
Influence de la température et du rapport Eau/Ciment sur le retrait empêché des pâtes de ciment au jeune âge

A. Pertué, P. Mounanga, A. Khelidj

*GeM – UMR CNRS 6183, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique
IUT de Saint-Nazaire, 58 Rue Michel Ange, BP 420, 44606 Saint-Nazaire cedex*

Arnaud.pertue@univ-nantes.fr, Pierre.mounanga@univ-nantes.fr

Abdelhafid.khelidj@univ-nantes.fr

RÉSUMÉ. Cet article présente une étude sur le retrait endogène empêché de pâtes de ciment au jeune âge en conditions de température contrôlée. Au cours de ce travail, deux rapports Eau/Ciment ($E/C = 0,3$ et $0,4$) ainsi que trois températures de cure ($T = 20, 30$ et 40°C) ont été étudiés. La méthode de mesure du retrait empêché est celle de l'anneau. Le dispositif expérimental a été équipé d'un système de régulation thermique par circulation d'eau afin de conserver l'échantillon en conditions quasi-isothermes. Les résultats obtenus montrent que la température de cure joue un rôle important sur l'apparition de la première fissure. De plus, la diminution du rapport E/C et l'augmentation de la rigidité de l'anneau central se traduisent par un raccourcissement de l'âge de fissuration.

ABSTRACT. This study deals with autogenous restrained deformation of cement pastes at early age in controlled-temperature conditions. Two water-to-cement ratios ($W/C = 0.3$ and 0.4) and three curing temperatures ($T = 20, 30$ and 40°C) are investigated. The measurement method for restrained shrinkage is the ring-test method. The experimental device is equipped with a peripheral water circulation system to keep the specimen in quasi-isothermal conditions. The results show that the curing temperature significantly influences the appearance of the first cracking. Furthermore, the decrease of the water-to-cement ratio and the increase of the ring rigidity cause a diminution of the cracking age.

MOTS-CLÉS : retrait empêché, fissuration endogène, isotherme, jeune âge, hydratation.

KEYWORDS: restrained shrinkage, autogenous cracking, isothermal, early age, hydration.

1. Introduction

Aux jeune et très jeune âges, c'est-à-dire au cours des premiers jours qui suivent la prise, les matrices cimentaires sont soumises à d'importantes variations volumiques d'origines différentes (thermique, hydrique ou physico-chimique). Le retrait endogène et les déformations d'origine thermique sont particulièrement problématiques pour la durabilité des bétons à hautes performances dont le rapport Eau/Ciment est faible. L'amplitude de leurs déformations au jeune âge est en effet très élevée et le risque de fissuration précoce de ces matériaux est important.

Dans la plupart des ouvrages ou parties d'ouvrages en béton, les évolutions dimensionnelles du matériau peuvent être empêchées, et les contraintes internes de traction induites, lorsqu'elles deviennent trop importantes, sont susceptibles d'entraîner une fissuration prématurée. Une connaissance des déformations en conditions libres est insuffisante pour prédire ces fissures. Comme pour le retrait libre, beaucoup de paramètres conditionnent la cinétique et l'amplitude des déformations empêchées : la température de cure, la composition du béton, la géométrie de la pièce, les conditions de séchage, le type de ciment, etc. L'effet de certains de ces paramètres a fait l'objet de précédents travaux de recherche (Grzybowski et Shah, 1990 ; Weiss *et al.* 1999, Weiss et Ferguson, 2001 ; Hossain et Weiss, 2006 par exemple), mais il existe encore peu d'études sur l'influence de la température sur le retrait endogène empêché.

Plusieurs méthodes d'essais existent pour mesurer le retrait empêché des matériaux cimentaires (Bentur et Kovler, 2003). Parmi celles-ci, la méthode de l'essai à l'anneau est une méthode simple et facile à mettre en œuvre ; elle a été utilisée par de nombreux chercheurs (Grzybowski et Shah, 1990 ; Weiss et Ferguson, 2001 ; Weiss et Shah, 2002 ; Shah et Weiss, 2006 ; Turcry *et al.*, 2006) pour quantifier le risque de fissuration des matrices cimentaires. Une récente étude bibliographique de ces travaux a été réalisée par Radlinska *et al.* en 2006.

L'objet du travail présenté dans cet article est d'étudier le retrait empêché en conditions endogènes et quasi-isothermes de matrices cimentaires au jeune âge. L'influence de trois paramètres – la rigidité de l'anneau central, l'influence du rapport Eau/Ciment et l'effet de la température de cure – a été étudiée sur l'âge d'apparition de la première fissure endogène. Le dispositif expérimental mis au point est équipé d'un système de régulation thermique par circulation d'eau et placé dans un caisson en bois entre deux plaques d'aluminium pour l'isoler de l'extérieur.

2. Programme expérimental

2.1. Matériaux

Un ciment Portland CEM I 52.5, constitué à 95% de clinker, a été utilisé. Sa composition de Bogue est donnée au tableau 1. Sa surface spécifique est de 339

m²/kg. Dans cette étude, deux rapports eau/ciment ($E/C = 0,3$ et $0,4$) et trois températures de cure ($T = 20, 30$ et 40°C) ont été étudiés.

Tableau 1. Composition de Bogue du ciment utilisé

Phases du ciment	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	Gypse
Composition massique (%)	60,4	12,2	8,8	8,0	7,4

2.2. Essai à l'anneau quasi-isotherme

Le dispositif de l'essai à l'anneau, schématisé aux figures 1 et 2, est composé de deux anneaux concentriques : un anneau extérieur en PVC et un anneau métallique central reposant sur une plaque en aluminium. Une photographie d'ensemble du système est présentée en figure 3.

Trois dispositifs ont été réalisés avec trois anneaux métalliques différents, en acier, en laiton et en acier inoxydable. Les caractéristiques géométriques et mécaniques de ces anneaux sont précisées dans le tableau 2. La section transversale de l'échantillon étudié est de 40×40 mm.

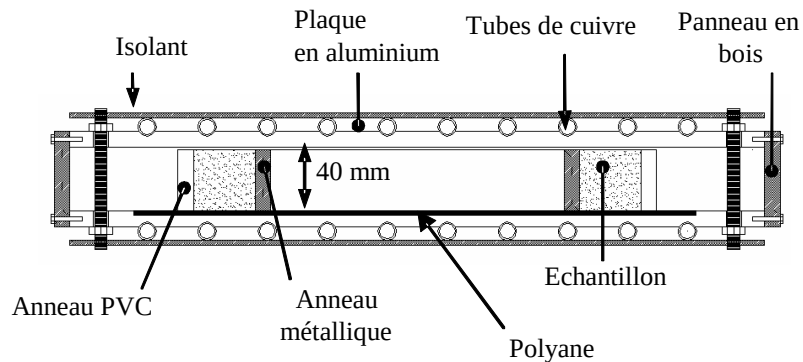


Figure 1. Vue en coupe du dispositif de l'anneau quasi-isotherme

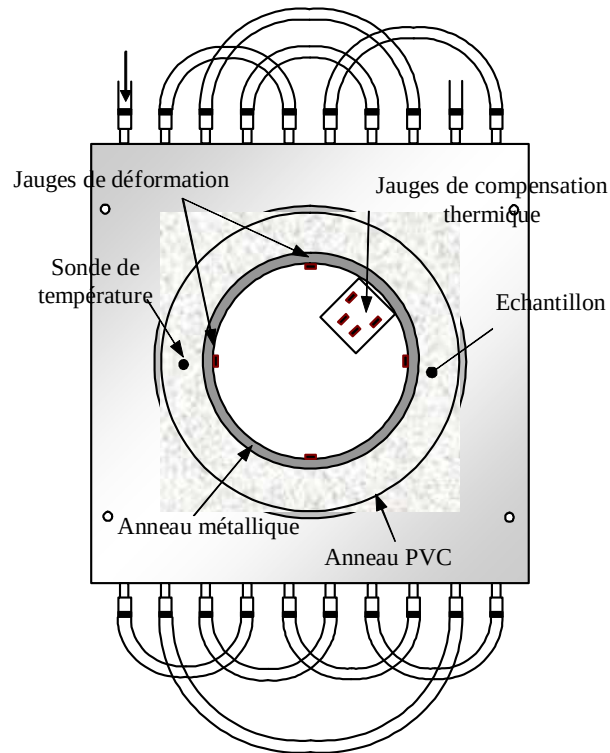


Figure 2. Schéma du dispositif de l'anneau isotherme (vue de dessus)

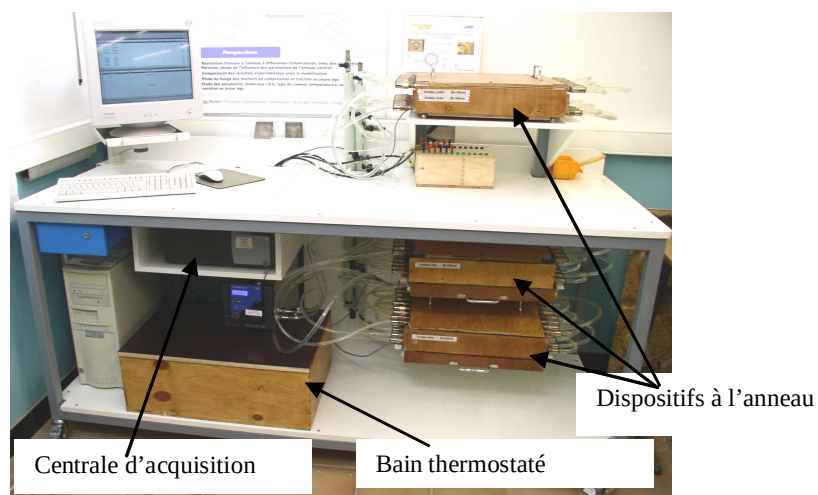


Figure 3. Vue d'ensemble du système expérimental

Tableau 2. *Caractéristiques des anneaux métalliques centraux*

Anneaux	Rayon intérieur (mm)	Rayon extérieur (mm)	Module d'Young (MPa)	Coefficient de Poisson (-)
Laiton	95	105	100 000	0,33
Acier inoxydable	95	105	200 000	0,30
Acier	95	105	211 000	0,30

Les déformations de l'anneau central dues au retrait de la pâte de ciment sont mesurées par 4 jauges de déformation. 4 jauges supplémentaires sont placées au centre de l'anneau pour la compensation thermique. Le contrôle de la température de l'échantillon est assuré par un système de régulation thermique constitué d'un réseau de tubes en cuivre fixés sur deux plaques d'aluminium et connectés à un bain d'eau thermostatée ($\pm 0,1^{\circ}\text{C}$). Pour éviter les pertes thermiques, un isolant est placé sur les tubes en cuivre et chaque anneau est installé dans un coffrage en bois.

2.3. Protocole d'essai

Le système de régulation est enclenché 2 h avant le début de l'essai pour stabiliser la température du dispositif. De l'huile de décoffrage est appliquée sur l'anneau métallique afin de limiter les frottements avec l'échantillon. Pour les mêmes raisons, un film polyane est placé entre la plaque d'aluminium inférieure et l'échantillon. Chaque pâte de ciment est préparée en mélangeant l'eau et le ciment à température ambiante pendant 3 minutes. L'échantillon est alors coulé autour de l'anneau central. Un thermocouple, plongé au centre de l'échantillon, permet de mesurer la température durant l'essai. Celle-ci se stabilise à la température de cure souhaitée ($\pm 2^{\circ}\text{C}$) en 1 h. Une fois le dispositif expérimental scellé, l'acquisition automatique peut commencer. Le temps entre la fin du malaxage et le début de l'acquisition n'excède pas 15 minutes. La température et la déformation de l'anneau central sont enregistrées toutes les 20 minutes. L'essai s'arrête dès l'apparition d'une fissure traversante dans l'échantillon, détectée par un saut brutal dans l'évolution de la déformation de l'anneau métallique.

3. Résultats expérimentaux

3.1. Effet du rapport Eau/Ciment

La fissuration endogène au jeune âge est le résultat de l'interaction entre des phénomènes complexes : d'une part, l'évolution des déformations endogènes du matériau, susceptibles d'engendrer une fissuration et, d'autre part, le développement de la rigidité qui s'oppose à ces déformations. La composition du matériau, et

notamment la quantité d'eau initiale disponible pour l'hydratation du ciment, vont largement conditionner l'évolution de ces propriétés. La figure 4 montre l'effet du rapport E/C sur l'âge de la fissuration, mesuré avec l'anneau en inox à une température de 40°C. La première heure d'essai est marquée par une déformation positive (dilatation) de l'anneau qui s'explique par la mise à l'équilibre thermique de la pâte à la température de cure imposée. On constate une différence d'âge de fissuration de 10 h entre les deux rapports E/C = 0,3 et 0,4. Ce phénomène s'explique tout d'abord par le fait que le retrait endogène se développe plus rapidement pour un rapport E/C plus faible (Baroghel-Bouny *et al.*, 2006) : en effet, la prise du matériau se produit plus précocement (entre 1,3 et 2 h pour la pâte de rapport E/C = 0,3 et entre 1,8 et 2,5 h pour celle à E/C = 0,4, à 40°C) et l'autodessiccation débute plus rapidement et de façon plus intense. Par ailleurs, la rigidité de la pâte de rapport E/C = 0,3 augmente plus rapidement que celle de la pâte à E/C = 0,4 : ainsi, à 24 h, le module d'Young, mesuré par méthode acoustique (Grindosonic®), de la pâte avec E/C = 0,3 à 40°C est de 22,5 GPa tandis qu'il n'est que de 15,8 GPa pour la pâte de rapport E/C = 0,4 à la même température. De ce point de vue, pour une même déformation, les contraintes internes générées dans la pâte de plus faible rapport E/C seront donc plus élevées. Notons enfin que le phénomène de relaxation, qui tend à réduire progressivement les contraintes internes au sein d'un matériau dont les déformations sont empêchées et donc à retarder l'âge de la première fissure, est plus important lorsque le module d'Young est plus faible (Atrushi, 2003).

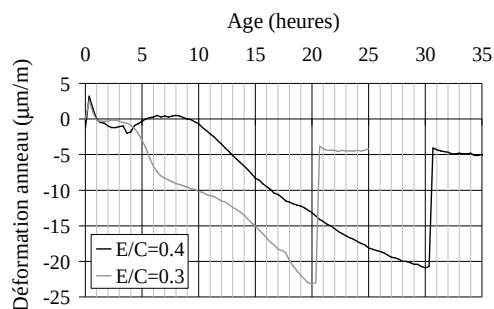


Figure 4. Déformation de l'anneau en inox pour E/C = 0,3 et 0,4 à T = 40°C

3.2. Effet de la température de cure et de la nature de l'anneau

Les paramètres étudiés ici sont la température de cure et la nature de l'anneau. La figure 5 montre les résultats de l'essai à l'anneau obtenus avec la pâte à E/C = 0,3 à 20, 30 et 40°C sur l'anneau en laiton et sur l'anneau en acier, respectivement. On constate que la température de cure a une influence non négligeable sur l'âge de la première fissure. En effet, plus la température de cure est élevée, plus la fissure apparaît tôt. Entre 20 et 40°C, l'âge de la fissure est divisé par 5,7 pour l'anneau en

laiton et par 4,2 pour l'anneau en acier. Ce phénomène est directement lié à la thermoactivation du processus d'hydratation du ciment qui provoque une accélération du retrait endogène (Mounanga *et al.*, 2006) et donc des contraintes internes induites par ces déformations empêchées. Par ailleurs, la déformation à la rupture est deux fois plus importante pour l'anneau en laiton que pour l'anneau en acier (figure 5). Ces différences, attribuées à la différence de module d'Young entre les deux anneaux métalliques centraux (tableau 2), sont directement liées au degré de restriction des déformations des pâtes de ciment : pour une matrice cimentaire donnée, plus ce degré de restriction est élevé, plus l'âge de la première fissuration endogène et la déformation à la rupture seront faibles. Hossain et Weiss ont abouti aux mêmes conclusions sur le retrait empêché de mortiers soumis à la dessiccation (Hossain et Weiss, 2006).

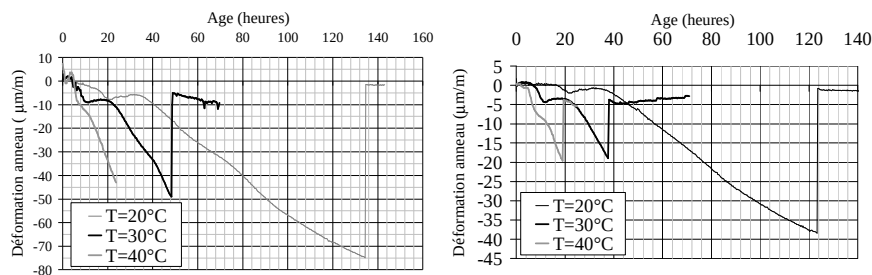


Figure 5. Déformations de l'anneau en laiton (à gauche) et de l'anneau en acier (à droite) pour $E/C = 0,3$ à $T = 20, 30$ et 40°C

4. Conclusions

Au travers de cette étude sur le risque de fissuration endogène précoce des pâtes de ciment mesuré par la méthode à l'anneau, nous avons constaté que :

- la diminution de la quantité d'eau dans la pâte de ciment provoque une diminution de l'âge de la première fissure endogène ; ce phénomène est probablement lié au fait que les déformations endogènes se développent d'autant plus rapidement et plus intensément que la quantité d'eau initiale dans le matériau est plus faible ;
- l'augmentation de la température cause une diminution du temps d'apparition de la première fissure. Ce phénomène est une conséquence directe de la thermoactivation de l'hydratation des pâtes de ciment au jeune âge ;
- une diminution du module d'Young de l'anneau métallique central provoque un retardement de l'apparition de la fissure et une augmentation de la déformation endogène à la rupture de l'échantillon.

5. Bibliographie

- Atrushi D.S., Tensile and compressive creep of early age concrete: Testing and modelling, Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Norvège, 2003.
- Baroghel-Bouny V., Mounanga P., Khelidj A., Loukili A., Rafaï N. "Autogenous deformations of cement pastes: Part II – W/C effects, micro-macro correlations, and threshold values" *Cement and Concrete Research*, vol. 36, n° 1, 2006, p. 123-136.
- Bentur A., Kovler K., "Evaluation of early age cracking characteristics in cementitious systems", *Materials & Structures*, vol. 36, n° 3, 2003, p. 183-190.
- Grzybowski M., Shah S.P., "Shrinkage cracking of fiber reinforced concrete", *ACI Materials Journal*, vol. 87, n° 2, 1990, p. 138-148.
- Hossain A.B., Weiss J., "The role of specimen geometry and boundary conditions on stress development and cracking in the restrained ring test", *Cement and Concrete Research*, vol. 36, n° 1, 2006, p. 189-199.
- Mounanga P., Baroghel-Bouny V., Loukili A., Khelidj A., "Autogenous deformations of cement pastes: Part I – Temperature effects at early age and micro-macro correlations", *Cement and Concrete Research*, vol. 36, n° 1, 2006, p. 110-122.
- Radlinska A., Moon J.H., Rajabipour F., Weiss J., "The ring test: a review of recent developments". In O.M. Jensen, P. Lura, K. Kovler (eds), *Rilem Proc. intern. symp.: Volume changes of hardening concrete, Lyngby (Denmark), 2006*.
- Shah H.R., Weiss J., "Quantifying shrinkage cracking in fiber reinforced concrete using the ring test", *Materials & Structures*, vol. 39, n° 9, 2006, p. 887-899.
- Turcry P., Loukili A., Haidar K., Pijaudier-Cabot G., Belarbi A., "Cracking tendency of self-compacting concrete subjected to restrained shrinkage; experimental study and modelling", *Journal of Materials in Civil Eng.*, vol. 18, n° 1, 2006, p. 46-54.
- Weiss W.J., Yang W., Shah S.P., "Factors influencing durability and early-age cracking in high-strength concrete structures", *ACI SP 189-22 High Performance Concrete: Research to practice, Farmington Hills MI*, 1999.
- Weiss W.J., Ferguson S., "Restrained shrinkage testing: the impact of specimen geometry on quality control testing for material performance assessment". *Concreep 6; Proc. intern. symp., Cambridge (USA), 20-22 August 2001*. Elsevier, 2001.
- Weiss W.J., Shah S.P., "Restrained shrinkage cracking: the role of shrinkage reducing admixtures and specimen geometry", *Materials & Structures*, vol. 35, n° 2, 2002, p. 85-91.