

# Prédiction de la cinétique à long terme du retrait endogène des matériaux cimentaires à partir de l'auto-dessiccation

**A. AILI<sup>a</sup>, M. VANDAMME<sup>b</sup>, J.-M. TORRENTI<sup>c</sup>, B. MASSON<sup>d</sup>**

a. Université Paris-Est, Laboratoire Navier (UMR 8205), CNRS, École des Ponts ParisTech, IFSTTAR, F-77455 Marne-la-Vallée, France ; email : abudushalamu.aili@enpc.fr

b. Université Paris-Est, Laboratoire Navier (UMR 8205), CNRS, ENPC, IFSTTAR, F-77455 Marne-la-Vallée, France ; email : matthieu.vandamme@enpc.fr

c. Université Paris-Est, IFSTTAR, 14 Boulevard Newton, F-77420 Champs-sur-Marne, France ; email : jean-michel.torrenti@ifsttar.fr

d. EDF-DIN-SEPTEN, Division GS - Groupe Génie Civil, 12-14 Avenue Dutriévoz, F-69628, Villeurbanne, France ; email : benoit.masson@edf.fr

## Résumé :

*Les matériaux cimentaires se déforment au cours du temps en absence de chargement même s'il n'y a pas d'échange d'humidité avec le milieu extérieur. Cette déformation dépendant du temps est connue sous le nom de retrait endogène. Cet article a pour objectif de prédire la cinétique à long terme de ce retrait endogène en supposant que le retrait endogène peut être considéré comme un fluage sous l'effet capillaire dû à l'auto-dessiccation. Nous commençons par caractériser l'auto-dessiccation par une relation entre le rapport eau-sur-ciment et l'humidité relative à long terme en conditions endogènes en analysant les mesures expérimentales dans la littérature. Puis nous calculons la force capillaire due à l'auto-dessiccation en utilisant la loi de Kelvin dans le cadre de la poromécanique. En combinant cette force capillaire avec le module de fluage du gel de silicate de calcium hydraté (C-S-H), une limite supérieure et une limite inférieure de la cinétique à long terme du retrait endogène du gel de C-S-H sont estimées. Enfin, en comparant la cinétique à long terme de retrait endogène avec les résultats expérimentaux disponibles dans la littérature, nous vérifions que la prédiction est satisfaisante.*

## Abstract :

*Cement-based materials shrink in absence of load even if there is no water exchange with outside. This time-dependent strain is known as autogenous shrinkage. The objective of the present study is to predict the long-term kinetics of autogenous shrinkage by assuming that the long-term autogenous shrinkage is creep under capillary effects due to self-desiccation. We will start by characterizing the self-desiccation by a relation between water-to-cement ratio and long-term relative humidity under autogenous condition by analyzing data available in literature. Then, we compute the capillary force due to the self-desiccation by using Kelvin's law in the framework of poromechanics. By combining this capillary force with the creep modulus of calcium silicate hydrate (C-S-H) gel, upper and lower bounds of long-term kinetics of autogenous shrinkage of C-S-H gel are estimated. At the end, by comparing the long-term kinetics*

*of autogenous shrinkage from experimental results available in literature with the prediction mentioned above, we find the prediction satisfactory.*

## **Mots clefs : Auto-dessiccation, retrait endogène, effet capillaire, homogénéisation, fluage**

### **1 Introduction**

Le retrait de dessiccation des matériaux cimentaires est considéré par plusieurs auteurs [6, 8] comme un fluage sous l'effet capillaire dû à la dessiccation. En revanche, il y a peu d'études qui considèrent le retrait endogène des matériaux cimentaires comme du fluage sous auto-dessiccation [10]. Dans cette étude, nous nous intéressons à la prédiction de la cinétique de retrait endogène à long terme en considérant celui-ci comme un fluage sous auto-dessiccation.

Nous commençons par analyser les données expérimentales dans la littérature sur la décroissance d'humidité relative en conditions endogènes.

Puis nous évaluons dans le cadre poromécanique la force due à l'effet capillaire à l'échelle du gel de C-S-H et des pores capillaires. En prenant cette force capillaire comme l'origine du retrait endogène, et en la combinant avec le module de fluage du gel de C-S-H, on prédit la cinétique à long terme de retrait endogène.

Pour finir, la prédiction est comparée avec les résultats expérimentaux de la littérature.

### **2 Auto-dessiccation**

Au cours de l'hydratation du ciment, la porosité diminue moins rapidement que la quantité d'eau. Donc, l'humidité relative à l'intérieur décroît au cours de l'hydratation s'il n'y a pas d'échange d'eau avec l'extérieur. Powers et al. [16] ont montré que l'hydratation s'arrête lorsque l'humidité relative descend en-dessous d'une certaine valeur voisine de 75%. Par conséquent, l'humidité relative en conditions endogènes se stabilise à une valeur d'équilibre  $h_r^\infty$  à long terme, ce qui est confirmé par des observations expérimentales [3, 12, 15, 20, 21, 19]. En traçant l'humidité relative à long terme  $h_r^\infty$  en fonction du rapport eau-sur-ciment  $w$  (voir Fig. 1), nous obtenons une limite supérieure et une limite inférieure pour l'humidité relative à long terme  $h_r^\infty$  :

- Limite supérieure :  $h_r^+(w) = \min \{0.6 + w, 1\}$
- Limite inférieure :  $h_r^-(w) = \min \{0.66 + 0.45w, 1\}$

### **3 Effet capillaire et cinétique à long terme**

#### **3.1 Effet capillaire**

Cette section a pour objectif de calculer la force capillaire due à l'auto-dessiccation. Pour cela, nous considérons le béton comme un matériau multi-échelle et adoptons la même microstructure que dans [1] :

- À l'échelle la plus grande du béton, les granulats sont considérés comme des inclusions sphériques qui ne fluent pas et sont entourées par la matrice de pâte de ciment qui flue ;

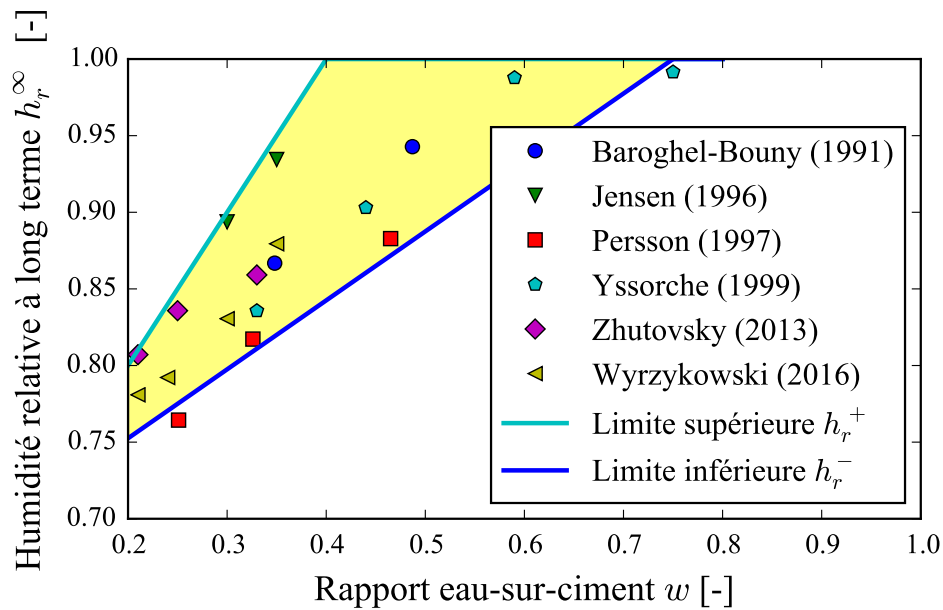


FIGURE 1 – Humidité à long terme due à l’auto-dessiccation en fonction du rapport eau-sur-ciment.

- À l’échelle en dessous, c.-à-d. à l’échelle de la pâte de ciment, on considère la portlandite, l’hydrate de sulfoaluminat de calcium et le clinker non hydraté comme des inclusions sphériques qui ne fluent pas et sont entourées par une matrice composée du mélange du gel de C-S-H et des pores capillaires. Cette matrice flue ;
- À l’échelle encore plus basse, c.-à-d. à l’échelle du mélange du gel de C-S-H et des pores capillaires, le gel de C-S-H est considéré comme une matrice qui flue et entoure les pores capillaires qui sont considérés sphériques.

Nous nous plaçons à l’échelle du mélange du gel de C-S-H et de pores capillaires. Selon la théorie de la pomécanique, la contrainte capillaire à cette échelle est égale à  $\sigma_h = bS_lP_c$  [7] où  $b$ ,  $S_l$ ,  $P_c$  sont respectivement le coefficient de Biot, le degré de saturation et la pression capillaire. Pour un rapport eau-sur-ciment donné, nous supposons le degré d’hydratation final  $\xi^\infty = 1 - \exp(-3.3w)$  [18] et calculons d’abord le volume  $V_{cap}$  de pores capillaires et le volume  $V_{gel}$  du gel de C-S-H avec le modèle de Powers [16]. Ainsi nous obtenons la porosité capillaire  $\phi_c$  à l’échelle considérée, qui va nous permettre de calculer le coefficient de Biot  $b$  et le degré de saturation  $S_l$  :

- Le coefficient de Biot est calculé en deux étapes d’homogénéisation avec l’équation dérivée par Ghabezloo [9]. D’abord nous supposons que la porosité du gel de C-S-H est égale à  $\phi_{gel} = 0.32$  (valeur moyenne des porosités de C-S-H de haute densité et de basse densité [11]). En prenant le coefficient de Poisson du gel de C-S-H égal à 0.2 [1], par le schéma d’homogénéisation auto-cohérent, nous obtenons le coefficient de Biot du gel de C-S-H  $b_{gel} = 2\phi_{gel}$ . Ensuite, par le schéma de Mori-Tanaka, nous obtenons le coefficient de Biot du mélange du gel de C-S-H avec les pores capillaires  $b = 1 - \frac{1-\phi_c}{1+\phi_c}(1 - b_{gel})$ .
- Le degré de saturation  $S_l$  est calculé comme le rapport du volume d’eau restant sur le volume des pores.
- La dépression capillaire est calculée avec la loi de Kelvin,  $P_c = \frac{\rho_w RT}{M_w} \ln(h_r^\infty)$ , où  $\rho_w$ ,  $M_w$ ,  $R$ ,  $T$  sont respectivement la densité de l’eau, la masse molaire de l’eau, la constante universelle des gaz parfaits et la température.

## 3.2 Prédiction de la cinétique à long terme

Dans cette section, on considère que le retrait endogène à long terme est la somme de la déformation élastique et du fluage sous la force capillaire due à l'auto-dessiccation. Plusieurs auteurs [13, 5, 14] ont observé que le fluage propre (c.-à-d. la déformation différée du béton sous charge constante en conditions endogènes moins le retrait endogène) évolue comme une fonction logarithmique du temps à long terme. Donc, la cinétique à long terme de retrait endogène est donnée, sur une échelle logarithmique, par la pente du fluage sous la contrainte  $\sigma_h$  calculée ci-dessus.

Pour un test de fluage sous une contrainte constante quelconque  $\sigma_0$ , le module de fluage est défini comme la valeur de  $\sigma_0/(t d\varepsilon/dt)$  à long terme [17]. En analysant des résultats expérimentaux de fluage propre, Aili et al. [2] ont trouvé que le module volumétrique  $C_{gel}^K$  de fluage du gel de C-S-H (défini comme la valeur de  $\sigma_v/(t d\varepsilon^v/dt)$  à long-terme où  $\sigma_v$  et  $\varepsilon^v$  sont respectivement contrainte volumétrique et déformation volumétrique) est égal approximativement à 13 GPa. Combinant cette valeur avec la contrainte capillaire  $\sigma_h$  calculée ci-dessus, on obtient la pente à long terme de retrait endogène à l'échelle du gel de C-S-H :

$$t \frac{d\varepsilon_{gel}^v}{dt} = \frac{b S_l P_c}{C_{gel}^K} \quad (1)$$

$\varepsilon_{gel}^v$  est le retrait volumétrique. Comme le retrait endogène est isotrope, en notant le retrait endogène dans une direction principale comme  $\varepsilon_{gel}$ , nous avons la relation  $\varepsilon_{gel}^v = 3\varepsilon_{gel}$ .

## 3.3 Comparaison avec les résultats expérimentaux de la littérature

Dans cette section, nous allons comparer la cinétique à long terme des résultats expérimentaux de retrait endogène avec la prédiction par l'équation 1. Nous analysons d'abord les résultats expérimentaux de retrait endogène de la littérature. De la base de donnée collectée par le Prof. Bažant et ses collaborateurs [4], nous avons sélectionné des tests de retrait endogène répondant aux critères suivants : le ciment utilisé est un ciment Portland ordinaire ; il n'y a pas d'ajout de fumée de silice, de cendre volante, de filler, de laitier ; la durée du test est assez longue. N'ayant pas d'information sur la condition d'étanchéité, nous supposons que les tests dans cette base de données sont bien réellement en condition endogène. En traçant le retrait endogène de ces données sélectionnées en fonction du temps, nous observons que le retrait endogène évolue comme une fonction logarithmique du temps à long terme, lorsque le rapport eau-sur-ciment est plus faible que 0.6. Ainsi, nous calibrons sur cette cinétique à long terme l'équation suivante :

$$\varepsilon_{sh}(t) = \alpha_{sh} \log(t) + \beta_{sh} \quad (2)$$

où  $\varepsilon_{sh}$  et  $\alpha_{sh}$  sont respectivement le retrait endogène et la pente à long terme en échelle logarithmique. Afin de comparer avec la cinétique à long terme prédite par l'équation 1, nous menons deux étapes d'homogénéisation viscoélastique dans le même esprit que celles de [1] et obtenons :

$$\frac{d\varepsilon_{gel}^v}{d(\log(t))} = 3\alpha_{sh} \left( \frac{1+f_a}{1-f_a} \right) \left( \frac{1+f_b}{1-f_b} \right) \left( \frac{1-\phi_c}{1+\phi_c} \right) \quad (3)$$

où  $f_a$  est la fraction volumique des granulats ;  $f_b$  la fraction volumique des portlandite, hydrate de calcium sulfoaluminat et clinker non hydraté ;  $\phi_c$  est la fraction volumique des pores capillaires. Toutes ces fractions volumiques peuvent être calculées en combinant la formulation de béton avec le modèle d'hydratation de Powers [16]. La figure 2 compare la cinétique à long terme, obtenue à partir des résultats expérimentaux et de l'équation 3, avec la cinétique prédite par l'équation 1. Elles sont du même ordre de grandeur et montrent la même tendance lorsque le rapport eau-sur-ciment diminue, et nous considérons donc la prédiction satisfaisante.

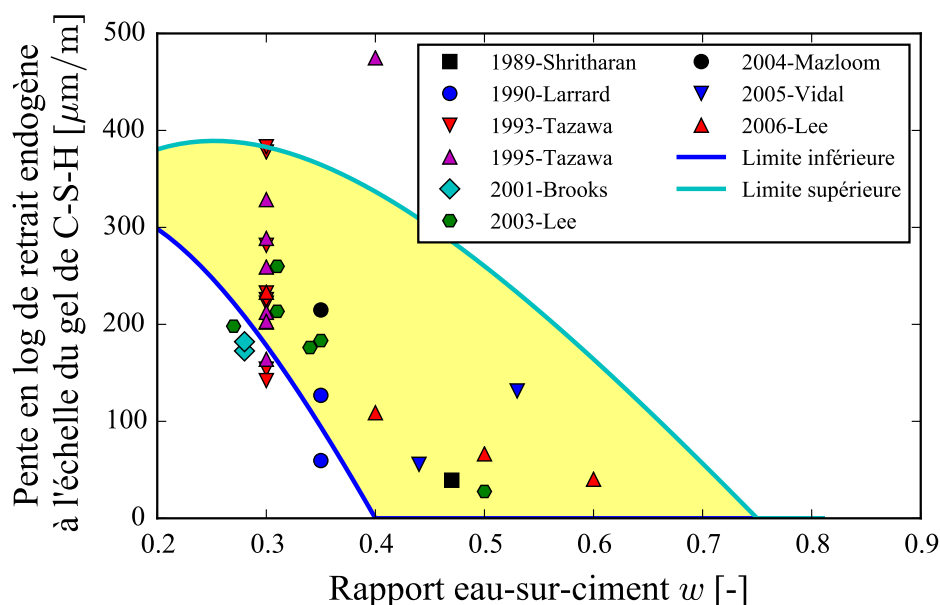


FIGURE 2 – Comparaison de la pente en échelle logarithmique à long terme prédite par l'équation 1 avec celle obtenue à partir des tests de retrait endogène. La limite supérieure de la pente est estimée en prenant la dépression capillaire  $P_c$  due à la limite inférieure d'humidité relative de la figure 1 ; La limite inférieure de la pente est estimée en prenant la dépression capillaire  $P_c$  due à la limite supérieure d'humidité relative de la figure 1.

## 4 Conclusion

Nous avons d'abord estimé l'auto-dessiccation en fonction du rapport eau-sur-ciment en analysant les mesures d'humidité relative en conditions endogènes. Puis, en supposant que le retrait endogène est la somme de la déformation élastique et du fluage sous l'effet capillaire dû à l'auto-dessiccation, nous avons prédit sa cinétique à long terme. Finalement, cette prédiction est comparée avec les résultats expérimentaux de la littérature et la comparaison est satisfaisante. Les conclusions suivantes sont obtenues :

- En conditions endogènes, plus le rapport eau-sur-ciment est faible, plus l'humidité relative est faible à un instant donné ;
- Le retrait endogène des bétons dont le rapport eau-sur-ciment est plus bas que 0.6, évolue comme une fonction logarithmique du temps à long terme ;
- La cinétique de retrait endogène à long terme peut être prédite en considérant le retrait comme du fluage sous l'effet capillaire dû à l'auto-dessiccation.

## Références

- [1] A. Aili, M. Vandamme, J.-M. Torrenti, B. Masson, J. Sanahuja, Time evolutions of non-aging viscoelastic Poisson's ratio of concrete and implications for creep of C-S-H, *Cement and Concrete Research*, 90 (2016) 144-161.
- [2] A. Aili, M. Vandamme, J.-M. Torrenti, B. Masson, J. Sanahuja, On a poromechanical approach to long-term autogenous shrinkage, in : 6th Biot conference on poromechanics, accepted.
- [3] V. Baroghel-Bouny, Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons - méthodes, analyse, interprétations, Thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, 1994.
- [4] Z. P. Bažant, G. H. Li, Comprehensive database on concrete creep and shrinkage, *ACI Materials Journal*, 05(6) (2008) 635–637.
- [5] Z. P. Bažant, M. H. Hubler, & Q. Yu, Pervasiveness of excessive segmental bridge deflections : Wake-up call for creep. *ACI Structural Journal* 108(6)(2011), 766.
- [6] F. Benboudjema, F. Meftah, J.-M. Torrenti, A viscoelastic approach for the assessment of the drying shrinkage behaviour of cementitious materials, *Materials and Structures*, 40 (2) (2007) 163–174.
- [7] Coussy, O., et al., The equivalent pore pressure and the swelling and shrinkage of cement-based materials, *Materials and Structures*, 37(2004)15–20.
- [8] C. Di Bella, M. Wyrzykowski, P. Lura, Evaluation of the ultimate drying shrinkage of cement-based mortars with poroelastic models, *Materials and Structures*, 50 (1) (2017) 52.
- [9] S. Ghabezloo, Association of macroscopic laboratory testing and micromechanics modelling for the evaluation of the poroelastic parameters of a hardened cement paste, *Cement and Concrete research*, 40(8) (2010) 1197-1210.
- [10] C. Hua, P. Acker, P. & A. Ehrlacher, Analyses and models of the autogenous shrinkage of hardening cement paste : I. Modelling at macroscopic scale, *Cement and Concrete Research*, 25(7)(1995)1457-1468.
- [11] H. M. Jennings, A model for the microstructure of calcium silicate hydrate in cement paste, *Cement and Concrete Research*, 30(1) (2000) 101-116.
- [12] O. Jensen, P. Hansen, Autogenous deformation and change of the relative humidity in silica fume-modified cement paste, *ACI Materials Journal*, 93 (6) (1996) 539–543.
- [13] R. Le Roy, Déformations instantanées et différées des bétons à hautes performances Thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, 1995.
- [14] 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.
- [15] B. Persson, Moisture in concrete subjected to different kinds of curing, *Materials and Structures*, 30(9) (1996)533-544.
- [16] T. C. Powers and T. L. Brownyard. Studies of the hardened paste by means of specific-volume measurements. *PCA Bulletin*, Portland Cement Association (1947) 669–712.
- [17] M. Vandamme, J.-F. Ulm, Nanogranular origin of concrete creep, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(26), (2009) 10552-10557.
- [18] V. Waller, Relations entre composition des bétons, exothermie en cours de prise et résistance en compression, Thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, 1999.

- [19] M. Wyrzykowski and P. Lura, Effect of relative humidity decrease due to self-desiccation on the hydration kinetics of cement, *Cement and Concrete Research* 85 (2016) 75-81.
- [20] M.-P. Yssorche-Cubaynes and J.-P. Ollivier, La microfissuration d'autodesiccation et la durabilité des BHP et BTHP, *Materials and Structures*, 32(1) (1999) 14-21.
- [21] S. Zhutovsky and K. Kovler, Hydration kinetics of high-performance cementitious systems under different curing conditions, *Materials and Structures*, 46(10) (2013)1599-1611.