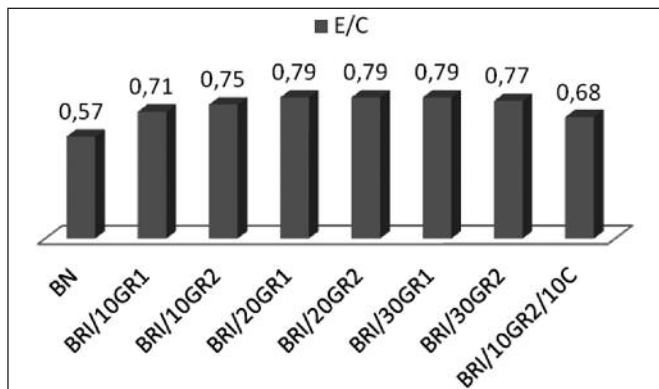


Figure 4. Rapport E/C des bétons à granulats recyclés incendiés

En considérant les valeurs du rapport E/C des bétons à granulats recyclés et du béton qui ne contient que des granulats naturels, on remarque :

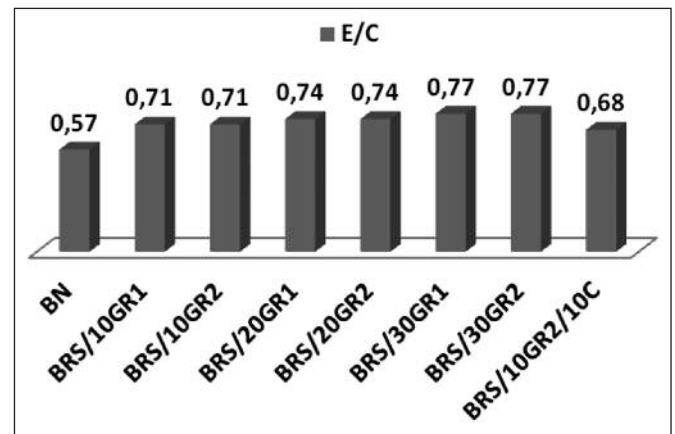


Figure 5. Rapport E/C des bétons à granulats recyclés sains

– une augmentation du rapport E/C pour les bétons à granulats recyclés incendiés constituant :

- 24 % pour BRI/10GR1,
- 31 % pour BRI/10GR2,
- 36 % pour BRI/20GR1,
- 36 % pour BRI/20GR2,
- 36 % pour BRI/30GR1,
- 34.5 % pour BRI/30GR2,
- 17.2 % pour BRI/10GR2/10C ;

– une augmentation du rapport E/C pour les bétons à granulats recyclés sains constituant :

- 24 % pour BRS/10GR1,
- 24 % pour BRS/10GR2,
- 29 % pour BRS/20GR1,
- 29 % pour BRS/20GR2,
- 34.5 % pour BRS/30GR1,
- 34.5 % pour BRS/30GR2,
- 17.2 % pour BRS/10GR2/10C.

Les valeurs de l'affaissement et de la résistance en compression des bétons à granulats recyclés incendiés et des bétons à granulats recyclés sains sont citées dans les tableaux 3 et 4 respectivement.

Caractéristiques du béton	BN	BRI/10G R1	BRI/10G R2	BRI/20G R1	BRI/20G R2	BRI/30G R1	BRI/30G R2	BRI/10G R2/10C
Affaissement, cm	2.5	3	4.5	3.5	4	3.5	3.5	3
Résistance à la compression, MPa	23	16.3	15.7	16	15.3	13.8	14.3	20.7

Tableau 3. Affaissement et résistance à la compression des bétons à granulats recyclés incendiés

Caractéristiques du béton	BN	BRS/10G R1	BRS/10G R2	BRS/20G R1	BRS/20G R2	BRS/30G R1	BRS/30G R2	BRS/10G R2/10C
Affaissement, cm	2.5	4	3	4	4	3.5	3.5	3
Résistance à la compression, MPa	23	17	19.5	16.3	16.5	15.1	15.2	22.4

Tableau 4. Affaissement et résistance à la compression des bétons à granulats recyclés sains

Les figures 6 et 7 présentent les valeurs de la résistance en compression des bétons à granulats recyclés incendiés et celles des bétons à granulats recyclés sains respectivement. On remarque que tous les bétons recyclés ont une résistance inférieure à celle du béton ne contenant que des granulats naturels. La diminution de la résistance des bétons à granulats recyclés devient plus remarquable avec l'augmentation du taux des granulats recyclés, ce qui est tout à fait logique. Les compositions contenant des granulats recyclés à dimensions de 4 à 16 mm fournissent une résistance légèrement meilleure que celle fournie par les compositions contenant des granulats recyclés à dimensions de 8 à 16 mm. Ceci peut être attribué à une meilleure homogénéisation de la granulométrie. Enfin, l'ajout de 10 % de ciment a bien amélioré la résistance à la compression.

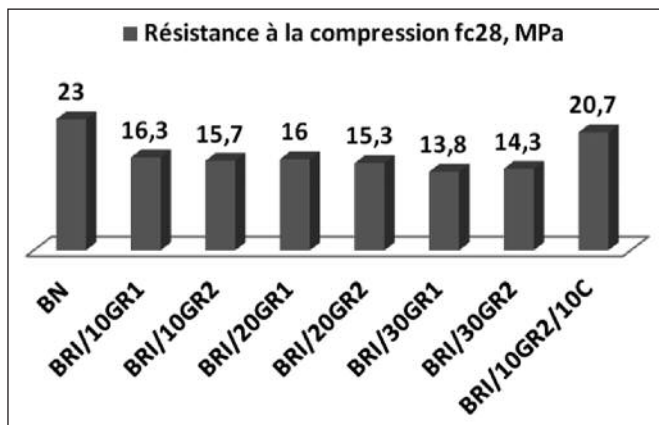


Figure 6. Résistance à la compression des bétons à granulats recyclés incendiés

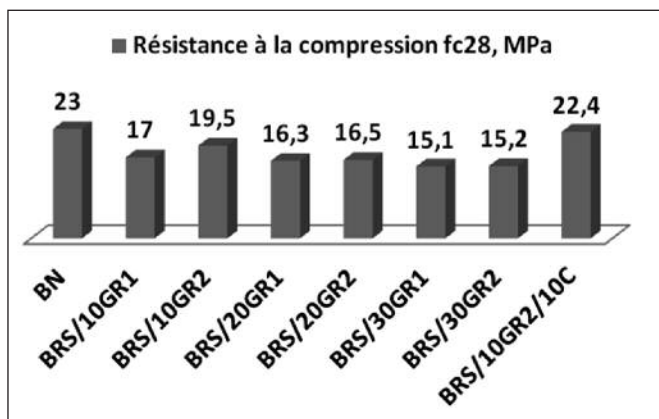


Figure 7. Résistance à la compression des bétons à granulats recyclés sains

En comparant les résultats des essais de compression des bétons à granulats recyclés et du béton qui ne contient que des granulats naturels, on remarque :

- une diminution de la résistance en compression pour les bétons à granulats recyclés incendiés constituant :
  - 29 % pour BRI/10GR1,
  - 32 % pour BRI/10GR2,
  - 30,4 % pour BRI/20GR1,
  - 33 % pour BRI/20GR2,
  - 40 % pour BRI/30GR1,
  - 38 % pour BRI/30GR2,
  - 10 % pour BRI/10GR2/10C ;
- une diminution de la résistance en compression pour les bétons à granulats recyclés sains constituant :
  - 26 % pour BRS/10GR1,
  - 15 % pour BRS/10GR2,
  - 29 % pour BRS/20GR1,
  - 28 % pour BRS/20GR2,
  - 35 % pour BRS/30GR1,
  - 33,7 % pour BRS/30GR2,
  - 2,5 % pour BRS/10GR2/10C.

En récapitulant les résultats des essais de compression, on peut remarquer une chute de la résistance en moyenne :

- de 30,5 % pour les bétons contenant 10 % de granulats recyclés incendiés,
- de 20,5 % pour les bétons contenant 10 % de granulats recyclés sains,
- de 31,7 % pour les bétons contenant 20 % de granulats recyclés incendiés,
- de 28,5 % pour les bétons contenant 20 % de granulats recyclés sains,
- de 39 % pour les bétons contenant 30 % de granulats recyclés incendiés,
- de 34,4 % pour les bétons contenant 30 % de granulats recyclés sains.

Ces résultats sont conformes à ceux obtenus lors des essais antérieurs réalisés par notre équipe (El Dalati *et al.*, 2008) et qui ont montré que la résistance à la compression diminue de plus de 30 % lors de l'utilisation d'un taux de 30 % de granulats recyclés non affectés par l'incendie.

## 4.2. Essais de porosité

Les résultats des essais de porosité réalisés sur les cubes de béton à granulats recyclés incendiés et sains sont illustrés dans les tableaux 5 et 6 respectivement. Les figures 8 et 9 illustrent également les valeurs des porosités calculées.

Désignation	BRI/10G R1	BRI/10G R2	BRI/20G R1	BRI/20G R2	BRI/30G R1	BRI/30G R2	BRI/10G R2/10C
E/C	0.71	0.75	0.79	0.79	0.79	0.77	0.68
Masse sèche, g	266	275.7	274.7	269.3	265.7	267	266.3
Masse saturée d'eau, g	291	301.7	302	297.7	294.3	296.3	291.7
Masse d'eau retenue, g (= Volume des vides, cm <sup>3</sup> )	25	26	27.3	28.4	28.6	29.3	25.4
Porosité, %	20	20.8	21.84	22.72	22.88	23.44	20.32

Tableau 5. Porosité des bétons à granulats recyclés incendiés

Désignation	BRS/10G R1	BRS/10G R2	BRS/20G R1	BRS/20G R2	BRS/30G R1	BRS/30G R2	BRS/10G R2/10C
E/C	0.71	0.71	0.74	0.74	0.77	0.77	0.68
Masse sèche, g	275.7	281.3	273.7	274.3	270.7	269.7	269.7
Masse saturée d'eau, g	300.7	306.7	301	301.7	299	298	295
Masse d'eau retenue, g (= Volume des vides, cm <sup>3</sup> )	25	25.4	27.3	27.4	28.3	28.3	25.3
Porosité, %	20	20.32	21.84	21.92	22.64	22.64	20.24

Tableau 6. Porosité des bétons à granulats recyclés sains

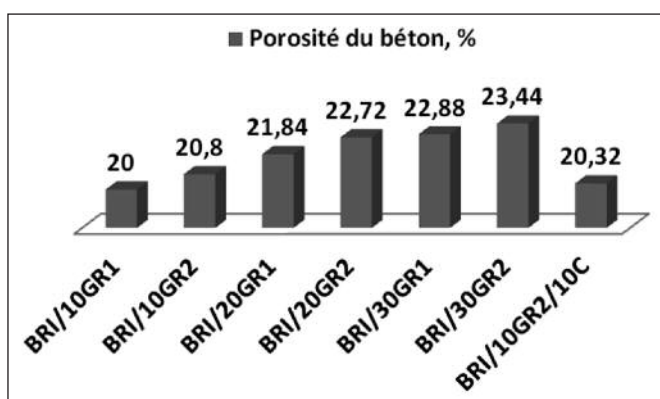


Figure 8. Porosité des bétons à granulats recyclés incendiés

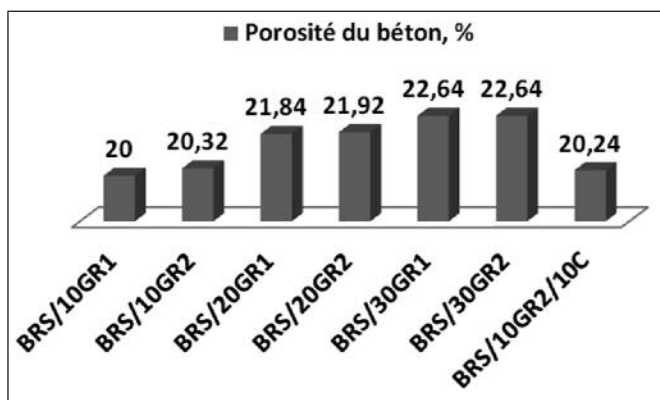


Figure 9. Porosité des bétons à granulats recyclés sains

On remarque que la porosité des bétons augmente avec l'augmentation du taux des granulats recyclés. La porosité est élevée à cause de la porosité des granulats recyclés et elle augmente avec l'augmentation du rapport E/C.

Pour les bétons BRI/10GR1, BRI/10GR2, BRI/20GR1, BRI/10GR2/10C, BRS/10GR1, BRS/10GR2, BRS/20GR1, BRS/20GR2 et BRS/10GR2/10C, la qualité du béton vis-à-vis de la porosité est médiocre. Pour les autres bétons, la qualité du béton vis-à-vis de la porosité est presque mauvaise.

### 4.3. Indice de durabilité des granulats recyclés

La masse totale des échantillons de granulats recyclés incendiés constituait 505.89 g, la masse de chacun de ces

échantillons étant comprise entre 40.89 et 58.90 g, alors que celle des échantillons de granulats recyclés non atteints par le feu constituait 504.63 g, la masse de chacun de ces échantillons étant comprise entre 40.80 et 56.45 g. D'après le calcul basé sur les mesures réalisées durant les essais, l'indice de durabilité des granulats recyclés incendiés est obtenu égal à 91.65 % et celui des granulats recyclés sains est égal à 98.41 %.

On remarque que l'indice de durabilité des granulats provenant du béton incendié est beaucoup plus petit que celui des granulats provenant du béton sain. Par conséquent, le béton formé par des granulats recyclés non incendiés sera sûrement plus durable que celui formé par des granulats recyclés incendiés.

### 4.4. Indice de durabilité des bétons contenant des granulats recyclés

L'indice de durabilité a été calculé pour deux séries de bétons à agrégats recyclés : une série contenant 10 % d'agrégats recyclés incendiés (BRI) et une série contenant 10 % d'agrégats recyclés non incendiés (BRS). Chaque série de béton comportait les deux catégories d'agrégats : agrégats de 8 à 16 mm (catégorie GR1) et agrégats de 4 à 16 mm (catégorie GR2). D'après les mesures effectuées durant les essais, l'indice de durabilité des bétons a été calculé et les valeurs obtenues sont données dans le tableau 7.

Désignation	BRI/10G R1	BRI/10G R2	BRS/10G R1	BRS/10G R2
Indice de durabilité	98.22%	96.63%	98.28%	98.49%

Tableau 7. Indice de durabilité des bétons contenant 10 % de granulats recyclés

L'examen des valeurs obtenues montre que l'indice de durabilité des bétons contenant d'agrégats recyclés incendiés est plus petit que celui des bétons contenant d'agrégats recyclés non incendiés ; cette observation n'est pas inattendue car les granulats constituant ces bétons ont montré une image pareille lors des essais décrits au paragraphe 4.3.



## 5. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Afin d'assurer une maniabilité du béton à granulats recyclés (incendiés ou non incendiés) comparable à celle du béton ordinaire ne contenant pas de granulats recyclés, il est nécessaire d'ajouter de l'eau, ce qui peut affecter évidemment sa résistance à la compression.

Les bétons à granulats recyclés offrant de faibles résistances en compression peuvent être utilisés en tant que bétons de propreté et bétons cyclopéens, ainsi que dans les travaux routiers comme les bordures et les pavés de trottoirs, les murs poids, les canaux et dans d'autres constructions ne nécessitant pas des résistances élevées.

Le béton recyclé qui peut avoir un rapport E/C élevé ne peut pas être utilisé dans des milieux agressifs à cause de sa porosité et perméabilité élevées.

L'ajout de 10 % de ciment aux mélanges de bétons à granulats recyclés permet de compenser la perte de résistance en compression de ces bétons et de leur fournir une résistance comparable à celle des bétons ne contenant que des granulats naturels.

Les valeurs obtenues de la résistance à la compression des bétons contenant des granulats recyclés, qu'ils soient incendiés ou non, permettent leur utilisation dans les structures.

## 6. BIBLIOGRAPHIE

Rubaud M., Pasquet J.-F., Bourgeois F., « Recyclage des matériaux de construction : les nouvelles filières pour préserver l'environnement », *Géosciences*, n° 1, janvier 2005, Source : <http://www.brgm.fr/dcenewsFile?ID=255>.

Gomez-Soberon J.M.V., « Porosity of recycled concrete with substitution of recycled aggregate. An experimental study », *Cement and Concrete Research*, Elsevier, vol. 32, n° 8, August 2002, p. 1301-1311.

Dreux G., Festa J., *Nouveau guide du béton et ses constituants*, Eyrolles, Paris, 1998.

NF P 18-451 : Bétons – Essai d'affaissement, AFNOR, Paris, décembre 1981.

NF P 18-400 : Bétons – Moules pour éprouvettes cylindriques et prismatiques, AFNOR, Paris, décembre 1981.

NF P 18-404 : Bétons – Essais d'étude de convenance et de contrôle – Confection et conservation des éprouvettes, AFNOR, Paris, décembre 1981.

NF P 18-406 : Bétons – Essai de compression, AFNOR, Paris, décembre 1981.

NF P 18-405 : Bétons – Essai d'information – Confection et conservation des éprouvettes, AFNOR, Paris, décembre 1981.

NF P 18-417 : Béton – Mesure de la dureté de surface par rebondissement à l'aide d'un scléromètre, AFNOR, Paris, décembre 1989.

NF P 18-554 : Granulats – Mesure des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux, AFNOR, Paris, 1979.

Brown E.T. (Editor), « Suggested method for determination of the slake-durability index », *Rock Characterization Testing & Monitoring, ISRM Suggested Methods*, Published for the Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics, Pergamon Press, Oxford, New York, 1981, p. 92-94.

ASTM D4644-08: Standard test method for slake durability of shales and similar weak rocks, *Annual Book of ASTM Standards 2010*, ASTM, West Conshohocken, PA, USA. Section 4, Construction, vol. 04.08, March 2010.

El Dalati R., Youssef E., Matar P., Yotte S., Homsy F., « Effet de la nature des agrégats sur la qualité du béton recyclé », *Compte-rendu du 3<sup>e</sup> Congrès International Francophone de Mécanique Avancée CIFMA03*, Alep, Syrie, 21-23 avril 2008.