
Réinterprétation des essais de fluage propre du béton à très long terme

Jean Michel Torrenti¹

¹ Université Paris Est, IFSTTAR, Champs sur Marne, France, jean-michel.torrenti@ifsttar.fr

RÉSUMÉ. La prédiction des déformations différées des bétons à très long terme est particulièrement importante pour les structures précontraintes. Parmi les composantes de ces déformations, il y a le fluage propre, déformation sous charge du béton, sans échange d'eau avec l'extérieur. L'analyse des résultats expérimentaux indique que cette composante peut s'exprimer sous forme logarithmique. Toutefois, certains essais à très long terme semblent indiquer une déviation par rapport à cette tendance. L'objectif de cet article est de montrer que ces déviations peuvent s'expliquer par des artefacts expérimentaux (séchage parasite ou lixiviation du béton).

ABSTRACT. The prediction of delayed deformations of concrete at very long term is particularly important for prestressed structures. Among the components of these deformations, there is the basic creep, deformation of the concrete under load, without exchange of water with the environment. The analysis of the experimental results indicates that this component can be expressed in logarithmic form. However, some very long term tests seem to indicate a deviation from this trend. The aim of this article is to show that these deviations can be explained by experimental artefacts (parasitic drying or leaching of concrete).

MOTS-CLÉS : béton, fluage propre, essai.

KEY WORDS : concrete, basic creep, test.

1. Introduction

La prédiction des déformations différées des bétons à très long terme est particulièrement importante pour les structures précontraintes comme les ponts ou les enceintes de centrales nucléaires car elles peuvent affecter leur durée de service. L'analyse du comportement de ce type d'ouvrage montre en effet que les déformations différées ne sont pas asymptotiques [BAZ 11], [SEL 14], [BEN 15]. Les déformations différées de ces structures dépendent de la relaxation de l'acier et des déformations différées du béton. Classiquement, ces dernières sont décomposées en retrait endogène, retrait de dessiccation, fluage propre et fluage de dessiccation.

Concernant le fluage propre, un consensus semble se faire sur le fait que la complaisance incluant la déformation élastique et la déformation de fluage propre peut s'exprimer de la manière suivante :

$$J(t_0, t - t_0) = \frac{1}{E(t_0)} + \frac{1}{\beta_1 C} \log \left(1 + \frac{t - t_0}{\beta_2 \tau(t_0)} \right) \quad [1]$$

où t_0 est l'âge de chargement, E le module d'Young, C un paramètre indépendant de t_0 , τ un temps dépendant de t_0 , et β_1 et β_2 des paramètres d'ajustement (valeurs par défaut égales à 1).

Cette relation, de structure similaire à celle proposée pour le code model 2010 de la fib [MUL 13], a été comparée à de nombreux résultats expérimentaux et permet de bien représenter le comportement de la plupart des essais disponibles [LER 17], [TOR 15]. Toutefois, sur le très long terme (après 1000 jours), certains résultats expérimentaux semblent s'écarter de cette relation (en donnant une déformation qui est plus grande que celle prédite à partir de la relation 1, cf. figures 1 et 2). L'objet de cet article est d'analyser les causes d'origine matériau pouvant expliquer cette déviation (nous supposons ici que le système de maintien d'une charge constante et celui de mesure des déformations fonctionnent et ne sont pas à l'origine de ces phénomènes ; de même, dans le cas du fluage propre, l'effet d'un retrait de carbonatation est écarté).

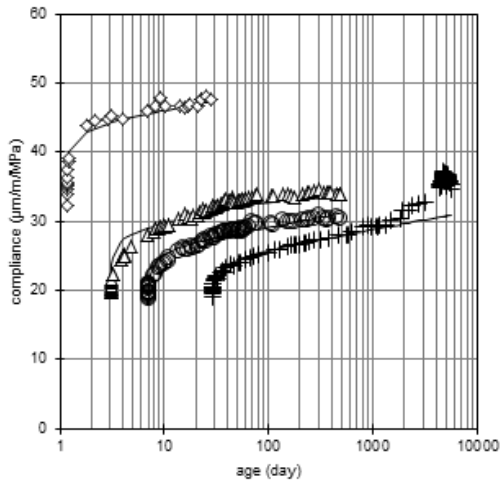


Figure 1. Compliance de fluage propre, béton B2 ($e/c=0,33$) chargé à 1, 3, 7 et 28 jours [LER 17]. On note, pour l'essai chargé à 28 jours et se déroulant sur plus de 10 ans, un écart qui apparaît entre la prédiction à l'aide de la relation 1 et les mesures.

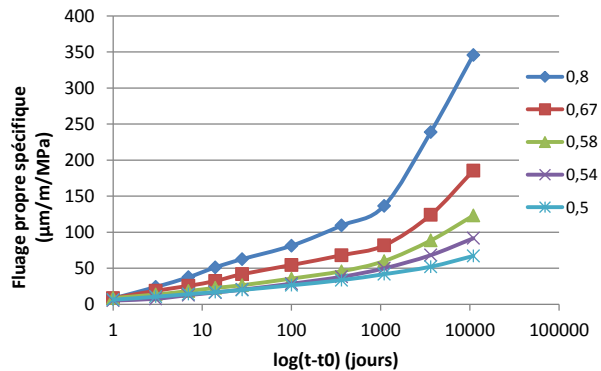


Figure 2. Fluage propre spécifique, essai de Brooks, granulats de North Notts [BRO 05]. L'essai a duré 30 ans et on constate une accélération des déformations par rapport au logarithme du temps sur le très long terme, surtout pour les e/c les plus faibles.

2. Une cause intrinsèque ?

Si un phénomène parasite n'est pas impliqué (voir paragraphes suivants), l'accélération du fluage propre peut être due à un phénomène intrinsèque, par exemple une redistribution des contraintes des C-S-H vers les granulats conduisant à des non linéarités [SMI 13] ou bien un couplage fluage-endommagement (lié à une microfissuration induite par le fluage) [TOR 08], [TOR 17]. Dans les deux approches, il est possible de caler les paramètres des modèles afin de retrouver cette accélération. Toutefois, sur ouvrages, cette accélération n'apparaît pas : le comportement global semble évoluer avec le logarithme du temps [BAZ 11] et si les modèles n'arrivent pas à simuler ce comportement c'est parce qu'ils prédisent un comportement asymptotique borné. Il paraît donc important d'évaluer si le comportement constaté n'est pas un artefact.

3. Un défaut de l'essai de fluage propre ?

Pour réaliser un essai de fluage propre, il existe deux grandes familles de méthodes afin d'éviter le séchage du béton : soit les éprouvettes sont recouvertes d'une couche d'étanchéité, soit les éprouvettes sont conservées dans l'eau (remarque : ces deux conditions ne sont en fait pas équivalentes ; en effet, notamment pour des bas rapports eau sur ciment – donc pour les BHP et BTHP, l'autodessiccation due à la réaction d'hydratation conduit à des humidités internes pouvant descendre jusqu'à 75% [YSS 99], ce qui peut limiter l'hydratation [FLA 11], alors que, bien sûr, dans le cas de la conservation dans l'eau, l'humidité relative interne reste à 100%). Nous allons examiner les phénomènes pouvant affecter le comportement à long terme dans les deux cas.

2.1 Essai avec revêtement d'étanchéité

Dans cet essai les éprouvettes sont protégées de la dessiccation à l'aide d'un revêtement appliqué en surface. Plusieurs techniques sont possibles comme l'application d'une résine, de feuilles d'aluminium auto-collant, voire d'un mix des deux. Toutefois, la tenue de cette étanchéité au cours du temps est toujours un problème très difficile à résoudre [ATT 89], [TOU 99]. Ainsi, dans le cas des deux couches d'aluminium auto-collant, Toutlemonde et Le Maou [TOU 99] constatent que la perte d'eau s'accélère au cours du temps et mesurent une perte de masse d'environ 0,4% au bout d'environ 2 ans.

Comme le fluage résulte de la différence entre la déformation totale et le retrait, si celui est mesuré en parallèle au fluage et que les éprouvettes ont la même protection pour les deux essais, le retrait de dessiccation n'intervient pas. Mais souvent l'essai de retrait endogène est arrêté : dans les essais de Le Roy [LER 17] c'était le cas (arrêt après 1300 jours). L'écart visible sur la figure 1 entre une relation en $\log(t-t_0)$ et les mesures est de l'ordre de $4 \cdot 10^{-6}/\text{MPa}$ (pour une durée entre 1000 jours et 4000 jours environ) et cette valeur est tout à fait compatible avec une déformation due à un retrait et un fluage de dessiccation.

2.2 Essai avec conservation dans l'eau

Dans ce type d'essai les éprouvettes sont conservées dans l'eau. L'explication de l'accélération ne peut donc pas être due à un séchage. Par contre, la conservation dans l'eau peut induire en peau une lixiviation progressive des hydrates : portlandite d'abord puis C-S-H. Bien sur ce phénomène est très lent et ne se remarque pas sur un essai très court. De même, si l'eau n'est pas renouvelée elle se sature en calcium et la lixiviation est très ralentie. Dans les articles de Brooks, malheureusement il n'est pas indiqué si l'eau est renouvelée mais une communication personnelle avec le professeur Forth (travaillant dans le même laboratoire que Brooks) a permis d'établir que l'eau de conservation des essais de fluage était renouvelée tous les 3 mois environ. Il est donc certain qu'il y a eu de la lixiviation. Dans ce cas un couplage avec le fluage existe [TOR 08] et comme le rayon des éprouvettes de Brooks n'était que de 38mm il est vraisemblable que l'effet de la lixiviation est important.

Pour estimer cet effet, nous faisons l'hypothèse que la zone lixiviée ne participe plus au fonctionnement mécanique de la section i.e. lorsque le matériau se lixivie, la contrainte appliquée au matériau sain augmente ce qui induit une non linéarité apparente du fluage (avec éventuellement, lorsque l'épaisseur lixiviée devient très importante, une non linéarité due au couplage avec l'endommagement [TOR 08]).

En supposant que la profondeur lixiviée x_d s'exprime par la relation suivante :

$$x_d = k\sqrt{t} \quad [2]$$

alors, la contrainte appliquée au matériau sain évolue comme :

$$\sigma(t) = \sigma(t_0) \frac{\pi R^2}{\pi(R - k\sqrt{t})^2} \quad [3]$$

où R est la rayon de l'éprouvette.

En utilisant la relation de l'équation 1 pour le fluage et en se plaçant dans le cadre du principe de superposition, on peut alors modéliser l'effet de la lixiviation. Kamali et al. [KAM 08] ont proposé une relation donnant le paramètre k de l'équation 2 en fonction du e/c. Ce paramètre doit être corrigé pour tenir compte de l'effet de tortuosité apporté par les granulats [NGU 06] et sera ajusté sur les essais de Brooks :

$$k = k_0 \ln\left(8,6 \frac{e}{c}\right) \quad [4]$$

La simulation des essais de Brooks suppose que, à partir de la relation 1, on peut établir la valeur des paramètres du fluage propre sur la partie initiale des courbes i.e. avant 1000 jours. Au-delà, il faut tenir compte de la lixiviation en recalculant la contrainte à chaque pas de temps et en appliquant le principe de superposition. La figure 3 montre que la lixiviation, avec un jeu de paramètres compatible avec ce que l'on trouve dans la littérature permet d'expliquer la non linéarité du fluage propre à très long terme.

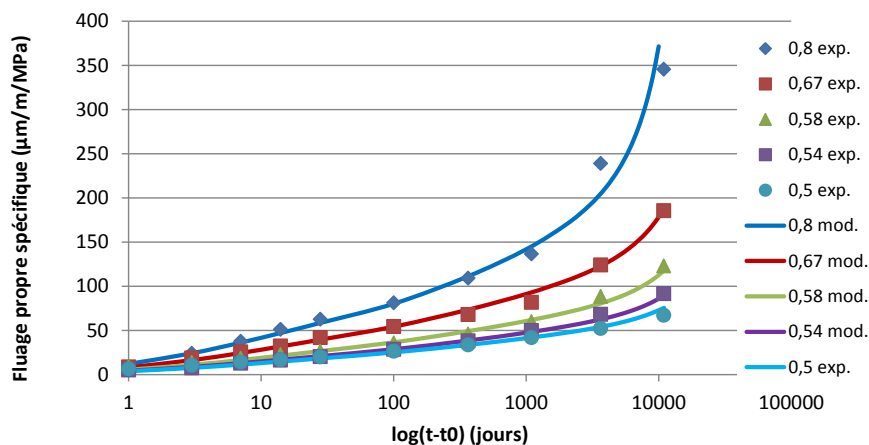


Figure 3. Comparaison résultats expérimentaux de Brooks et modélisation du fluage prenant en compte la lixiviation du béton.

3. Conclusions

Le fluage propre du béton peut être exprimé sous la forme d'une fonction logarithmique du temps depuis le chargement. Les écarts constatés à très long terme (accélération du fluage au-delà de 1000 jours) sont explicables par d'autres phénomènes physiques liés aux conditions de conservation : séchage dans le cas d'une conservation sous revêtement d'étanchéité et lixiviation dans le cas d'une conservation dans l'eau.

4. Bibliographie

- [ATT 89] A. ATTOLOU, A. BELLOC, J.M. TORRENTI, "Méthodologie pour une nouvelle protection du béton vis à vis de la dessiccation", *Bulletin de Liaison des LPC*, n°164, Nov.-Dec. 89.
- [BAZ 11] BAZANT Z.P., HUBLER M.H., YU Q., « Excessive Creep Deflections: An Awakening », *Concrete International*, August 2011, p. 44-46.
- [BEN 15] F. BENBOUDJEMA, J.M. TORRENTI, On the very long term delayed behaviour of biaxially prestressed structures: the case of the containments of nuclear power plants, *Concreep10 conference*, Vienna, 2015.
- [BRO 05] BROOKS J J (2005) 30-Year creep and shrinkage of concrete. *Mag. Concr. Res.* 57(9):545-556
- [FLA 11] R.J. FLATT, G.W. SCHERER, J.W. BULLARD, Why alite stops hydrating below 80% relative humidity, *Cement and Concrete Research* 41 (2011) 987–992
- [KAM 08] S. KAMALI, M. MORANVILLE, S. LECLERQ, Material and environmental parameter effects on the leaching of cement pastes: Experiments and modelling, *Cement and concrete research*, (2008) 38 (4), 575-585
- [LER 17] R. LE ROY, F. LE MAOU, J.M. TORRENTI, Long term basic creep behavior of high performance concrete. Data and modelling, *Materials and structures*, (2017) 50:85, DOI 10.1617/s11527-016-0948-8
- [MUL 13] 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
- [SEL 14] SELLIN J.P., BARTHÉLÉMY J.F., TORRENTI J.M., BONDONET G., Delayed deformations of segmental prestressed concrete bridges: the case of the Savines Bridge, *Proceedings of the Intern. Conference on Ageing of Materials & Structures*, Delft 26 – 28 May 2014
- [SMI 13] V. ŠMILAUER, M. LEPSŠ & M. GREGOROVÁ, Updating B3 model for long-term basic creep, *Life-Cycle and Sustainability of Civil Infrastructure Systems – Strauss, Frangopol & Bergmeister (Eds)*, 2013 Taylor & Francis Group
- [TOR 08] J.M. TORRENTI, V. H. NGUYEN, H. COLINA, LE MAOU F., F. BENBOUDJEMA, F. DELERUYELLE, Coupling between leaching and creep of concrete, *Cement and concrete research*, 38 (2008) 816–821.
- [TOR 15] J.M. TORRENTI, R. LE ROY, Analysis and modelling of basic creep, *Concreep10 conference*, Vienna, 2015
- [TOR 17] J.M. TORRENTI, Basic creep of concrete - Coupling between high stresses and elevated temperatures, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2017, DOI: 10.1080/19648189.2017.1280417
- [TOU 99] TOUTLEMONDE F., LE MAOU F., Protection des éprouvettes de béton vis-à-vis de la dessiccation - Le point sur quelques techniques de laboratoires. *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, 1999, 203:105-119
- [YSS 99] M.P. YSSORCHE, J.P. OLLIVIER, La microfissuration d'autodessiccation et la durabilité des BHP et BTHP, *Materials and Structures*, vol. 32, 1999, p. 14-21.