

# ÉTUDE DE L'AFFAISSEMENT ET DES PERFORMANCES D'UN BÉTON RECYCLÉ

Hallshow Hussain<sup>\*,\*\*</sup>, Daniel Levacher<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>Université de Caen - <sup>\*\*</sup>Université de Limoges

Gérer le devenir des déchets du bâtiment est un défi récent auxquels sont confrontés les ingénieurs, car seuls les déchets ultimes pourront à terme être mis en décharge. Valoriser les granulats issus de bétons de démolition sans traitement préalable, et sans risques majeurs de pollution, pour faire de nouveaux bétons, est l'objectif de ce travail. Les granulats de béton de démolition actuellement utilisés dans la plupart des pays Européens sont valorisés dans le domaine routier. Il est possible également d'obtenir un béton à base de granulats recyclés issus de bétons de démolition ayant de bonnes caractéristiques mécaniques. Certains auteurs affirment que les différences obtenues sur la résistance en compression simple  $F_c$ , le module d'élasticité  $E$ , ... entre un béton recyclé par rapport à un béton conventionnel sont importantes, d'autres affirment le contraire. Et parallèlement, nous avons constaté selon différentes sources bibliographiques le manque d'études sur la composition d'un béton à base de granulats recyclés. Ceci constitue un problème, voire une insuffisance majeure. Que l'on focalise l'étude sur  $F_c$ ,  $E$  ou la durabilité... les résultats diffèrent en fonction de la composition du béton, à savoir le rapport gravier sur sable (G/S), et le rapport eau sur ciment (E/C). C'est pour cela que nous avons accordé une importance particulière à la composition du béton recyclé et à la méthode à adopter pour substituer aux granulats traditionnels, les granulats issus de béton de démolition. Nous présentons dans ce travail les résultats expérimentaux relatifs à une campagne d'essais mécaniques sur plus de 100 éprouvettes cylindriques  $11 \times 22$  cm.

Managing the building wastes is a recent challenge to which are confronted engineers, because only ultimate wastes will be stored in confined disposals. Valorisation of demolished concrete, without treatment neither major pollution risks, in the manufacture of new concrete, constitutes the first part of this work. Concrete aggregates from demolished structures are mainly re-used for road construction. Other reuses of concrete aggregates are possible such as the manu-

facturing of new concrete materials with good mechanical characteristics. Many investigators have been carried out in the world and comparisons between recycled concrete aggregate and conventional concrete have given different conclusions by the researchers. Sometimes it is different to compare some experimental results due to the lack of knowledge links to the composition of the recycled concrete. It is clear that the unconfined compressive strength  $F_c$ , the elasticity modulus  $E$  or the durability of the concrete are depending on the concrete composition through gravel on sand ratio G/S and water on cement ratio E/C relationships. Hence the substitution of aggregates method and the composition are clearly given. Experimental results issued from more than 100 cylindrical concrete samples are analyzed.

## DOMAINE D'ÉTUDE

Le recyclage des granulats issus de bétons de démolition passe par différentes étapes, à savoir la démolition des structures, l'élaboration des granulats à partir des blocs de béton, la composition du béton à base des granulats recyclés et enfin l'étude de la durabilité de ces bétons, voir le schéma 1. Les polluants sont pratiquement le seul obstacle au recyclage des bétons. Il est possible de diminuer le taux de pollution des granulats recyclés à partir de la démolition et à travers la gestion des déchets du BTP. Pour cela il est préférable de faire une démolition sélective quand cela est possible. D'autre part, il faut instaurer des règles plus strictes en matière de transport et de stockage des granulats recyclés, car un certain nombre de polluants peut s'ajouter aux granulats recyclés à différentes étapes. Afin de ne pas considérer les problèmes liés aux polluants, nous avons choisi des granulats recyclés propres issus d'une démolition sélective. La figure 1 donne un aperçu de la qualité des granulats recyclés utilisés. Le type de ciment utilisé est un CPA-CEM 52.5 PM, ainsi désigné selon les normes en vigueur. Pour un béton recyclé comme dans un béton ordinaire, les

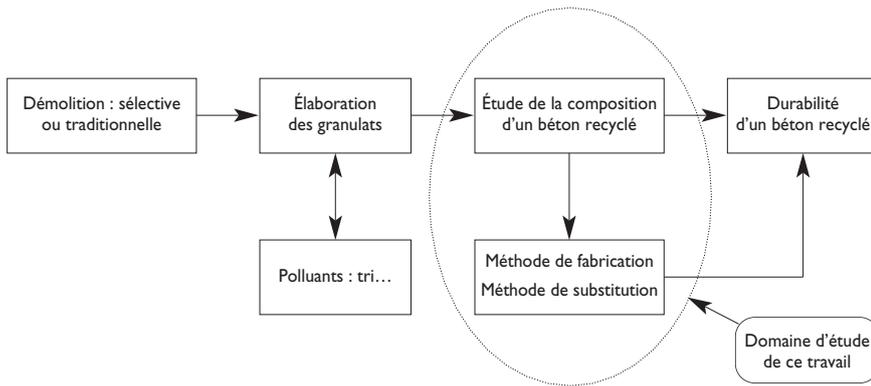


Schéma I : Domaine d'étude de ce travail

agressions chimiques se portent principalement sur la pâte de ciment. En d'autres termes, nous retrouvons les mêmes réactions chimiques face aux mêmes mécanismes d'agression. Notons que ces agressions seront d'autant plus préjudiciables que le béton est poreux. Lors de la confection d'un béton ordinaire, 50 % de l'eau utilisée sert à l'hydratation ; le reste sert uniquement à la maniabilité. Cette moitié est responsable de la porosité et fournit l'eau libre qui facilite l'agression du béton par la suite. Ainsi, dans le but d'obtenir un béton plus durable, il faut utiliser au mieux les matériaux solides, à savoir les graviers (G) et le sable (S) et diminuer si possible l'eau.

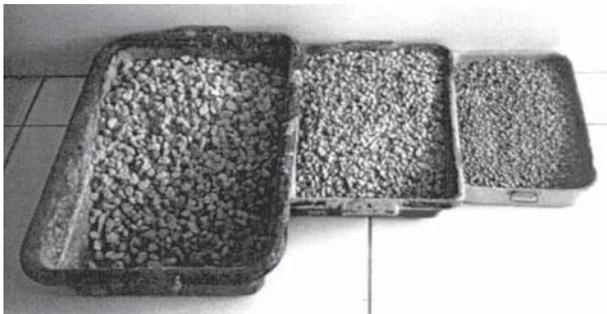


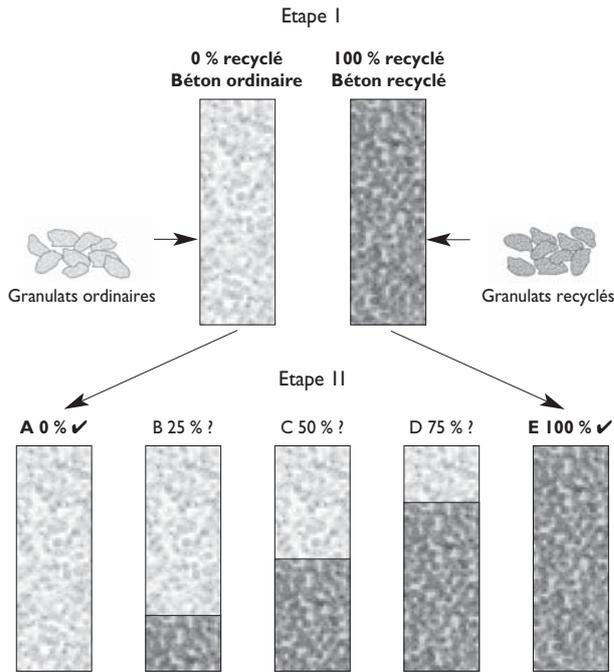
Figure 1 : Graviers recyclés issus d'une démolition sélective

## PROBLÈMES ET MÉTHODES DE SUBSTITUTION GRANULOMÉTRIQUE

La façon de substituer les granulats, c'est-à-dire remplacer un volume de granulats par un volume égal d'un autre granulat ou la substitution par un volume équivalent, est une étape très importante dans le recyclage. Lors de la substitution, on est amené à comparer des granulats qui sont différents, non seulement par une seule caractéristique, mais pour plusieurs caractéristiques sur lesquelles reposent les différentes méthodes de composition du squelette granulaire, à savoir, la masse volumique, le module de finesse ou la granulométrie... Nous savons d'après la bibliographie que, déjà pour un même granulat, les caractéristiques varient en fonction de  $D_{max}$ . Par exemple, si on réduit  $D_{max}$  de moitié, le retrait varie de près de 11 %. La différence de  $D_{max}$  des gra-

nulats pose un sérieux problème pour établir des analyses comparatives. En pratique les différences entre un granulat naturel et un granulat recyclé peuvent être aussi attribuées à leur taille, notamment à  $D_{max}$ . La question principale qui est posée, est de savoir comment substituer et comparer les granulats employés dans tel ou tel béton. Puis le problème peut se révéler être encore plus délicat lorsqu'on utilise des granulats recyclés et un pourcentage de granulats naturels. On utilise les graviers recyclés dans leur état, autrement dit, sans modifier leur granularité. Mais dans tous les cas, il faut garder au moins  $D_{max}$  identique.  $D_{max}$  est aussi un indice de la surface spécifique qui influence directement le dosage en ciment et le dosage en eau. Souvent en pratique, les granulats recyclés comparés aux granulats naturels, n'ont pas la même granularité. Mais cela ne veut pas dire forcément que la granularité des granulats recyclés est plus médiocre que celle des granulats naturels. En effet, la reconstitution de la granulométrie ne permet pas forcément d'améliorer le résultat recherché. Il peut y avoir un effet contraire, tout en sachant que le problème de l'affaissement reste essentiel dans le cas de bétons recyclés. L'affaissement est lié au dosage en eau et en ciment mais aussi à la composition du squelette granulaire, à savoir le rapport gravier/sable (G/S). Il est clair que la seule raison du rejet d'un granulat est la teneur en polluant non traitable. Si nous utilisons des granulats recyclés dans leur état initial et si on substitue au niveau granulaire des pourcentages de 10, 20 voire 90 %, à ce moment là, on pourrait avoir des problèmes d'application de la méthode de Dreux-Gorisse pour la composition du squelette granulaire. La méthode de Dreux-Gorisse ne permet pas de choisir le pourcentage de substitution. Elle donne le pourcentage de chaque type de granulat par rapport à leur granulométrie. Pour choisir le pourcentage de substitution et puis connaître les caractéristiques du béton fabriqué, nous proposons la méthode de substitution granulaire suivante, voir le schéma II. Elle est constituée de deux étapes. La première est « la substitution granulaire à 100 % ». Cette étape est la détermination du comportement d'un béton ordinaire à « 0 % de graviers recyclés » et celui d'un béton à base de granulats recyclés à 100 % « ou à base de graviers recyclés à 100 % » issus de bétons de démolition ou autres. Autrement dit, il faut choisir deux mélanges et déterminer le comportement de chacun des deux mélanges.

L'autre étape concerne l'interpolation du comportement des bétons à base de granulats recyclés à différents pourcentages. Cette interpolation est la substitution au niveau du béton, consistant à déterminer le comportement des états intermédiaires en substituant un pourcentage de graviers recyclés au niveau du béton, et consiste à déterminer le comportement des états intermédiaires.



**Schéma II : Méthode de substitution suggérée pour l'incorporation des granulats dans les bétons.**

Il s'agit en fait de séparer le problème en deux étapes. La première est de déterminer le comportement d'un béton avec 100 % de granulats recyclés et celui d'un béton à base de granulats naturels à 100 %. La deuxième étape concerne la détermination du comportement d'un béton « mélange » d'un pourcentage d'un béton à base de granulats recyclés « E » et d'un béton ordinaire « A », soit la substitution au niveau du béton, voir le schéma II. Il s'agit alors de pouvoir déterminer le comportement d'un béton à base de granulats recyclés à différents pourcentages, par exemple : 25 %, 50 %, 75 %. Il faut définir les caractéristiques des mélanges B ou C ou D à partir des valeurs de référence des mélanges A et E. En fait il est important de savoir comment se combine les performances mécaniques initiales de chaque béton de référence A ou E dans le mélange à x pourcentage de granulats recyclés. Il faut aussi dénombrer les interactions éventuelles et déterminer les problèmes de composition du squelette granulaire. Les caractéristiques des granulats ordinaires et recyclés sont différentes, et pour minimiser les calculs, on étudie des substitutions intermédiaires allant de 10, 20 à 90 %, voir schéma II.

### ÉTUDE DE LA RÉSISTANCE D'UN BÉTON RECYCLÉ EN FONCTION DE L'AFFAISSEMENT AU CÔNE D'ABRAMS

#### Composition

Trois bétons différents ont été confectionnés pour cinq valeurs d'affaissement pour chacun. Ceci représente quinze gâchées. Chaque gâchée, préparée pour un affaissement donné, fournit trois éprouvettes cylindriques 1 l x 22 cm tes-

tées à la compression à l'âge de 28 jours. Le nombre total d'éprouvettes réalisées est de 45. Dans ce programme expérimental, tous les squelettes granulaires sont composés selon la méthode de Dreux-Gorisse. Ce programme a pour objectif de comparer les performances mécaniques d'un béton ordinaire à celle d'un béton à base de graviers recyclés à 100 % : c'est l'étape I. Puis on fabrique un béton à base de graviers recyclés à 50 %. L'objet de l'étape II est de déterminer comment substituer les granulats naturels par des recyclés et selon quelles règles ? Quelles sont les relations à retenir selon les paramètres prépondérants ? Comment utiliser ces relations ? Les comparaisons sont établies pour les différents affaissements. On maintient le dosage en ciment constant et égal à 350 kg/m<sup>3</sup>. On fait varier l'affaissement, cela implique la variation du rapport E/C. Puisque le dosage en ciment est constant, c'est le volume de la pâte qui varie avec la variation du rapport E/C. Le volume des granulats varie légèrement mais le rapport G/S reste constant. La méthode de Dreux-Gorisse fixe le rapport G/S en volume. Mais on sait que la masse volumique des graviers recyclés est inférieure à celle des graviers ordinaires. Cela veut dire lorsqu'on recycle le même volume de graviers, et même si les granulats recyclés ont la même granularité que les granulats ordinaires, pour un même rapport graviers naturels/sables naturels (Gn/Sn) et graviers recyclés/sables naturels (Gr/Sn), on obtient une diminution de la masse des graviers recyclés employés dans le béton. Cet effet est d'autant plus vrai que la masse volumique des graviers recyclés est inférieure à celle des graviers ordinaires. La figure 2 montre une éprouvette de béton à base de graviers recyclés à 100 % (t4) et une éprouvette de béton à base de graviers naturels à 100 % (t1). Dans les deux cas, les sables utilisés sont naturels.



**Figure 2 : Eprouvettes cylindriques de béton t1 : Eprouvette à base de granulats naturels t4 : Eprouvette à base de graviers recyclés à 100 %**

#### Affaissement

Les teneurs en eau des granulats utilisés sont données par le tableau I.

**Tableau I : Teneur en eau et coefficient d'absorption d'eau moyens des granulats utilisés.**

	Ordinaires		Recyclés
	Sables	Graviers	Graviers
Teneur en eau (%)	0.16 ± 0.02	0.3 ± 0.05	3.0 ± 0.50
Coefficient d'absorption d'eau (%)	2.5 ± 0.05	0.5 ± 0.10	6.0 ± 0.50

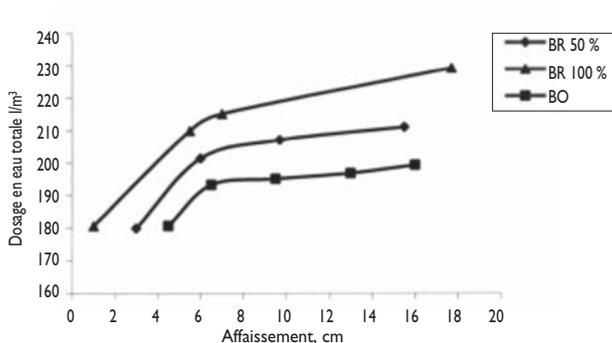
Sur la figure 3, pour de petits affaissements, de 4 à 9 cm, une variation d'eau importante correspond à une petite variation d'affaissement. Mais pour de grands affaissements, au delà de 8 cm, une petite variation d'eau correspond à une grande variation de l'affaissement. On voit lors de l'utilisation du cône d'Abrams, qu'un affaissement plastique, de 5 à 9 cm, peut être atteint plus facilement en terme de contrôle d'eau, mais un affaissement très plastique « ou liquide », 10 à 16 cm, est moins contrôlable. Ceci s'explique. Au départ pour les petits affaissements, l'eau dans le mélange est à la fois absorbée par les granulats, mouille le ciment et le reste sert à la maniabilité du mélange. Mais pour les grands affaissements, les granulats sont saturés rapidement, ainsi l'eau ajoutée reste libre et ainsi, favorise davantage l'affaissement. Ainsi le rapport E/C et l'affaissement changent selon la qualité des granulats et  $D_{max}$ .

### Résistance en compression en fonction de l'affaissement

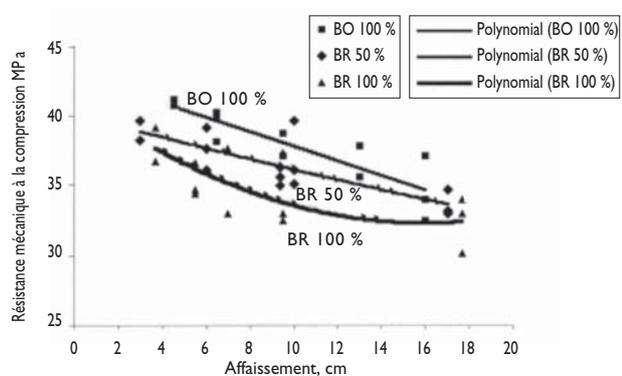
Dans le cas d'un béton à base de graviers recyclés à 100 % (BR 100 %), la chute de la résistance en compression pour un affaissement plastique à très plastique, ne dépasse pas 20 %. Dans le cas d'un béton à base de graviers recyclés à 50 % (BR 50 %), la chute de la résistance en compression dépend surtout de l'affaissement. Pour un affaissement ferme, voir figure 4, la chute de la résistance d'un béton de graviers recyclés à 50 % (BR 50 %), est à peu près la même que celle d'un béton de graviers recyclés à 100 % (BR 100 %). Mais pour un affaissement très plastique voire fluide, la chute de la résistance d'un béton de graviers recyclés à 50 % (BR 50 %) est négligeable, et il donne la même résistance qu'un béton ordinaire (BO 100 %), comme montré sur la figure 4.

### ÉTUDE DU SQUELETTE GRANULAIRE

Il s'agit d'étudier la résistance mécanique en compression à l'âge de 28 jours et le dosage en eau, pour une consistance plastique, en fonction de différentes compositions des parties solides du béton, à savoir, différents dosages en ciment et rapports G/S. Le rapport G/S influe sur la résistance du



**Figure 3 : Dosage en eau versée en fonction de l'affaissement pour des bétons à base de granulats recyclés à 100 % « BR 100 % », pour des bétons à base de granulats recyclés à 50 % « BR 50 % » et pour des bétons à base de granulats ordinaires « BO » appelés aussi béton témoin.**



**Figure 4 : Résultats expérimentaux de  $F_c$  pour un dosage en ciment de 350 kg/m³ de CPA-CEM 52,5, à l'âge de 28 jours.**

béton, mais la tendance et l'amplitude de cette variation dépend du type de sable, du type de graviers et du dosage en ciment. En résumé, on cherche à trouver le rapport G/S idéal selon le type de granulats et le dosage en ciment.

Il faut rappeler que pour une résistance et un affaissement donnés, quand le rapport G/S est élevé : la surface spécifique des granulats est faible. Ainsi, on a besoin de moins de pâte de ciment pour couvrir la surface des granulats. Mais par ailleurs cette pâte de ciment doit remplir l'espace intergranulaire, ce qui devient considérable en l'absence d'une quantité suffisante de sable. De plus, on peut provoquer une ségrégation en raison de cet espace intergranulaire important et de l'absence de sable capable de retenir la pâte. Par exemple, les bétons sans fines [Neville, 2000] sont des bétons constitués uniquement de graviers, d'eau et de ciment, conçus surtout avec une consistance ferme et avec peu de ciment pour avoir des résistances de l'ordre de 10 MPa. Pour remplir les grands espaces intergranulaires, le besoin en pâte de ciment rend le béton plus faible vis à vis des variations de la température et des agressions chimiques. On obtient un matériau très réactif à l'environnement et en conséquence moins performant en matière de durabilité.

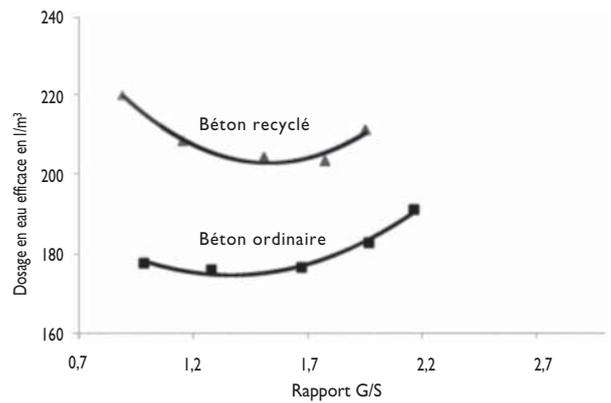
Pour un rapport G/S faible, on retrouve les deux mêmes effets contradictoires, leur action étant différente. Dans ce cas, l'espace intergranulaire diminue mais la surface spécifique des granulats est élevée. Ainsi, on a besoin de plus de pâte de ciment pour créer des liants entre les granulats. Donc il faut trouver un rapport G/S idéal pour atteindre l'affaissement et la résistance désirés selon la qualité des granulats.

Nous avons deux bétons : un béton obtenu avec des sables et des graviers ordinaires et un béton avec sables ordinaires et graviers recyclés. Le sable ordinaire a une surface spécifique supérieure à celle des graviers ordinaires et celle des graviers recyclés. Le coefficient d'absorption d'eau du sable ordinaire est supérieur à celui des graviers ordinaires mais inférieur à celui des graviers recyclés. Dans la bibliographie, on trouve en général que le rapport G/S idéal pour l'affaissement ne convient pas pour obtenir la meilleure résistance, et ce, tout en sachant que la résistance d'un béton, pour un dosage en ciment et un affaissement donnés, dépend de la quantité d'eau.

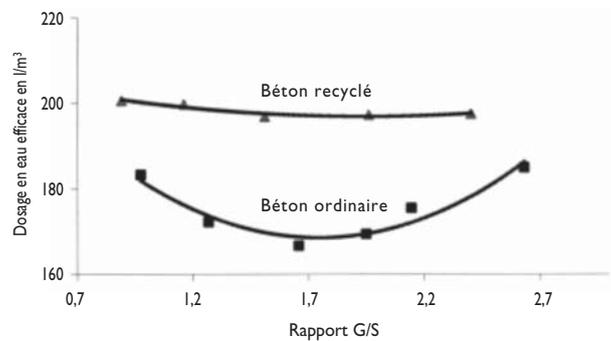
### Composition

**Tableau 2 : Valeurs moyennes optimales de dosage en eau et de la résistance à l'âge de 28 jours, pour une consistance plastique et les rapports G/S correspondants.**

	Dosage en eau minimum (l/m <sup>3</sup> )		Résistance maximale (MPa)	
	C = 200 kg/m <sup>3</sup>	C = 425 kg/m <sup>3</sup>	C = 200 kg/m <sup>3</sup>	C = 425 kg/m <sup>3</sup>
Béton ordinaire	176 pour G/S= 1.3	167 pour G/S= 1.7	17 pour G/S= 1.4	62 pour G/S= 1.5
Béton recyclé	203 pour G/S= 1.8	196 pour G/S= 1.5	17 pour G/S= 1.5	40 pour G/S= 1.8



**Figure 5 : Relation entre dosage en eau efficace et le rapport G/S pour un béton ordinaire et un béton à base de graviers recyclés pour un affaissement plastique et un dosage en ciment de 200 kg/m<sup>3</sup>.**

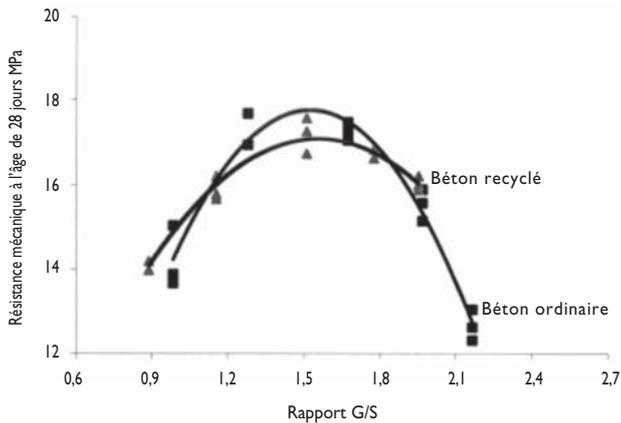


**Figure 6 : Relation entre dosage en eau efficace et le rapport G/S pour un béton ordinaire et un béton à base de graviers recyclés pour un affaissement plastique et un dosage en ciment de 425 kg/m<sup>3</sup>.**

Nous avons choisi différents rapports G/S, variant de 1.0 à 2.7, pour deux dosages en ciment de 200 kg/m<sup>3</sup> et de 425 kg/m<sup>3</sup>. Ces paramètres pour l'étude menée avec deux types de graviers : naturels concassés et recyclés issus de bétons de démolition. L'affaissement est fixé à 7±2 cm. Le volume d'air occlus pour tous les mélanges a été estimé à 20 l/m<sup>3</sup>.

### Résultats et discussion

L'ensemble des résultats présentés au tableau 2 correspondent à des bétons ayant une consistance plastique, à savoir un affaissement au cône d'Abrams de 7±2 cm, comme indiqué ci-dessus. Pour maintenir une consistance plastique, pour les bétons à base de graviers recyclés, la différence de dosage en eau par rapport à celui d'un béton ordinaire, varie de 15 à 45 l/m<sup>3</sup>, selon le dosage en ciment et le rapport G/S. Les figures 5 et 6 illustrent ces variations pour les deux dosages.



**Figure 7 : Relation entre la résistance à la compression à l'âge de 28 jours et le rapport G/S pour un béton ordinaire et un béton à base de graviers recyclés pour un affaissement plastique et un dosage en ciment de 200 kg/m<sup>3</sup>.**

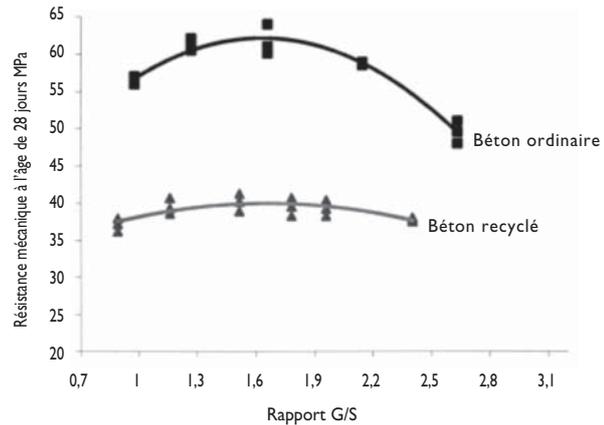
Pour un dosage en ciment de 200 kg/m<sup>3</sup>, la différence de dosage en eau, entre un béton à base de graviers recyclés et à base de graviers ordinaires, est de l'ordre de 25 à 45 l/m<sup>3</sup> selon le rapport G/S. Mais cette différence diminue pour atteindre 15 à 30 l/m<sup>3</sup> quand le dosage en ciment est de 425 kg/m<sup>3</sup>. Ceci veut dire que, dans l'ensemble, quand on augmente le dosage en ciment, le dosage en eau nécessaire pour maintenir une consistance plastique diminue, aussi bien dans le cas du béton ordinaire que dans le cas du béton à base de graviers recyclés.

Dans le cas d'un béton à base de graviers recyclés avec un dosage en ciment de 425 kg/m<sup>3</sup>, le dosage en eau pour le béton recyclé est peu dépendant du rapport G/S. La différence de dosage en eau entre un béton ordinaire et un béton à base de graviers recyclés est maximum pour un rapport G/S de 1.7.

On constate aussi que le béton à base de graviers recyclés, pour un affaissement donné, n'a pas une plus grande dépendance entre le dosage en eau et le rapport G/S. Une réduction de la résistance mécanique à l'âge de 28 jours, par rapport à un béton ordinaire, est observée. Cela peut s'expliquer par l'hétérogénéité des granulats recyclés. Enfin selon Kaplan [in Neville, 2000], l'enchevêtrement des gros granulats contribue à augmenter la résistance en compression.

Aussi bien pour un béton ordinaire que pour un béton à base de graviers recyclés, la variation de la résistance mécanique à l'âge de 28 jours, est d'autant plus sensible à la variation de dosage en eau que le dosage en ciment est élevé. Les figures 7 et 8 illustrent cette tendance. Plus le dosage en ciment est faible, plus la résistance mécanique en compression à l'âge de 28 jours d'un béton à base de graviers recyclés, se confond avec celle d'un béton ordinaire. Mais en même temps, la différence de dosage en eau est plus prononcée pour un affaissement plastique.

La composition du squelette granulaire n'intéresse pas uniquement la composition relative aux graviers et aux sables.



**Figure 8 : Relation entre la résistance à la compression à l'âge de 28 jours et le rapport G/S pour un béton ordinaire et un béton à base de graviers recyclés pour un affaissement plastique et un dosage en ciment de 425 kg/m<sup>3</sup>.**

Elle concerne les éléments solides, y compris le ciment. La composition et la mise en place d'un béton sont les facteurs déterminants de ses performances.

La masse volumique des granulats est aussi un paramètre physique à considérer. En effet la masse volumique du béton intervient dans le cas de structures hydrauliques pour des raisons de stabilité de ces structures. La masse volumique des graviers issus des bétons de démolition est à peu près égale à celle des bétons d'origine, à savoir de l'ordre de 2.3 à 2,5 t/m<sup>3</sup>. Dans ce travail nous avons étudié uniquement les bétons ayant un affaissement plastique et très plastique.

On constate que la résistance du béton chute très rapidement lors de l'apparition de ségrégations, au delà d'un certain rapport de G/S. Ce rapport est de 1.9 pour un béton dosé à 200 kg/m<sup>3</sup> mais il vaut 2.2 pour un béton dosé à 425 kg/m<sup>3</sup>. La ségrégation pour un affaissement plastique est due au manque de fines en quantité suffisante. Ainsi, on voit que dans la ségrégation intervient le rapport G/S mais le dosage en ciment également.

Pour une résistance donnée, quand on utilise une classe de ciment plus faible, on doit augmenter le dosage en ciment. Pour des bétons de faible résistance, avec un rapport E/C élevé, il est souhaitable d'avoir une quantité de sable et de ciment suffisante pour écarter d'éventuelles ségrégations. Pour les bétons, ceci nous amène à conseiller de faire le choix d'un ciment de faible classe, dans le cas des bétons de faible résistance, quitte à utiliser un plus fort dosage en ciment. Finalement, on peut dire qu'un plus grand dosage en ciment écarte au maximum la ségrégation.

Pour un béton de faible résistance, ce qui correspond à un rapport E/C fort, les bétons recyclés et ordinaires donnent la même résistance. Mais pour un rapport E/C faible, la différence varie de 10 à 25 %. Ceci a été également observé sur les mortiers. La chute de la résistance est de 25 % pour un dosage en ciment de 425 kg/m<sup>3</sup>; si on se réfère aux résultats précédemment obtenus, la chute était de 15 % pour un

rapport G/S de 1.7 et un dosage en ciment de 350 kg/m<sup>3</sup>. La chute de la résistance s'accélère avec l'augmentation du dosage en ciment. Ceci va dans le même sens que des résultats obtenus par Neville, [2000]. Il note que : « l'influence du type de gros granulats sur la résistance du béton est fonction du rapport E/C. Pour des rapports E/C inférieurs à 0.4, les résistances obtenues peuvent être majorées de près de 38 % lorsque des graviers concassés sont utilisés à la place de graviers roulés. Cette influence des granulats sur la résistance diminue avec l'augmentation du rapport E/C. Pour un rapport E/C de 0.65 on ne constate plus de différences entre les résistances à la compression obtenues sur des bétons fabriqués avec des granulats concassés ou roulés ».

Pour l'ensemble des essais expérimentaux, le béton témoin ou béton ordinaire, est à base de graviers ordinaires concassés. Les graviers recyclés sont également concassés.

En résumé, les performances des bétons sont dominées en premier lieu par le rapport E/C puis par le rapport G/S. L'ajout de sable permet un meilleur contrôle de la consistance du béton et d'éliminer les risques de ressuage et de ségrégation.

## CONCLUSIONS

La différence de résistance entre un béton à base de granulats ordinaires et un béton à base de granulats recyclés dépend :  
– du pourcentage de granulats recyclés : pour une résistance de 20 à 40 MPa dans le cas de recyclage de graviers ayant une masse volumique moyenne de l'ordre de 2,45 t/m<sup>3</sup> et un coefficient d'absorption d'eau de 6 %, la chute de  $F_c$  ne dépasse pas 25 %. Ainsi, on estime qu'un recyclage de graviers jusqu'à 20 % n'engendre pas de différence significative, et cela quelle que soit la consistance du béton. Pour un affaissement très plastique voire fluide, la chute de la résistance d'un béton à base de 50 % de graviers recyclés est négligeable, voir figure 4.

– de la qualité des granulats recyclés : les indices physiques les plus significatifs de la qualité des graviers recyclés destinés aux bétons sont la masse volumique des graviers recyclés ( $P_{gr}$ ) et leur coefficient d'absorption d'eau ( $Ab_{gr}$ ). En général la masse volumique des graviers recyclés est proche de celle des bétons d'origine, à savoir 2,4 t/m<sup>3</sup> pour un béton ordinaire. Quant au coefficient d'absorption d'eau des graviers recyclés  $Ab_{gr}$ , il dépend de l'état de fissuration des graviers qui provoque un excès d'eau dans le béton et cause

## Références bibliographiques consultées

- [ADD 94] Addis B.J., Alexander M.G., « Cement-saturation and its effects on the compressive strength and stiffness of concrete », *Cement and concrete research*, 1994, Volume 24, pp. 975-986.
- [ALE 95] Alexander M. G., Milne T. I., « Influence of cement blend and aggregate type on stress-strain behaviour and elastic modulus of concrete », *ACI materials journal*, 1995, pp. 227-235.
- [ARQ 95] Arquie G., Tourenq C., « Granulats, géologie ressource, législation, environnement, élaboration, matériels, essais, contrôle », Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 1995, pp.1-329.
- [BAR 99] Baron J. et Ollivier J.-P., « Les bétons, bases et données pour leur formulation ». Association technique de l'industrie des liants hydrauliques, École Française du Béton. Eyrolles. 1999, pp.187-410.
- [DEV 93] De Vries P., « Concrete recycled, crushed concrete as aggregate », *Concrete*, 1993, pp. 9-13.
- [DRE 98] Dreux G., Festa J., « Nouveau guide du béton et de ses constituants », Eyrolles, huitième édition, 1998, pp. 113-397.
- [DUP 95] Dupain R., Lanchon R., Saint-Arroman J.-C., « Granulats, sols, ciments et bétons », Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire, Edition Casteilla, 1995, pp. 1-234.
- [FAU 97] Fauconnier R., Salaun B., « Déchets de chantier de bâtiment », Les réponses aux questions que se posent entrepreneurs et artisans du bâtiment, Physique du bâtiment et environnement, 1997, pp. 51-58.
- [HAN 86] Hansen T. C., « Recycled aggregates and recycled aggregate concrete », second state-of-the-art report developments 1945-1985, Rilem technical committee - 37 - DRC, Demolition and recycling of concrete, 1986, pp. 201-246.
- [HEN 94] Hendriks F., « Certification system for aggregates produced from building waste and demolished buildings », *Environmental aspect of construction with materials*, Editeurs : J.J.J.M. Gourmans, H.A. van der Sloot and TH. G. Aalbers, 1194 Elsevier Science, 1994, pp. 821-834.
- [HEN 93] Henrichsen A., Hendriks C., « Properties of concrete with recycled aggregates », *Proceedings of international recycling congress*, 1993, pp. 28-36.
- [HUS 02] Hussain H., « Étude de la composition, du comportement mécanique et de l'endommagement d'un béton recyclé », Thèse de doctorat, Université de Caen, 2002, 255 p.
- [KLI 94] Klieger P., Lamond J. F., « Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials », STP 169C, ASTM publication code Number (PCN), 1994, pp. 1-445.
- [LAR 93] Larbi J. A., « Microstructure of the interfacial zone around aggregate particles in concrete », TNO Building and construction research department of building technology Rijswijk, Heron, vol.38, no.1, 1993, pp. 1-69.
- [MOR 93] Morel A., Gallias J.-L., Bauchard M., Mana F., Rousseau E., « Practical guidelines for the use recycled aggregates in concrete in France and Spain », *Proceedings of third International Rilem Symposium on demolition and reuse of concrete and masonry*. Odense, Denmark, 1993, pp. 71-81.
- [NEV 00] Neville A., « Propriétés des bétons », Centre de Recherche Interuniversitaire (CRIB), Edition Eyrolles, 2000, 806p.
- [NIX 77] Nixon P.J., « Recycled concrete as an aggregate for concrete - a review », *Rilem - 37 - DRC Committee, Demolition and re-use of concrete, Materials and structures*, 1977, pp. 371-378.
- [QUE 96] Quebaud M., « Caractérisation des granulats recyclés, étude de la composition et du comportement de bétons incluant ces granulats », Thèse de doctorat en génie civil, Université d'Artois, Pôle de Béthune, 1996, pp. 1-184.
- [TAV 96] Tavakoli M., Soroushian P., « Strength of recycled aggregate concrete made using field-demolished concrete as aggregate », *ACI materials journal*, Title no.93-M21, March-April 1996, pp. 182-190.

### DÉCHETS SCIENCES & TECHNIQUES, REVUE FRANCOPHONE D'ÉCOLOGIE INDUSTRIELLE

SAP - 7, chemin de Gordes - 38100 Grenoble - Tél. : 04 76 43 28 64 - Fax : 04 76 56 94 09 - Mél : [dst@pro-environnement.com](mailto:dst@pro-environnement.com)

Service abonnement : Joséphine Sambito/SAP (téléphoner du lundi au vendredi de 9 h à 12 h et de 13 h à 16 h).

N° de commission paritaire : 76929 - N° ISSN : 0753-3454. Dépôt légal : 365 juin 2003 - Imprimerie Louis Jean/Gap - Photocomposition SAP

Principaux associés : Groupe Reed Exposition France.