Influence des granulats recyclés sur le comportement à haute température des bétons à hautes performances

Susanna ROMAGNOSI[1*], Prosper PLIYA[1], Anne-Lise BEAUCOUR[1], Albert NOUMOWE[1]

[1] *Laboratoire de Mécanique et Materiaux de Génie Civil, Université de Cergy-Pontoise, 5 Mail Gay Lussac, Neuville sur Oise F-95031 Cergy-Pontoise, France*

**Corresponding author: susanna.romagnosi@u-cergy.fr*

RÉSUMÉ. *Le comportement du béton à haute température peut présenter différents phénomènes, par exemple l'écaillage, et une baisse importante de performances mécaniques. Les bétons de granulats recyclés (RAC) se différentiant des bétons classiques par leur porosité plus élevée et leurs multiples interfaces, il est nécessaire d'étudier leur comportement à haute température. L'influence des granulats recyclés sur l'évolution des propriétés mécaniques résiduelles (après chauffage) est analysée dans la première partie de cette étude. Ensuite, elle est portée sur la résistance à l'écaillage de cinq formulations de bétons à hautes performances : 0R-0R, 0-15R, 0-30R, 30R-30R et 30R-0R. Dans la nomenclature des bétons, le premier nombre représente le pourcentage massique de substitution par le sable recyclé ; le deuxième représente le pourcentage massique de substitution par les graviers recyclés. Les résultats confirment que l'élément clé est la teneur en eau des bétons et que la présence simultanée de 30% de sable et de 30% de graviers recyclés pourrait avoir une influence favorable sur la résistance à l'écaillage.*

ABSTRACT. *Concrete behaviour at high temperature can present several phenomena such as spalling and a dramatic loss of mechanical properties. Recycled aggregates concretes (RAC) being different from natural aggregate concrete in many ways (higher porosity, interfacial transition zones,) it is essential to study their behavior at high temperature. Firstly, this work analyses the influence of recycled aggregates on the evolution of RAC mechanical residual properties after heating. Finally, the spalling behaviour was investigated on five high strength concretes: 0R-0R, 0-15R, 0-30R, 30R-30R and 30R-0R. In the concretes nomenclature, the first number represents the replacement percentage by weight of recycled sand; the second number represents the replacement percentage of recycled coarse aggregate. The results confirm that one of the key parameter is the concrete moisture content and otherwise show a favorable influence of the simultaneous presence of 30% of fine and coarse recycled aggregate on the spalling behaviour of concrete.*

MOTS-CLÉS : *Haute températures, Granulats Recyclés, Ecaillage, Comportement thermo-mécanique, Teneur en eau.*

KEY WORDS: *High temperature, Recycled aggregates, Spalling, Thermo-mechanical behaviour, Moisture content.*

1. Introduction

Soumis à haute température le béton peut présenter un écaillage et une baisse importante des propriétés mécaniques dus aux transformations physico-chimiques, à l'incompatibilité de déformation entre la pâte cimentaire et les granulats, à l'augmentation de la pression de vapeur et au gradient thermique. Puisque les granulats occupent entre 60 et 80 % du volume total du béton, ils jouent un rôle très important dans les transferts de masse et de chaleur. Beaucoup d'études ont été effectuées sur les propriétés des bétons de granulats recyclés à température ambiante, mais celles sur le comportement à haute température sont très peu nombreuses. Plusieurs auteurs ont étudié les propriétés mécaniques résiduelles des RAC avec différents taux de substitution en les soumettant à différents cycles de chauffage-refroidissement jusqu'à la température de 800°C [XIA 14 ; ZEG 09 ; SAR 13 ; VIE 11 ; KOU 11]. Ces études ont montré qu'il y a une faible réduction des propriétés mécaniques résiduelles, voire parfois quelques améliorations Toutefois, Laneyrie et al. [LAN 16] ont conclu que la présence de contaminants dans les granulats recyclés peut réduire la résistance mécanique résiduelle des RAC soumis à haute température.

Cette recherche porte sur l'analyse de l'influence des granulats recyclés (sable et graviers) sur différents aspects : tout d'abord sur l'évolution des propriétés mécaniques avec l'augmentation de température et sur l'analyse de la propagation des fissures. A cet effet, des bétons à hautes performances ont été fabriqués avec différents taux de substitution de graviers (15 et 30%) et de sable (30%) recyclés, puis ont été exposés à trois cycles de chauffage-refroidissement : 300°C, 450°C et 600°C. Enfin, des chauffages à 10°C/min ont été conduits pour analyser l'effet des différentes conditions de conservation (teneurs en eau) des bétons et des différents pourcentages de sable et/ou gravier recyclé(s) sur la résistance à l'écaillage.

2. Programme expérimental

2.1. Formulations des bétons

Pour cette recherche, cinq formulations de béton ont été préparées en utilisant du ciment CEM I 52,5, des granulats naturels de nature calcaire (GN) de fractions granulaires 4/10 et 6.3/20 et un sable naturel silico-calcaire (SN) de fraction granulaire 0/4. Les bétons de granulats recyclés (RAC) contiennent une proportion de granulats recyclés issus de démolition de bâtiments (béton ordinaire recyclé). Ces granulats fournis par le projet national « RECYBETON » sont de trois différentes fractions granulométriques : 0/4 (SR), 4/10 et 10/20 (GR). Les graviers recyclés 4/10 et 10/20 (GR) sont de nature silico-calcaire avec une majorité de silex. Puisque les granulats recyclés ont un coefficient d'absorption en eau élevé (Tableau 1) ils sont sursaturés avant la préparation des bétons, l'eau excédentaire étant prise en compte dans le calcul de l'eau effective. Tous les bétons ont un même rapport Eau/Ciment (égal à 0,4) et une même quantité de ciment (475 kg/m^3). Toutes les formulations ont été préparées en adaptant la quantité du superplastifiant afin d'atteindre la classe de consistance S4 (avec un affaissement de 16 à 20 cm).

Tableau 1. *Propriétés des matériaux.*

	SN 0/4	SR 0/4	GN 4/10	GN 6.3/20	GR 4/10	GR 10/20
Coefficient d'absorption en eau [%]	1	8.9	0.51	0.4	5.60	5.80
Densité	2.68	2.08	2.71	2.71	2.29	2.26

Dans les cinq formulations de béton, on trouve un béton de référence avec seulement des granulats naturels. Les quatre autres formulations ont été faites en remplaçant les granulats naturels à différents pourcentages par des granulats recyclés. Dans la nomenclature C xR-yR, "x" représente le pourcentage massique de sable recyclé et "y" représente le pourcentage de graviers recyclés.

2.2. Préparation des bétons

Pour chaque formulation de béton, des éprouvettes cylindriques de différentes dimensions ont été préparées (Φ 150x300 mm et Φ 110x220 mm). Après fabrication, ces éprouvettes ont été conservées dans leurs moules pendant 7 jours, puis démoulées et enroulées dans des chiffons humides, ensuite enfermées dans des sacs en plastique et enfin conservées à la température de 20 ± 2°C jusqu'à la date d'utilisation (28 et 90 jours). Certaines éprouvettes ont été sorties des chiffons humides après 90 jours puis séchées à la température ambiante dans le laboratoire pendant presque 11 mois jusqu'au test de l'écaillage. Les éprouvettes Φ 150x300 mm ont été coupées en tranches de différentes épaisseurs juste avant les tests de caractérisation (à 90 jours) : les tranches de 100 mm sont utilisées pour la mesure du module dynamique et l'analyse statistique de fissures ; quatre quartiers de 40 mm d'épaisseur sont utilisés pour la mesure de la porosité à l'eau.

3. Tests

3.1. Test de stabilité thermique

Pour le test de résistance à l'écaillage, un four électrique de dimensions 1300 x 1010 x 1040 mm muni d'une ventilation pour rendre homogène la température à l'intérieur a été utilisé. Le cycle de chauffage-refroidissement programmé intègre trois phases : une montée en température à une vitesse de 10°C/min jusqu'à 600°C, un palier de 2h, et enfin une phase de refroidissement jusqu'à la température ambiante (20°C) à une vitesse de 1°C/min.

3.2. Test de caractérisation mécanique résiduelle

Pour ces essais, le même four électrique est utilisé. Les vitesses de chauffage et refroidissement sont plutôt de 1°C/min pour les éprouvettes Φ 110x220 mm conformément aux recommandations du comité technique RILEM TC 129. Les températures de palier sont de 300, 450 et 600°C avec un palier de 2h. Après chaque cycle de chauffage-refroidissement, les propriétés résiduelles suivantes sont mesurées : la perte de masse a été mesurée comme différence entre la masse avant et après chauffage, la résistance à la compression f_c (conformément à la NF EN 12390-3), le module dynamique E_d (NF EN 12504-4) et la porosité à l'eau P (NF

P18-459). Pour les mesures de module dynamique et de porosité à l'eau des éprouvettes non chauffées, les échantillons ont été séchés dans une étude à 80°C jusqu'à masse constante.

4. Résultats

4.1. Propriétés résiduelles

Les propriétés résiduelles mesurées après chauffage sur des éprouvettes conservées en condition humide jusqu'à 90 jours sont présentées sur la Figure 1.

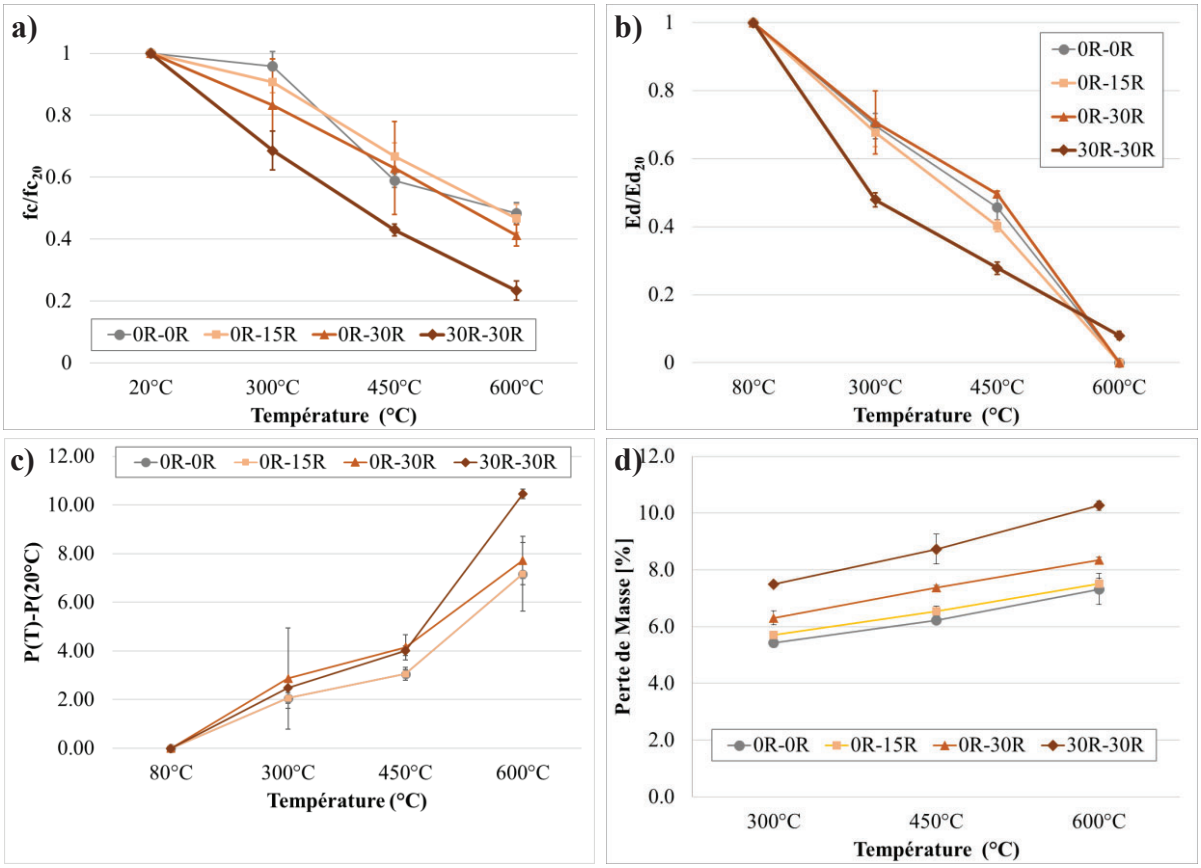

Figure 1. *Propriétés résiduelles relatives après chauffage : (a) résistance à la compression, (b) module dynamique, (c) porosité à l'eau et (d) perte de masse après chauffage.*

Une baisse plus linéaire des propriétés mécaniques des bétons avec granulats recyclés est observée par rapport à celle des bétons ordinaires dont la résistance est maintenue jusqu'à 300°C (Figure 1 a et b). La substitution de 30% de graviers recyclés (C0R-30R) n'implique que peu de modification tandis que la substitution de 30% de sable recyclé (C30R-0R) entraîne une baisse supplémentaire de résistance de 5 à 10 % par rapport au C0R-30R. On note par ailleurs une forte augmentation de la porosité à l'eau notamment entre 450°C et 600°C, plus sensible pour les bétons recyclés. Ces derniers présentent aussi une plus forte perte de masse à 300°C liée à une teneur en eau libre plus importante et à la quantité de pâte cimentaire supplémentaire présente dans les granulats recyclés. (Figure 1 c et d). Les propriétés des bétons à la température ambiante sont données dans le Tableau 2.

Tableau 2. *Propriétés des bétons à 20°C.*

	C 0R-0R	C 0R-15R	C 0R-30R	C 30R-30R	C 30R-0R
fc [MPa]	53.5 ±6.0	51.2 ±0.9	47.6 ±5.12	61.4 ±0.8	63.2 ±2.3
Ed [GPa]	51.7 ±1.9	49.4 ±0.8	48.5 ±3.5	77.2 ±3.5	53.9 ±0.9
Porosité à l'eau [%]	10.6 ±1.1	12.0 ±0.4	12.9 ±0.2	13.5 ±0.2	13.0 ±0.5

4.2. Comportement à l'écaillage

Les tests de stabilité thermique ont été effectués afin de mieux comprendre l'influence de la teneur en eau (différentes conditions de conservation) sur le comportement à haute température des RAC. Le Tableau 3 présente les teneurs en eau moyennes des éprouvettes et le nombre d'éprouvettes présentant un écaillage explosif par rapport au nombre total d'éprouvettes. Les éprouvettes avec le sable recyclé ont été testées après 11 mois, au lieu de 3 mois pour les bétons C0R-0R, C0R-15R, C0R-30R ce qui explique leur plus faible teneur en eau. On remarque que globalement les éprouvettes conservées en cure humide montrent une forte sensibilité à l'éclatement, à l'exception des C30R-30R.

Tableau 3. *Synthèse des essais d'écaillage : teneur en eau (w%) et part d'éprouvettes ayant éclaté (Exp.).*

	C0R-0R		*C 0R-15R*		*C 0R-30R*		*C 30R-30R*		*C 30R-0R*	
	(w%)	*Exp.*	*(w%)*	*Exp.*	*(w%)*	*Exp.*	*(w%)*	*Exp.*	*(w%)*	*Exp.*
secs	4.5	0/3	4.8	0/3	4.8	0/3	5.1	0/3	4.0	0/3
humides	6.3	3/3	6.8	1/2	6.9	3/3	5.4	1/3	5.4	3/3

Les éprouvettes séchées ne montrent aucun éclatement. Quelques écaillages ont été observés en surface au droit de gros granulats présents près de la surface pour les bétons contenant 30% de gravillons recyclés (C0R-30R et C30R-30R).

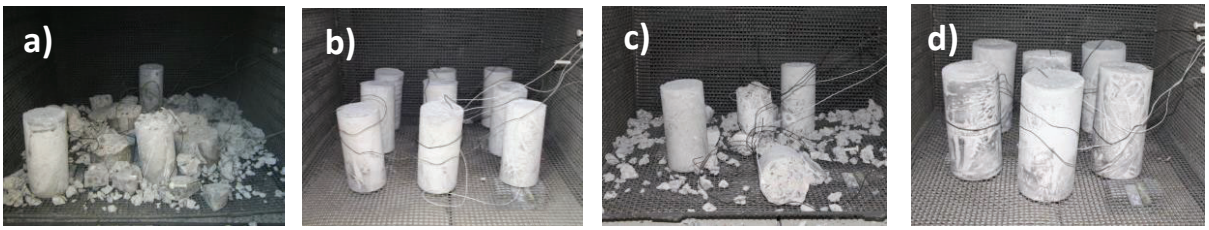

Figure 2. *Essai de stabilité sur éprouvettes C0R-0R, C 0R-15R et C 0R-30R à l'état humide (a) et après séchage (b), C 30R-30R et C 30R-0R à l'état humide (a) et après séchage (b).*

5. Conclusions

Les principaux résultats de cette étude peuvent être résumés ci-dessous :

- La substitution de 30% de gravier naturel par du gravier recyclé induit une faible baisse supplémentaire de résistance résiduelle par rapport au béton de granulat naturel. Le même pourcentage de sable recyclé a un effet plus défavorable sur les propriétés mécaniques et physiques résiduelles.
- Les résultats des tests d'écaillage sont très fortement liés à la teneur en eau et sont semblables pour des bétons avec ou sans granulats recyclés. Le meilleur comportement du béton C30R-30R sera à confirmer par des essais supplémentaires et une étude des propriétés de transfert.

6. Bibliographie

[KOU 11] S. C. Kou, C. S. Poon, et M. Etxeberria, « Residue strength, water absorption and pore size distributions of recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperatures », *Cem. Concr. Compos.,* vol. 53, 2014, p. 73‑ 82.

[LAN 16] C. Laneyrie, A.L. Beaucour, M. F. Green, R. Hébert, B. Ledesert, et A. Noumowé, « Influence of recycled coarse aggregates on normal and high-performance concrete subjected to elevated temperatures », *Constr. Build. Mater.,* vol. 111, 2016, p. 368‑ 378.

[SAR 13] S. R. Sarhat et E. G. Sherwood, « Residual Mechanical Response of Recycled Aggregate Concrete after Exposure to Elevated Temperatures », J. Mater. Civ. Eng., vol. 25, no 11, 2013, p. 1721‑ 1730.

[VIE 11] J. P. B. Vieira, J. R. Correia, et J. de Brito, « Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled concrete coarse aggregates », *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, nº 5, 2011, p. 533‑ 541.

[XIA 14] J. Xiao, Y. Fan, et M. M. Tawana, « Residual compressive and flexural strength of a recycled aggregate concrete following elevated temperatures », *Struct. Concr.*, vol. 14, nº 2, 2014, p. 168‑ 175.

[ZEG 09] C. J. Zega et A. A. Di Maio, « Recycled concrete made with different natural coarse aggregates exposed to high temperature », *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, nº 5, p. 2047‑ 2052, mai 2009.