Etude expérimentale du fluage des bétons de granulats recyclés

Pablo PEÑA TORRES [1], George WARDEH[2], Elhem GHORBEL[3]

Université de Cergy-Pontoise, L2MGC, 5 Mail Gay Lussac-Neuville sur Oise-95031 Cergy Pontoise Cedex

[1] *pablo.pe?a-torres@etu.u-cergy.fr*

[2] *george.wardeh@u-cergy.fr*

[3] *elhem.ghorbel@u-cergy.f*

RÉSUMÉ. *La présente étude s'intéresse au comportement à long terme dans le cas de 6 bétons de granulats recyclés correspondant à 2 classes de résistance C25/30 et C35/45 et élaborés à partir de 2 formulations de référence en substituant partiellement ou complètement les granulats naturels par des granulats recyclés. Afin de mener cette étude, des éprouvettes prismatiques 10x10x90 cm ont été sollicitées en flexion 3 points à un niveau de chargement de 30% de la résistance ultime à l'échéance de 90 jours après le coulage. Les bétons ont été également caractérisés en termes de résistance à la compression, de résistance à la traction par fendage et de module d'élasticité dynamique.*

Les résultats expérimentaux montrent que, pour la même classe de résistance à la compression, la cinétique du fluage est influencée par la présence des granulats recyclés et elle est d'autant plus accélérée que le taux de remplacement est important. A un taux de substitution identique, le fluage de la série C25/30 est plus important que celui de la série C35/45. A partir des résultats de cette étude en parallèle aux résultats retrouvés dans les références bibliographiques, le coefficient de fluage a été déterminé et les valeurs ont été comparées aux valeurs prédites par les normes EC2 et CEB-FIB. Il apparaît que les modèles analytiques surestiment les valeurs expérimentales.

ABSTRACT. *The present study aims to characterize the creep behavior of six recycled aggregate concretes corresponding to two classes of compressive strength C25/30 and C35/45 and designed from two mixtures of reference by substituting partially or completely natural aggregates with recycled ones. In order to carry out this study, 10x10x90 cm prismatic specimens were subjected to 3 points bending test at the age of 90 days at a loading level representing 30% of the ultimate strength. Concretes were also characterized in terms of compressive strength, splitting tensile strength and dynamic modulus of elasticity. The experimental results show that, for the same class of compressive strength, the kinetics of creep is influenced by the presence of recycled aggregates and it is as accelerated as the replacement ratio is important. At an identical substitution ratio, the creep of the series C25/30 is higher than that of the C35/45 series.*

Based on the obtained results in parallel to the results found in the literature, the creep coefficient was determined and the values were compared with those predicted by the EC2 and the CEB-FIB standards. It was found that analytical models overestimate experimental values.

MOTS-CLÉS : *Béton, Granulats recyclés, Propriétés mécaniques, Fluage, EC2.*

KEY WORDS: *Concrete, Recycled aggregates, Mechanical properties, Creep, EC2.*

1. Introduction

L'utilisation des granulats issus de la déconstruction des structures de génie civil est un enjeu essentiel du développement durable et apparait comme la solution d'avenir pour préserver les ressources naturelles et limiter les zones de stockage. Néanmoins, les granulats recyclés possèdent des propriétés différentes de celles des granulats naturels à cause de la présence du mortier et de la pâte de ciment résiduels qui restent attachés aux grains naturels après le processus de production. Les caractéristiques des granulats recyclés influent directement sur la performance du béton à court et à long terme et les explications les plus communes sont associées à la présence du mortier attaché, à la porosité plus élevée aussi bien qu'au module d'élasticité plus faible des bétons à base des granulats recyclés.

Le fluage d'un élément en béton, soumis à un chargement mécanique maintenu constant dans le temps, se traduit par l'augmentation progressive de la déformation quelle que soit la nature des granulats. Le fluage est

dit de dessiccation lorsque les échanges hydriques avec l'ambiance sont permis alors qu'il est dit propre ou endogène si la surface du matériau est isolée de l'environnement. Les propriétés de fluage sont influencées par plusieurs facteurs tels que l'âge du béton au moment de la mise en charge et l'intensité du chargement, la température et l'état hydrique ainsi que par les paramètres de formulation du béton.

Les travaux de recherche relatifs au comportement en fluage du béton des granulats recyclés sont encore très limités. Néanmoins, le consensus général est que le fluage du béton des granulats recyclés est supérieur à celui du béton formulé avec des granulats naturels. Le fluage d'un béton formulé avec 100% des gravillons recyclés peut provoquer une augmentation de l'ordre de 60% par rapport au béton naturel. Cette augmentation est due essentiellement à la présence du mortier attaché et le phénomène s'amplifie si les fines recyclées sont employées [FAT11, DOM09]. D'après Domingo-Cabo et al. [DOM09], les déformations de fluage augmentent avec le taux de substitution des gravillons naturels par les recyclés même si le dosage en ciment et le rapport E/C sont conservés constants. Fathifazl et ses collègues [FAT11] montrent qu'avec un dosage en mortier (attaché et nouveau) égal à celui du béton des granulats naturels, les déformations du fluage sont similaires. Par contre, en utilisant les méthodes classiques de formulation qui consistent à remplacer les gravillons naturels par des recyclés, les déformations du fluage augmentent.

Les résultats disponibles dans les références bibliographiques proviennent essentiellement des essais de fluage en compression sous chargement relativement faible par rapport à la résistance à la compression mais sous chargement plus complexe, tel que la traction ou la flexion, très peu d'études sont réalisées. De plus, l'effet de l'utilisation du sable recyclé n'a pas encore été abordé. L'objectif principal du présent travail est de quantifier expérimentalement et numériquement le comportement à long terme des bétons de granulats recyclés en compression et en flexion. Un intérêt est également porté sur la validité des expressions analytiques proposées par les normes EC2 et CEB pour la modélisation du fluage des bétons recyclés.

2. Matériaux et programme expérimental

Les bétons développés dans le cadre des projets nationaux PN RECYBETON et ANR ECOREB ont été choisis pour ce travail. Il s'agit de huit formulations appartenant à deux classes de résistance à la compression C25/30 et C35/45. Pour les deux séries, les granulats naturels sont substitués par des granulats recyclés à trois taux massiques : 30%, 50% et 100%. La désignation de chaque formulation correspond à la nomenclature C25/30-xR-yR ou C35/45-xR-yR où xR correspond au taux de substitution en sable recyclé tandis que yR correspond au taux de substitution en graviers recyclés. Les différentes formulations sont données dans le travail d'Omry et al. [OMA17]. La particularité de ces formulations est que le dosage en ciment augmente lorsque le taux de substitution augmente afin d'atteindre la résistance cible à la compression. Des cylindres 11x22 cm ont été préparés afin de caractériser les propriétés mécaniques et le module d'élasticité dynamique. Par ailleurs, des éprouvettes prismatiques 10x10x90 cm ont été confectionnées pour les essais de fluage en flexion 3 points. Les éprouvettes ont été démoulées après 24 h, conservées dans un bassin d'eau à température ambiante pendant 28 jours puis testées. Les essais de compression ont été réalisés à l'aide d'une presse INSTRON de capacité de 3500 kN à asservissement hydraulique à une vitesse de chargement de 0.5 MPa/s. Les essais de résistance à la traction par fendage ont été effectués, à l'aide de la même presse, à une vitesse de chargement égale à 0.05 MPa/s. Les essais de fluage ont été effectués sur deux bancs de flexion placés dans une salle régulée en température à 20 °C (±2 °C) et en humidité relative à 50 % (± 5%). Chaque banc est composé d'un portique sur lequel sont montés deux appuis ponctuels dont un simple, d'un support de charge et d'un comparateur digital. La charge est appliquée au moyen de masses calibrées empilées sur le plateau de chargement et la flèche est mesurée au milieu de la poutre à l'aide du comparateur.

3. Résultats expérimentaux

3. 1 Propriétés mécaniques

L'ensemble des résultats résumés dans le tableau 1 montre que pour la même classe de résistance à la compression, l'introduction des granulats recyclés entraîne une diminution de la résistance à la traction. L'affaiblissement est de 15% pour la série C35/45 alors qu'il est de 18% pour la série C25/30 lorsque le squelette granulaire est complètement recyclé. De plus, l'incorporation des granulats recyclés n'a pas un effet sur la résistance à la traction de la série C35/45 lorsque le taux de remplacement est supérieur à 30%. Nous constatons également que les modules diminuent en augmentant le taux de substitution en granulats recyclés. La réduction du module est attribuée au module d'élasticité plus faible des granulats recyclés ainsi qu'à la

porosité élevée des bétons incorporant des granulats recyclés. Le paramètre Γ, appelé taux de substitution massique, représente la masse des granulats recyclés par rapport à la masse totale des granulats naturels et recyclés dans la formulation. Il est égal à 1,0 lorsque le sable et les gravillons sont complètement recyclés.

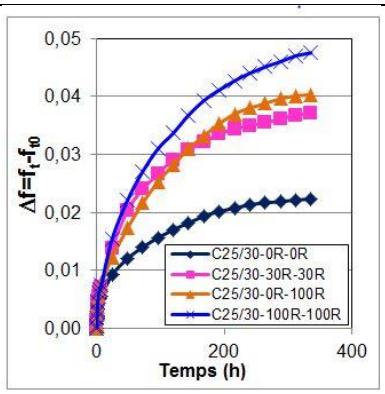
Tableau 1. *Propriétés mécaniques des bétons à 28 jours.*

Formulations	Γ	Résistance à la compression f_{cm} (MPa)	Traction par fendage f_{ctm} (MPa)	Module d'élasticité dynamique E_d (GPa)
C25-0R-0R	0,0	$33{,}8^{\pm 1{,}4}$	$3{,}4^{\pm 0{,}24}$	$39{,}9^{\pm 0{,}7}$
C25-0R-100R	0,3	$33{,}5^{\pm 0{,}8}$	$3{,}3^{\pm 0{,}16}$	$34{,}2^{\pm 0{,}3}$
C25-30R-30R	0,5	$32{,}5^{\pm 1{,}0}$	$3{,}0^{\pm 0{,}18}$	$33{,}7^{\pm 0{,}3}$
C25-100R-100R	1,0	$28{,}6^{\pm 1{,}3}$	$2{,}8^{\pm 0{,}18}$	$30{,}6^{\pm 0{,}4}$
C35-0R-0R	0,0	$38{,}6^{\pm 2{,}4}$	$3{,}6^{\pm 0{,}15}$	$41{,}2^{\pm 0{,}8}$
C35-0R-100R	0,3	$40{,}2^{\pm 0{,}5}$	$3{,}3^{\pm 0{,}16}$	$37{,}0^{\pm 0{,}7}$
C35-30R-30R	0,5	$39{,}1^{\pm 1{,}1}$	$2{,}9^{\pm 0{,}07}$	$34{,}9^{\pm 0{,}3}$
C35-100R-100R	1,0	$35{,}7^{\pm 1{,}2}$	$3{,}0^{\pm 0{,}1}$	$32{,}7^{\pm 0{,}4}$

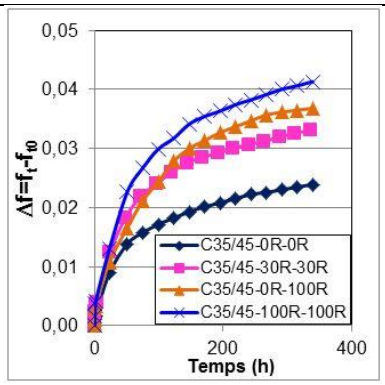
3. 2 Comportement différé de bétons des granulats recyclés

L'évolution de la flèche, $\Delta_f = f_t - f_{t0}$, pour les deux séries C25/30 et C35/45 est représentée sur la figure 1. f_t représente la flèche mesurée à l'instant t alors que f_{t0} est la flèche élastique obtenue au moment de chargement. L'analyse des courbes montre que les formulations incorporant des granulats recyclés développent des flèches plus importantes que les formulations de référence. De plus, l'amplitude de la flèche est d'autant plus importante que le taux de substitution est élevé. Les résultats de ces essais sont en accord avec les travaux antérieurs disponibles dans les références bibliographiques [FAT11, DOM09, GUO17]. La cinétique accélérée des déformations du fluage en présence des granulats recyclés est due d'après Xiao et al. [XIA15] à la présence de l'ancien mortier attaché autour des grains naturels qui est caractérisé par un faible module d'élasticité, une porosité élevée et un réseau de fissures important dû au processus du concassage. La comparaison des cinétiques de fluage entre les deux séries du béton en fonction du taux de substitution montre que le fluage de la série C25/35 est plus important que celui de la série C35/45 lorsque les granulats recyclés sont employés. Les écarts pour chaque taux de substitution peuvent s'interpréter par la différence entre les paramètres de formulation conduisant à une porosité plus importante pour la série C25/30 par rapport à la série C35/45.

La figure 2 représente la variation du coefficient de fluage $\varphi(t,t_0)$ en fonction du taux de substitution massique, Γ, pour les bétons étudiés en plus de ceux retrouvés dans les références bibliographiques . Sur cette figure, φ_{RAC} désigne le coefficient de fluage pour les bétons recyclés tandis que φ_{NAC} définit celui des bétons formulés avec des granulats naturels. Par ailleurs, le paramètre Γ a été déterminé pour chaque matériau à partir des formulations fournies par les auteurs afin de permettre la comparaison d'une manière uniforme. Les résultats montrent que le rapport $\varphi_{RAC}/\varphi_{NAC}$ est d'autant plus important que le taux de substitution Γ est élevé. En effet, le module élastique plus faible, les caractéristiques de l'ancien mortier attaché, et l'augmentation du volume de la pâte cimentaire pour maintenir la classe de résistance à la compression sont à l'origine de cette hausse.



a) C25/30



b) C35/45

Figure 1 : *Evolution de la flèche des bétons étudiés.*

Le coefficient $\varphi(t,t_0)$ qui représente le rapport entre la déformation de fluage, ε_{fl}, et la déformation élastique, ε_{el}, peut être prédit à l'aide des modèles simplifiés proposés par les normes de dimensionnement telles que l'EC2 [EUR04] et le CEB [CEB90]. Ces modèles estiment $\varphi(t,t_0)$ en fonction des propriétés du matériau étudié, la taille de l'élément et des conditions environnementales. La comparaison entre les valeurs expérimentales et celles prédites par l'EC2 est illustrée sur la figure 3 où nous remarquons que la prédiction n'est pas suffisamment acceptable pour déterminer $\varphi(t,t_0)$. Cette conclusion peut être généralisée pour les valeurs calculées selon le modèle CEB-FIB. Par ailleurs, les modifications nécessaires pour tenir compte explicitement de la présence des granulats recyclés sont proposées pour les deux modèles.

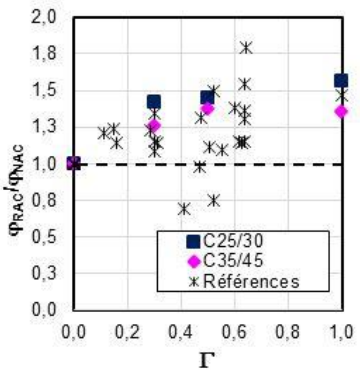


Figure 2 : *Variation du coefficient de fluage en fonction du taux de substitution.*

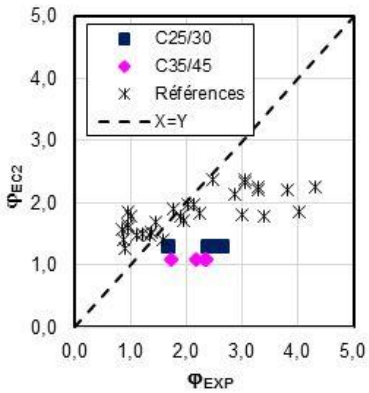


Figure 3 : *Comparaison entre les valeurs expérimentales et calculées du coefficient de fluage.*

4. Conclusions

La présente étude porte sur le comportement au fluage de de 6 bétons à granulats recyclés correspondant à 2 classes de résistance C25/30 et C35/45. Les bétons ont été élaborés à partir de 2 formulations de référence en substituant partiellement ou entièrement les granulats naturels par des matériaux issus du recyclage des bétons. La campagne d'essais du fluage menée sur des poutres chargées en flexion trois points a indiqué que les déformations du fluage de dessiccation sont influencées par la présence des granulats recyclés et elles sont d'autant plus accentuées que le taux de remplacement est important. A partir des résultats du présent travail et des résultats disponibles dans la littérature, les relations analytiques développées pour prédire le coefficient de fluage du béton des granulats naturels ont été analysées en vue de leur application pour le béton des granulats recyclés. L'analyse a mis en évidence que ces relations ne sont pas adéquates pour le béton des granulats recyclés et les modifications nécessaires pour tenir compte de la présence des granulats recyclés sont proposées.

5. Bibliographie

[CEB90] CEB-FIP, Model Code, T. Telford, 1990: London.

|DOM09] Domingo-Cabo, A., et al., Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials, 2009. 23(7): p. 2545-2553.

[EUR04] Eurocode2, Design of concrete structures_Part 1-1 General rules and rules for buildings. 2004: Paris.

|FAT11] Fathifazl, G., et al., Creep and drying shrinkage characteristics of concrete produced with coarse recycled concrete aggregate. Cement and Concrete Composites, 2011. 33(10): p. 1026-1037.

[GUO17] Guo, M., Identifications expérimentale et numérique des micromécanismes liés à la rupture et au fluage dans le béton recyclé, in GeM. 2017, Ecole centrale de Nantes. p. 152.

[OMA17] Omary, S., et al., Mix Design and Recycled Aggregates Effects on the Concrete's Properties 10.1007/s40999-017-0247-y. International Journal of Civil Engineering, 2017.

[XIA15] Xiao, J., Y. Fan, and V.W.Y. Tam, On creep characteristics of cement paste, mortar and recycled aggregate concrete. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2015. 19(10): p. 1234-1252.