HAL
open science

Développement d'un banc d'essai de retrait empêché : relation entre formulation et fissurabilité des bétons au jeune âge

Patrick Ienny, Adamah Messan, Christian Brun-Buisson, Pierre Couturier, Pierre Slangen, Jean Samuel Wienin

To cite this version:

Patrick Ienny, Adamah Messan, Christian Brun-Buisson, Pierre Couturier, Pierre Slangen, et al.. Développement d'un banc d'essai de retrait empêché : relation entre formulation et fissurabilité des bétons au jeune âge. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. hal-03391331

HAL Id: hal-03391331

https://hal.science/hal-03391331v1

Submitted on 21 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Développement d'un banc d'essai de retrait empêché : relation entre formulation et fissurabilité des bétons au jeune âge

A. MESSAN[a], P. IENNY[b], C. BUISSON[b], P. COUTURIER[b], P. SLANGEN[b], J.S. WIENIN[b]

a. Ecole Polytechnique de Kaya, BP 174, KAYA (BURKINA-FASO)
b. Ecole des Mines d'Alès (CMGD), 6 avenue de Clavière, 30319 ALES

Résumé :

De récentes études ont montré la forte sensibilité des Bétons Hautes Performances (BHP) à la fissuration prématurée. Un dispositif d'essai a été conçu afin d'étudier le retrait plastique pour des sollicitations dites « empêchées ». Reposant sur le principe d'un double asservissement en force et déformation, les résultats issus de ce dispositif « actif » permettent d'estimer les évolutions durant l'essai de la contrainte de traction développée dans le béton et du taux de fluage « au très jeune âge ».

Abstract :

Recent studies showed the extreme sensitivity of High Performance Concrete (HPC) on the early age cracking. A new technique was setting-up to study plastic shrinkage under restrained conditions. Based on the concept of closed-loop on both load and strain parameters, results obtained with this « active » system allow to estimate during the test the tensile stress growing inside the concrete and the creep rate at « very early age »

Mots clefs: retrait plastique au très jeune âge, retrait empêché, contrainte interne, fluage

1 Introduction

Le retrait au très jeune âge a retenu l'attention des centres de recherche ces dernières années en raison de l'avènement des BHP, qui sont très sensibles à la fissuration précoce. Cette fissuration prématurée est une question clé de la durabilité à long terme de ces matériaux. Les études menées sur le retrait au très jeune âge ont essentiellement porté sur la réduction du retrait plastique dans les conditions structurales dites « libres ». Cependant, il est à noter que la réduction du seul retrait libre ne donne pas forcement une indication sur le risque de fissuration prématurée.

Ainsi, plusieurs essais de retrait empêché ont été mis au point dans divers centres de recherche pour évaluer la capacité de fissuration du matériau cimentaire [1,2]. Ces essais peuvent être classés en deux types selon le mode d'empêchement du retrait (système passif et système actif) et selon la géométrie du moule (linéaire et cylindrique). Le système passif est couramment utilisé sur une géométrie cylindrique : le béton est coulé autour d'un anneau en acier instrumenté. Son principe repose sur un compromis entre une rigidité suffisante de cet anneau pour imposer la condition d'empêchement et une relative souplesse permettant de remonter à la contrainte interne dans le béton via la mesure de sa déformabilité [3]. Les récentes études ont montré que la contrainte mesurée à l'aide du système passif dépend de la rigidité du béton et de celle de l'anneau en acier et, par conséquent, les informations obtenues avec ce système ne sont pas suffisamment fiables. Cette limitation conduit au développement de dispositifs actifs de retrait empêché. Le système actif peut être utilisé sur une géométrie linéaire ou cylindrique. Cette fois, l'empêchement du retrait se fait grâce un asservissement en déformation qui ramène l'échantillon de béton à sa dimension initiale : il s'agit soit de sa longueur entre mors pour une éprouvette linéaire, soit de son rayon intérieur pour une éprouvette cylindrique. La sensibilité de cet asservissement est définie en fonction du niveau de contraintes résiduelles attendu. Bien que ce principe ait été développé dans la littérature, les études menées avec un système actif d'empêchement du retrait étaient beaucoup plus dédiées à l'analyse du retrait après la prise [1, 2]. La période avant la fin de prise est totalement occultée alors même que c'est durant cette période que les bétons hautes performances sont sensibles à la fissuration précoce [4].

Ce projet apporte un moyen d'analyse expérimental complémentaire pour étudier les matériaux cimentaires au très jeune âge. Il repose sur le développement d'un dispositif actif de retrait empêché permettant d'étudier

le comportement du béton avant et pendant la prise. Les résultats issus de ce dispositif permettent, non seulement d'estimer le niveau de contrainte de traction atteint dans le béton durant l'essai mais également de rendre compte du degré de fluage du béton au très jeune âge. Ce dernier résultat est obtenu indirectement en couplant l'essai de retrait empêché à un essai de retrait libre effectué sur une éprouvette présentant la même section de séchage.
Afin de rendre compte du travail effectué, cet article est organisé en trois points. Dans le premier point, nous présenterons la conception et la fabrication du dispositif de retrait empêché mis en place. Il sera question du choix des dimensions de l'anneau et du dimensionnement de la structure métallique servant d'ossature pour le système. Le second point est consacré au système de pilotage. Il s'agit de présenter le principe de double asservissement qui gouverne le fonctionnement du dispositif de retrait empêché. Au troisième point, la composition et les propriétés du béton hautes performances utilisé seront présentées. Les résultats de calibration et d'essai de retrait libre et empêché sur le béton formulé seront ensuite discutés.

2 Conception d'un dispositif de retrait empêché

2.1 Choix d'une géométrie

Le dispositif développé est basé sur une géométrie annulaire. Le béton est coulé autour d'un anneau en acier (Fig.1). Le choix de cette géométrie plutôt qu'une éprouvette linéaire est dicté par l'avantage d'une absence de mors (nécessaire à la sollicitation d'une éprouvette linéique), ce qui permet de s'affranchir des problèmes de concentration de charge dans les zones de transfert [5]. La pression *p* est appliquée sur l'anneau au moyen d'un vérin souple constitué d'une feuille de polyuréthane (capacité 10bars) maintenu axialement par un plateau inférieur et un couvercle, tous deux produits dans un acier de 10mm d'épaisseur. Cependant, l'état de contrainte dans l'éprouvette de béton est tributaire des dimensions de l'anneau. Deux résolutions analytiques du problème de mécanique sont réalisées selon que la pression est directement appliquée à l'anneau ou bien que ce transfert est assuré par une enveloppe cylindrique en tôle mince. Dans ce deuxième cas cette pièce additionnelle permet notamment d'homogénéiser la répartition de la pression sur la paroi intérieure de l'éprouvette de béton.

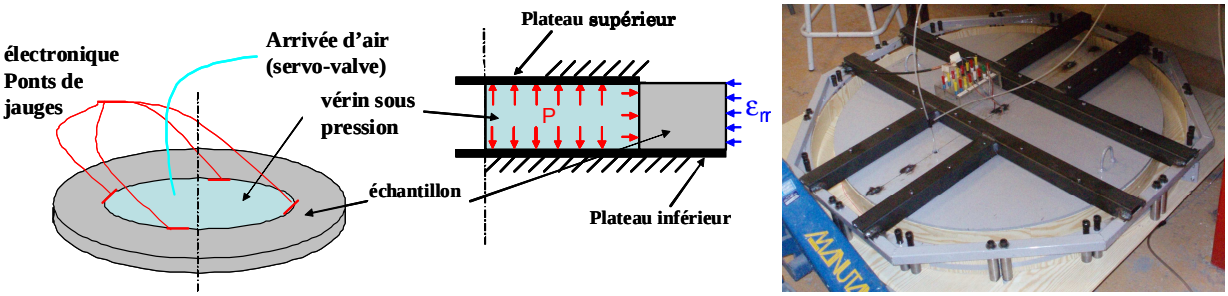

FIG. 1 – Schéma de principe et photographie de l'essai de retrait « empêché ».

Si R_i et R_e sont respectivement les rayons intérieur et extérieur de l'anneau de béton, le calcul monocomposant (absence de la tôle de transfert), sous l'hypothèse de contraintes planes, conduit aux expressions analytiques des contraintes orthoradiale ($\sigma_{\theta\theta}$) et radiale (σ_{rr}) :

$$\sigma_{rr}(r) = p\frac{R_i^2}{R_e^2 - R_i^2}\left(1 - \frac{R_e^2}{r^2}\right) \quad ; \quad \sigma_{\theta\theta}(r) = p\frac{R_i^2}{R_e^2 - R_i^2}\left(1 + \frac{R_e^2}{r^2}\right) \qquad \left(avec\ R_i \le r \le R_e\right) \qquad (1)$$

L'anneau de béton, est soumis à un état de contrainte de compression radiale et de traction orthoradiale lorsqu'est appliquée une pression (*p*) sur sa paroi interne. L'équation (1) montre aussi que l'état de contrainte dans l'anneau de béton n'est ni homogène ni uniaxial. La géométrie de l'anneau doit donc être définie de façon à minimiser la contrainte de compression radiale d'une part et garantir un état de contrainte orthoradiale homogène d'autre part. Pour atteindre cet objectif, deux paramètres A_1 et A_2 dépendants de la géométrie ont été définis (équation (2)).

$$A_1 = \frac{\sigma_{\theta\theta}(R_i)}{\sigma_{\theta\theta}(R_e)} - 1 = \frac{1}{2}\left(\frac{R_e^2}{R_i^2} - 1\right) \quad ; \quad A_2 = \left|\frac{\sigma_{rr}(R_i)}{\sigma_{\theta\theta}(R_i)}\right| = \left|\frac{R_i^2 - R_e^2}{R_i^2 + R_e^2}\right| \tag{2}$$

A_1 est l'indicateur du gradient de contrainte orthoradiale et A_2 traduit l'écart à une sollicitation unidirectionnelle [6]. Cependant la géométrie doit constituer un compromis entre l'obtention d'une sollicitation de traction homogène et uniaxiale et des dimensions raisonnables de l'essai. L'essai développé devant être appliqué à l'analyse de bétons, la section radiale de l'anneau correspond aux sections des essais habituellement pratiqués sur ces matériaux (70x70mm^2). Le rayon de l'anneau est choisi égal à 500mm ce qui limite le gradient sur la contrainte orthoradiale (A_1=15%). De même cette géométrie limite le rapport entre les contraintes radiale et orthoradiale (A_2=13%).

A partir de cette géométrie, la conception générale des éléments de l'essai a été étudiée. La chambre interne constituée du vérin souple est reliée à un compresseur d'air lui appliquant une pression interne. Une tôle métallique fine (dont le choix de l'épaisseur est discuté plus loin) ceinture le vérin souple et assure le transfert de la pression radiale sur l'anneau. Cette enveloppe associée à une enceinte extérieure à l'anneau, elle-même en acier, assure aussi la fonction de moule de l'anneau en béton lors de sa mise en œuvre (figure 1). Le couvercle en acier assurant le confinement du vérin souple est renforcé par un treillis constitué de barres creuses en acier de 40mm de section.

Le choix de l'épaisseur de l'enveloppe interne est guidé par la sensibilité de mesure souhaitée. Signalons que la paroi interne de cette enveloppe est instrumentée de 4 jauges de déformations comme l'illustre la figure 1. Cette instrumentation doit permettre de réaliser un asservissement afin de maintenir le rayon intérieur (R_i) de l'anneau constant au cours de l'essai de retrait empêché. Outre cette sensibilité requise, le dimensionnement de l'enveloppe interne est également guidé par la contrainte orthoradiale qu'elle subit à la suite d'une rupture du béton. Une résolution de ce problème de mécanique intégrant le rôle de transfert assuré par l'enveloppe cylindrique en tôle mince a été réalisée. A titre d'exemple le profil radial de la contrainte orthoradiale est tracé sur la figure 2 pour une contrainte maximale dans le béton égale à 10MPa. Pour ce calcul les caractéristiques du béton sont : ν=0.2 ; E=51 GPa. Le choix d'une tôle de transfert de 2mm d'épaisseur confère une contrainte orthoradiale égale à 40MPa.

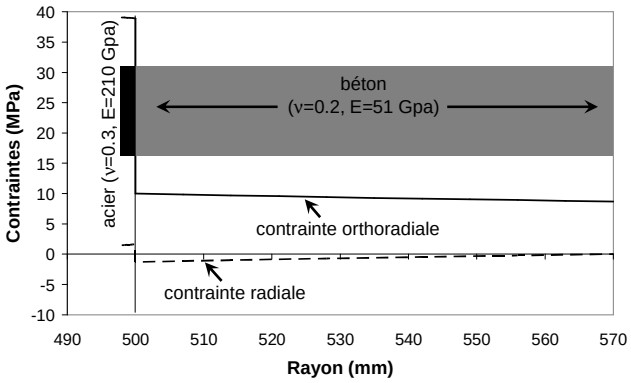

FIG. 2 – Chambre métallique contenant le vérin souple.

Ce calcul analytique nous fournit aussi les sensibilités du capteur de pression (CP) et des jauges de déformation (qui assurent le contrôle de la géométrie de l'anneau) nécessaires à la fonction d'asservissement. La sensibilité requise permet d'obtenir une résolution de 0.01MPa sur l'évolution de la contrainte interne.

2.2 Système de pilotage et d'acquisition

L'originalité de ce dispositif de retrait empêché est de pouvoir, au cours d'un même essai, mesurer simultanément les évolutions de la contrainte orthoradiale et de la déformation cumulée : celle-ci représente l'addition d'une déformation de retrait (<0) et d'une déformation de fluage (>0). L'extraction de cette déformation cumulée est déduite de l'hypothèse de la décomposition additive des déformations au cours du retrait empêché (figure 3) :

$$\varepsilon_{total}(t) = \varepsilon_{élastique}(t) + \varepsilon_{retrait}(t) + \varepsilon_{fluage}(t) = 0 \tag{3}$$

Le principe de fonctionnement est basé sur un double asservissement, alternativement en pression et en déformation. Au cours du retrait du béton, la paroi de la chambre métallique se rétracte. La pression d'air envoyée dans le vérin souple permet de ramener la chambre métallique dans sa forme initiale (cycle de compensation). Si la géométrie initiale, choisie comme référence, correspond au moment de la mise en place du béton dans le moule, la déformation moyenne des quatre jauges de déformation collées sur la paroi interne de la tôle fournit une mesure de modification du rayon de l'anneau au cours du retrait. La figure 3 illustre le principe de fonctionnement : il s'agit d'un empêchement discontinu à l'échelle de la sensibilité de l'asservissement choisi. Lorsqu'une valeur seuil de la déformation moyenne est atteinte, le dispositif agit sur la servo-valve pour augmenter la pression dans le vérin et ramener le retrait du béton à sa valeur de référence. La valeur seuil (3 – 6µdef) doit être compatible avec la sensibilité des jauges de déformation. Puis une nouvelle phase de régulation en pression permet de maintenir un niveau constant à l'intérieur de la chambre jusqu'à ce que la déformation engendrée par le retrait du béton atteigne à nouveau la valeur seuil. Ce principe de régulation séquentiel se poursuit tout au long de l'essai et conduit à l'augmentation de la contrainte interne dans l'anneau de béton lors de sa dessiccation. La programmation sous Labview (National Instruments) du système de pilotage de l'essai intègre ainsi deux systèmes PID (figure 3) : le premier permet d'asservir en déformation dans la phase de compensation et le second permet de maintenir la pression constante dans le vérin souple jusqu'à ce que la déformation moyenne atteigne de nouveau le seuil.

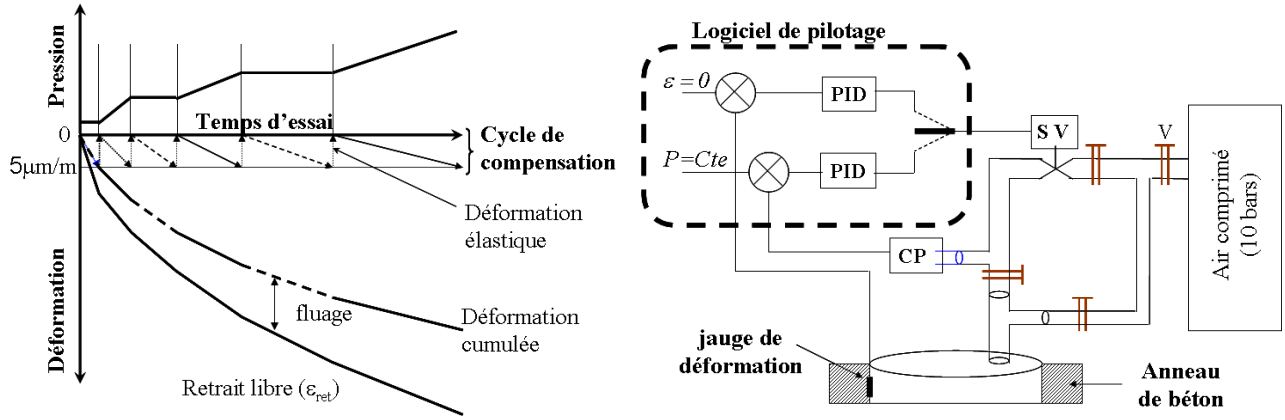

FIG. 3 – Schéma de principe du pilotage de l'essai de retrait empêché.

3 Test sur un BHP

3.1 Formulation et mise en œuvre du matériau

Le béton utilisé pour ce travail correspond à une formulation relative à un Béton Haute Performance (BHP). Ce béton présente un rapport massique eau/ciment (E/C) égale à 0,4. Il est formulé avec les constituants suivants :

sable (JOFFRE) de granulométrie 0/4mm
gravillon de granulométrie 4/8mm
ciment CEM I 52,5 N CE CP2 NF « SB », d'une surface spécifique de 438m^2/kg

Le Tableau 1 ci-dessous reprend les proportions des différents constituants entrant dans la formulation de ce béton. Au cours de la mise en œuvre, un super-plastifiant est ajouté en une proportion de 1.5% du poids du ciment et de la fumée de silice.

Eau	Ciment	Sable	Gravillon	Fumée de silice
200	500	815	920	67

Tableau 1 – Proportions des différents constituants en Kg/m^3.

La résistance en compression à 24h de ce béton est de 49.8MPa, et son coefficient d'étalement à la mise en œuvre est de 80cm. Sa masse volumique expérimentale est de 2456kg/m^3.

3.2 Test de reproductibilité

Des essais de reproductibilité ont été réalisés sur la base de la formulation présentée ci-dessus. Ces essais permettent de connaître l'influence de toute la chaine d'essai intégrant les points suivants : formulation, mise en œuvre, choix des paramètres d'essais (seuil en déformation), régulation de l'environnement (%HR=50%, Température=22°C). Pour les deux essais présentés un choix différents de seuil de déformation a été défini afin d'identifier la sensibilité de ce paramètre sur les résultats obtenus. La contrainte orthoradiale mesurée à partir de la pression dans le vérin souple montre une bonne reproductibilité du signal obtenu avec une évolution d'autant plus continue que le seuil de régulation en déformation est plus faible (figure 4a). Il est à noter que dans le cas le plus défavorable le seuil de déformation choisi (6µdef) introduit une résolution de 0.05 MPa sur la contrainte orthoradiale. Cependant cette résolution étant scalairement dépendante du module de rigidité de l'anneau en béton, il est attendu une forte diminution de cette résolution après prise (résolution de 0.13MPa pour un seuil égal à 3µdef selon le calcul analytique précédent). La déformation cumulée, qui traduit la compensation du retrait de dessiccation par la composante de fluage, présente les mêmes caractéristiques de reproductibilité (figure 4b).

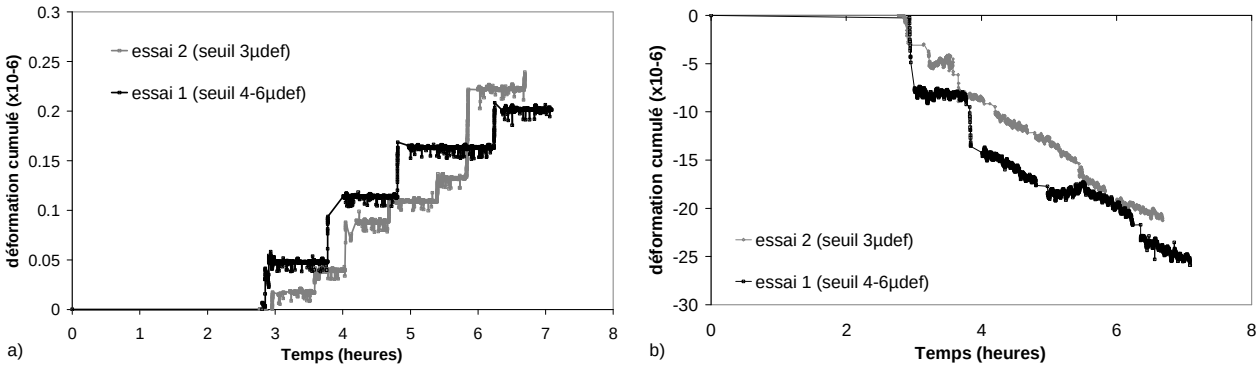

FIG. 4 – Essais de reproductibilité : a) déformation cumulée, b) contrainte orthoradiale

3.3 Essai de retrait empêché sur BHP

Sur la base de la formulation précédente, un essai de retrait empêché a été réalisé sur une période de 24h. Rappelons qu'au cours de cette période se produit un double phénomène de retrait : tout d'abord apparaît une phase dite de retrait plastique qui se produit avant durcissement sous l'effet d'une dessiccation. Cette phase est inhérente à l'échange entre le béton et l'environnement qui, dans le cas traité, ne peut se produire que par la face libre supérieure de l'anneau conférant ainsi un rapport d'échange (S/V=1.4%). Cette phase de retrait exogène se manifeste avant le début de prise. Suite à cela, se produit un retrait d'autodessication d'origine endogène qui traduit le début de la réaction d'hydratation. Si le premier phénomène confère un gradient de retrait de la surface libre vers l'intérieur de l'éprouvette le deuxième retrait peut être considéré comme uniforme dans le matériau. Les résultats de cet essai sont présentés sur la figure 5.

On peut remarquer que la contrainte orthoradiale (contrainte interne) ne débute qu'après une période d'incubation correspondante à la période dormante du béton à l'état frais (figure 5a). A la suite de cette phase, les évolutions simultanées du retrait et de la cohésion (par hydratation) du béton induisent une augmentation de la contrainte interne. Cette évolution présente deux cinétiques selon que l'on se situe avant ou après 10h d'essai. Des résultats similaires ont été obtenus pour des Mortiers Ultra Haute Performance [1, 7]. Si on s'intéresse à la déformation cumulée, on constate que le ralentissement de l'évolution de la contrainte interne est simultané à celui de cette déformation cumulée. On rappelle que cette déformation correspond à la déformation de retrait libre (négative) à laquelle se superpose la déformation de fluage. Celle-ci est positive compte-tenu de l'évolution de la contrainte orthoradiale de traction au sein de l'anneau.

Parallèlement à cet essai de retrait empêché sur anneau, un essai de retrait libre a été réalisé sur la base d'une éprouvette prismatique de même section (280x70x70mm^3). Pour conserver le même taux d'échange avec l'extérieur, cet essai présente la surface supérieure libre.

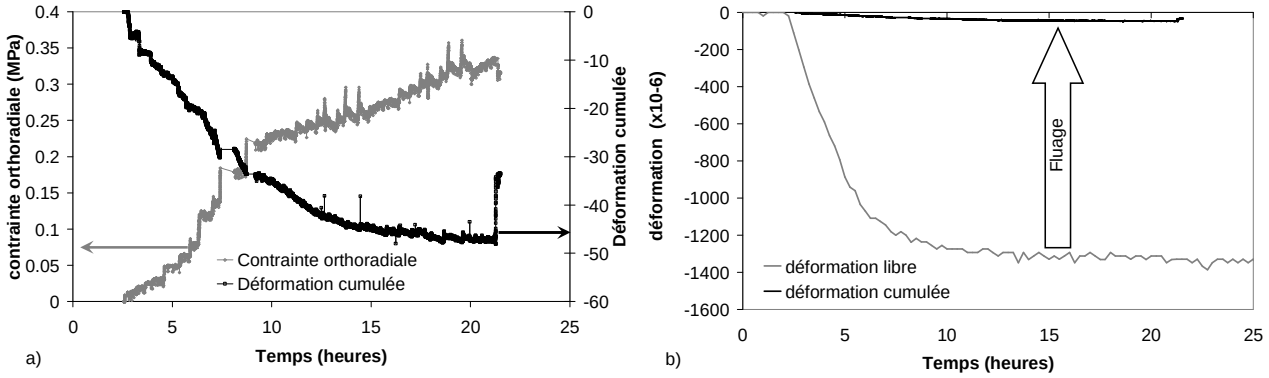

FIG. 5 – a) Retrait empêché sur BHP, b) comparaison retrait libre et déformation cumulée

La mesure de retrait est réalisée au moyen de deux capteurs de déplacements (type LVDT) disposés aux deux extrémités de l'éprouvette : une cale de transfert en polymère est positionnée entre le capteur et la surface de l'éprouvette. Le résultat de cet essai de retrait libre est présenté sur la figure 5b. Ce retrait présente une cinétique importante (200µdef/h) dans une première phase (avant 5 heures), suivie d'un net ralentissement après 10h d'essai. La superposition sur ce graphe de la déformation cumulée obtenue lors de l'essai de retrait empêché traduit l'importance de la déformation de fluage consentie par l'anneau dès que la contrainte de traction orthoradiale progresse dans le matériau. Ce phénomène lié à la plasticité du béton avant sa prise a été révélé par d'autres auteurs [1, 8]. Ces auteurs ont montré que la relaxation due au fluage du matériau cimentaire pouvait diminuer de moitié la valeur de la contrainte interne (ici contrainte orthoradiale) dans le matériau.

Conclusion perspectives:

Cet article présente le développement d'un test de retrait empêché dédié à l'analyse des risques de fissuration précoce dans les bétons. La technique adoptée, basée sur une géométrie en forme d'anneau, utilise le principe d'un double asservissement séquencé en pression et en déformation. Classé parmi les essais de type « actif », celui-ci se distingue de l'existant par la possibilité de connaître l'évolution de la déformation de fluage à l'origine de la relaxation de la contrainte interne générée durant le test. Outre la possibilité d'étudier l'influence d'ajouts ou de renforts sur la fissurabilité des bétons de formulation sensible tels que les BHP, ce protocole expérimental ouvre la voie d'une meilleure compréhension de la phénoménologie du comportement de ces matériaux durant la prise.

Références

[1] HOSSAIN A.B., WEISS J., "The role of specimen geometry and boundary conditions on stress development and cracking in restrained ring test" *Cement and Concrete Research*, 36, 2004, pp. 189-199.
[2] IGARASHI S., BENTUR A., KOVLER K., "Autogenous shrinkage and induced restraining stresses in high-strength concretes", *Cement and Concrete Research*, 30, 2000, pp. 1701-1707.
[3] LAMOUR V., HAOUAS A., MORANVILLE M., LEBOURGEOIS L., "A new technique for characterization of early ages cracking of mortars" CEReM Journal, 2003, pp. 35-38.
[4] SCHWARTZENTRUBER A., PHILIPPE M., MARCHESE G., "Effect of PVA, glass and metallic fibers, and of an expansive admixture on the cracking tendency of ultrahigh strength mortar", *Cement and Concrete Composites*, 26, 2004, pp. 573-580.
[5] ALTOUBAT S.A., LANGE D.A., « Grid-specimen interaction in uniaxial restrained tests", Concrete : Materials Science to Applications, ACI SP-206, 2002, pp. 189-204.
[6] MESSAN A., IENNY P., NECTOUX D., "New testing method to investigate free and restrained plastic shrinkage of mortar: Influence of Glass Fibers, Cellulose Ether and EVA (Ethylene-Vinyl Acetate)", *Cement and Concrete Composites*, accepté 2008.
[7] SPRINGENSCHMID R. et al, "Thermal cracking in concrete at early ages" *in Thermal Cracking Concrete at Early Ages, R. Springenschmid (editor)*, Proc. RILEM Symp., E&FN SPON, 1994, pp. 137-144.
[8] TURCRY P., "Retrait et fissuration des bétons autoplaçants : influence de la formulation" *Thèse de doctorat de l'Université de Nantes*, 2004.