Fluage du béton et du béton précontraint à 20°C et 40°C

Hugo Cagnon[1], Thierry Vidal[1], Nam Nguyen[1], Jean-Michel Torrenti[2], Alain Sellier[1]

[1]*Université de Toulouse ; UPS, INSA ; LMDC (Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions) ; 135, avenue de Rangueil ; F-31 077 Toulouse Cedex 04, France*

[2]*Université Gustave Eiffel, 5 Bd Descartes, 77420 Champs-sur-Marne, France*

RESUME Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet ANR PIA MACENA portant sur le comportement mécanique d'une enceinte de confinement des centrales nucléaires françaises en cas d'accident. Le chauffage d'un béton sous charge peut induire une déformation thermique transitoire qui se caractérise par de fortes cinétiques et amplitudes. En cas d'accident, les augmentations de pression interne et de température entraineraient des redistributions de contraintes et des diminutions des forces de précontrainte non négligeables dont les répercussions en termes de pertes potentielles d'étanchéité de l'enceinte de confinement doivent être évaluées.

L'objectif de cette étude est de fournir des données expérimentales de retrait et fluage entre 20°C et 40°C, début de la montée en température en cas d'accident qui peut atteindre 110°C à 140°C. Les résultats doivent permettre de mieux comprendre les mécanismes de la déformation thermique transitoire afin d'améliorer les modèles de fluage.

Mots-clefs fluage, déformation thermique transitoire, béton précontraint.

I. INTRODUCTION

Garantir l'étanchéité de l'enceinte de confinement des centrales nucléaires est un défi mondial. Le projet national français ANR PIA MACENA avait pour objectif d'étudier le comportement de l'enceinte de confinement en béton précontraint en conditions d'accident. Ces conditions se caractérisent par une augmentation de pression et de température. Des études sur le fluage ont montré un accroissement des cinétiques et des amplitudes de déformations avec la température, qui peut être amplifié par des effets couplés du séchage ou de l'endommagement (Ladaoui et al., 2013). Une déformation supplémentaire appelée déformation thermique transitoire se développe lorsqu'un béton est chargé puis chauffé par rapport à un béton chauffé puis chargé. Sa cinétique et son amplitude dépendent du taux de saturation, de la vitesse de chauffage et des conditions hygrométriques (Cagnon et al., 2019). Les mécanismes à son origine se produiraient dans les feuillets de C-S-H. Cette déformation serait due à une diminution momentanée de la viscosité du béton lié aux glissements des interfeuillets facilités par la fragilisation de leurs liaisons par microdiffusion d'eau entre nanopores et pores capillaires, sous l'effet couplé d'une dilatation de l'eau et d'une contrainte mécanique (Manzoni et al., 2020). Elle serait potentiellement amplifiée par l'endommagement dû aux dilatations différentielles entre la pâte de ciment et les granulats (Torrenti, 2018). Dans le cas du béton précontraint, l'élévation de la température entraînerait dès

lors un accroissement des pertes de précontrainte dues à l'amplification des déformations de retrait et fluage du béton, et de la relaxation des aciers de précontrainte (Chhun et al., 2018). Dans cet article, sont présentés les essais de fluage en compression sur cylindres en béton et en flexion sur poutres précontraintes en condition endogène à 20°C et 40°C, début de la montée en température en cas d'accident qui peut atteindre 110°C à 140°C.

II. Matériaux et méthodes

A. Matériaux

La formulation du béton de l'étude est représentative de ceux des structures du projet, avec un E/C de 0,52, un ciment CEM I 52,5 NCE et des granulats silico-calcaire roulés. À 28 jours, la résistance à la compression f_{cm} est de 46,1 MPa ± 1,2MPa, le module de Young E_{cm} de 35,1GPa ± 0,2GPa et la résistance à la traction f_{ctm} de 3,9 MPa ± 0,2MPa. Après le coulage, les éprouvettes ont été conservées dans leurs moules à 95%HR (±5%), et 20°C (±1°C) Après un jour, elles ont été démoulées et scellées pour éviter les échanges hydriques avec le milieu extérieur. A 64 jours, le câble de précontrainte de chaque poutre a été mis en tension. A la date t_0, le chargement, en compression pour les cylindres et en flexion pour les poutres a été appliqué par la suite. Certains échantillons ont été maintenus en condition endogène à 20°C, tandis que d'autres ont été chauffés à 40°C un jour après le chargement dans le but d'observer la déformation thermique transitoire.

B. Fluage en compression uniaxiale à 20°C et 40°C en endogène sur cylindres

Les essais de fluage en compression uniaxiale ont été réalisés sur 3 cylindres de 11,8 cm de diamètre et de 22,4 cm de hauteur. Après durcissement, 6 différentes conditions thermomécaniques ont été testées : échantillons non chargés à 20°C et à 40°C pour suivre les déformations libres, chargés à 30% de la résistance à la compression mesurée à la date de l'essai, et chargés à 60%, à 20°C et 40°C pour les deux niveaux de chargement.

C. Fluage en flexion 4 points à 20°C et 40°C en endogène sur poutres précontraintes

Les poutres sont précontraintes avec un câble centré de classe 1860MPa. La contrainte de compression initiale induite dans les poutres vaut 12 MPa. Durant la 1ère phase, où seule la précontrainte s'exerce, un fluage en compression se développe qui, ajouté au retrait et à la relaxation du câble, réduit la précontrainte initiale. Pendant l'essai de fluage en flexion 4 points (2e phase), la force est appliquée de sorte à générer une contrainte de compression théorique correspondant à 60%f_{cm} sur la fibre supérieure et une contrainte nulle sur la fibre inférieure.

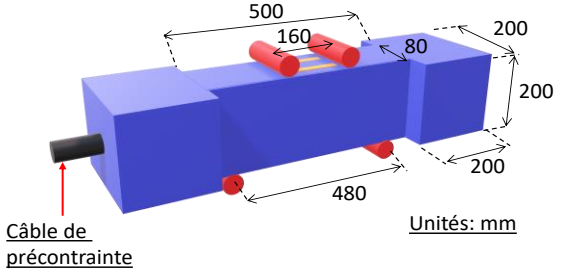

FIGURE 1. Poutres précontraintes et schéma de chargement sur les 4 appuis en rouge

III. Résultats expérimentaux

A. Déformations endogènes libres et sous charge sur cylindres à 20°C et 40°C

Les déformations libres mesurées à 20°C sur cylindres et sur poutres avant chargement mécanique n'excédant pas 50 µm/m après 250 jours ne sont pas présentées. Dans la figure 1, les déformations libres endogènes à 20°C et 40°C sont présentées (gauche) et comparées (sur la même période) à celles totales sous charge à 30% et 60%f_{cm} à 20°C et 40°C (droite).

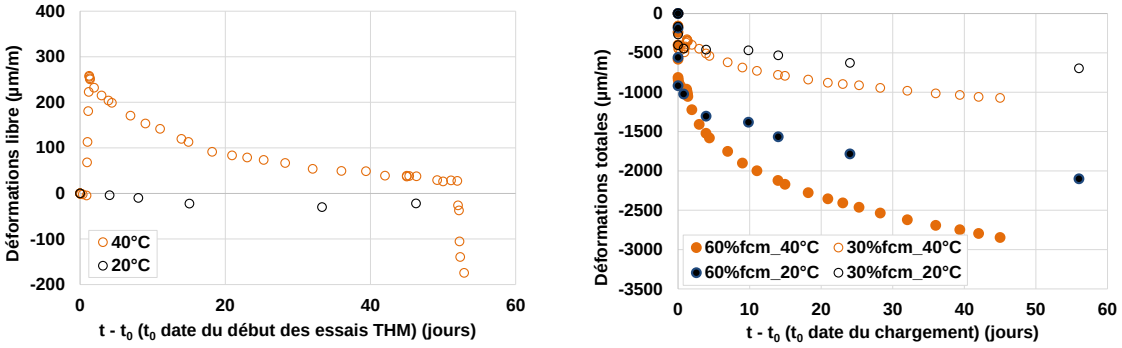

FIGURE 2. Evolutions des déformations libres à 20°C et à 40°C (gauche) et des déformations totales sous charge maintenue pour les différentes conditions thermo-mécaniques (droite)

Les déformations libres à 20°C sont faibles (figure 1, gauche). A 40°C, le béton se dilate, avec un coefficient de dilatation thermique de 12,2µm/m/°C. Après stabilisation de la température à 40°C, le retrait endogène paraît plus élevé mais une perte de masse de 0.58% mesurée en fin d'essai révèle une part de retrait de séchage. Après application de la charge et apparition des déformations élastiques (figure 1, droite), les déformations différées sous charge se développent à 20°C. Après un jour, des échantillons sont chauffés à 40°C. L'amplitude de la dilatation inférieure à celle du béton non chargé démontre la présence de la déformation thermique transitoire. Suite à la phase thermique transitoire, la température augmente la vitesse de fluage. Les évolutions à 30% et 60%f_{cm} montrent que le fluage est non linéaire mais sans augmentation due à la température.

B. Flexion 4 points sur poutres en béton précontraint à 20°C et 40°C

La figure 2 présente les évolutions des déformations des fibres extrêmes des poutres précontraintes depuis la date de mise en tension (gauche) et la date de mise en flexion (droite).

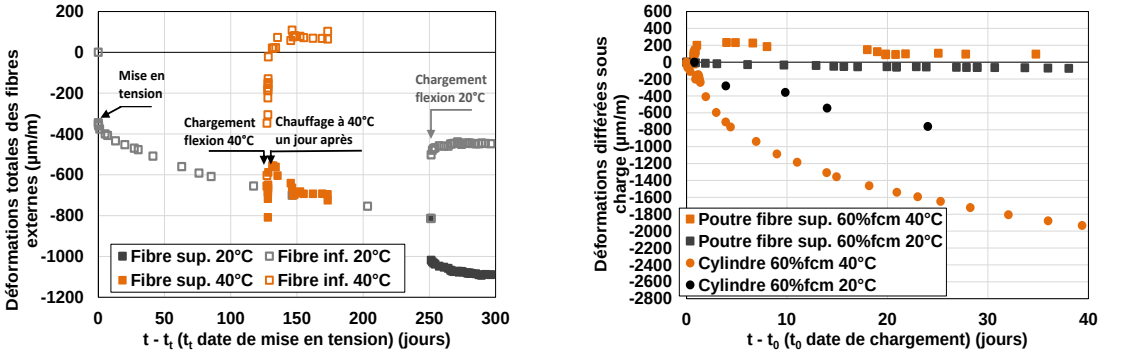

FIGURE 3. Déformations totales des fibres extrêmes à 20°C et 40°C (gauche) et déformations différées sous charge maintenue pour les différentes conditions thermo-mécaniques (droite)

Les déformations élastiques, à l'instant de la mise en tension de la précontrainte, et différées depuis cette date, sont comparables sur les deux fibres (figure 2 gauche), le câble étant centré. La mise en flexion, combinée aux effets de la précontrainte résiduelle, entraîne des déformations élastiques puis des déformations différées de compression et de légère traction sur les fibres extrêmes à 20°C et à 40°C. Le chauffage à 40°C après 1 jour de fluage de flexion provoque une dilatation significative sur les deux fibres. La figure 2 (droite) compare les déformations différées sous charge de la fibre théoriquement comprimée à 60%f_{cm} des poutres avec celle sur cylindre au même taux de charge, à 20°C et 40°C. Les déformations différées sont plus élevées sur cylindres, quelle que soit la température. De plus, la dilatation supérieure constatée sur cylindre démontre que la déformation thermique transitoire est atténuée par la précontrainte. La raison pourrait en être la consolidation du béton due à la précontrainte préalable au fluage de flexion. La consolidation réduit rapidement la cinétique de fluage y compris celle du fluage thermique transitoire, rendant cette dernière très faible sur un béton ayant vieilli sous charge.

IV. Conclusions

L'essai de fluage en compression a révélé l'apparition d'une déformation thermique transitoire sur un béton chargé depuis peu de temps puis chauffé. Ce phénomène est caractérisé par une augmentation de la cinétique d'évolution des déformations différées. Par ailleurs, l'évolution des déformations sous deux niveaux de chargement a montré que la non-linéarité du fluage (par rapport à la contrainte) n'était pas modifiée par la température. Dans le cas des poutres précontraintes, la déformation thermique transitoire pendant l'essai de fluage en flexion tardif est beaucoup plus faible que lors des essais de fluage en compression à 60%f_{cm} sans précontrainte préalable. Ce résultat peut être attribué à la consolidation du béton pendant la phase initiale de précontrainte, qui en « consommant » prématurément le potentiel de fluage, atténue les déformations thermiques transitoires et de fluage ultérieures (Cagnon et al., 2019).

REFERENCES

Cagnon, H., Vidal, T., Sellier, A., Bourbon, X., Camps, G., 2019. Transient Thermal Deformation of high performance concrete in the range 20 °C–40 °C. Cem. Concr. Res. 116, 19–26. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.11.001

Chhun, P., Sellier, A., Lacarriere, L., Chataigner, S., Gaillet, L., 2018. Incremental modeling of relaxation of prestressing wires under variable loading and temperature. Constr. Build. Mater. 163, 337–342. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.123

Ladaoui, W., Vidal, T., Sellier, A., Bourbon, X., 2013. Analysis of interactions between damage and basic creep of HPC and HPFRC heated between 20 and 80 °C. Mater. Struct. 46, 13–23. https://doi.org/10.1617/s11527-012-9879-1

Manzoni, F., Vidal, T., Sellier, A., Bourbon, X., Camps, G., 2020. On the origins of transient thermal deformation of concrete. Cem. Concr. Compos. 107, 103508. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103508

Torrenti, J.M., 2018. Basic creep of concrete-coupling between high stresses and elevated temperatures. Eur. J. Environ. Civ. Eng. 22, 1419–1428. https://doi.org/10.1080/19648189.2017.1280417