

# Optimisation de l'EC2 pour la prédiction du fluage des bétons de granulats recyclés

Pablo PEÑA TORRES<sup>1</sup>, Elhem GHORBEL<sup>2</sup>, George WARDEH<sup>3</sup>

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

<sup>1</sup>[pablo.pena-torres@etu.u-cergy.fr](mailto:pablo.pena-torres@etu.u-cergy.fr)

<sup>2</sup>[elhem.ghorbel@u-cergy.fr](mailto:elhem.ghorbel@u-cergy.fr)

<sup>3</sup>[george.wardeh@u-cergy.fr](mailto:george.wardeh@u-cergy.fr)

**RESUME** L'Eurocode 2 (EC2) propose un modèle empirique pour prédire le fluage total du béton. Les propriétés de fluage sont généralement déterminées en mesurant le coefficient de fluage, noté  $\varphi$ , en fonction du temps,  $t$ , et de l'âge du béton au moment du chargement,  $t_0$ . Ce coefficient est le produit d'un coefficient de fluage conventionnel,  $\varphi_0$ , par une fonction temporelle de type puissance. Le modèle dépend également de la géométrie de l'élément, du type de ciment, l'humidité relative ainsi que de la résistance moyenne à la compression à l'âge de 28 jours.

Le principal objectif du présent travail est de proposer une modification de l'expression de l'EC2 afin d'améliorer sa prédiction de fluage pour les bétons des granulats naturels et aussi son extension pour estimer le fluage du béton des granulats recyclés. Pour atteindre cet objectif, une base de données constituée des résultats expérimentaux disponibles dans les références bibliographiques a été créée. La comparaison entre les valeurs expérimentales en termes du coefficient de fluage conventionnel,  $\varphi_0$ , coefficient qui dépend de l'HR,  $h_0$  et  $f_{cm}$ ,  $\beta_H$ , et de la puissance de la fonction du vieillissement,  $\alpha$ , montre une dispersion importante. Pour la solution de cette dispersion, il est nécessaire l'introduction des termes correctifs qui tiennent en compte la proportion des granulats et le taux de substitution des granulats recyclés dans la formulation.

**Mots-clefs** Béton, Granulats recyclés, Propriétés mécaniques, Fluage, EC2.

## I. INTRODUCTION

Le fluage est la faculté du béton à se déformer lorsqu'il est soumis à un chargement mécanique maintenu constant dans le temps. Suivant le mode de conservation du béton durant le chargement, on définit deux types de fluage : fluage de dessiccation et fluage propre. La déformation de fluage est influencée par plusieurs facteurs tels que l'âge du béton au moment de chargement, l'intensité du chargement, la température, l'humidité relative, la géométrie de l'élément ainsi que par les paramètres du béton (formulation et propriétés mécaniques). Les études relatives au comportement différé du béton incorporant des granulats recyclés montrent que la déformation de fluage est supérieure à celui du béton témoin formulé avec des granulats naturels (Fathifazl et al., 2011; Tošić

et al., 2019). Cette augmentation est due essentiellement à l'effet du mortier attaché aux granulats naturels qui se caractérise par une porosité élevée et un module d'élasticité très faible par rapport aux granulats naturels. Une étude antérieure menée par (P. Torres et al., 2019) a montré que les normes en vigueur ne sont pas adéquates pour le béton des granulats recyclés et nécessitent des modifications pour tenir en compte la présence des granulats recyclés dans sa formulation.

## II. MODELISATION ANALYTIQUE DU FLUAGE

### II.1 Modèle de l'Eurocode 2

Le modèle de fluage proposé par l'EC2 (EC2, 2004) s'applique à tout élément en béton plein ou armé sous les conditions d'Etats Limites de Service. Il calcule les déformations de fluage total sans distinction entre fluage propre et fluage de dessiccation. Le coefficient de fluage,  $\varphi(t, t_0)$ , se calcule à l'aide de l'équation (1) :

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \cdot \beta_c(t, t_0) \quad (1)$$

Avec :

- $\varphi_0$  est le coefficient de fluage conventionnel
- $\beta_c(t, t_0)$  est le coefficient qui tient en compte du développement du fluage avec le temps après chargement, et peut être estimé par l'expression (2) :

$$\beta_c(t, t_0) = \left[ \frac{t-t_0}{\beta_H+t-t_0} \right]^{0.3} \quad (2)$$

Où :

$t$  est l'âge du béton à l'instant considéré, en jours.

$t_0$  est l'âge du béton au moment du chargement, en jours.

$\beta_H$  est un coefficient dépend de l'humidité relative (HR en %), du rayon moyen de l'élément ( $h_0$  en mm) et de la résistance à la compression du béton ( $f_{cm}$  en MPa).

### II.2 Modèle de fluage modifié

Le modèle de fluage modifié est défini à partir d'une analyse de données obtenus de la littérature en utilisant l'équation (3) :

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \cdot \left[ \frac{t-t_0}{\beta_H+t-t_0} \right]^\alpha \quad (3)$$

Avec cette base de données et à l'aide d'un algorithme fait en le logiciel MATLAB, les paramètres expérimentaux  $\varphi_{0\text{-exp}}$ ,  $\beta_{H\text{-exp}}$  et  $\alpha_{\text{exp}}$  de chaque expérience sont calculés. Avec ces résultats, on a analysée le paramètre  $\beta_H$  en fonction des variables qu'interviennent dans le calcul (HR,  $h_0$  et  $f_{cm}$ ).

De cette analyse, on a proposé l'expression (4) qui donne des valeurs plus proches que l'expression proposé par l'EC2:

$$\beta_{H-modif} = 1,5 \cdot [1 + (0,012 \cdot RH)^{18}] \cdot h_0 + 0,00075 \cdot f_{cm}^3 \quad (4)$$

En utilisant l'expression  $\beta_{H-modif}$ , afin de calculer les valeurs de  $\varphi_{0-exp}$  et  $\alpha_{exp}$ . On prend le logarithme des deux côtés de l'équation (3), une expression sous la forme  $Y = A + BX$  est obtenue (Pan and Meng, 2016):

$$\ln[\varphi(t, t_0)] = \ln(\varphi_{0,exp}) + \alpha_{exp} \cdot \ln \left[ \frac{t-t_0}{\beta_{H-modif} + t-t_0} \right] \quad (5)$$

Les paramètres  $A = \ln(\varphi_{0-exp})$  et  $B = \alpha_{exp}$  sont obtenues par régression linéaire des résultats expérimentaux dans l'espace  $X = \ln \left[ \frac{t-t_0}{\beta_{H-modif} + t-t_0} \right]$ ,  $Y = \ln[\varphi(t, t_0)]$ .

De ces résultats, on a obtenu une valeur moyenne de  $\alpha = 0.44$  le quel on va le prendre comme la valeur de  $\alpha$  modifié. Pour le paramètre  $\varphi_0$ , on a évalué sa sensibilité avec le rapport volumique de sable sur les granulats totaux ;  $S/(S+G)$ , le quelle nous a donné une corrélation de puissance 2. Sachant que cette variable n'est pas incluse dans l'expression  $\varphi_0$  de l'EC2, on va l'introduire pour calculer  $\varphi_{0-modif}$ . L'expression (6) montre le paramètre  $\varphi_0$  modifié avec le coefficient trouvé:

$$\varphi_{0-modif} = 5,7 \cdot \left[ \frac{S}{S+G} \right]^2 \cdot \varphi_{0,EC2} \quad (6)$$

Pour l'évaluation de fluage du béton avec des granulats recyclés, il est nécessaire d'introduire un facteur additionnel au niveau de  $\varphi_0$  en prenant en compte le taux de substitution des granulats recyclés par rapport aux granulats naturels, à cause du mortier attaché sur les granulats recyclés. Avec des valeurs de  $\varphi_0$  calculés à partir des courbes de déformation de fluage des bétons avec granulats recyclés (BGR), obtenues de la littérature, et en utilisant l'expression (6), on propose l'expression (7) pour calculer  $\varphi_0$  pour les bétons avec granulats recyclés:

$$\varphi_{0-modif} = 5,7 \cdot \left[ \frac{S}{S+G} \right]^2 (1 + 0,33 \cdot \Gamma_m) \cdot \varphi_{0,EC2} \quad (7)$$

Où  $\Gamma_m$  est le rapport massique entre les granulats recyclés et le squelette granulaire totale.

### III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

La base de données utilisée pour déterminer les paramètres est constituée de 20 courbes de fluage des BGN et 38 courbes de fluage des BGR issus de la littérature. Les résultats de l'évaluation montrent des modifications pour tous les paramètres qu'interviennent dans l'expression de calcul du coefficient de fluage. Pour chaque courbe de fluage, les coefficients de corrélation ont été calculés pour le modèle modifié et celui de l'EC2 (Tableau 1).

**TABLEAU 1. Coefficient de corrélation (R<sup>2</sup>)**

R <sup>2</sup>	EC2	Modifié
BGN (20)	0.69	0.81
BGR (38)	0.64	0.79

La figure 1 montre la comparaison entre l'estimation du coefficient de fluage calculé par l'EC2 et l'expression modifiée proposée. Nous pouvons observer que l'expression modifiée permet de donner une meilleure prédiction que l'EC2.

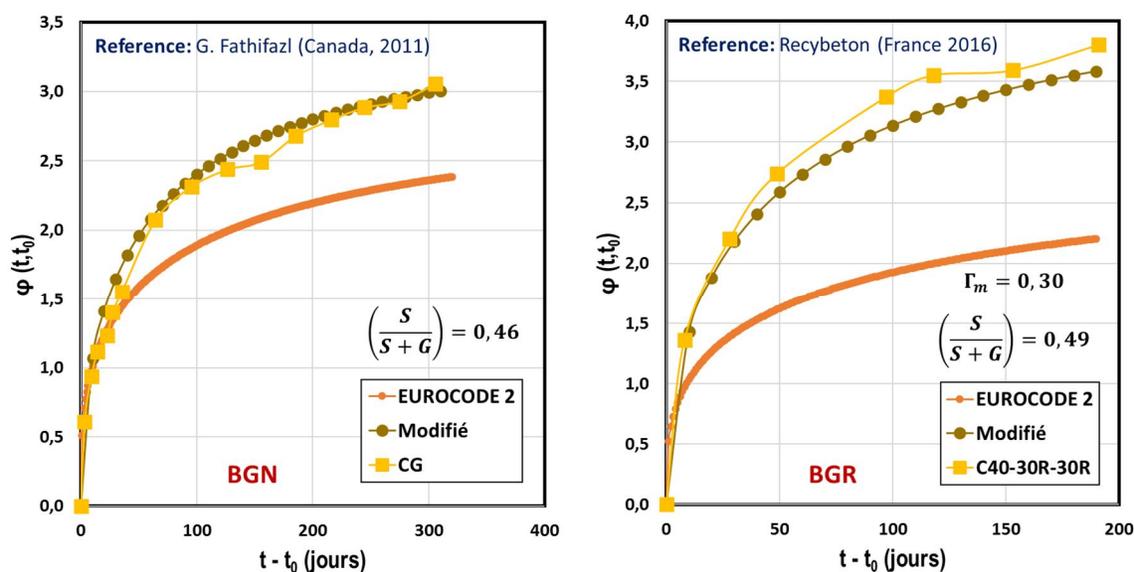


FIGURE 1. Evaluation de la prédiction des coefficients de fluage

#### IV. CONCLUSION

Cette étude présente une modification de l'expression donné par l'EC2 pour calculer le coefficient de fluage du béton avec des granulats naturels (BGN) et celui avec des granulats recyclés (BGR). L'expression modifiée a montré une meilleure prédiction de comportement au fluage des bétons naturels et recyclés en comparaison à l'expression de l'EC2.

#### REFERENCES

EC2, 2004. Eurocode 2: Calcul des structures en béton - Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments. Com. Eur. Norm.

Fathifazl, G., Ghani Razaqpur, A., Burkan Isgor, O., Abbas, A., Fournier, B., Foo, S., 2011. Creep and drying shrinkage characteristics of concrete produced with coarse recycled concrete aggregate. *Cem. Concr. Compos.* 33, 1026–1037. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.08.004>

Pan, Z., Meng, S., 2016. Three-level experimental approach for creep and shrinkage of high-strength high-performance concrete. *Eng. Struct.* 120, 23–36. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.04.009>

Peña Torres, P., Ghorbel, E., Wardeh, G., 2019. Validité de l'EC2 pour la modélisation du fluage des bétons de granulats recyclés. 37èmes Rencontres L'AUGC PolytechUNICE Nice.

Tošić, N., de la Fuente, A., Marinković, S., 2019. Creep of recycled aggregate concrete: Experimental database and creep prediction model according to the fib Model Code 2010. *Constr. Build. Mater.* 195, 590–599. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.048>