

ANALYSE ET MODÉLISATION DU FLUAGE PROPRE DU BÉTON

ANALYSIS AND MODELLING OF CONCRETE BASIC CREEP

Jean-Michel TORRENTI¹, Robert LEROY^{1,2}

¹ Université Paris Est, IFSTTAR, département MAST

² ENSAPM, Paris

1. INTRODUCTION : FLUAGE PROPRE DU BÉTON

Une bonne prédiction des déformations différées du béton est un enjeu important pour les structures en béton précontraint et un dimensionnement correct de la précontrainte. Ces déformations différées comprennent dans les codes modernes quatre composantes : les retraits endogène et de dessiccation, les fluages propre et de dessiccation [MUL 13, LER 95, LAP 93]. Dans ce travail nous allons nous intéresser uniquement au fluage propre.

Le fluage propre du béton est conventionnellement la part de déformation différée d'un béton chargé sous une contrainte constante s et protégé de la dessiccation. On l'obtient en laboratoire en protégeant le béton de la dessiccation et en mesurant en parallèle la composante de retrait endogène (hors dessiccation). On définit alors la complaisance J telle que la déformation mécanique e (déformation due à la charge appliquée, soit déformation totale moins le retrait) soit égale au produit de cette complaisance par la contrainte appliquée : $\varepsilon = J \sigma$.

Acker et Ulm [ACK 2001] ont analysé les essais de Le Roy [LER 95] en exprimant la dérivée de cette complaisance en fonction du temps dJ/dt . Pour différents âges de chargement ils ont montré que cette dérivée s'exprimait en $1/Ct$ lorsque t était grand, avec la même valeur de C pour un béton donné quel que soit l'âge de chargement t_0 (cf.

figure 1). Les auteurs concluaient que le fluage propre faisait intervenir un phénomène de court terme (associé généralement à des mouvements d'eau liés à l'application de la charge) et un phénomène de long terme (plutôt lié à des glissements de feuillettes de C-S-H).

Nous allons montrer en reprenant les essais de Le Roy et d'autres essais de la littérature que, en fait, si on exprime la dérivée de la complaisance par rapport au temps écoulé depuis la mise en charge, soit $dJ/d(t-t_0)$, on obtient une courbe unique et que donc un seul phénomène est mis en jeu dans le fluage propre. L'intégration de la dérivée de la complaisance permet d'exprimer ensuite ce fluage propre et de montrer que la relation obtenue est semblable à celle proposée dans le nouveau MC2010 [MUL 2013]. L'analyse de différents résultats de la littérature permet de montrer qu'il est tout à fait possible de modéliser ces essais à l'aide de la loi proposée et permet *in fine* de comparer les paramètres proposés par le MC2010 avec ceux déduits des expériences.

2. ANALYSE DES ESSAIS DE FLUAGE PROPRE DE LE ROY

Le Roy a testé 10 bétons différents en fluage propre en faisant varier l'âge de chargement, la proportion d'eau,

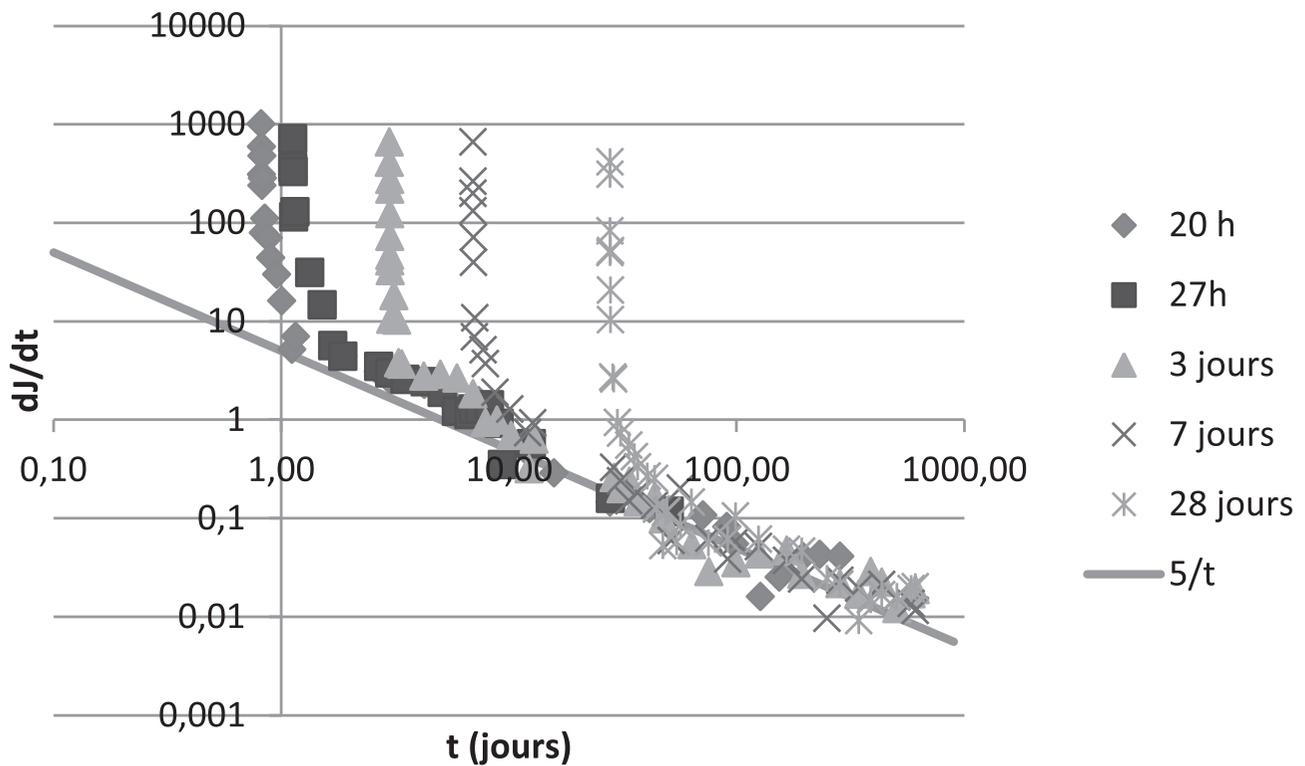


Figure 1 : Dérivée de la compliance par rapport au temps ; béton B0 de Le Roy et de Laplante [LER 95, LAP 93].

	E/C	Type de ciment	f_{cm28} [MPa]	$1/E_{28j}$ [10^{-6} MPa $^{-1}$]
B0	0,5	CEMI 52.5	43,5	25,5
B8	0,33	CEMI 52.5	67,2	20,6

Tableau 1 : Propriétés de 2 des bétons, différant uniquement par le rapport E/C [LER 95].

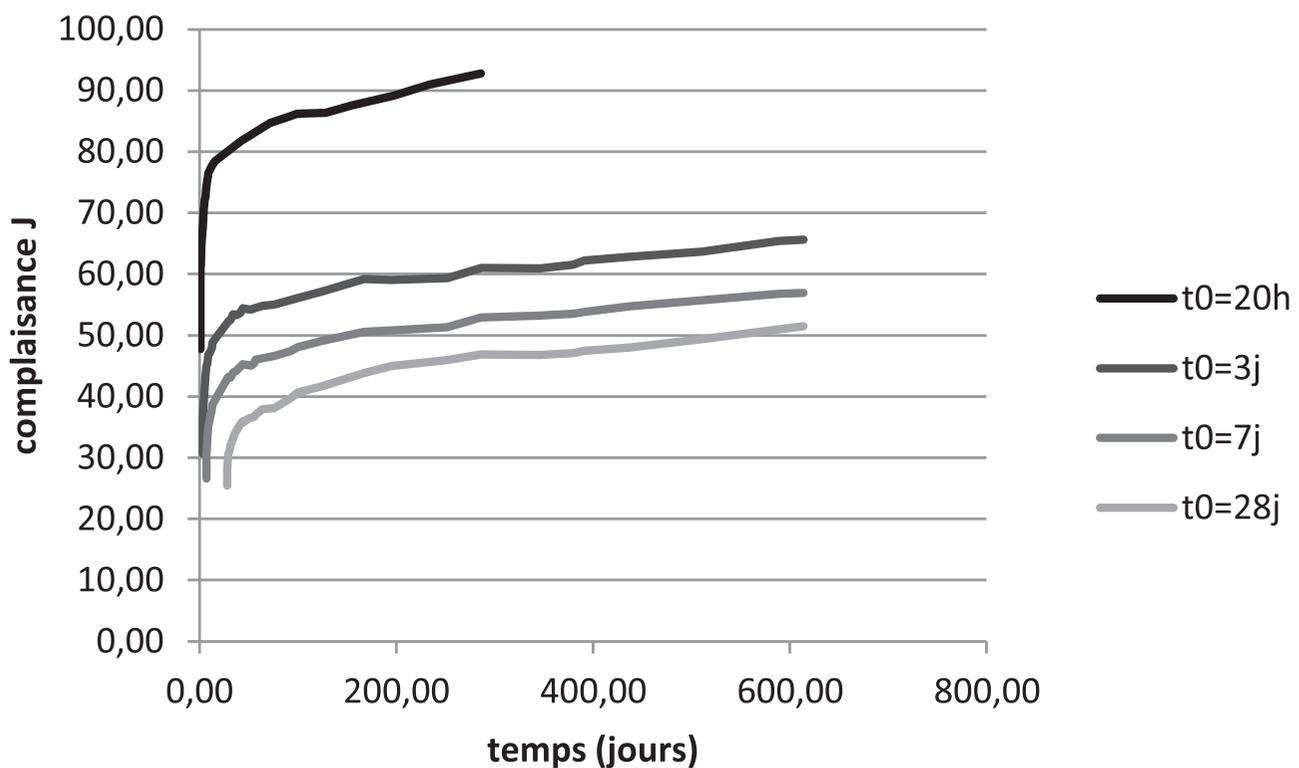


Figure 2 : Compliance par rapport au temps du béton B0 pour différents âges de chargement (échelle linéaire).

de fumée de silice et de volume de pâte [LER 95]. Le tableau 1 présente les compositions et principales propriétés de 2 de ces bétons. La figure 2 donne l'exemple pour le béton B0 de l'évolution des déformations et la figure 3 donne, pour le même béton la dérivée de la com-

plaisance par rapport à $(t-t_0)$. On peut constater que dans cette dernière représentation, dans une représentation log-log les points s'alignent depuis le début avec une droite de pente $1/Ct$. La figure 4 montre qu'il en est de même pour le béton B8.

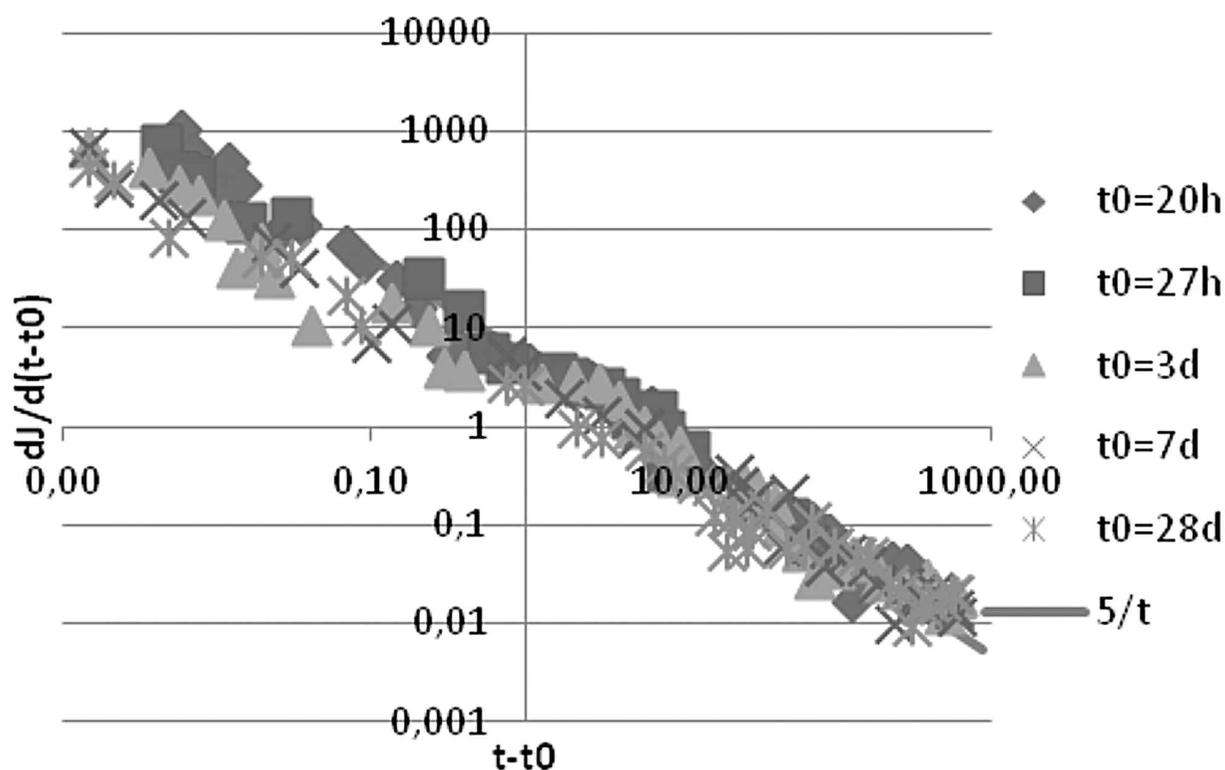


Figure 3 : Dérivée de la complaisance par rapport au temps écoulé depuis l'instant de chargement pour le béton B0 ; mêmes essais que ceux de la figure 1 (échelles log-log).

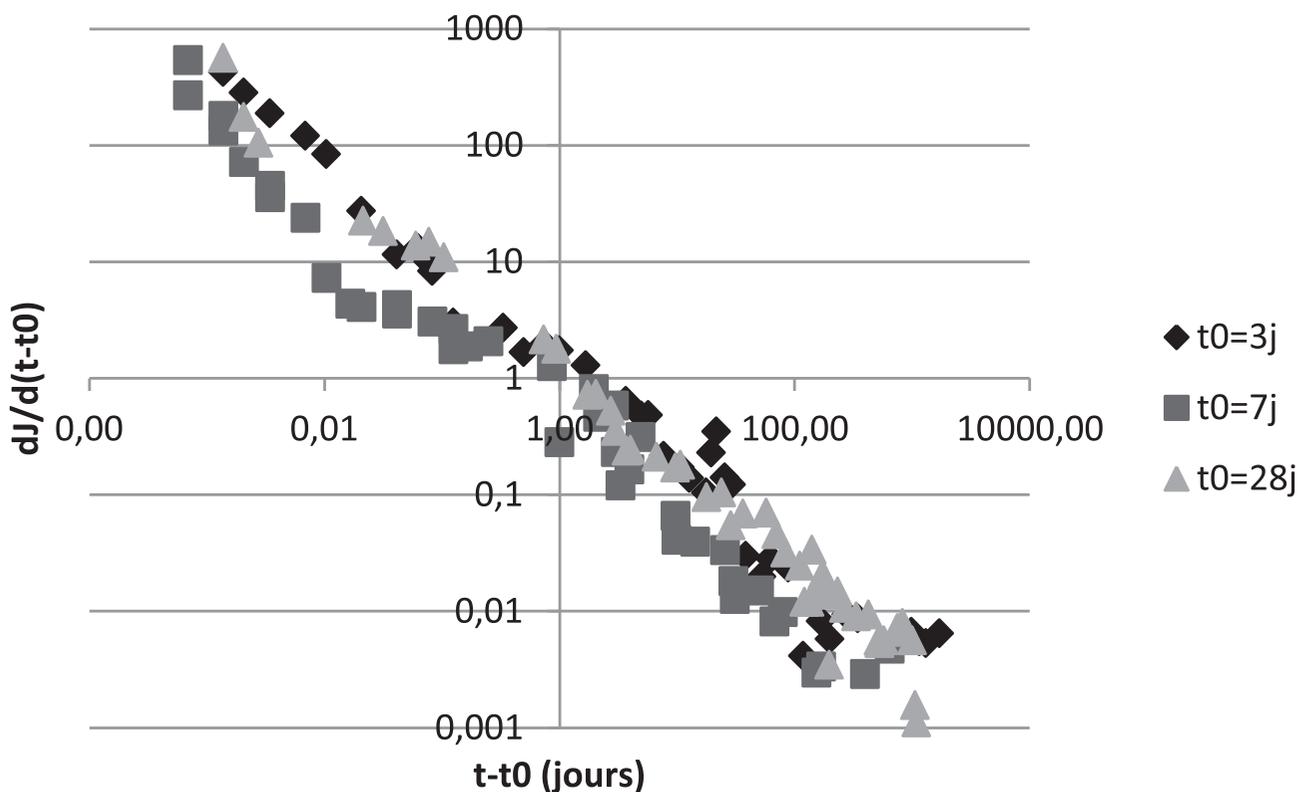


Figure 4 : Dérivée de la complaisance par rapport au temps écoulé depuis l'instant de chargement pour le béton B8 (échelles log-log).

3. CONSÉQUENCES POUR LA LOI DE FLUAGE PROPRE

Les résultats présentés précédemment montrent clairement que le fluage propre peut être considéré comme une seule fonction logarithmique dans laquelle l'âge de chargement n'affecte que le terme dépendant de $(t-t_0)$:

$$J = 1/E + 1/C \log(1 + (t-t_0)/\tau(t_0)) \quad [1]$$

avec quand $t \rightarrow \infty$ $dJ/dt \rightarrow 1/Ct$

Ceci correspond au comportement observé sur des échantillons de petite taille par nanoindentation [VAN 2013] mais aussi sur des structures réelles [BAZ 2012] [TOR 2015] même si dans le cas de structures il y a d'autres phé-

nomènes que le fluage propre à prendre en considération (retraits, relaxation de la précontrainte par exemple).

Nous pouvons comparer cette relation avec les résultats des essais repris de la NU database (http://www.civil.northwestern.edu/people/bazant/CreepShrinkData_131127.xlsx). On considère les essais de fluage propre pour lesquels plusieurs âges de chargement différents ont été testés. Le tableau 2 donne les caractéristiques des bétons utilisés quand celles-ci sont disponibles. Les figures 5 à 11 montrent qu'en prenant un coefficient C constant pour un béton donné et en faisant varier le paramètre $\tau(t_0)$ avec chaque âge de chargement la relation proposée est capable de représenter la physique des phénomènes.

	E/C	Type de ciment	f_{cm28} [MPa]	E_{28j} [MPa]
Kawasumi [KAW 82]	0,47	SL (slow)	33	21950
Shritaran [SHR 89]	0,47	R (rapid)	50	29800
Hanson [HAN 53]	0,56	SL	34	-
Nagamatsu [NAG 86]	0,55	R	32	26650
Browne [BRO 69]	0,42	-	50	-

Tableau 2 : Caractéristiques des bétons considérés dans l'étude.

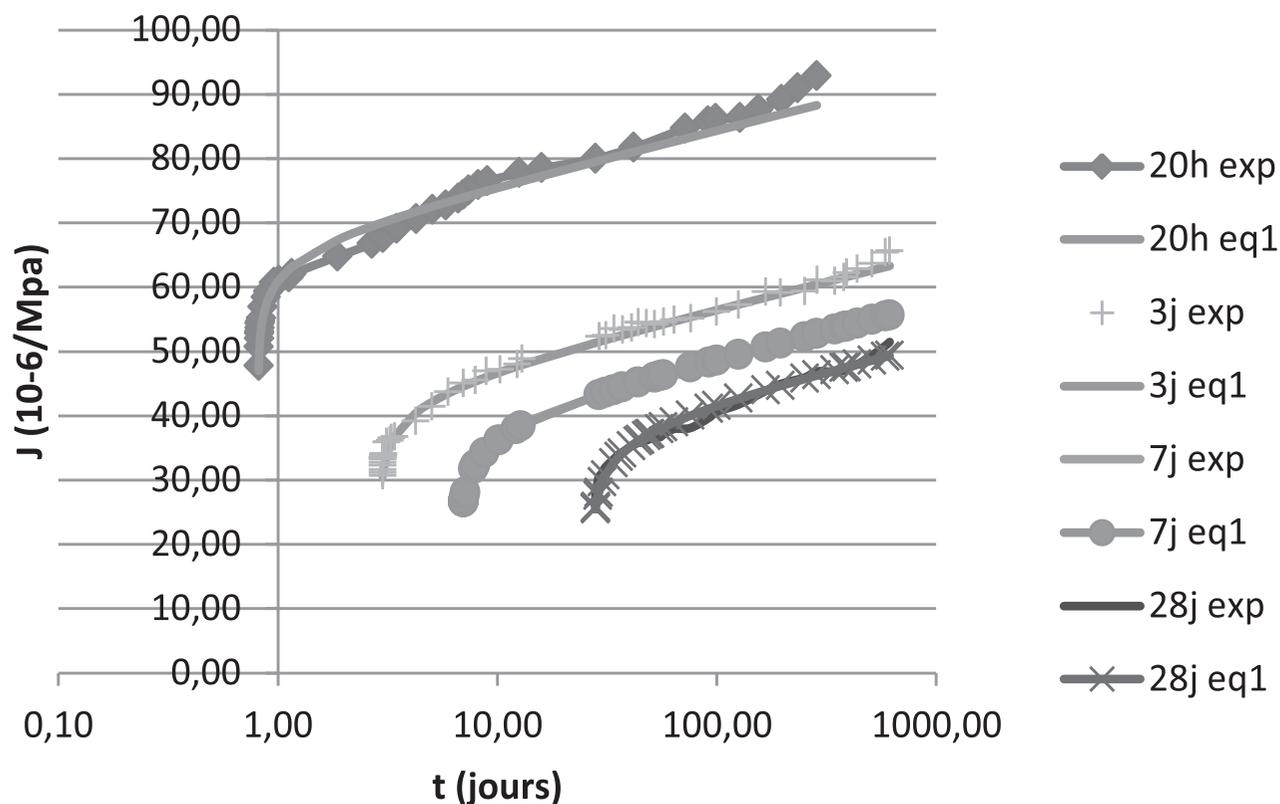


Figure 5 : Comparaison des résultats expérimentaux de Le Roy - béton B0 - avec l'équation 1.

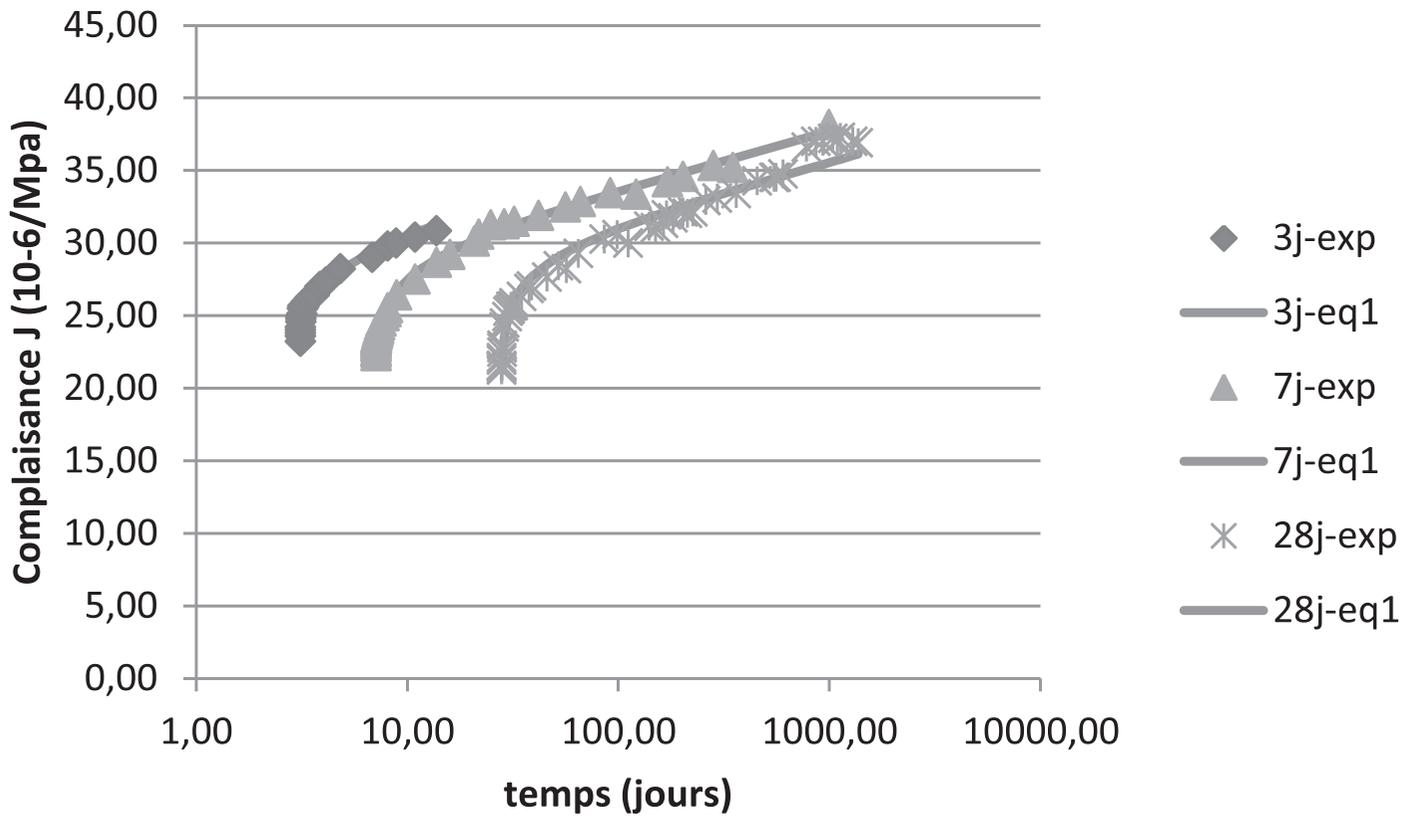


Figure 6 : Comparaison des résultats expérimentaux de Le Roy - béton B8 - avec l'équation 1.

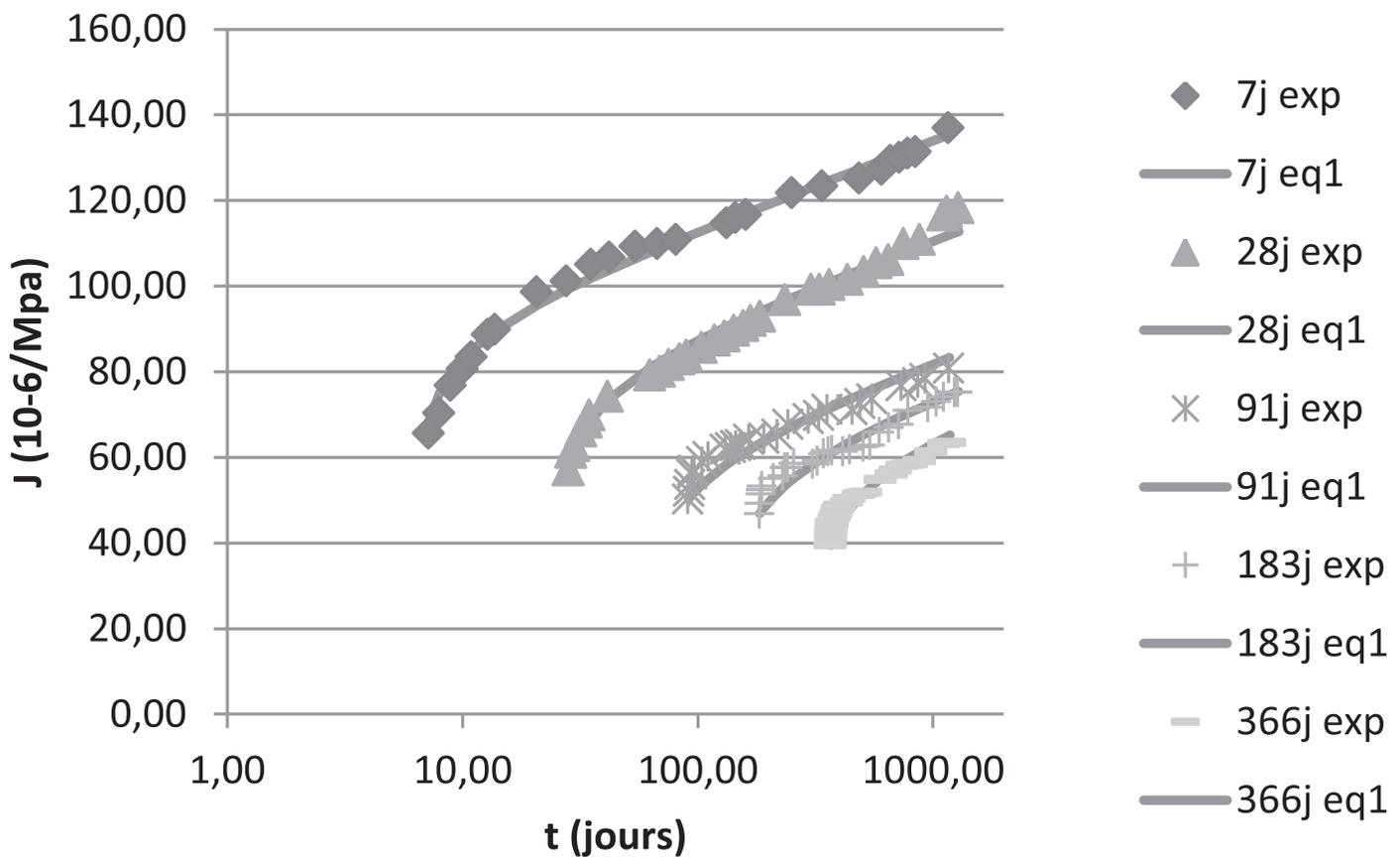


Figure 7 : Comparaison des résultats expérimentaux de Kawasumi [KAW 82] avec l'équation 1.

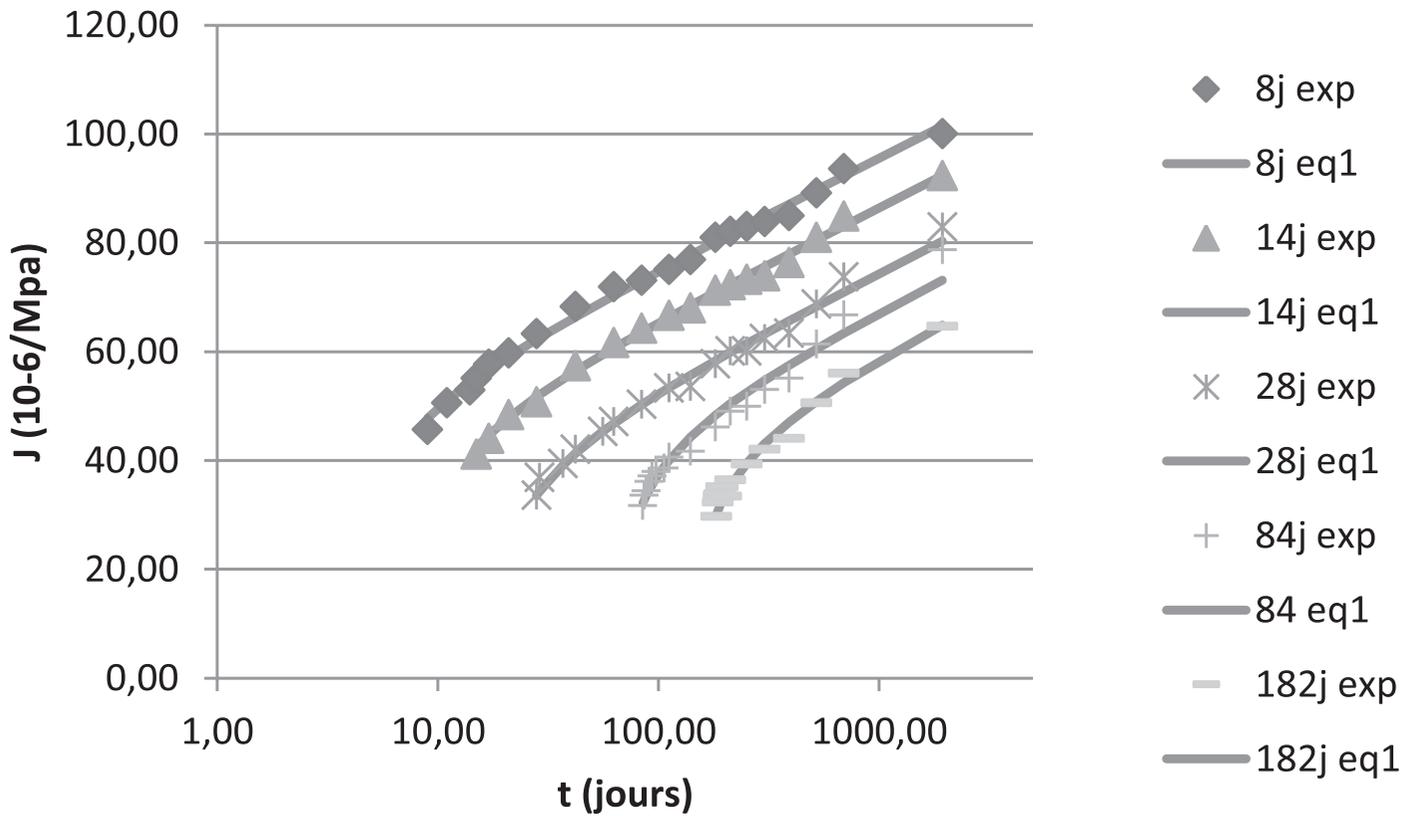


Figure 8 : Comparaison des résultats expérimentaux de Shritaran [SHR 89] avec l'équation 1.

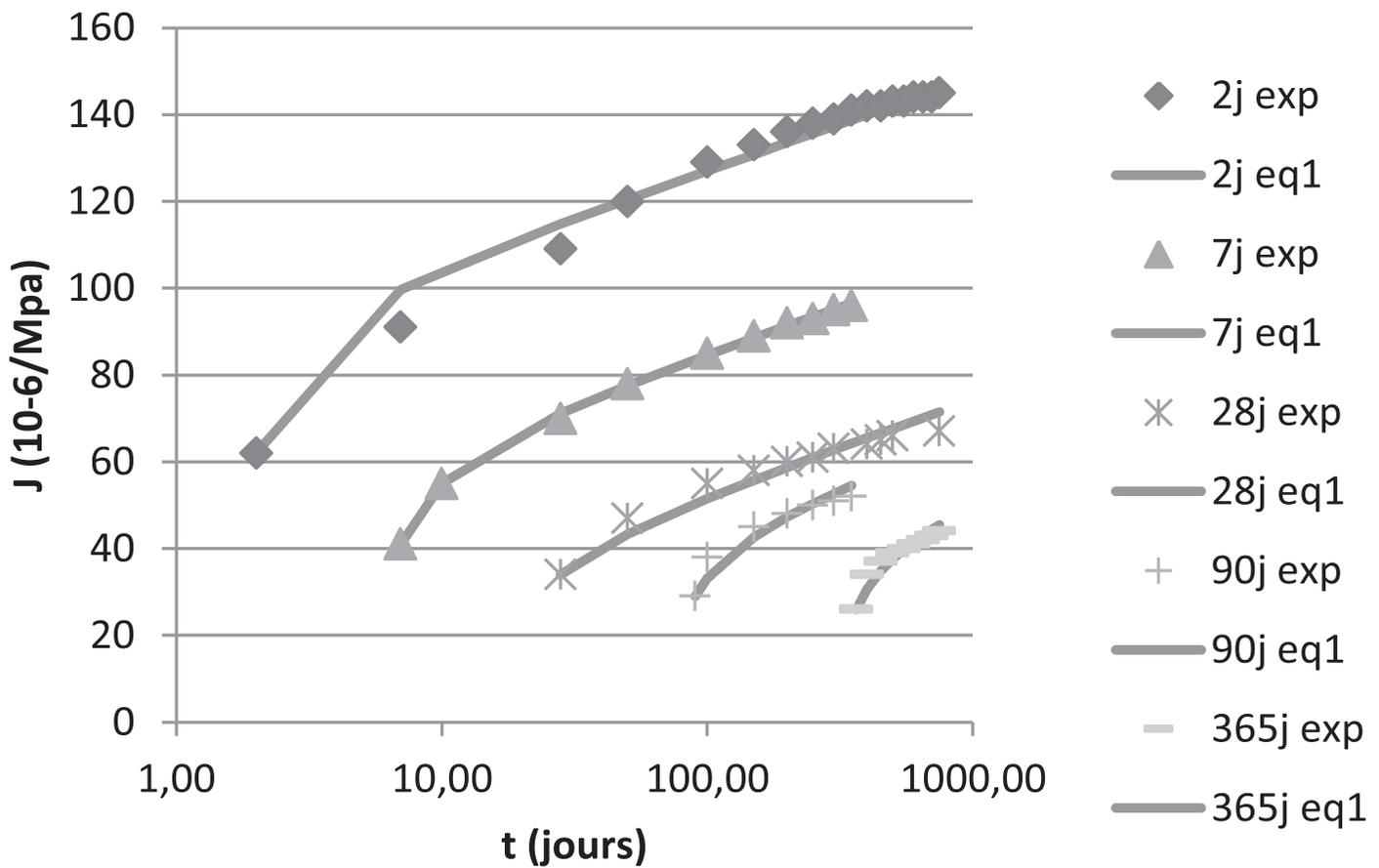


Figure 9 : Comparaison des résultats expérimentaux de Hanson [HAN 53] avec l'équation 1.

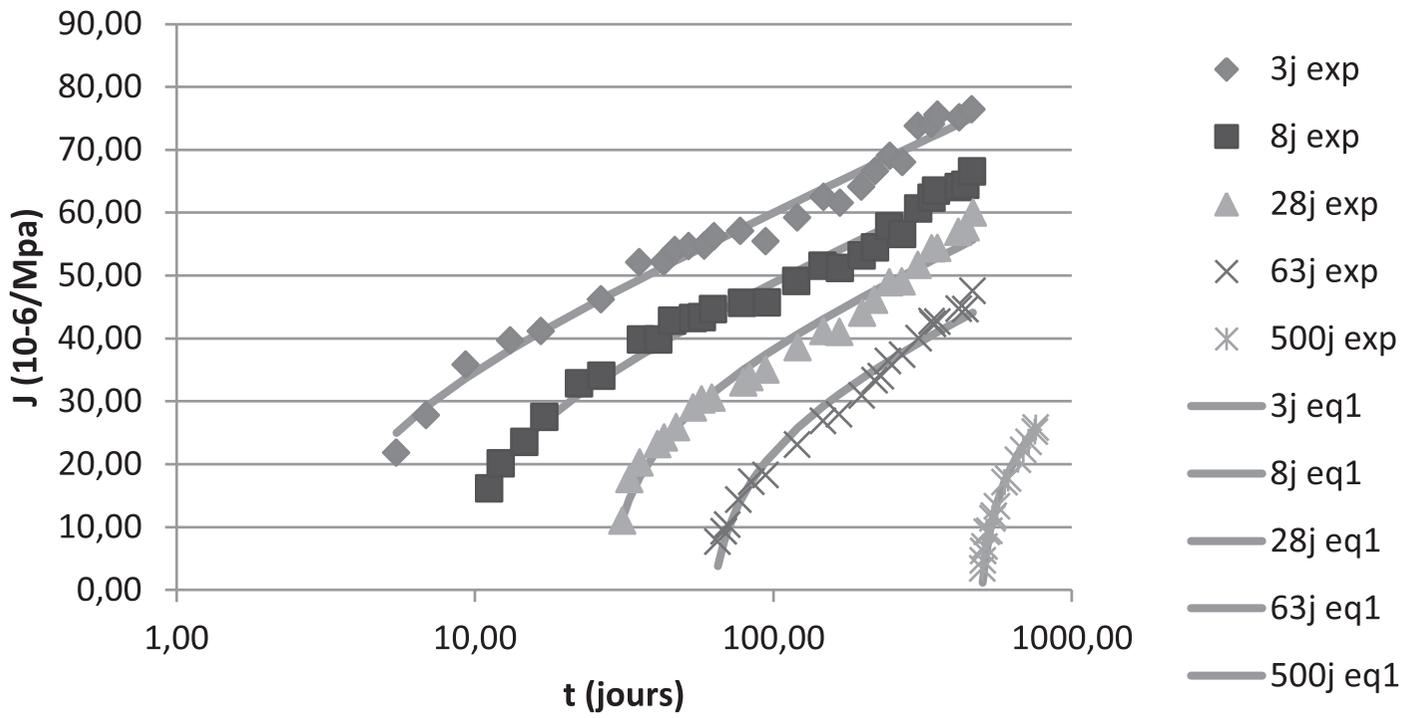


Figure 10 : Comparaison des résultats expérimentaux de Nagamatsu [NAG 86] avec l'équation 1.

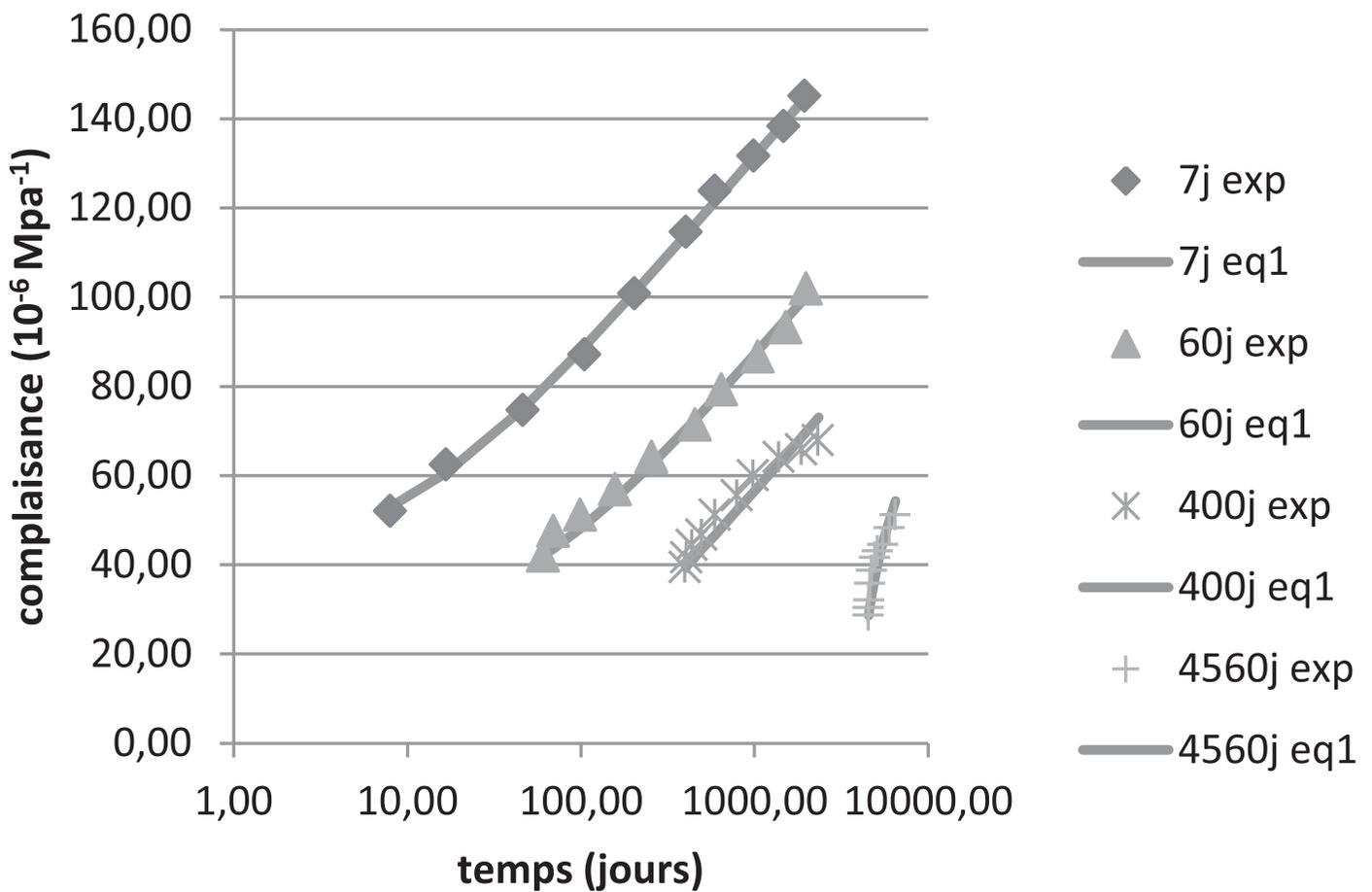


Figure 11 : Comparaison des résultats expérimentaux de Browne [BRO 69] avec l'équation 1.

4. COMPARAISON AVEC LE CODE MODEL 2010

Dans le récent Model Code 2010 le fluage propre est exprimé de manière similaire à l'équation 1 [MUL 2013].

$$\varepsilon_{bc} = \frac{\sigma}{E_{28}} \varphi_{0,bc} \beta_{bc}(t, t_0) \quad [2]$$

$$\text{Avec } \beta_{bc} = \ln \left(1 + (t - t_0) \left(0.035 + \frac{30}{t_{0,adj}} \right)^2 \right) \quad [3]$$

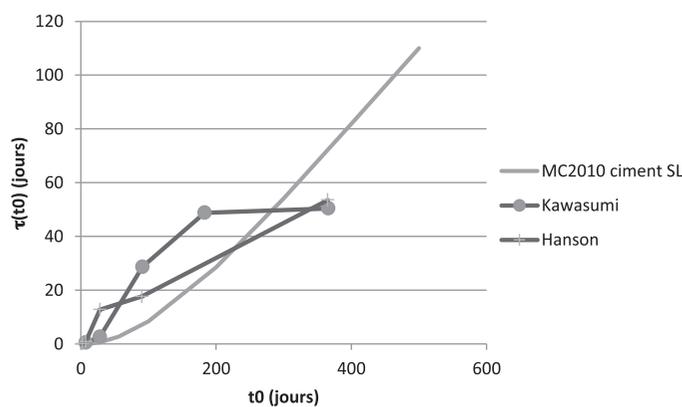
$$\text{Où } t_{0,adj} = t_0 \left(1 + \frac{9}{2 + t_0^{1.2}} \right)^\alpha \quad \text{avec } \alpha = -1 \text{ pour un}$$

ciment CEM32.5N (ou SL), 0 pour un 32.5R ou un 42.5N (ou N) et +1 pour 42.5R, 52.5N, 52.5R (ou R) [4]

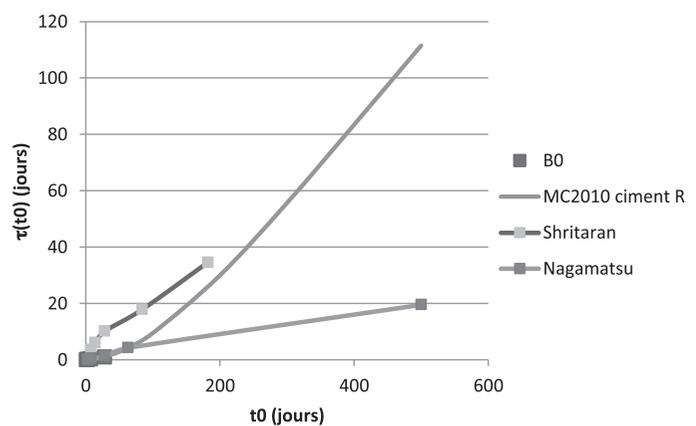
En comparant avec l'équation 1, on voit que

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{E_{28}} \varphi_{0,bc} = \frac{1,8}{E_{28} f_{cm}^{0,7}} \quad \text{et que } \frac{1}{\tau(t_0)} = \left(0.035 + \frac{30}{t_{0,adj}} \right)^2$$

On peut alors comparer les valeurs obtenues en calant l'équation 1 sur les résultats expérimentaux avec celles proposées par le Model Code 2010. Les figures 12a et 12b donnent les évolutions de $\tau(t_0)$, respectivement pour le cas des ciments SL et R. La figure 13 donne l'évolution de C en fonction de la résistance. On note un accord correct mais une variabilité certaine de ces paramètres lorsque l'on change de béton. Pour des ouvrages dans lesquels la prédiction du fluage est importante, il conviendra donc de caler au préalable ces paramètres sur des expériences de laboratoire.



a) cas des ciments SL



b) cas des ciments R.

Figure 12 : Évolutions de prédites par le MC2010 et obtenues par calage sur les expériences.

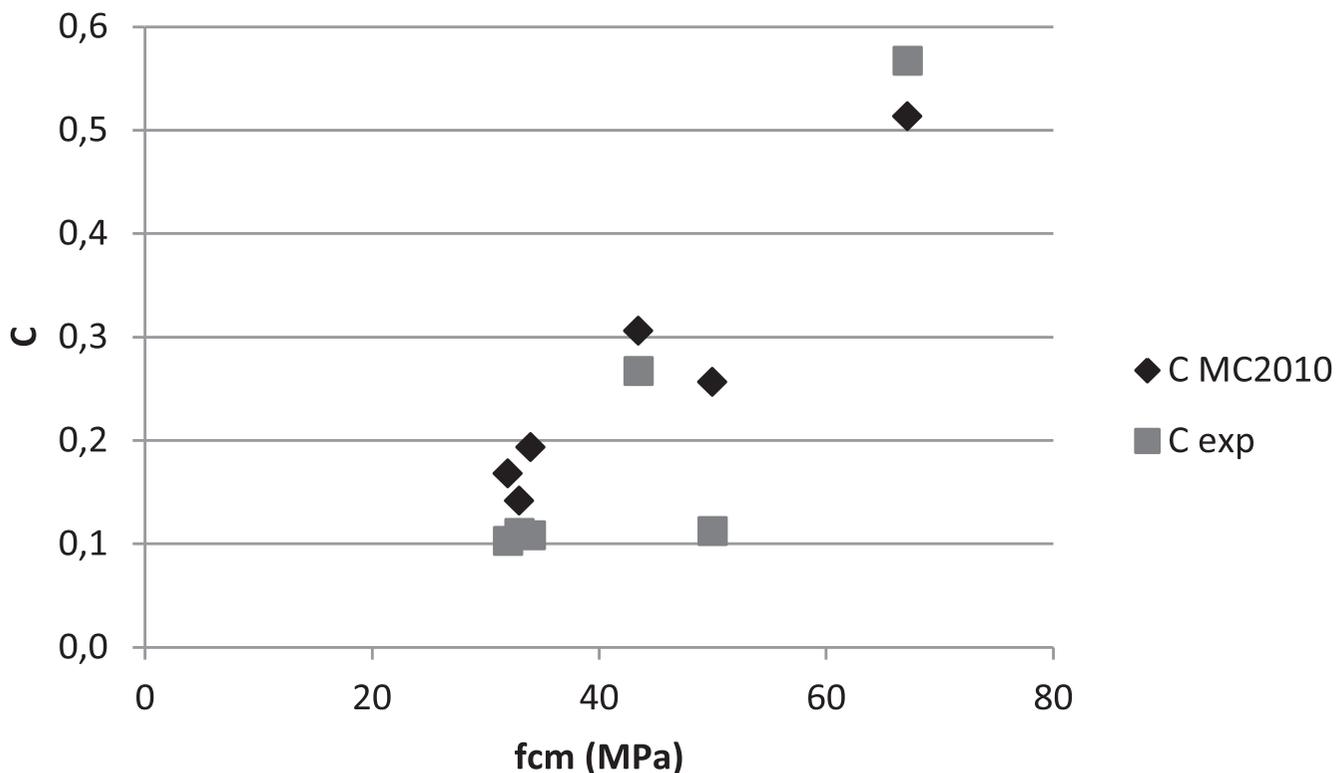


Figure 13 : Comparaison des valeurs de C prédites par le MC2010 et celles obtenues par calage sur les expériences, en fonction de la résistance moyenne f_{cm} .

5. CONCLUSIONS

Nous avons montré que l'analyse de résultats expérimentaux de fluage propre de béton ordinaire et hautes performances en fonction de la durée de chargement permet d'aligner sur une droite, en échelle log-log, la dérivée de la complaisance en fonction de la durée du chargement. Ce résultat apporte un éclairage différent par rapport aux travaux de Acker et Ulm, lesquels interprétaient les résultats expérimentaux en fonction du temps (et non de la durée de chargement) ce qui les amenaient à proposer 2 temps caractéristiques, donc 2 phénomènes différents dans les origines du fluage.

L'analyse proposée ici a permis d'élaborer une loi d'évolution de la complaisance en fluage propre en logarithme du temps, en faisant intervenir 2 paramètres - C et $\tau(t_0)$. Une confrontation de la loi avec un certain nombre d'expériences de la littérature, moyennant le calage du paramètre C pour un béton donné, et de $\tau(t_0)$ pour chaque âge de chargement, permet de traduire de manière satisfaisante les évolutions du fluage propre de divers bétons pour différents âges de chargement, et, en particulier, de prévoir l'évolution à long terme. La confrontation de la loi proposée avec le MC2010 montre que les paramètres de cette loi varient dans une gamme proche de celle constatée expérimentalement mais qui nécessitera néanmoins, pour les structures sensibles au fluage, un calage des paramètres du modèle à partir d'expériences de fluage.

6. BIBLIOGRAPHIE

- [ACK 2001] P. Acker, F. Ulm, « Creep and shrinkage of concrete: physical origins and practical measurements », *Nuclear Engineering and Design* 203 (2001) 143–158.
- [BAZ 2012] Z.P. Bazant, Y. Qiang, L. Guang-Hua, « Excessive long-time deflections of prestressed box girders: I. Record-span bridge in Palau and other paradigms », *ASCE J. of Structural Engrg.* 138 (6), 2012, 676–686.
- [BRO 69] Browne, R., Blundell, R., « The influence of loading age and temperature on the long term creep behaviour of concrete in a sealed, moisture stable state », *Materials and Structures* 2, (1969) 133-143.
- [HAN 53] Hanson, J.A., « A ten-year study of creep properties of concrete », Report No. SP-38, Concrete Laboratory, US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver (1953).
- [KAW 82] Kawasumi, M., Kasahara, K., Kuriyama, T., « *Creep of Concrete at Elevated Temperatures, Part 3, The Influence of Ages at Loading and Water/Cement Ratios.* » CRIEPI Report, No.382008, 1982.
- [LAP 93] P. Laplante (1993) Propriétés mécaniques des bétons durcissants : analyse comparée des bétons classiques et à très hautes performances, Thèse de doctorat de l'ENPC, spécialité Matériaux et Structures.
- [LER 95] Le Roy R., Déformations instantanées et différées des bétons à hautes performances – Etude paramétrique en fonction de la formulation – Proposition de modèles simplifiés, Thèse de doctorat, Ecole nationale des ponts et chaussées, 1995, repris dans Etudes et Recherches des LPC, OA 22 (1996).
- [MUL 2013] H. Muller, I. Anders, R. Breiner, M. Vogel, « Concrete: treatment of types and properties in fib Model Code 2010 », *Structural Concrete* 14 (2013), No. 4.
- [NAG 86] Nagamatsu, S., Sato, Y., Takeda, Y., « Creep Function for Aging Concrete », Fourth RILEM International Symposium on Creep and Shrinkage of Concrete: Mathematical Modeling Ed. by Z.P. Bazant, 1986 pp.743-754.
- [SHR 89] Shrivatharan, S., « *Structural Effects of Creep and Shrinkage on Concrete Structures* », M.E. thesis, Civil Engineer, University Auckland (1989).
- [TOR 2015] J.M. Torrenti, F. Benboudjema, On the very long term delayed behaviour of biaxially prestressed structures: the case of the containments of nuclear power plants, *Concreep10*, 2015.
- [VAN 2013] M. Vandamme, F. Ulm, Nanoindentation investigation of creep properties of calcium silicate hydrates, *Cement and Concrete Research* 52 (2013) 38–52.