
Effet des granulats recyclés sur le retrait endogène des mortiers au très jeune âge

Assia Djerbi Tegguer, Tien Dung Nguyen

Département Matériaux. Groupe Microstructure, Durabilité et Modélisation
IFSTTAR, 58 Bd Lefebvre, F-75732 Paris Cedex 15, France
E-Mail: assia.tegguer@ifsttar.fr

RÉSUMÉ. L'effet des inclusions granulaires sur les propriétés rhéologiques, les déformations au très jeune âge et les résistances mécaniques de mortiers a été étudié. Au cours de ce travail de recherche, un ciment de type CEM I et deux rapports eau/ciment ($E/C = 0,35$ et $0,45$) ont été utilisés. L'effet des granulats sur le retrait endogène a été quantifié en faisant varier le rapport massique granulat/ciment ($G/C=1$ et 2), et le type de granulat (sable naturel (SN) et des fines recyclées (FR)). Le retrait endogène a été évalué en utilisant le dispositif BT JADE permettant de mesurer le retrait linéique vertical des matrices cimentaires. Dans cette étude, le temps de prise des mortiers est mesuré par des essais de prise de Vicat, on considère que le temps zéro correspond au point de divergence entre le retrait chimique et le retrait endogène. Les résultats obtenus montrent que la substitution du sable naturel par des fines recyclées engendre une diminution du retrait endogène des mortiers dans le cas $G/C=1$, et une augmentation dans le cas $G/C=2$.

ABSTRACT. This study aims to quantify the effects of A/C ratio and aggregate properties on the properties of the mortars (workability, autogenous shrinkage, compressive strength) prepared with natural river sand (NS) and fine recycled aggregate (FRA). Two water-to-cement ratios ($W/C=0.35$ and 0.45), two aggregate-to-cement (A/C) ratios ($A/C = 1$ and 2), and two types of aggregates (i.e, natural crushed aggregate (NCA) and fine recycled concrete aggregate (FRCA)) were used in the experiments. Portland cement type CEM I was used in the mortar mixtures. The autogenous shrinkage test of mortars and concretes can be measured by a linear method designed at IFSTTAR. Since autogenous shrinkage is expected t_0 initiate only after setting has occurred, it is justified to take the time t_0 as a reference from which autogenous shrinkage will be determined from the length change curves. The results show that the use of fine recycled aggregates at saturated state in the mortar mixes can reduce the autogenous shrinkage in the case $A/C=1$, and an increase in the case of $A/C=2$.

MOTS-CLÉS: Retrait endogène, jeune âge, cure interne, granulats recyclés, mortiers.

KEYWORDS: Autogenous shrinkage, early age, internal curing, recycled aggregates, mortars.

1. Introduction

Les granulats recyclés affectent les propriétés du béton frais. D'après (Poon *et al.*, 2004) ce phénomène est attribué à la forme angulaire, la rugosité et à l'absorption d'eau élevée des granulats recyclés. L'effet de la substitution de la fraction granulaire recyclée par des granulats naturels, sur le retrait de séchage a été étudié par (Hasaba *et al.*, 1981). Les résultats obtenus montrent que le retrait de séchage de béton à base de gros granulats recyclés présente une augmentation de 50 % par rapport à un béton conventionnel. Alors qu'une augmentation de 70 % est observée dans le cas d'utilisation de gros granulats et des fines recyclées. L'utilisation des fines recyclées issues de démolition dans le béton est souvent limitée. L'objectif de cet article est d'étudier l'effet des fines recyclées sur l'affaissement, le retrait endogène et la résistance en compression des mortiers. L'effet de la concentration granulaire G/C et le rapport E/C a été mis en évidence durant ce travail de recherche.

2. Matériaux

Le type de ciment utilisé dans la formulation des mortiers est le ciment Portland CEM I 52.5 N, la finesse du ciment est de $3347 \text{ cm}^2/\text{g}$, sa composition de Bogue est 69,4% de C_3S , 4,34 % de C_2S , 2,45 % de C_3A et 13,6% de C_4AF . L'ensemble des essais est réalisé à une température constante de $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$. Dans cette étude deux types de granulats sont utilisés. Un sable naturel de seine (SN) et des fines recyclées (FR). Ces fines recyclées sont obtenues par broyage d'un béton de démolition. La granulométrie des granulats étudiés est inférieure à 5 mm. La courbe granulométrique et les propriétés physiques des granulats sont reportées dans la figure 1 et dans le tableau 1.

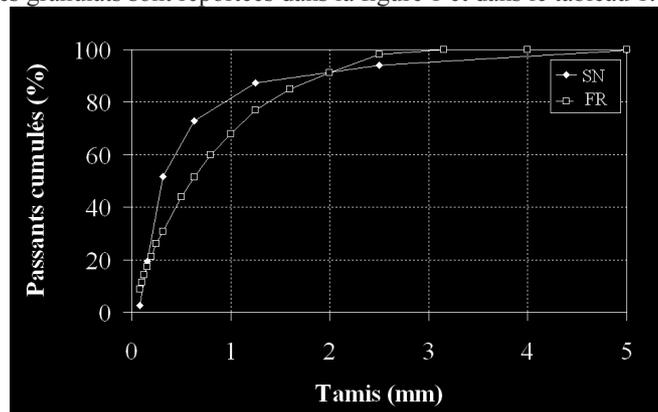


Figure 1. Granulométrie des granulats utilisés

Effet des granulats recyclés sur le retrait endogène des mortiers au très jeune âge

Granulats	Masse volumique (kg/m ³)	Compacité			Coefficient d'absorption (%)	
		< 0,315 (mm)	0,315-1,25 (mm)	>1,25 (mm)	24 h	72 h
SN	2504	0,684	0,686	0,634	0,23	0,23
FR	2235	0,491	0,553	0,532	7,15	9,67

Tableau 1. Propriétés physiques des granulats

La durée de détermination du coefficient d'absorption d'eau des granulats naturels préconisée par la norme NF EN 1097-6 est de 24h. Le coefficient d'absorption des fines recyclées (FR) est supérieur à celui du sable naturel, la saturation totale est obtenue après 72h d'immersion.

3. Formulation des mortiers

Le retrait endogène et la résistance mécanique ont été évalués sur huit formules de mortiers. Les formules ont été choisies afin d'étudier le maximum de paramètres de composition tels que le rapport eau-ciment (E/C), le rapport granulat-ciment (G/C) et le type de granulat (tableau 2). Les mortiers sont préparés selon la norme EN 196- et les granulats sont incorporés à l'état saturé (tableau 1). A l'issue du malaxage, l'affaissement des mortiers a été évalué en utilisant le cône d'Abrams. La structuration des mortiers au cours du temps est déterminée à l'aide d'un prisomètre automatique. A l'état durci, l'évolution de la résistance mécanique en compression des mortiers a été évaluée sur des éprouvettes prismatiques 4 × 4 × 16 cm³ pour différents âges : 1,7 et 28 jours.

Nomenclature	Composition des mortiers		
	E/C	Type de granulats	G/C
035SN1	0,35	Seine	1
035SN2	0,35	Seine	2
045SN1	0,45	Seine	1
045SN2	0,45	Seine	2
035FR1	0,35	Fines recyclées	1
035FR2	0,35	Fines recyclées	2
045FR1	0,45	Fines recyclées	1
045FR2	0,45	Fines recyclées	2

Tableau 2. Formulations des mortiers

4. Retrait endogène

La déformation endogène des mortiers au très jeune âge est mesurée par le dispositif BT JADE. Il s'agit d'un dispositif de mesure de la déformation linéique verticale. La mesure est effectuée à l'aide d'un bâti (Boulay, 2007), type portique (Baron, 1977), équipé d'un moule souple en PVC (Boulay et al., 1993 ; Jensen et al., 1995), immergé dans une cuve à température contrôlée. Un capteur de déplacement au sommet du portique mesure les variations de hauteur de l'éprouvette tandis qu'un thermocouple, noyé au centre, mesure ses variations de température. Du fait de ses dimensions, ce bâti est conçu pour des éprouvettes de béton (figure 2). Un dispositif développé par l'IFSTTAR, en complément du bâti et de la cuve, comprend un bain thermostaté, un boîtier de conditionnement et un microordinateur. Les mesures de déplacement débutent avant la prise du béton. Les déformations endogènes ne sont comptées qu'à partir de la prise du béton (t_0), en accord avec la définition donnée par (JCI, 1998 ; Bentur, 2003). Les déformations avant prise sont très dépendantes des conditions de frottement du dispositif quel qu'il soit comme cela a déjà été souligné par (Baron, 1977). De plus, les déformations avant prise sont plutôt volumiques et sont très mal estimées par des mesures linéiques. Une expérience de (Radocea, 1997) illustre bien ce propos. Il montre que la déformation d'un prisme horizontal est quasiment nulle avant prise alors que, selon ses termes, « le retrait chimique se transforme intégralement en déplacement vertical » c'est-à-dire le niveau du béton dans le prisme. Il est admis que t_0 marque l'instant à partir duquel des contraintes de traction, par retrait empêché, peuvent apparaître, du fait d'un durcissement rapide du matériau.

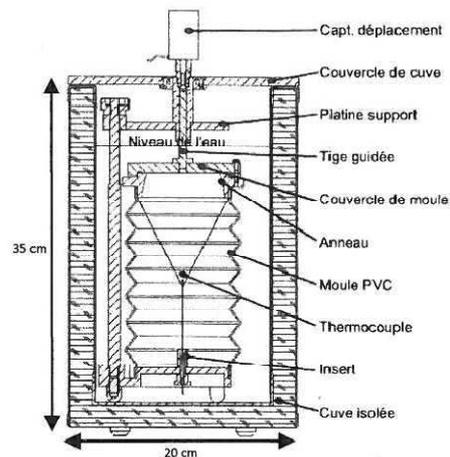


Figure 2. Bâti de mesure du retrait endogène au jeune âge pour bétons.

L'essai courant est réalisé à température constante (20°C), sans échange hydrique avec l'extérieur (un couvercle équipé d'un joint torique obture la partie supérieure du moule) et à la pression atmosphérique (une valve fixée au couvercle permet l'équilibrage des pressions dès que la pression interne est inférieure de plus de 0,05 bar). Pour des besoins particuliers, la température imposée peut suivre une historique quelconque. Ce dispositif mesure le déplacement de la tête de l'éprouvette à tout instant mais la mesure effectuée doit être initialisée depuis t_0 , instant qui doit être déterminé par le prisomètre. Cette mesure est réalisée parallèlement à l'essai du retrait endogène. Les données enregistrées (déplacement et températures) permettent le calcul de la déformation de l'éprouvette après correction des fluctuations thermiques. La relation suivante est utilisée :

$$L_0 (\alpha_0 \Delta \theta_0 + \varepsilon_e) = C_{\theta_{ec}} \Delta \theta_{ec} + C_{\theta_{amb}} \Delta \theta_{amb} - \Delta I_m \quad (2)$$

Dans l'équation 2, le terme de gauche est, à la longueur de base près, la somme de la déformation endogène et de la déformation thermique de l'éprouvette. Le terme de droite est la somme du déplacement mesuré et des corrections thermiques du bâti.

Plus précisément, les notations sont les suivantes : L_0 (Longueur de base de l'éprouvette), α_0 (Coefficient de dilatation thermique de l'éprouvette ou CDT), $\Delta \theta_0$ (Variations de température de l'éprouvette), ε_e (Déformation endogène depuis t_0), $C_{\theta_{ec}}$ (Sensibilité de la mesure du déplacement aux variations de température de cuve), $\Delta \theta_{ec}$ (Variations de température de l'eau de la cuve), $C_{\theta_{amb}}$ (Sensibilité de la mesure du déplacement aux variations de la température ambiante), $\Delta \theta_{amb}$ (Variations de la température ambiante), ΔI_m (Déplacement mesuré). Les corrections thermiques ne sont utiles que si des variations de température affectent les mesures. Lors d'un essai courant, la température de cuve est quasiment constante et la correction n'est pas nécessaire. Dans une salle à température contrôlée, la deuxième correction n'est pas nécessaire non plus. Il ne reste alors que la déformation thermique de l'éprouvette qui est estimée en supposant le CDT de l'éprouvette constant à partir de la prise (Laplante, 1994). Ce CDT est estimé à l'aide de cycles de température en fin d'essai.

5. Résultats et discussions

5.1. Affaissement des mortiers

L'effet de la formulation des mortiers sur l'affaissement est présenté à la figure 3. On constate que l'augmentation de la concentration granulaire engendre une diminution de l'affaissement des mortiers. Pour les mortiers de rapport E/C=0,45 l'augmentation de la concentration granulaire provoque une réduction d'affaissement de 55% pour le mortier de sable de seine (SN) et de 67% pour le mortier de fines recyclées (FR) (figure 3.b). Ce phénomène est plus significatif pour E/C=0,35, qui présente une réduction d'affaissement est de 92% pour le mortier (SN) et de 93 % pour le mortier (FR) (figure

3.a). Ce résultat peut être expliqué par le fait que la diminution de la quantité d'eau engendre une réduction de la distance entre les grains et par la suite une augmentation du frottement entre ces grains. L'affaissement du mortier de fines recyclées (FR) est inférieur à celui du mortier de sable de Seine (SN). Cette différence est plus significative pour le rapport $G/C=2$. Ce phénomène peut être expliqué par la compacité du sable de Seine qui est plus grande que celle des fines recyclées (Tableau 1). La compacité dépend de la forme et l'état de surface des granulats. Les fines recyclées présentent une forme anguleuse et une rugosité non négligeable générée par le broyage d'un béton de démolition. Ceci entraîne une augmentation du frottement entre les grains en remplaçant le sable de Seine par les fines recyclées.

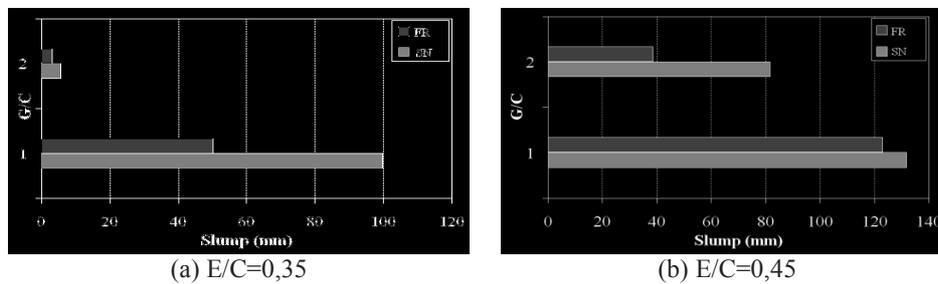


Figure 3. Effets des granulats recyclés sur l'affaissement des mortiers

5.2. Déformations endogènes

La variation de la déformation endogène des mortiers de sable de seine (SN) est présentée dans la figure 4. Les courbes obtenues présentent la même allure, un gonflement obtenu après la prise des mortiers suivi par un retrait. Le gonflement est plus marqué pour les mortiers de rapport $E/C=0,45$ (Figure 4.b). Cette phase de gonflement isotherme est généralement expliquée par trois phénomènes (Garcia-Boivin, 1999): Le premier est la croissance de produits d'hydratation cristallins ($Ca(OH)_2$, AFm et Aft) qui engendre une pression sur les parois des pores. En effet, les cristaux de portlandite augmentent avec le rapport E/C pour un degré d'hydratation donné. Le second est la formation des C-S-H internes qui occupent un volume plus important que le solide anhydre qu'ils remplacent. Ce phénomène est accentué pour des mortiers dont le rapport E/C est élevé (Figure 4.b). Le troisième est la réabsorption dans la porosité capillaire de la couche d'eau de ressuage, qui se forme au sommet de l'échantillon avant la prise. Cette eau de ressuage va converger vers la porosité capillaire et donc continuer l'hydratation en formant d'autres hydrates. L'évolution de la température évaluée au cœur des éprouvettes est un indicateur d'hydratation. Durant la phase du gonflement l'accélération du dégagement de chaleur des mortiers se produit (Figure 4 et Figure 5). Ce gonflement s'interrompt lorsque le matériau devient suffisamment résistant pour

Effet des granulats recyclés sur le retrait endogène des mortiers au très jeune âge

reprendre la pression occasionnée par les hydrates. On constate que l'augmentation de la concentration granulaire provoque une diminution du retrait endogène. Dans le cas du rapport E/C=0,35 (Figure 4.a), le retrait endogène du mortier de concentration granulaire S/C =2 évalué après 48h d'hydratation présente une diminution d'environ 40% par rapport au mortier de concentration granulaire S/C=1. Dans le cas du rapport E/C=0,45 la diminution est de l'ordre de 40% obtenue après 113h d'hydratation. Le retrait est relatif à la fraction de pâte de ciment présente dans le mortier. En effet, les inclusions granulaires sont peu déformables à cause de leur rigidité, beaucoup plus élevées que celles de la pâte de ciment. Les contraintes résiduelles emmagasinées dans la pâte limitent la déformation quand on augmente la fraction volumique des granulats.

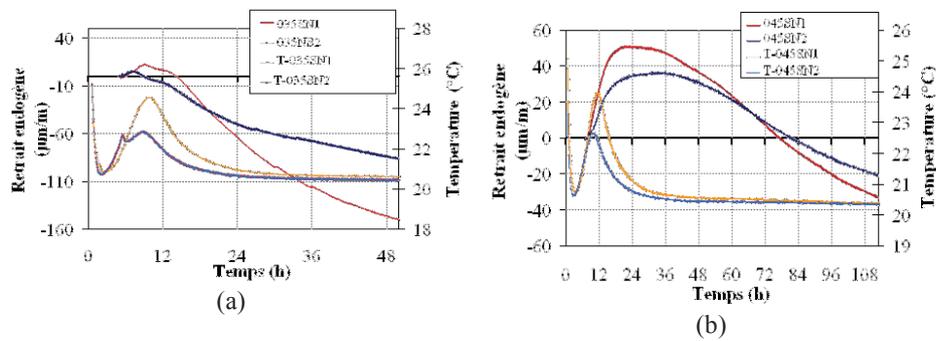


Figure 4. Retrait endogène des mortiers de sable naturel

La figure 5 présente la variation de la déformation endogène des mortiers de fines recyclées (FR).

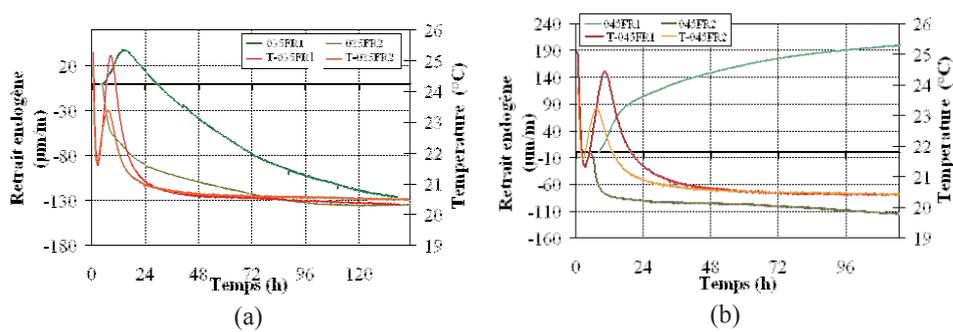


Figure 5. Retrait endogène des mortiers de fines recyclées

On constate que la phase de gonflement est obtenue uniquement pour une concentration granulaire $G/C=1$, pour les mortiers de rapport E/C 0,35 et 0,45 (Figure 5.a et 5.b). Le gonflement est plus important pour le rapport $E/C=0,45$. Ce résultat peut être expliqué par la consommation d'eau des granulats par le ciment ce qui engendre par la suite la formation d'autres hydrates qui occupent un volume plus important que le solide anhydre. Pour une concentration granulaire $G/C=2$, la déformation endogène des mortiers de fines recyclées (FR) présente un retrait important durant les premières heures (72h pour $E/C=0,35$ et 24h pour $E/C=0,45$). Ce résultat peut être expliqué probablement par le fait que les fines recyclées, contenant une fraction de ciment partiellement hydraté, développent un retrait qui s'ajoute au retrait endogène de la matrice cimentaire. Ce retrait supplémentaire augmente avec l'accroissement du rapport G/C .

La comparaison entre le comportement des mortiers de sable naturel (NS) et des fines (FR) recyclés vis-à-vis le retrait endogène est présentée dans la figure 6. Pour une concentration granulaire $G/C=1$ (figure 6.a), le retrait endogène du mortier de fines recyclées présente un gonflement plus important par rapport au mortier de sable naturel (NS). Cette divergence est due probablement au taux de saturation des fines recyclées qui est plus élevé par rapport au sable de seine (Tableau 1) ce qui engendre par la suite une augmentation supplémentaire de volume des hydrates. L'effet est moins marqué pour le rapport $E/C=0,35$.

Dans le cas d'une concentration granulaire $G/C=2$ (figure 6.b), le comportement du retrait endogène des mortiers formulés avec des fines recyclées est différent du comportement des mortiers de concentration granulaire $G/C=1$ (figure 6.a). On constate que le gonflement est absent pour les mortiers de fines recyclées avec un retrait supérieur à celui évalué sur des mortiers de sable naturel. Ce résultat peut être expliqué probablement par le fait que les fines recyclées développent un retrait supplémentaire, ce dernier est plus important pour une concentration granulaire $G/C=2$.

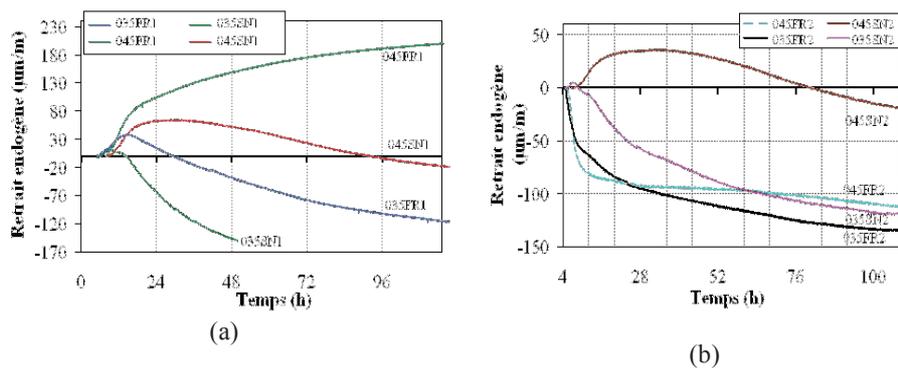


Figure 6. Effet du type de granulat sur la déformation endogène des mortiers

5.3 Résistance de compression

La résistance de compression des mortiers est présentée dans la figure 7. La substitution totale de fines recyclées par le sable naturel engendre une diminution de la résistance de compression. Cette dernière présente une augmentation d'environ 30% entre 7j à 28j pour les mortiers de fines recyclées, alors qu'une augmentation de 60% est observée pour les mortiers de sable naturel. Ce résultat est dû probablement à l'effet de la zone de transition qui présente des propriétés moins bonnes pour les fines recyclées.

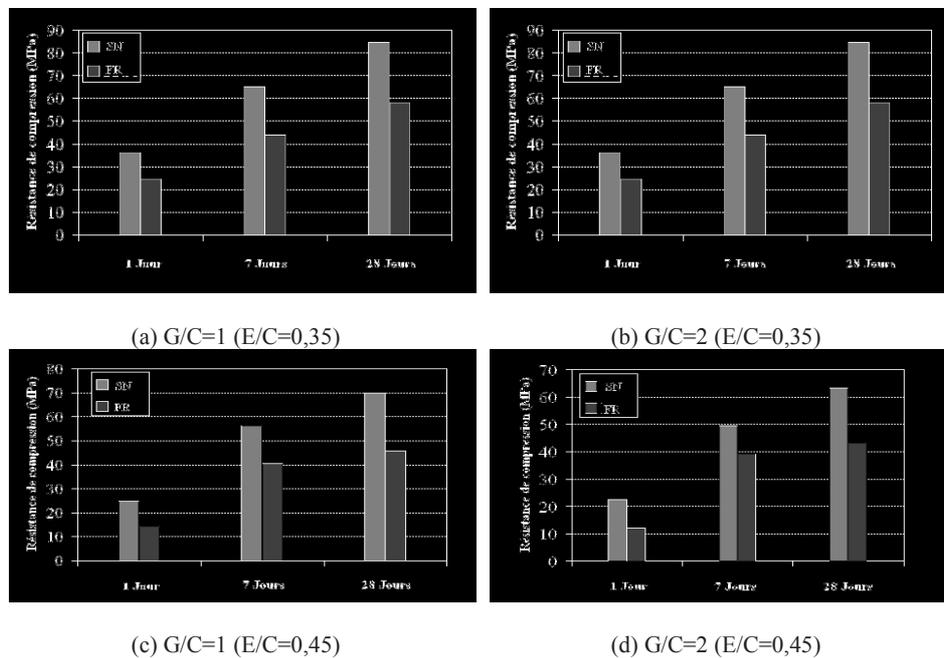


Figure 7. Résistance de compression des mortiers pour différents âges

6. Conclusion

Les résultats présentés montrent que l'affaissement des mortiers de sable naturel (SN) est supérieur à celui des mortiers de fines recyclées. Cela est dû à l'effet de la compacité qui est plus élevée pour le sable de seine. La substitution totale du sable naturel par des fines recyclées saturées génère une réduction du retrait endogène des mortiers pour une concentration granulaire (G/C=1). Cette réduction peut être expliquée

par l'absorption d'eau plus élevée des fines recyclées, ce qui engendre par la suite une prolongation de la cure interne des mortiers de fines recyclés. Cependant pour une concentration granulaire ($G/C=2$), le retrait endogène est plus élevé pour les mortiers de fines recyclées. Ce résultat peut être expliqué probablement par le fait que les fines recyclées développent un retrait supplémentaire.

La résistance de compression des mortiers de fines recyclées et l'accroissement de cette dernière obtenue pour différents âges 1, 7 et 28j sont inférieurs aux résultats obtenus sur des mortiers de sable naturel.

7. Bibliographie

Baron J., Mise au point d'un essai simplifié de second retrait, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 89, juin 1977, p. 39-44.

Bentur A., Terminology and definitions, in Early age cracking in cementitious systems, A. Bentur editor, RILEM Report n° 25, 2003, p. 13-15.

Boulay C., « Développement d'un dispositif de mesure du retrait endogène d'un béton au jeune âge », *Actes des 8èmes Journées Scientifiques du RF2B, Montréal*, 5-6 juillet 2007, p. 48-57.

Boulay C., Patiens C., « Mesure des déformations du béton au jeune âge », *Materials and Structures*, vol. 26, 1993, p. 307-311.

Garcia-Boivin S., Retrait au jeune âge des bétons : Développement d'une méthode expérimentale et contribution à l'analyse physique du retrait endogène, Thèse de Doctorat - Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1999.

Hasaba S., Kawamura M., Kazuyuki T., Kunio T., « Drying shrinkage and durability of concrete made from recycled concrete aggregates », *Trans Jap Concr Inst*, vol. 3, 1981, p. 55-60

JCI Committee on Autogenous Shrinkage of Concrete, Committee report on autogenous shrinkage of concrete, in: E.Tazawa (Ed.), Japan Concrete Institute, Proc. Of the Int. Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete, Hiroshima, Japan, 1998, p. 1-67.

Jensen O. M., Hansen P. F., « A dilatometer for measuring autogenous deformation in hardening Portland cement paste », *Materials and Structures*, vol. 28, 1995, p. 406-409.

Laplante P., Boulay C., « Evolution du coefficient de dilatation thermique du béton en fonction de sa maturité aux tout premiers âges », *Materials and structures*, vol. 27, 1994, p. 596-605.

Poon CS., Shui ZH., Lam L., Kou SC., « Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of hardened concrete », *Cement and Concrete Research*, vol. 34, n°1, 2004, p. 31-36.

Radocea A., « Autogenous volume change of concrete at very early age, model and experimental data », Proc. of an Int. Research Seminar in Lund, Report TVBM 3075, 1997, p. 56-71.