

VALORISATION DES AGRÉGATS ISSUS DE BÉTONS DE DÉMOLITION DANS LA FABRICATION DE NOUVEAUX BÉTONS

Hallshow Hussain* et **, Daniel Levacher**, Jean-Louis Quenec'h*, Abdelkrim Bennabi*, Fabien Bouvet*

*ESITC de Caen - ** Centre de géomorphologie, M2C-GRGC, UPRES A 6143 CNRS

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la valorisation des déchets de chantier. L'objectif principal est l'emploi de granulats issus des bétons de démolition dans la fabrication de nouveaux bétons. Les études bibliographiques convergent sur le fait que le recyclage de sable (taille < 5 mm) est plus problématique que le recyclage de graviers. En effet du point de vue environnemental la plupart des polluants qui sont de taille très fine se concentrent dans les sables. Par ailleurs les grains de sable ont une surface spécifique plus grande et absorbent plus d'eau; ceci pose des problèmes à différents stades de la fabrication et de la réalisation : affaissement, résistance à 28 jours et durabilité. Ainsi dans cette étude, nous avons décidé de mener des essais sur la résistance à l'âge de 28 jours de mortiers contenant des sables recyclés puis sur un certain nombre d'éprouvettes de béton avec du gravier recyclé uniquement à 100 %. Les granulats utilisés ici sont des déchets de laboratoire, autrement dit des matériaux relativement propres. Cela permet de caractériser l'évolution des performances des bétons à base de granulats recyclés « non pollués ». Les résultats sont encourageants, la chute de la résistance en recyclant le gravier uniquement ne dépasse pas 11 % pour une résistance caractéristique visée de 26 MPa.

INTRODUCTION

La rénovation et la reconstruction des ouvrages de génie civil produisent chaque année beaucoup de déchets. Un pays comme la France produit 20 à 25 millions de tonnes de déchets de démolition par an (Quebaud, 1996). Ainsi les exigences économiques, environnementales, politiques et l'épuisement des sources de matériaux de construction, encouragent de plus en plus le recyclage et les recherches sur les matériaux de substitution, même pour fabriquer des bétons de moindre qualité. D'une façon générale avec la diminution de la production des agrégats naturels, le recyclage des bétons, en tant qu'agrégats de substitution se développe. La première référence de qualité dans ce domaine date de la deuxième guerre mondiale (Nixon, 1977). Les deux points, à la fois, importants et interactifs dans ces études sont : la classification de ces matériaux déchets par

This study concerns the reuse and the valorization of raw waste materials. The main objective consists in the use of aggregates issued from the concrete for making a new manufactured one. In literature, many investigations have stated on the fact that the reuse of the sand (size < 5 mm) is more difficult than the reuse of gravels. Effectively most of pollutants are fine size particles thus they can be concentrated with the sand. Also the sands have a greater specific surface and so they need more water by absorption, what poses a problem at different levels of workability, for the resistance to 28 days and to the level of durability. In this study, we have decided to run tests on the resistance of mortars recycled to 100 % aged of 28 days and a number of tests have been performed on cylindrical concrete samples with only reused gravel to 100 %. Here the used aggregates are clean because waste are coming from samples tested in laboratory. That allows us to characterize the performances of concrete with reused aggregates without pollutants. Results are good, the fall of the resistance by recycling gravels does not exceed 11 % for a fixed characteristic resistance of 26 MPa.

rapport à leur qualité (qualification) puis les domaines d'application de leur valorisation. Les matériaux de recyclage appelés parfois matériaux secondaires sont nombreux ainsi il faut faire des classifications pour ces matériaux par rapport à leurs caractéristiques. En principe nous avons quant à l'application différents types de structure : ce sont les blocs en béton qu'on peut appeler structures médiocres et les ponts, structures hydrauliques... qui se classent dans les structures d'importance. Aujourd'hui dans l'analyse et dans la conception de ces structures, on s'occupe de plus en plus du choix du matériau de construction. Ainsi il n'est plus justifiable d'utiliser des matériaux de bonne qualité pour une structure médiocre, parce que le facteur de sécurité et le facteur d'économie n'ont pas la même importance pour les différents types de structures. En effet, les facteurs économiques (l'offre, la demande et la saturation de marché) puis

le concept de recyclage qui implique d'éviter l'épuisement des sources d'approvisionnement, donnent l'idée de revaloriser les matériaux recyclables dans les mêmes secteurs. Les différents facteurs que l'on vient de citer tendant à favoriser de plus en plus la valorisation des bétons de démolition dans la fabrication de nouveaux bétons sous forme d'agrégats de substitution. Toutefois les domaines où le béton de substitution peut être utilisé (Hendriks, 1994), sont : les constructions routières pour les couches de forme et de roulement, les nouveaux bétons et les structures hydrauliques composées de matériaux de remplissage.

LES GRANULATS RECYCLÉS

Les granulats recyclés sont enrobés par une gangue de ciment poreux et fissuré, ayant une plus grande capacité d'absorption d'eau par rapport aux granulats naturels. Les matières étrangères, plastiques, bois... et les polluants invisibles à l'œil nu, liés aux granulats, peuvent diminuer leur résistance, lors de leur intégration dans un nouveau béton. Ainsi le premier critère de valorisation de ces granulats est la teneur en polluants et autres matières. Ainsi les déchets issus des bâtiments peuvent être classifiés en trois catégories (Sindt et al., 1997) : la fraction réutilisable est composée d'éléments valorisables dans leur forme et fonction originelle (ex : poutres, cadres de fenêtre, etc.). La fraction recyclable est valorisable après un traitement ou une transformation (ex : les gravats minéraux, les métaux, etc.). La fraction non valorisable est souvent la partie exclue à cause de sa forte teneur en polluants. L'état de ces granulats est fonction de l'état à la démolition et l'endommagement subit pendant le concassage et le transport (Quebaud, 1996).

Zones de transition

Autour des agrégats, la pâte de ciment constitue une zone qu'on appelle la zone de transition (Reinhardt et al., 1991 ; Klieger et al., 1994), voir figure 1. L'absorption d'eau par les agrégats pendant l'hydratation influence en grande partie la zone de transition, provoquant une mauvaise distribution de l'eau dans le mélange. De plus la circulation de l'eau entre la pâte de ciment et les agrégats à différentes étapes de l'hy-

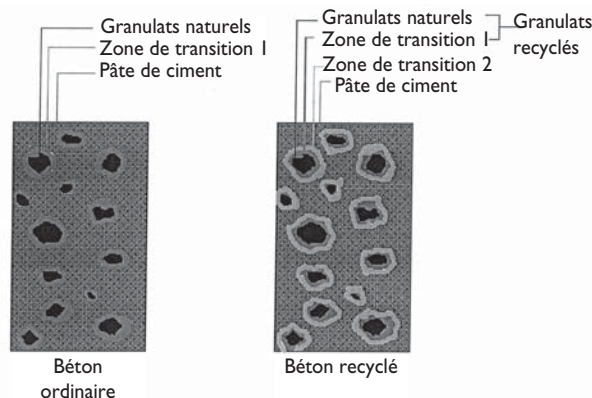


Figure 1 : Agrégats issus du béton de démolition dans un nouveau béton

dratation génère une sorte de malformation d'hydrates dans cette zone au niveau de la porosité, par manque d'eau et au niveau du retrait également. Il a été constaté que dans la zone de transition, où l'hydratation ne s'est pas correctement faite, les hydrates sont plus gros (Reinhardt et al., 1991 ; Klieger et al., 1994). On en conclut dans un premier temps que la présence des agrégats normaux dans le béton a deux effets contradictoires. D'une part ils font apparaître la zone de transition qui est plus faible (un passage facile pour les fissures), faisant diminuer la résistance f_c , et d'autre part ils obligent les fissures à les contourner ce qui prolonge les chemins de fissuration et gêne leur propagation faisant ainsi augmenter la résistance f_c . Les résultats expérimentaux dans la littérature permettent de dire que les résultats globaux de ces deux effets contradictoires pour un béton ordinaire, sont positifs jusqu'à une certaine limite.

Quant aux agrégats de substitution, voir figure 1, on peut dire qu'il existe deux zones de transition dans le béton de substitution. Les agrégats de substitution sont constitués d'agrégats d'origine et d'une gangue de ciment ou mortier qui l'entoure. Cette gangue de ciment se trouve en grande partie dans la zone de transition du béton d'origine, ce qui explique la grande porosité des agrégats de substitution. Ainsi quand on introduit ces agrégats de substitution dans une pâte de ciment pour fabriquer un béton de substitution ; cette gangue de ciment (ancienne zone de transition) affaiblit davantage la zone de transition dans le béton de substitution ; cette nouvelle zone de transition est plus faible que l'ancienne. La différence de faiblesse entre la zone de transition dans un béton ordinaire comparée à celle d'un béton de substitution est d'autant plus grande que la différence entre la porosité des agrégats normaux et les agrégats de substitution l'est.

RAPPORT E/C, f_c ET OUVRABILITÉ

Un des facteurs les plus importants dans le mélange du béton à base de granulats recyclés, est la quantité d'eau qu'il faut ajouter pour avoir le même affaissement qu'un béton ordinaire, ce qui en conséquence affaiblit sa résistance. Si on met beaucoup d'eau cela provoque une ségrégation, et dans le cas contraire nous avons un problème d'ouvrabilité. Nous savons aussi que ce problème est plus prononcé pour le sable recyclé que pour le gravier recyclé. Ainsi des essais ont été amenés sur 12 éprouvettes cylindriques de béton 11x22 cm, fabriquées selon la méthode de Dreux-Gorisse avec la formule de Féret (Dupain et al., 1995 ; Dreux et al., 1998), en substituant 50 % de graviers naturels par des granulats recyclés d'origines différentes. Nous avons reconstitué une granulométrie pour les graviers recyclés identique à celle des graviers naturels. Le ciment utilisé est un CPA 52.5. Puis sur 54 éprouvettes de mortier 4x4x16 mm [norme EN 196-1 in Afnor, 1990], on étudie l'influence du rapport E/C sur leur comportement, sachant que les granulats recyclés (graviers et sable) dans cette étude sont issus de déchets de laboratoire, donc propres. Le ciment utilisé pour les mortiers est un CPJ 32.5.

Les caractéristiques des composants

Les compositions des éprouvettes 4x4x16 mm sont les suivantes :

- Lot A : 18 éprouvettes de pâte de ciment seule (100 % pâte de ciment),
- Lot B : 18 éprouvettes de mortier naturel, 70 % de sable naturel et 30 % de pâte de ciment,
- Lot C : 18 éprouvettes de mortier recyclé, 70 % de sable recyclé et 30 % de pâte de ciment, et ce, en faisant varier le rapport E/C.

Toutes les éprouvettes ont été conservées pendant 24 heures dans un conteneur plastique fermé avant démoulage puis immergées dans l'eau jusqu'à l'âge de 28 jours, à une température de 20° ± 5 °C.

Tableau-1 : Caractéristiques physiques des granulats utilisés

Type de granulats	Masse volumique absolue (t/m ³)	Teneur en eau (%)	Coefficient d'absorption d'eau (%)
Sable naturel	2,96	1,35	2,10
Gravier naturel	2,88	0,28	0,30
Gravier recyclé d'origine BHP	2,61	3,10	4,47
Sable recyclé d'origine BO	2,57	4,16	14,90
Gravier recyclé d'origine BO	2,50	4,71	12,23

Le béton témoin est un béton ordinaire de résistance caractéristique 26 MPa à l'âge de 28 jours et ayant un affaissement de 7 cm.

GRANULOMÉTRIE

Les granulométries des granulats utilisés dans cette étude sont représentées dans les tableaux 2 et 3.

Tableau 2 : Granulométries des sables

Tamis (mm)	5	4	2,5	2	1	0,4	0,2	0,1	0,08	0
Tamisats de sable recyclé en %	0,998	0,901	0,698	0,608	0,347	0,146	0,058	0,027	0,021	0
Tamisats de sable naturel en %	0,996	0,973	0,900	0,816	0,783	0,528	0,070	0,020	0,010	0

Tableau 3 : Granulométrie des graviers

Tamis (mm)	20	16	12,5	10	8	6,3	5
Tamisat des graviers en %	1,00	0,99	0,82	0,80	0,45	0,12	0,40

ESSAIS MÉCANIQUES

Les essais mécaniques sur les éprouvettes de mortier 4x4x16 cm ont été effectués selon la norme [EN 196-1 in Afnor, 1990]. D'abord la traction par flexion trois points, puis la compression sur chacun des demi-prismes issus de la flexion. Il faut signaler que nous n'avons pas exclus les valeurs qui diffèrent de 10 % de la moyenne parce que le rapport E/C et les qualités des composants, en particulier le sable recyclé, contribuent à l'hétérogénéité du mortier. Ainsi la fluctuation de 10 % ou même plus, d'une valeur par rapport à la moyenne, dans le cas d'une étude comme celle-ci, peut

être liée au rapport E/C et aux qualités des composants de mortier que nous étudions. Nous n'avons pas voulu éliminer certains facteurs qui pourront être influents par la suite.

RÉSULTATS DES ESSAIS SUR MORTIERS ET DISCUSSION

– Dans le cas de bétons et de mortiers, lorsqu'on fait varier les caractéristiques d'un de ses composants, cela influence simultanément plusieurs caractéristiques du mélange, ce qui se traduit par un déplacement des courbes (figures 2 à 4). Ceci affecte la résistance, l'ouvrabilité, le rapport E/C et la forme de la courbe. Ainsi la valeur de la résistance optimale, *a priori*, ne peut pas être atteinte pour le même rapport E/C ni pour la même ouvrabilité. Autrement dit, il est difficile de comparer des points ayant le même rapport E/C, le même affaissement ou la même résistance. Il faut tracer des courbes et comparer des états « similaires », surtout pour

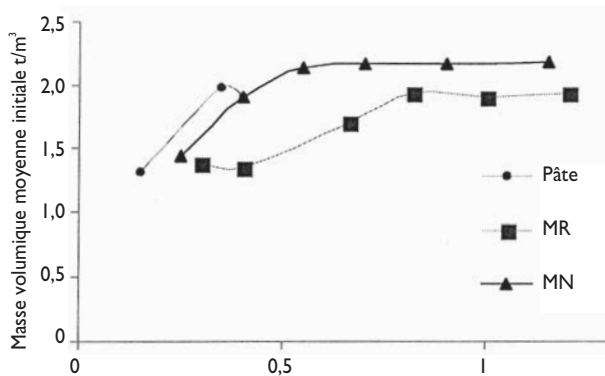


Figure 2 : Masse volumique moyenne initiale en fonction de rapport E/C

les valeurs optimales.

– Sur la figure 2 et 3, la masse volumique initiale et finale pour les différentes compositions varie

entre 1.5 et 2.2 t/m³. En comparant la masse volumique initiale à la valeur finale, pour chacune des courbes, on observe qu'avant le pic, la différence entre la masse volumique initiale et finale est proportionnelle au rapport E/C, mais au-delà du pic il n'y a plus de différence entre la masse volumique initiale et finale. Cela s'explique par le fait qu'avant le pic, le mortier manque d'eau ; il est capable de consommer ou de retenir de l'eau pendant la conservation pour le durcissement jusqu'à l'âge de 28 jours. Ainsi pendant la conservation des éprouvettes qui ont un rapport E/C faible (avant le pic), elles absorbent de l'eau, et cette absorption est d'autant plus grande que le sable utilisé est plus absorbant. Après le pic le mortier est « saturé ». La valeur maximale d'absorption d'eau varie selon les différentes courbes, les différentes quantités de pâte de ciment et les différents types de sable, comme indiqué dans le tableau 4.

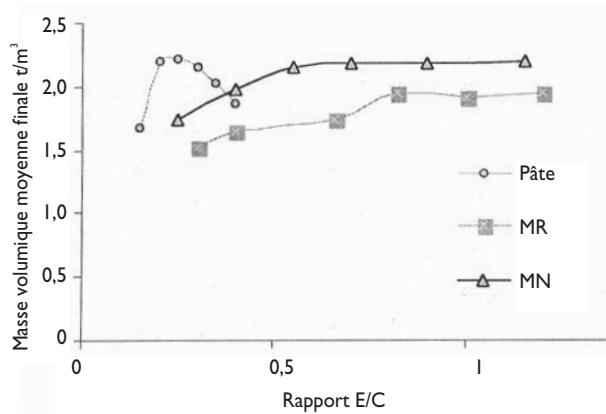


Figure 3 : Masse volumique moyenne finale en fonction de rapport E/C

Tableau 4 : Valeurs d'absorption maximale d'eau pendant la conservation de 28 jours	
Quantité max. d'absorption pendant la conservation kg/m ³	
Pâte	750
MN	250
MR	250

– La chute de la résistance, pour le mortier naturel par rapport au mortier recyclé, en traction par flexion, est de 25 %. La chute de la résistance, pour le mortier naturel par rapport au mortier recyclé, en compression est de 40 %. Ainsi la chute de résistance est plus importante en compression qu'en traction. Cela peut s'expliquer parce que les granulats ont un rôle plus important dans le cas d'une charge en compression que dans le cas de la traction. Le rapport entre la chute de la résistance en compression et en traction est de 1,6.

Les autres valeurs sont récapitulées dans le tableau 5.

Tableau 5 : Résistances optimales en traction et en compression pour les éprouvettes 4x4x16 cm			
	Résistance maximale en compression Rc, MPa	Résistance maximale en traction par flexion Rt, MPa	Rapport Rc/Rt
Pâte	77	15	0,20
MN	27	7	0,26
MR	16	5,2	0,32

– Sur les figures 4 et 5, en comparant la courbe « Pâte » avec les deux autres courbes, mortier recyclé « MR » et mortier naturel « MN », on voit que la pâte de ciment seule est plus résistante en traction et en compression même si elle est plus homogène, elle reste plus sensible vis-à-vis du changement de la quantité d'eau, à savoir du rapport E/C. Sur la figure 2 on note que les trois courbes ont à peu près les mêmes masses volumiques, cependant elles ont des résistances différentes. Cela veut dire que la résistance du mortier ne dépend pas de sa masse volumique. La masse volumique ne

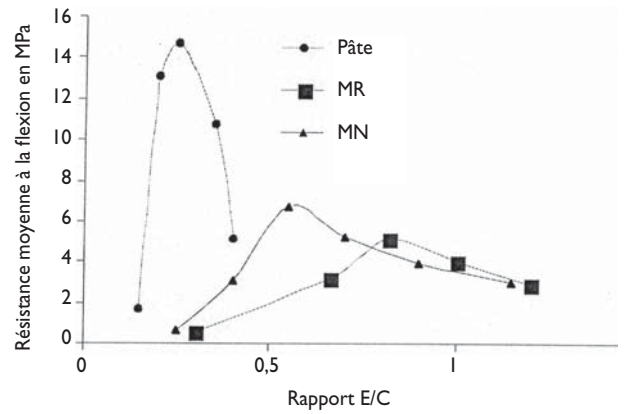


Figure 4 : Résistance moyenne en traction par flexion des éprouvettes 4x4x16 cm, à l'âge de 28 jours, en fonction du rapport E/C, conditions de conservation identiques

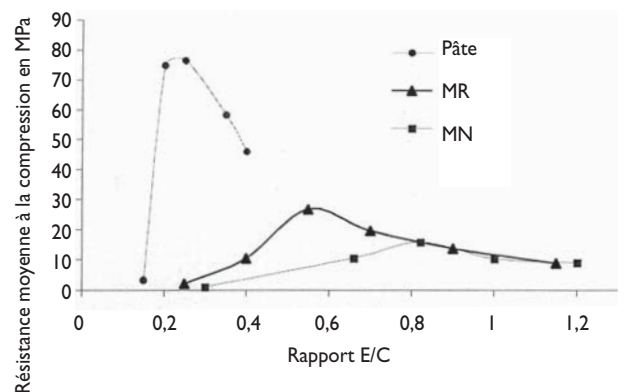


Figure 5 : Résistance moyenne de compression des éprouvettes 4x4x16 cm, à l'âge de 28 jours, en fonction du rapport E/C, condition de conservation identiques

caractérise pas le dosage en ciment. Bien que la pâte de ciment constitue seulement 30 % du volume du béton ou du mortier, le dosage en ciment et le rapport E/C restent les facteurs dominants de la résistance du béton. On remarque que les résistances les plus élevées des trois courbes correspondent aux pâtes. La masse volumique du béton n'a aucune signification en matière de dosage en ciment, ceci veut dire qu'un béton d'une masse volumique plus élevée n'a pas forcément la résistance la plus importante. Mais pour une composition donnée (ou une des trois courbes, à dosage en ciment fixe) la diminution de la porosité ou le remplacement des pores par de la matière solide, augmente la résistance.

– Dans le cadre des essais effectués sur les éprouvettes cylindriques de béton de taille 11x22 cm (voir tableau 1), pour la caractérisation physique des granulats, nous avons choisi la masse volumique et le coefficient d'absorption d'eau comme paramètres d'étude, tout en sachant que l'on a reconstitué la même granulométrie pour les graviers recyclés et le gravier naturel. La masse volumique des agrégats issus du béton ordinaire « BO » n'est pas très différente de

celle des granulats issus de bétons à hautes performances « BHP », mais son coefficient d'absorption est beaucoup plus élevé, ce qui explique la diminution de la résistance du béton contenant des granulats issus du béton ordinaire. Cela veut dire que le coefficient d'absorption d'eau est le facteur dominant de cette caractérisation. Le coefficient d'absorption d'eau est lié à la porosité et ceci explique l'importance de la « deuxième » zone de transition et ainsi la réduction des caractéristiques mécaniques lors de son emploi dans un nouveau béton. La masse volumique des granulats reste plutôt un facteur modal. Il existe un seuil fonction du rapport E granulats/E pâte et du coefficient d'absorption d'eau, au-dessous duquel le mode de rupture sera transgranulaire (béton léger, BHP...). Le type de rupture est lié à la résistance mécanique du béton. La rupture du béton est en général intergranulaire dans le cas du béton ordinaire. De plus dans la formulation de diverses méthodes de fabrication de bétons, le rapport entre « dosage en eau - dosage en ciment - affaissement » dépend d'un facteur modal appelé Dmax, taille maximale des granulats, pour caractériser la surface spécifique. Ainsi, les caractéristiques de la taille des granulats sont souvent des facteurs modaux dans les différents aspects du béton.

Si on relie les pics des trois courbes des figures 4 et 5 on obtient une autre courbe, qui est uniquement fonction des caractéristiques des granulats utilisés. Les différences entre ces trois courbes sont dues aux changements des caractéristiques des granulats. Plus le sable ou les granulats utilisés sont de mauvaise qualité, plus la courbe se déplace horizontalement vers la droite et demande plus d'eau, et verticalement vers le bas ce qui justifie la chute de la résistance mécanique en compression et en traction et la courbe s'aplatit (l'optimum est moins prononcé et la courbe est moins sensible vis-à-vis de la variation de rapport E/C).

– Nous savons que le sable recyclé est de moins bonne qualité que le sable naturel. Dans les figures 4 et 5, on constate une forme unique pour les trois courbes, à savoir une branche ascendante, qui correspond à un ajout d'eau et à un gain de résistance. Dans cette zone les pores sont nombreux à cause du problème d'ouvrabilité lié au manque d'eau. Puis nous avons une branche descendante (excès d'eau), dans cette zone il y a de plus en plus de problèmes de ségrégation. Les pores sont nombreux après l'évaporation de l'eau, mais cette fois-ci c'est à cause d'un excès d'eau.

– Sur les figures 4 et 5, on constate que les branches descendante du mortier recyclé et du mortier naturel se confondent, cela s'explique par le fait que dans cette partie le facteur dominant de la rupture n'est plus la qualité des granulats, mais c'est la ségrégation qui provoque des faiblesses et qui génère la rupture. Autrement dit la ségrégation contrôle la rupture ainsi il n'y a plus de différences entre un mortier à base de sable recyclé et un autre à base de sable naturel.

– L'augmentation du dosage en ciment permet de fabriquer

des bétons à base de granulats recyclés ayant une résistance égale à celle du béton ordinaire. Cela pourrait poser de plus en plus de problèmes en matière de durabilité. Nous savons que la pâte de ciment se dilate et se contracte en fonction de la quantité d'eau libre et en conséquence elle se fissure.

La diminution de la résistance dans le cas du recyclage du béton est due à l'apparition d'une zone de transition très poreuse et faible, passage facile pour les fissurations. Il vaut mieux utiliser des adjuvants pour atteindre la résistance pour un béton à base de granulats recyclés à celle d'un béton ordinaire. Par exemple la fumée de silice peut densifier la zone de transition et elle est jugée susceptible d'être plus efficace dans le cas du recyclage de bétons.

– En matière d'affaissement de béton à base de granulats comparé à un béton ordinaire ayant le même dosage en ciment, pour un même rapport (E/C = 0,67) l'affaissement de BR1 diminue de 36 % (de 7 cm à 4,5). De même pour un même affaissement de 7 cm, le rapport E/C de BR2 augmente de 16,4 % (de 0,67 à 0,78). Ce qui s'explique par la différence de coefficient d'absorption d'eau qui est de 0,28 pour le gravier naturel et de 14,9 pour le gravier recyclé BR. Les différences sont logiques mais les rapports ne sont pas linéaires ils varient fortement parce que les variables sont nombreuses. Ceci rend difficile toute déduction de loi à partir d'un nombre réduit d'éprouvettes. Il est plus représentatif de tracer des courbes et expliquer avant tout, le déplacement de ces courbes en fonction du changement de qualité des agrégats comme nous l'avons fait pour les mortiers.

– Pour le recyclage des BRH, et pour un même rapport

Tableau 6 : Dosage et affaissement des bétons fabriqués

Bétons	Ciment (kg/m ³)	E total (kg/m ³)	E/C	Affaissement (cm)	Sable naturel (%)	Gravier naturel (%)	Gravier recyclé d'origine BO (%)	Gravier recyclé d'origine BHP (%)
BO	308,5	207	0,67	7	100	100	0	0
BR1	308,5	207	0,67	4,5	100	50	50	0
BR2	308,5	241	0,78	7	100	50	50	0
BRH	308,5	207	0,67	7	100	50	0	50

E/C de 0,67, nous avons le même affaissement, cela est dû au fait que le coefficient d'absorption d'eau pour les granulats recyclés d'origine BHP est faible, voir tableau 1.

– Si l'on compare le sable recyclé et les graviers recyclés d'origine « béton ordinaire », le sable recyclé d'origine « béton ordinaire » a un coefficient d'absorption d'eau de 14,9, tableau 1, plus grand que celui des graviers d'origine « béton ordinaire » qui vaut 12,23. Cela pourrait être attribué avant tout à la surface spécifique (la surface spécifique du sable est supérieure à la surface spécifique des graviers).

– Si l'on compare les graviers recyclés d'origine « béton ordinaire » et ceux d'origine béton haute performance, on remarque que la différence entre leur masse volumique n'est pas très significative (respectivement de 2,50 et 2,61), mais la différence entre leur coefficient d'absorption d'eau

est très importante, respectivement de 12.23 et 4.47. Comme ils ont la même granulométrie, cela veut dire que l'absorption d'eau est fonction des qualités des bétons d'origine autres que la masse volumique.

– Dans le cas d'une étude sur un petit nombre d'éprouvettes, relative à la substitution des granulats, la meilleure approximation pour déterminer la chute de la résistance pourra se faire par une moyenne « physique » entre, la comparaison faite sur la base d'un même rapport E/C et d'un même affaissement. Par exemple dans le tableau 7, la chute de la résistance d'un béton recyclé qui a le même rapport E/C qu'un béton ordinaire (BR2) est de 8.8 %. Puis la chute de la résistance pour un béton qui a le même affaissement qu'un béton ordinaire (BR1) est de 11 %. Ainsi la chute de la résistance { la plus approximative dans le cas d'un petit nombre d'éprouvettes comme ici } est de $((8.8\% + 11\%) / 2) = 9.9\%$. Cette moyenne n'est pas très mathématique ni générale mais c'est propre au béton. Mais la comparaison entre les courbes reste la plus correcte et la plus fiable.

Tableau 7 : Résistance mécanique des bétons fabriqués

	Masse volumique (t/m ³)	Moyenne de fc à 28 jours (Mpa)	Ecart type de fc	Résistance caractéristique à 28 jours (MPa)	Chute de la résistance caractéristique à 28 jours (%)
BR1	2,345	29,880	0,960	26,0	11,0
BR2	2,366	30,716	0,820	26,7	8,8
BRH	2,365	31,495	0,163	27,4	6,5
BO	2,352	33,690	0,200	29,3	0,0

CONCLUSIONS

– Il est intéressant de voir qu'on peut fabriquer des bétons à base de graviers recyclés à 50 %, de résistance 26 MPa, sans aucun adjuvant. La chute de la résistance ne dépasse pas 11 % par rapport à un béton ordinaire. Mais les matériaux utilisés étaient des déchets de laboratoire, donc des matériaux très propres. La réduction de la résistance mécanique est due à la présence de polluants, et ces polluants s'ajoutent aux bétons lors de la démolition traditionnelle et du stockage arbitraire. Ainsi si nous voulons obtenir un béton à base de granulats recyclés, avec une bonne résistance et un minimum d'utilisation d'adjuvant, il faut mettre en place des règles pour la démolition et le stockage de béton de démolition. Cela rendra plus performants les bétons à base de ces granulats.

– On peut dire au vu de nos résultats, que l'impact de la qualité des granulats ne dépend pas seulement du rapport E/C, de la classe de ciment... mais dépend aussi du type de chargement. On constate ainsi une chute de la résistance en traction de 25 % et en compression de 40 %.

– Pour établir une comparaison, comme il y a plusieurs variables en jeu, les courbes se déplacent horizontalement et verticalement et s'aplatissent en même temps. Ainsi, on ne peut pas comparer une valeur absolue avec une autre

valeur absolue, mais il faut comparer d'abord les courbes puis les états optimaux.

– On divise souvent les granulats en deux parties, le sable (taille < 5 mm) et les graviers (taille > 5 mm). Il est clair que d'après les différents auteurs (Reinhardt et al., 1991 ; Klieger et al., 1994 ; Dreux et al. 1998) que le sable naturel a plus d'impact sur les qualités du béton que les graviers naturels. De même, le sable recyclé a plus d'impact sur les qualités du béton que les graviers recyclés. Mais dans la plupart des cas, lors du recyclage du béton, on est amené à employer du sable naturel avec les graviers recyclés, dans ce cas-là, il n'est pas sûr que le sable naturel ait plus d'impact sur les qualités du béton que les graviers recyclés. Si tel est le cas, beaucoup de formulation de fabrication du béton ordinaire doivent être revues pour ce dernier.

*** Hallshow Hussain, Jean-Louis Quenec'h, Abdelkrim Bennabi, Fabien Bouvet**
ESITC de Caen - 1, rue Pierre et Marie Curie - 14610 Epron

**** Hallshow Hussain, Daniel Levacher,**
Centre de géomorphologie, M2C-GRGC, UPRES A 6143 CNRS - 24, rue des Tilleuls - 14000 Caen

Bibliographie

- Afnor (1990), *Béton et constituants du béton : bétons et adjuvants*, Recueil de normes françaises, édité par l'afnor, tome 1 et 2, 3e édition.
- Dreux G. et Festa J. (1998), *Nouveau guide du béton et de ses constituants*, éditeur Eyrolles, huitième édition.
- Dupain R., Lanchon R., Saint-Arroman J.-C. (1995), *Granulats, sols, ciments et bétons*, Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire, Edition Casteilla.
- Hendriks Ch. F. (1994), *Certification system for aggregates produced from building waste and demolished buildings*, Environmental Aspect of Construction with Materials, Éditeurs : J.J.J.M. Gourmans, H.A. van der Sloot and T.H. G. Aalbers, 1194 Elsevier Science, pp. 821-834.
- Klieger P. and Lamond J. F. (1994), *Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials*, STP 169C., ASTM.
- Larbi J. A. (1993), *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, pp. 1-69.
- Nixon P.J. (1977), *Recycled concrete as an aggregate for concrete- a review*, RILEM - 37 - DRC Committee, demolition and re-use of concrete, Materials and structures, pp. 371-378.
- Québaud M. (1996), *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, pp. 207-214.
- Reinhardt H.W. and Naaman A.E (1991), *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*, E & FN SPON, pp. 4-38.
- Sindt V., Ruch M., Schulmann F. and Rentz O. (1997), *Analyse des facteurs qui conditionnent la teneur en polluants des matériaux recyclés issus des déchets de démolition*, TSM numéro 9 — 92^{ème} année, pp. 91-99.

Notations

- BO : béton ordinaire ou béton témoin
- BR : béton à base de gravier recyclé d'origine de béton ordinaire
- BR1 : même rapport E/C total que BO
- BR2 : même affaissement que BO
- BRH : béton à base de gravier recyclé d'origine BHP
- Fc : résistance du béton en compression à l'âge de 28 jours
- E/C : rapport eau/ciment
- MR : mortier recyclé
- MN : mortier naturel
- Pâte : pâte de ciment
- Rt : résistance en traction à l'âge de 28 jours
- Rc : résistance en compression à l'âge de 28 jours