

Effet des couplages Thermo-Hydro-Mécaniques sur le comportement différé du béton précontraint

V. N. NGUYEN^a, H. CAGNON^b, T. VIDAL^b, J. M. TORRENTI^a,
A. SELLIER^b

a. Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR), 14-20 Boulevard Newton - Champs-sur-Marne - 77447 Marne-la-Vallée Cedex 2, France

vnnnguyen@insa-toulouse.fr, jean-michel.torrenti@ifsttar.fr

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

cagnon@insa-toulouse.fr, vidal@insa-toulouse.fr, alain.sellier@insa-toulouse.fr

Résumé :

Le projet ANR MACENA (MAîtrise du Confinement d'une ENceinte en Accident) concerne l'étude du comportement de l'enceinte interne en béton précontraint d'une centrale nucléaire dans le cas d'un accident sévère. Ces conditions se caractérisent par une pression interne de 5 bars et une température pouvant atteindre 180°C durant deux semaines. L'augmentation des déformations, notamment différées, qui en résulte peut engendrer des pertes de précontrainte significatives et des redistributions de contraintes susceptibles d'induire une fissuration préjudiciable à la capacité de maintien du confinement vis-à-vis de la dispersion potentielle de radionucléides.

Pour être capable de modéliser le comportement mécanique du béton précontraint de l'enceinte en phase accidentelle, et de disposer d'outils prédictifs fiables, des données expérimentales sont nécessaires. Peu d'investigations ont été menées sur le comportement mécanique du matériau béton dans de telles conditions Thermo-Hydro-Mécaniques. Les rares résultats disponibles de la bibliographie mettent néanmoins en évidence des effets non négligeables de la température, des contraintes hydriques et mécaniques, sur les déformations du matériau, ainsi que de forts couplages. Cette étude a pour principal objectif de fournir des données originales afin d'alimenter et d'améliorer les modèles existants. Le programme expérimental réalisé est constitué de trois types d'essais de fluage : compression uniaxiale à deux taux de chargement, modéré et intense, flexion quatre points sur béton non armé, et flexion quatre points sur poutres d'échelle réduite en béton précontraint par post-tension. Pour chaque type d'expérimentation, plusieurs configurations thermo-hydro-mécaniques sont étudiées dans le cadre du projet. Les résultats présentés concernent la plage de température 20°C-40°C et les conditions de conservation en endogène ou en séchage à 50%HR. Ils permettent d'estimer la perte de précontrainte due aux effets couplés des déformations différées du béton et de la relaxation des aciers de précontrainte, et d'évaluer le comportement structural d'éléments de petites dimensions. La base de données issue des différents programmes d'essais de l'ensemble de ce projet de recherche contribue à améliorer la compréhension des effets couplés du séchage, de la température et de l'endommagement, et à affiner leurs prises en compte dans la modélisation en vue de la prédiction du comportement du béton précontraint de l'enceinte en conditions accidentelles.

Abstract :

The ANR MACENA project (MAîtrise du Confinement d'une ENceinte en Accident) deals with the study of the behaviour during a severe accident of the confinement vessel made of prestressed concrete, which is the third and last barrier in Nuclear Power Plants (NPP). These conditions are characterized by an inner pressure of 5 bars and a temperature of the vapour-gas mixing of 180°C maintained during two weeks. The resulting increase of deformations, in particular delayed deformations, can lead to significant prestressed losses and stresses redistribution. The induced cracks can affect the capacity of confinement of this last barrier in case of a breakdown of the first two barriers and lead to the radionuclide dispersion in the environment.

In order to model mechanical behaviour of prestressed concrete in accidental cases and to have reliable predictive tools, experimental results are required. However, few investigations have been carried out on mechanical behaviours of concrete under such Thermo-Hydro-Mechanical conditions. The rare available studies show significant impacts of temperature, humidity and loading conditions on deformation of material, especially in case of coupled effects.

The primary objective of this study is to provide datas for improving existing models concerning concrete behaviour. The experimental program consists in three types of creep tests, including uniaxial compressive test at two loading rates (moderate and intense levels), four-point bending test on concrete samples and on pre-stressed concrete on small-sized beams. For each experiment, several Thermo-Hydro-Mechanical configurations were investigated. In this paper, the temperature ranging from 20°C to 40°C and humidity of 50%RH or autogenous conditions were studied. Results from various experimental programs led in this research project allow to estimate prestressing losses due to coupled effects of concrete delayed strain and stress relaxation of prestressing steel and to assess the behaviour of small-sized prestressed structural elements. They also contribute to a better understanding of coupled effects of temperature, humidity and mechanical damage, and to improve models in order to predict mechanical response of prestressed concrete of the confinement vessel in case of a severe accident.

Mots clefs : fluage, thermique, hydrique, béton précontraint

1 Introduction

La maîtrise de l'étanchéité des ouvrages de confinement dans les centrales nucléaires permettant de prévenir toute dispersion potentielle des radionucléides dans l'environnement constitue un enjeu majeur dans le monde entier. En France, le projet ANR MACENA concerne l'étude du comportement de l'enceinte interne en béton précontraint d'une centrale nucléaire dans le cas d'un accident sévère. Pour cela une maquette à l'échelle 1/3 appelée maquette VERCORS a été réalisée. Les conditions d'accident se caractérisent par une pression interne de 5 bars et une température pouvant atteindre 180°C durant 15 jours. Les rares études concernant de telles conditions mettent en évidence des effets non négligeables de la température, des contraintes hydriques et mécaniques, sur les déformations du matériau [1, 2, 3]. Une élévation de la température engendre une augmentation des cinétiques et des amplitudes des déformations de fluage [1, 2], pouvant être accentuée en cas de couplage avec du séchage [3] ou avec un endommagement thermique à partir d'un seuil de température [4]. Dès lors, des déformations excessives pourraient survenir lors d'un accident grave, ce qui induirait des pertes de

précontrainte importantes entraînant un risque de fissuration préjudiciable vis-à-vis de la fonction de confinement. Il est donc indispensable de disposer d'outils prédictifs fiables et de pouvoir modéliser le comportement mécanique du béton précontraint en telles conditions.

Cette étude a pour principal objectif de fournir des données originales afin d'alimenter et d'améliorer les modèles existants. Le programme expérimental réalisé est constitué de trois types d'essais de fluage : en compression uniaxiale à deux taux de chargement, modéré et intense, en flexion quatre points sur béton non armé, et en flexion quatre points sur poutres d'échelle réduite en béton précontraint par post-tension. Pour chaque type d'expérimentation, plusieurs configurations thermiques, hydriques et mécaniques sont étudiées dans le cadre du projet. Les résultats présentés concernent la plage de température 20°C-40°C et les conditions de conservation en endogène ou en séchage à 50%HR. Les essais à plus hautes températures sont traités dans d'autres études menées dans le cadre du projet. La base de données contribue à améliorer la compréhension des effets des couplages thermo-hydro-mécaniques sur le comportement différé du béton précontraint.

2 Programme expérimental

Le programme expérimental réside en des essais de fluage à l'échelle du matériau béton et à l'échelle de l'élément de structure.

- à l'échelle du matériau béton :

- étude du fluage en compression uniaxiale à taux de chargement modéré et intense sur cylindres, complétée de suivis de retrait et de pertes de masse ;
- étude du fluage en flexion de poutres en béton non armées, complétée de suivis de retrait et pertes de masse.

- à l'échelle de l'élément de structure :

- étude du fluage en flexion de poutres en béton précontraint (BP).

La Figure 1 illustre l'ensemble des configurations d'essais de fluage avec les géométries de corps d'épreuves.

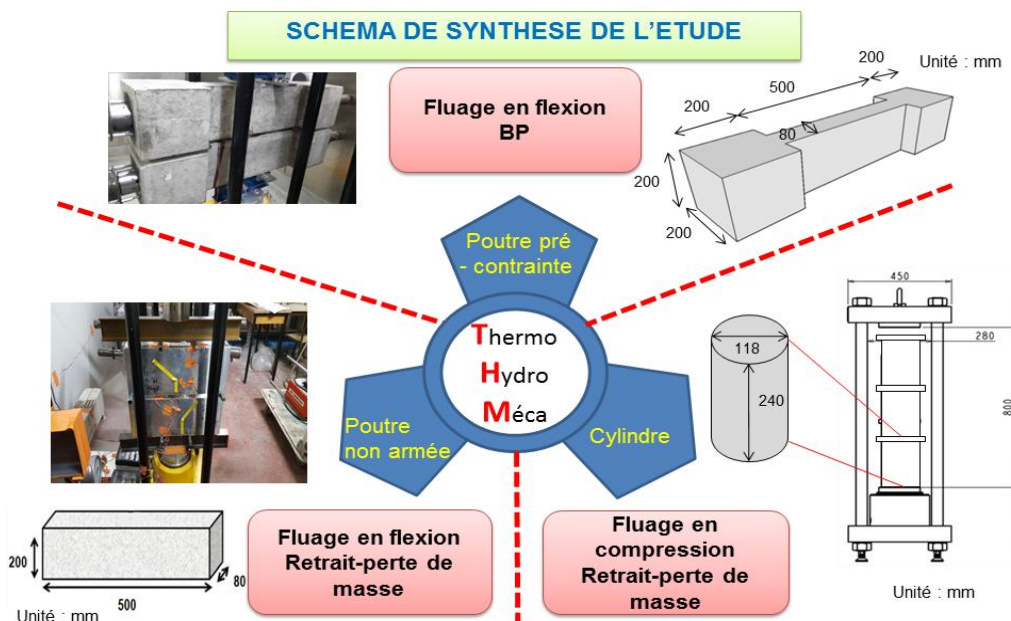


Figure 1. Schéma de synthèse de l'étude

Dans cet article, nous allons présenter les principaux résultats concernant l'étude du fluage en compression uniaxiale et l'étude du fluage en flexion quatre points de poutres en béton précontraint entre 20°C et 40°C et en endogène et à 50%HR.

2.1 Descriptions des essais de fluage

2.1.1 Fluage en compression uniaxiale sur cylindres

Le fluage en compression uniaxiale est réalisé sur des éprouvettes cylindriques 11x22cm. Pour les essais menés à 20°C, les éprouvettes sont instrumentées avec des capteurs LVDT numériques internes positionnés au cœur de l'éprouvette. Pour les essais à 40°C, les éprouvettes sont instrumentées par 3 jauges espacées de 120°, afin de mesurer les déformations longitudinales notamment pendant la phase transitoire en température. Cette mesure est compensée de la déformation thermique propre de la jauge grâce à un suivi de déformation d'une 2^{ème} jauge collée sur un échantillon de silicate de titane dont le coefficient de dilatation est négligeable devant celui des matériaux étudiés.

L'historique des conditions Thermo-Hydro-Mécaniques (THM) est présenté sur la Figure 2.

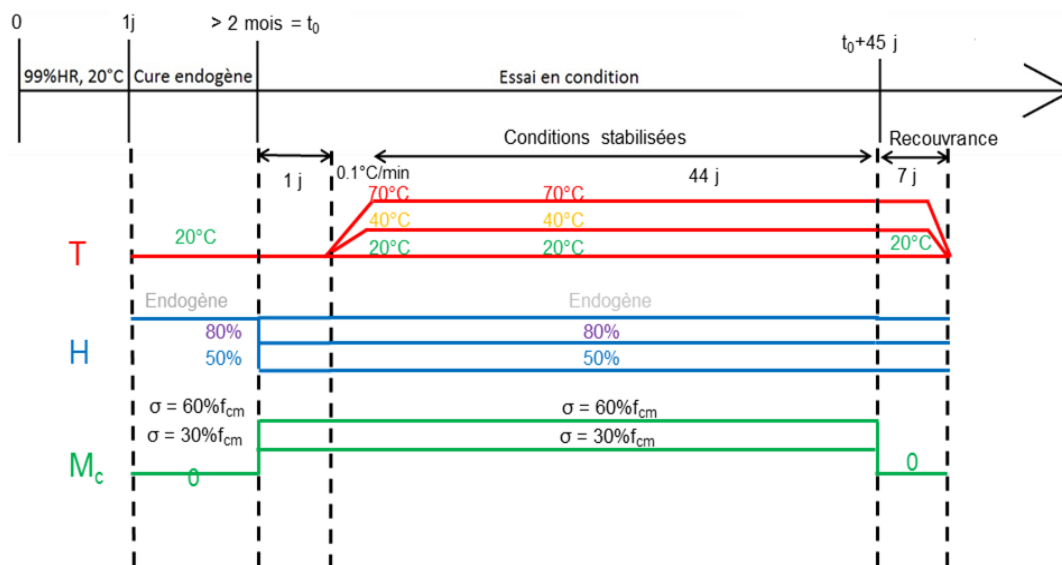


Figure 2. Historique des conditions Thermo-Hydro-Mécaniques pour les essais de fluage en compression uniaxiale sur cylindres

Après démoulage à 1 jour (conservation en salle humide à 99%HR et à 20°C) les échantillons sont conservés en cure endogène pendant une longue durée (> 2 mois) à 20°C afin de stabiliser l'hydratation du ciment et d'avoir des bétons dont les caractéristiques mécaniques sont similaires entre les essais. La condition endogène est également représentative de celle du béton au cœur de la structure. Le retrait endogène durant la cure est mesuré sur d'autres éprouvettes de même géométrie. A l'issue de cette cure, les échantillons sont placés sur les bâtis de fluage dans une ambiance correspondant à l'hygrométrie d'étude. La contrainte de compression est ensuite appliquée. Deux intensités de chargement mécanique de fluage en compression ont été appliquées : modérée à 30% f_{cm} (résistance moyenne en compression au jour du chargement t₀) et élevée à 60% f_{cm}. Pour être représentatif des évolutions des conditions THM en phase accident, les échantillons sont chargés préalablement au chauffage, ce qui correspond à la configuration de fluage thermique transitoire [5, 6,

7]. Le béton est chauffé après un jour de chargement avec une cinétique de $0,1^{\circ}\text{C}/\text{mn}$ dans le but de limiter le gradient thermique entre le cœur et la surface des éprouvettes. La durée de l'essai est *a minima* de 15 jours en conditions THM stationnaires, conformément à la durée de l'accident (44 jours pour de nombreux essais comme indiqué sur la Figure 2). Après la mise en déchargement, les conditions thermo-hydriques sont maintenues pendant environ 7 jours pour observer la phase de recouvrance, puis la température est remise à 20°C . En parallèle du fluage, des mesures de retrait sur éprouvettes non chargées subissant les mêmes conditions Thermo-Hydriques sont réalisées.

2.1.2 Fluage en flexion quatre points sur poutre en béton précontraint

Les poutres en béton précontraint (BP) par post-tension ont été dimensionnées suivant les critères suivants, en tenant compte des pertes de précontraintes instantanées :

- configuration d'essai de flexion quatre points ;
- sous le seul effet de la précontrainte, on vise un profil de contrainte normale uniforme de 12 MPa, qui correspond à la valeur de contrainte due à la précontrainte orthoradiale d'une enceinte nucléaire mais aussi approximativement à $30\% f_{cm}$ comme dans le cas du fluage en compression uniaxiale. La tension du câble de précontrainte à appliquer pour obtenir cet état de contrainte prend en compte les pertes de précontrainte instantanées ;
- lors de l'application de l'état de contrainte due à la flexion quatre points, le profil de contrainte résultant est caractérisé par une contrainte en fibre supérieure (fibre où sont appliquées les forces ponctuelles) de 24 MPa, correspondant approximativement à $60\% f_{cm}$ et une contrainte nulle en fibre inférieure. Néanmoins, il faut considérer que cet état de contrainte résultant demeure théorique, puisque des pertes de précontrainte différées de retrait et fluage du béton et de relaxation de l'acier de précontrainte modifieront l'intensité de la contrainte résiduelle due à la précontrainte en fonction de l'âge du chargement des poutres.

La configuration de l'essai de flexion et le schéma mécanique sont représentés sur la Figure 3 :

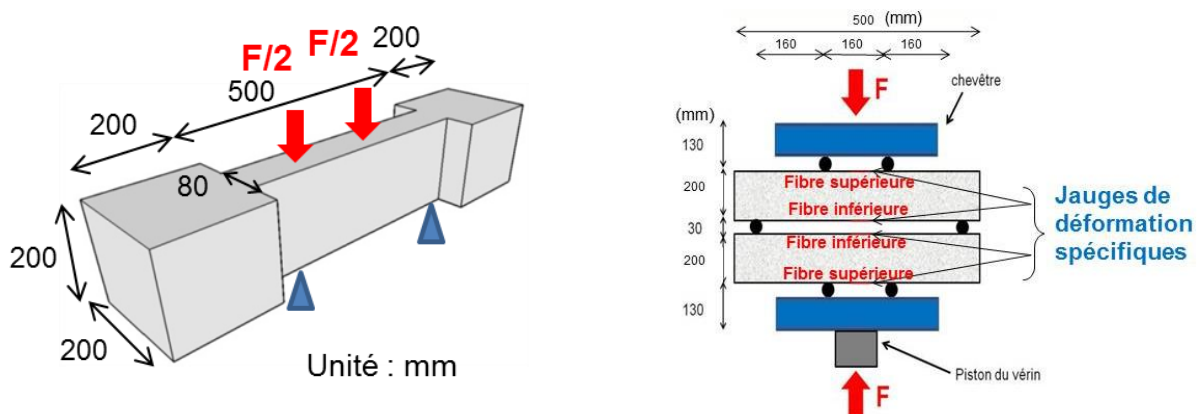


Figure 3. Géométrie d'une poutre BP et schéma mécanique de fluage de flexion quatre points hors zone d'ancrage de l'acier de précontrainte

La poutre BP répondant à ces critères de dimensionnement est constituée d'un acier de précontrainte de type mono-toron T15S gainé-graissé, centré selon la ligne moyenne de la poutre. Les caractéristiques de ce toron sont détaillées dans le Tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques de l'acier précontraint

Module d'élasticité E_p (GPa)	f_{pk} (MPa)	$f_{p0,1k}$ (MPa)	Diamètre (cm)	Section A_p (mm ²)
195	1860	1650	1,57	150

Le dispositif d'ancrage impose une augmentation des dimensions des sections d'about, à savoir 200 x 200 mm au lieu de 80 x 200 mm en section courante, sur une longueur de 200 mm. Toutefois, ces ancrages se situent en dehors de la zone soumise aux sollicitations mécaniques de l'essai de flexion. L'historique des conditions Thermo-Hydro-Mécaniques, de l'instant de décoffrage à 1 jour jusqu'à la fin de l'essai de fluage de flexion, est représentée sur la Figure 4.

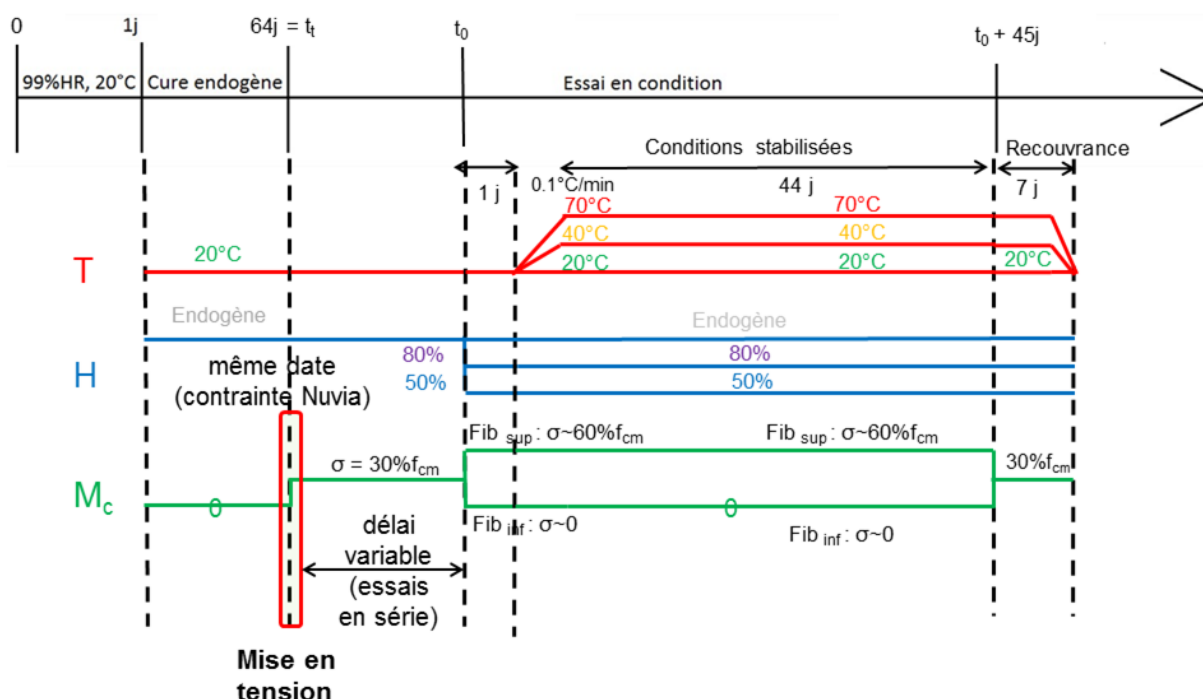


Figure 4. Historique des conditions Thermo-Hydro-Mécaniques pour les essais de fluage en flexion quatre points sur poutres précontraintes

Après démoulage à un jour, toutes les poutres ont été mises en condition endogène à 20°C. Elles sont également mises en tension à la même échéance de 64 jours après leur coulage. La tension initiale appliquée au vérin correspond à 85% f_{pk} , f_{pk} étant la résistance limite en traction. Cette mise en tension induit à mi-travée un profil de contrainte normale uniforme de 12 MPa dans le béton (cette valeur correspond à environ 30% de f_{cm} au moment de l'essai). Les déformations de trois poutres sont suivies depuis le jour de mise en tension par deux jauges en fibre supérieure, deux jauges en fibre inférieure et deux jauges sur un pommeau d'ajout en acier. Après simulation numérique, les déformations du pommeau d'ajout sont considérées équivalentes à celle du câble de précontrainte. Cela permet de connaître la déformation du câble de précontrainte dans le temps.

Les essais sur poutres BP étant réalisés en série pour chaque configuration thermo-hydrrique, le délai entre la mise en tension et le début de l'essai de fluage est variable. Par conséquent, les poutres BP subissent tout d'abord du retrait endogène (négligeable devant les autres déformations pour cette classe de résistance de béton), puis du fluage en compression due à la mise en précontrainte de durée différente suivant la série d'essais. Les poutres sont ensuite soumises simultanément à la flexion et à

l'hygrométrie d'étude. Pour chaque configuration thermo-hydrrique, deux poutres sont testées sur un même bâti de fluage (Figure 3). Les poutres sont instrumentées par quatre jauges béton avant essai (délai variable), avec deux jauges collées sur chaque fibre extrême de la section à mi-travée. De plus, l'acier de précontrainte est également équipé de deux jauges acier positionnées sur le pommeau d'ajout avant la date de début de l'essai.

La température d'étude est appliquée 1 jour après, suivant la même cinétique de chauffage que pour les autres essais de fluage (cf. 2.1.1 Fluage en compression uniaxiale sur cylindres). Les conditions THM sont maintenues pendant 15 jours minimum. Après la mise en déchargement, les déformations sont enregistrées pendant la phase de recouvrance d'environ 7 jours durant laquelle les conditions thermo-hydrriques de la configuration d'étude sont maintenues. La température est ensuite remise à 20°C.

2.2 Caractéristiques des matériaux

La composition du béton utilisé pour la confection de la maquette VERCORS est donnée dans le Tableau 2.

Tableau 2. Formulation du béton et caractéristiques des constituants, $E_{eff}/C=0,52$

Constituants	Proportion (kg/m ³)	Coefficient d'absorption (%)	Densité
0/4 REC GSM LGP1	830	0,77	2,66
4/11 R GSM LGP1	445	2,61	2,70
8/16 R BALLOY	550	2,25	2,70
CEM I 52.5 NCE CP2 NF Gaurain	320		3,19
Techno 80 Sika plast (% de ciment)	2,4 (0,75%)		1,06
Eau totale	198		1,00
Eau efficace E_{eff}	167		

Pour chaque coulage, les valeurs d'affaissement au cône d'Abrams et d'air occlus ont été relevées afin de caractériser les bétons à l'état frais. Les valeurs d'affaissement sont comprises entre 18 cm et 23 cm et celles de la teneur en air occlus entre 1,8% et 2,5%. Les propriétés mécaniques à l'état durci, mesurées sur des éprouvettes cylindriques 11x22cm sont détaillées dans le tableau 3. Ce béton présente des valeurs caractéristiques mécaniques, module de Young et résistance en traction par fendage, conforme à sa classe de résistance C40/50.

Tableau 3. Propriétés mécaniques à l'état durci

Echéance (jours)	Résistance en compression (MPa)	Module de Young (GPa)	Résistance en traction (MPa)
28	46,1 ± 1,2	35,1 ± 0,6	3,9 ± 0,2

3 Résultats et discussions

3.1 Etude du fluage en compression uniaxiale

3.1.1 Déformations sous charges totales des cylindres

La Figure 5 présente les évolutions des déformations totales mesurées sur les cylindres à partir de l'instant de mise en charge à 20°C, en condition endogène et à 50%HR. Les déformations de retrait ne sont pas soustraites. L'échelle des temps est exprimée en $t-t_0$, t_0 étant le début de l'application de la charge de fluage en compression.

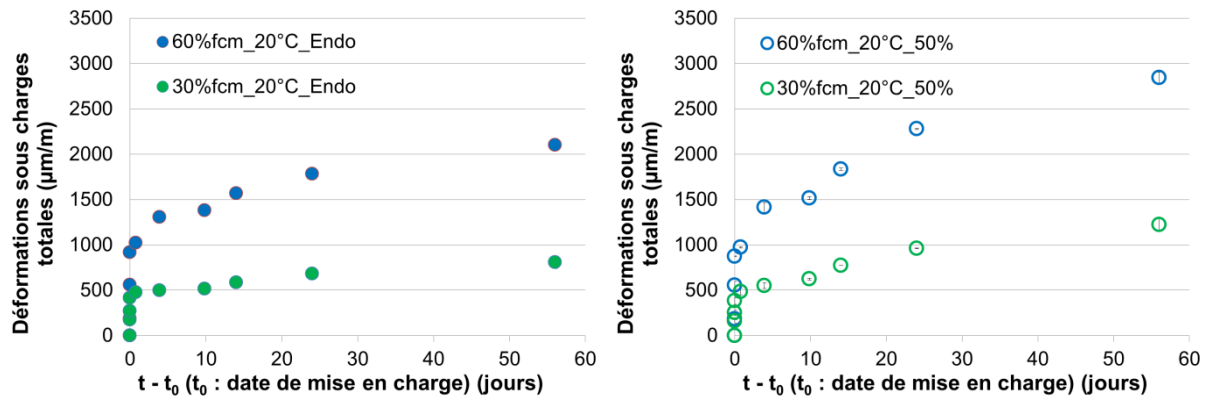


Figure 5. Evolution des déformations totales à 30% f_{cm} et 60% f_{cm} à 20°C en condition endogène (gauche) et à 50%HR (droite)

A l'instant t_0 de chargement, on observe des déformations élastiques instantanées dont le rapport d'amplitude est cohérent avec celui des taux de charge, à savoir 30% f_{cm} et 60% f_{cm} . Les valeurs de déformations totales augmentent dans le temps suivant une allure classique. Les amplitudes et les cinétiques sont dépendantes du taux de chargement (30% f_{cm} et 60% f_{cm}) et des conditions de séchage (en endogène ou 50%HR). Dans le cas du séchage à 50%HR, les déformations sont amplifiées par rapport à la condition en endogène du fait de la part complémentaire de retrait de dessiccation et de fluage de dessiccation.

La Figure 6 présente les évolutions des déformations totales mesurées sur les cylindres à partir de l'instant de mise en charge à 20°C, en condition endogène ou à 50%HR puis après chauffage à 40°C un jour après chargement. Ces conditions THM sont ensuite maintenues dans le temps. Suite à un problème expérimental, les données pour la configuration à 40°C en dessiccation à 50%HR n'est pas disponible et l'essai sera refait.

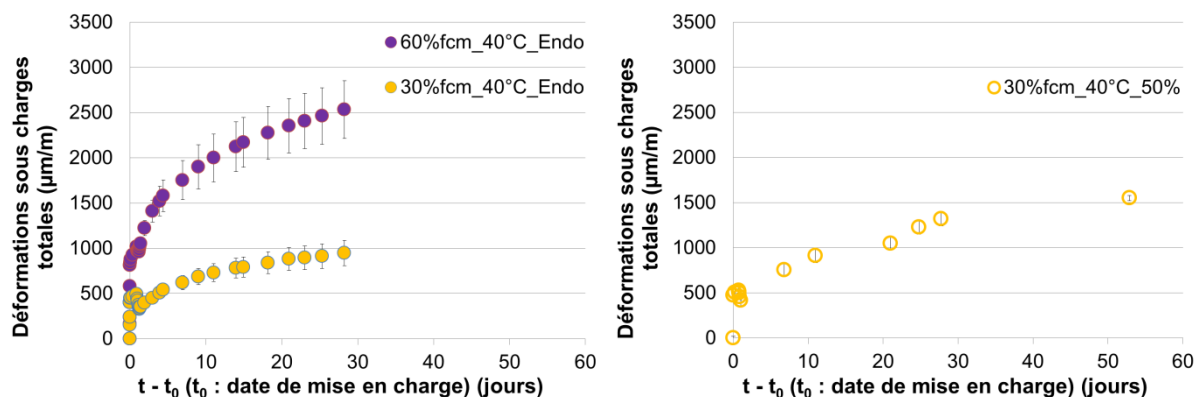


Figure 6. Evolution des déformations totales à 30% f_{cm} et 60% f_{cm} à 40°C en condition endogène (gauche) et en 50%HR (droite)

Les déformations élastiques instantanées sont semblables à celles précédemment présentées. On observe ensuite le développement du fluage à 20°C, en condition endogène ou en condition de séchage à 50%HR pendant un jour, avant le chauffage à 40°C. Le chauffage des échantillons à 1 jour conduit à une dilatation thermique observable sur chaque évolution. Etant donné que la vitesse de chauffage est relativement lente, 0,1°C/mn, cette déformation de dilatation thermique se produit simultanément avec celles de contraction de fluage et de retrait notamment celui en dessiccation. On observe globalement une diminution des déformations totales dans cette période, ce qui signifie que pendant le chauffage, la part de dilatation est prépondérante par rapport à celles susmentionnées. Lorsque la température est stabilisée à 40°C, le fluage évolue avec une cinétique intense dans les premiers jours, puis ralentit au-delà d'environ 10 jours. Ce comportement pourrait donc correspondre à du fluage, ou déformation, thermique transitoire qui se produit lorsqu'un béton est chauffé sous chargement. Les cinétiques sont néanmoins inférieures à celles mesurées par Cagnon [3] pour ces mêmes conditions, endogène et de température. Les plus fortes cinétiques de fluage thermique transitoire observées par Cagnon pourraient s'expliquer par le rôle de l'eau et l'influence du degré de saturation sur les déformations de fluage. En effet, ses travaux ont été menés sur un béton saturé suite à une cure dans l'eau, contrairement au béton de la présente étude conservé en cure endogène. De plus, dans l'étude menée par Cagnon [3] les bétons sont chauffés immédiatement après l'application de la charge, ce qui n'est pas le cas dans nos travaux puisque le chauffage s'effectue après un jour de chargement. L'analyse des déformations en condition de séchage montre des déformations supérieures à celles enregistrées en endogène à cause du complément de déformations de retrait et fluage de dessiccation. Le séchage est activé thermiquement. Les pores plus fins que ceux à 20°C sont vidés de leur eau, ce qui provoque des tensions capillaires plus intenses.

3.1.2 Effets du taux de chargement et de la température sur le fluage en compression

Pour analyser l'impact du taux de chargement, les résultats sont généralement exprimés en fluage spécifique. Le fluage spécifique correspond aux déformations différées sous charge (déformations élastiques préalablement retranchées) auxquelles on soustrait les déformations de retrait, et ensuite rapportées à la contrainte appliquée à l'instant t_0 , conformément à l'équation (Eq. 1). Pour pouvoir estimer l'effet de la température sur le fluage spécifique, nous proposons de prendre pour instant t_s de référence l'instant t correspondant à l'atteinte de la température de 40°C, qui correspond à la fin de la dilatation thermique. Compte tenu de la vitesse modérée de chauffage, des déformations de fluage se produisent pendant la phase de dilatation thermique. Pour éviter de sous-estimer le fluage en température en négligeant cette part de fluage, le même instant t_s est utilisé pour traiter les données de fluage à 20°C. En raisonnant de cette manière, une part de fluage thermique transitoire, vraisemblablement non négligeable et susceptible d'endommager le matériau, se produisant durant la période de chauffage à cinétique lente n'est donc pas considéré.

Les évolutions des fluages spécifiques mesurées sur les cylindres sont présentées à partir de l'instant de stabilisation en température t_s (à la fin de la dilatation) sur la Figure 7.

$$\text{fluage spécifique}(t) = \frac{\varepsilon_{\text{différée sous charge}}(t) - \varepsilon_{\text{différée sous charge}}(t_s) - (\varepsilon_{\text{retrait}}(t) - \varepsilon_{\text{retrait}}(t_s))}{\sigma(t_0)} \quad (\text{Eq.1})$$

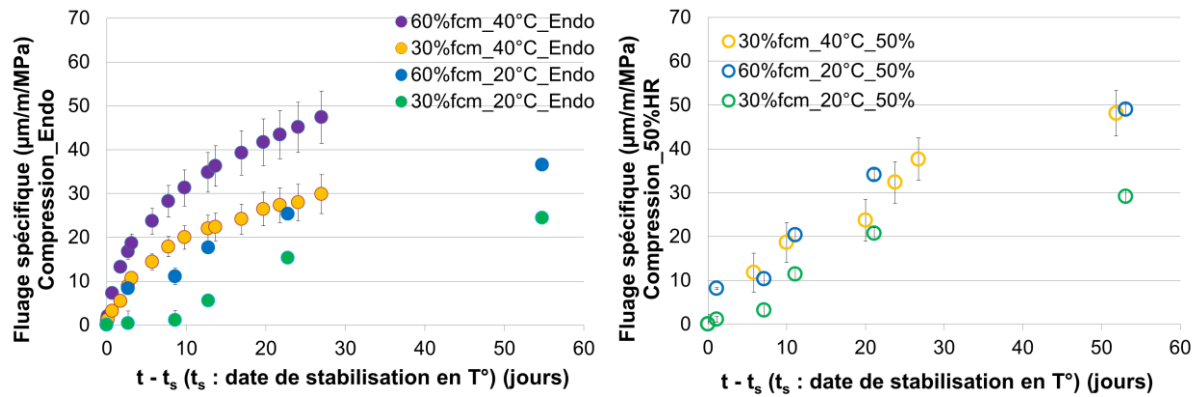


Figure 7. Evolution des fluages spécifiques à 30% f_{cm} et 60% f_{cm} à 20°C et 40°C en condition endogène (gauche) et en 50%HR (droite)

Ces résultats mettent en évidence la non-linéarité du fluage avec le taux de chargement puisque le fluage spécifique à un taux de charge 60% f_{cm} est supérieur à celui à 30% f_{cm} . Le taux de 60% f_{cm} pourrait conduire à un endommagement de fluage. Des études montrent que pour des taux de charge modéré inférieur à 45% f_{cm} , le fluage demeure linéaire [8-10]. Ces résultats montrent également l'effet de la température sur les déformations de fluage. Pour un même taux de charge, les amplitudes du fluage spécifique sont plus élevées à 40°C qu'à 20°C. Cet effet, mis en évidence par d'autres études, est généralement attribué à la diminution de la viscosité de l'eau qui pourraient favoriser le glissement des feuillettes de C-S-H, considéré comme un des mécanismes à l'origine du fluage. Certains chercheurs modélisent ainsi l'activation thermique via une loi d'Arrhenius en faisant intervenir la valeur de l'énergie d'activation qui régit la viscosité de l'eau [11, 12]. Néanmoins, ces précédentes recherches concernaient l'étude sur béton chauffé puis chargé, et non chargé puis chauffé comme dans cette étude. Or, un tel historique THM induit un supplément de déformation caractérisé par une cinétique et des amplitudes très fortes appelé fluage, ou déformation, thermique transitoire d'après [5, 6, 7]. Si on peut considérer que l'on observe effectivement du fluage thermique transitoire, les résultats de la cette étude ne permettent toutefois pas de distinguer des augmentations de cinétiques aussi élevées que celles constatées dans ces précédents travaux de recherche. On constate enfin que, en condition endogène, les valeurs des rapports entre fluage spécifique à 60% f_{cm} et à 30% f_{cm} sont respectivement de 1,66 à 20°C (à 23 jours) et de 1,59 à 40°C (à 27 jours). Il semble donc que la non-linéarité ne soit pas amplifiée par la température dans cette gamme de températures modérées.

3.2 Déformations sous charges totales des poutres béton précontraint

La Figure 8 présente les évolutions des déformations totales mesurées sur les fibres supérieure et inférieure à partir de l'instant de mise en tension du câble de précontrainte à 20°C. Depuis la mise en tension jusqu'au début de tous les essais les poutres sont conservées en endogène, comme présenté dans le paragraphe 2.1.2. Du fait de la réalisation en série des divers essais, l'application du chargement en fluage en flexion diffère suivant la condition hydrique. Le chargement en flexion en condition endogène est appliqué approximativement 250 jours après la mise en tension du câble de précontrainte. Le chargement ainsi que la mise en séchage à 50%HR sont appliqués environ 280 jours après la mise en tension. L'échelle des temps est exprimée en $t - t_i$, t_i étant le début de l'application de la tension de précontrainte dans les poutres.

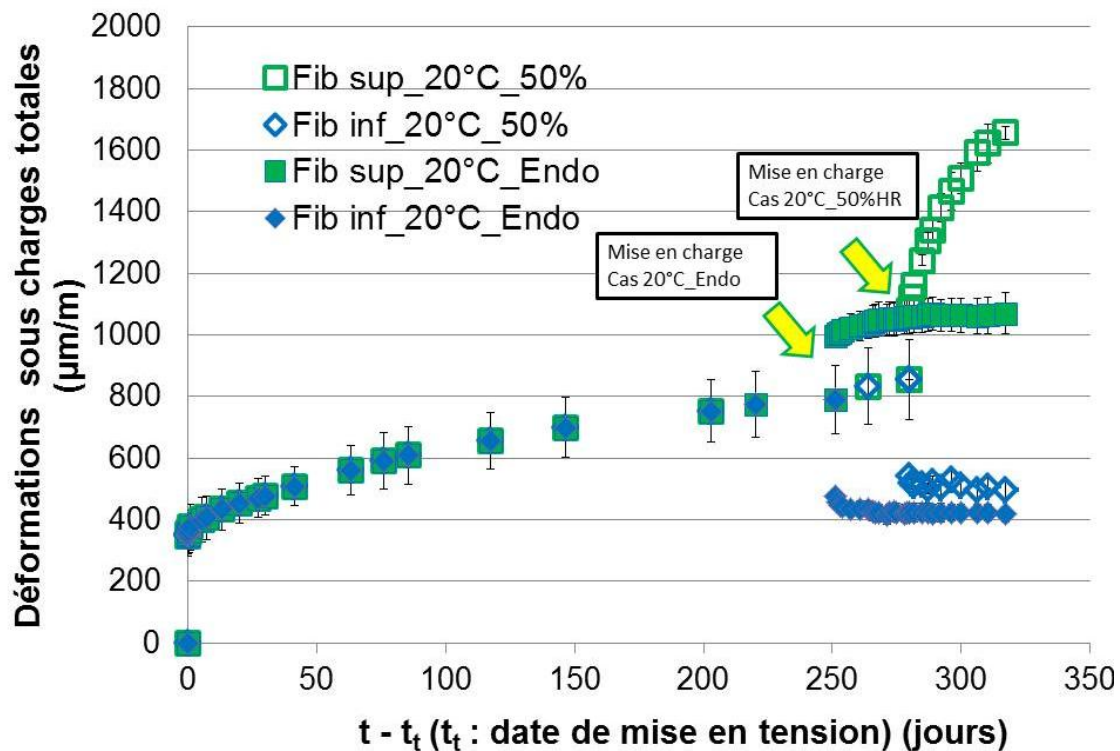


Figure 8. Evolution des déformations totales en fibres supérieure et inférieure à partir de la mise en tension des poutres précontraintes à 20°C en condition endogène et à 50%HR

A la mise en tension, la déformation de contraction élastique instantanée est identique sur les deux fibres puisque le câble de précontrainte est positionné suivant la ligne moyenne de la poutre. Pour la même raison, une fois la précontrainte appliquée, le retrait endogène et le fluage propre, sous contrainte de compression de $30\%f_{cm}$ due à la précontrainte, se développent sur les deux fibres suivant les mêmes évolutions. Ce résultat atteste des symétries géométriques et mécaniques de l'ensemble du dispositif d'essai et des poutres, en particulier le centrage du toron. Au bout d'approximativement 250 jours et 280 jours de mise en tension, les poutres précontraintes sont donc soumises à de la flexion simple, respectivement en endogène et à 50%HR, conduisant à la superposition, par rapport à l'état de contrainte initial de la section sous l'effet de la précontrainte, d'une contrainte de compression en fibre supérieure de $30\%f_{cm}$ et de traction en fibre inférieure de $-30\%f_{cm}$. Il se produit une déformation élastique instantanée de compression et de traction identique en valeur absolue respectivement en fibres supérieure et inférieure.

Après l'application de la flexion, pour les poutres conservées isolées des échanges hydriques, le retrait endogène à 20°C étant quasiment négligeable, on peut considérer que les déformations différées sont principalement celles de fluage propre. Les pertes de précontrainte différées de retrait endogène, fluage propre due à la précontrainte et la relaxation du toron qui se développent dès la date de mise en tension induisent une diminution de la contrainte de compression induite par la précontrainte initialement égale à $30\%f_{cm}$. Il en résulte que la contrainte de compression en fibre supérieure après chargement de flexion est inférieure à $60\%f_{cm}$. Pour les mêmes raisons, la contrainte en fibre inférieure résultant de la superposition de la contrainte de compression due à la précontrainte inférieure à $30\%f_{cm}$ et de la contrainte de traction par flexion de $-30\%f_{cm}$ correspond probablement à une légère traction. Ce fluage en traction en endogène demeure modéré, de l'ordre de $50\mu\text{m/m}$ au bout de 50 jours.

Pour les poutres soumises à 50%HR, les amplitudes sur la fibre supérieure deviennent plus importantes que dans le cas en endogène du fait du couplage avec le séchage à 50%HR. En fibre

inférieure, le retrait total plus important que celui en endogène et le fluage en traction tendent à se compenser.

La Figure 9 présente les évolutions des déformations totales mesurées sur les fibres supérieure et inférieure des poutres précontraintes qui sont soumises à du fluage de flexion à 40°C. Ces déformations sont représentées à partir de l'instant de la mise en tension du toron à 20°C. Au bout d'approximativement 65 jours et 125 jours de mise en tension, les poutres précontraintes sont soumises à de la flexion simple, respectivement en endogène et à 50%HR, puis sont chauffées un jour après. Depuis la mise en tension jusqu'au début de l'essai de fluage, les poutres sont systématiquement conservées en endogène.

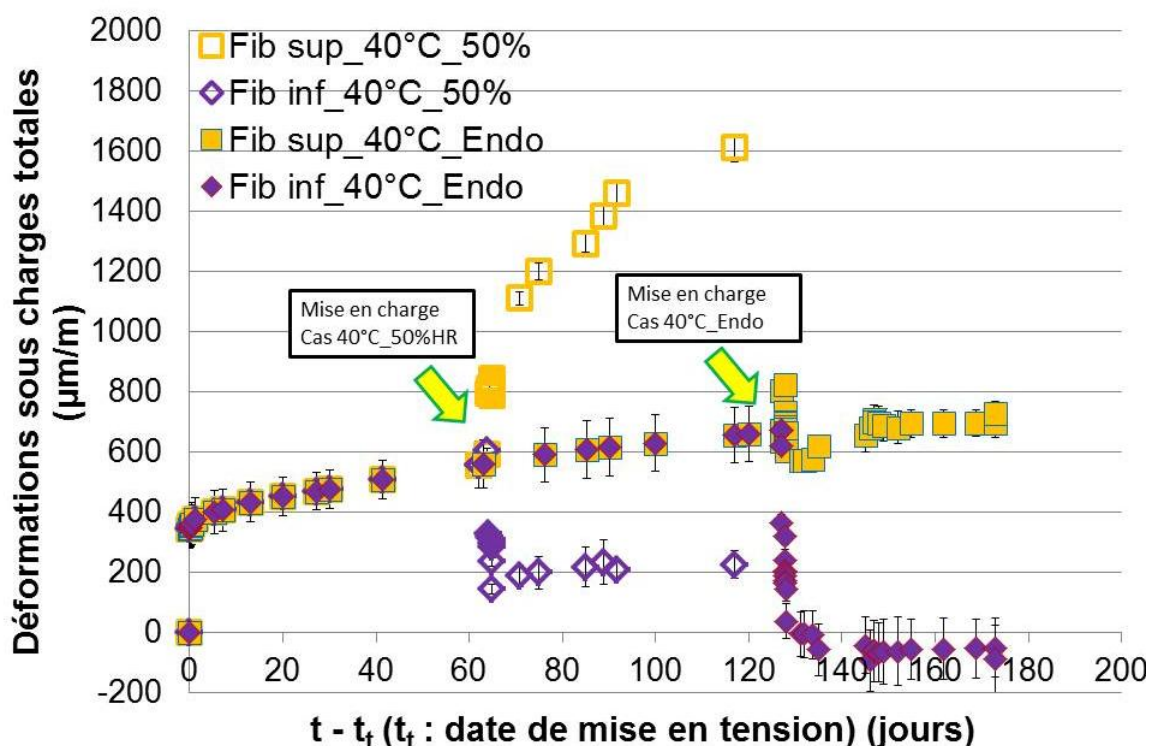


Figure 9. Evolution des déformations totales en fibres supérieure et inférieure à partir de la mise en tension des poutres précontraintes à 40°C en condition endogène et à 50% HR

Pour les poutres maintenues en condition endogène durant la totalité de l'essai, la mise en flexion induit une déformation instantanée de contraction en fibre supérieure et de traction en fibre inférieure à laquelle vient se superposer la dilatation thermique due au chauffage à 40°C appliqué le lendemain. Suite à la dilatation, on peut constater en fibre supérieure l'effet de la température avec une déformation différée sous charge de 2 à 3 supérieure à celle mesurée en endogène à 20°C durant la même durée d'essai. En fibre inférieure, un léger fluage de traction peut être observé durant les premiers jours qui suivent le chauffage, qui tend ensuite à se stabiliser. Puis, ces déformations paraissent ensuite atténuées par le retrait endogène. Pour les poutres soumises à 50%HR, le couplage avec le séchage entraîne une augmentation significative de la cinétique de la déformation en fibre supérieure due au retrait de dessiccation et au fluage de dessiccation activés thermiquement. En fibre inférieure, on constate une contraction et non plus une légère traction, ce qui semble traduire que le retrait total est supérieur au fluage de traction.

3.3 Comparaison des déformations différées mesurées en compression uniaxiale et sur poutres précontraintes

Nous proposons une confrontation des déformations différées mesurées sur cylindres de béton sous compression uniaxiale avec celles enregistrées en fibre supérieure comprimée durant les différentes phases subies par les poutres précontraintes.

3.3.1 Depuis la mise en tension

La Figure 10 compare les déformations différées mesurées sur la fibre supérieure des poutres précontraintes à partir de la mise en tension et sur les cylindres soumis à la compression uniaxiale à $30\%f_{cm}$ dans les mêmes conditions thermique, 20°C , et hydrique, en endogène. Pour le fluage en compression uniaxiale, nous rappelons que le chargement est appliqué à 90 jours alors que le toron est tendu à 64 jours.

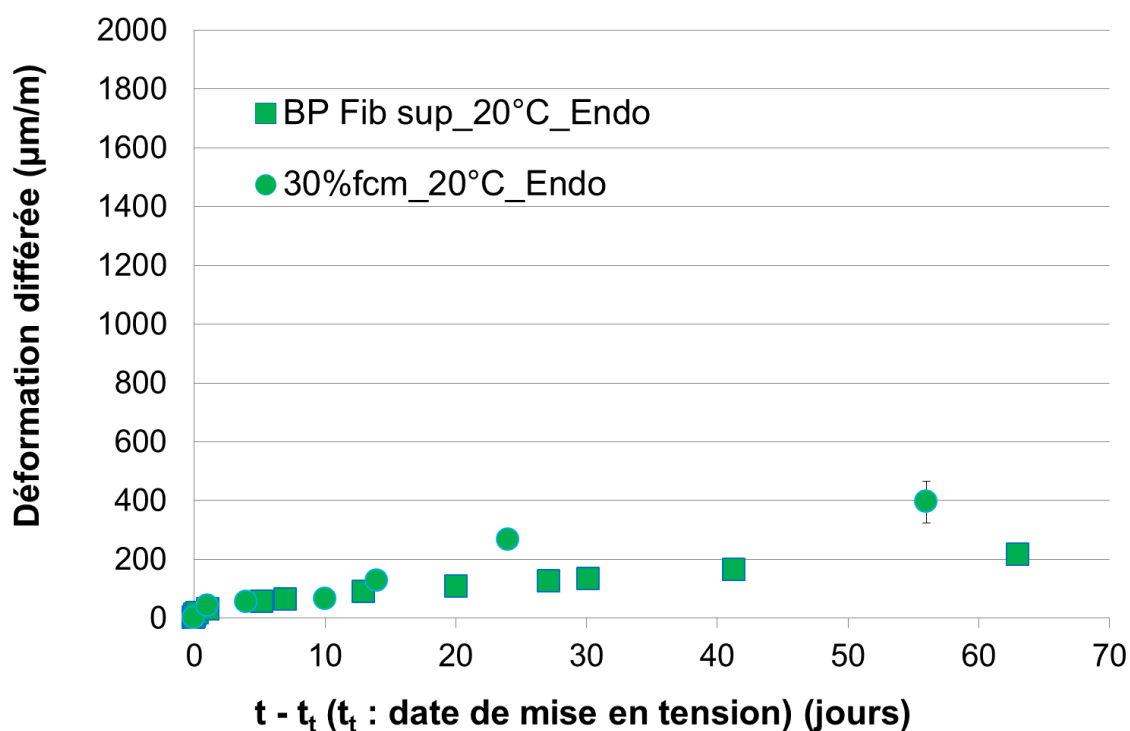


Figure 10. Evolution des déformations différées en fibres supérieure à partir de la mise en tension des poutres précontraintes à 20°C en condition endogène

L'évolution est assez identique pendant 10 jours, et au-delà, l'écart devient de plus en plus élevé. Au bout de 55 jours, la valeur mesurée sur les cylindres correspond environ au double de celle des poutres. Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer cet écart. Dès la mise en tension, les déformations de retrait et de fluage du béton, ainsi que le phénomène de relaxation de l'acier de précontrainte, entraînent des pertes de précontrainte dites différées. Par conséquent, la contrainte dans le béton induite par la tension du toron, initialement égale à $30\%f_{cm}$, diminue dans le temps. En revanche, dans le cas du fluage en compression uniaxiale, l'utilisation d'accumulateurs d'azote permet d'assurer le maintien de cette même valeur de contrainte initiale. Cette explication serait concordante

avec des évolutions similaires dans les premiers jours, et qui tendent à diverger à plus long terme. La présence de la cage d'armatures passives de type haute adhérence et de cadres d'effort tranchant pourrait également restreindre l'évolution des déformations différées du béton de par leur plus grande rigidité.

3.3.2 Depuis la mise en charge

La Figure 11 compare les déformations différées des fibres supérieures comprimées mesurées sur poutres précontraintes à partir de la mise en flexion avec celles des cylindres soumis à $60\%f_{cm}$, dans les mêmes conditions thermo-hydriques à 20°C , et soit en endogène, soit à 50%HR.

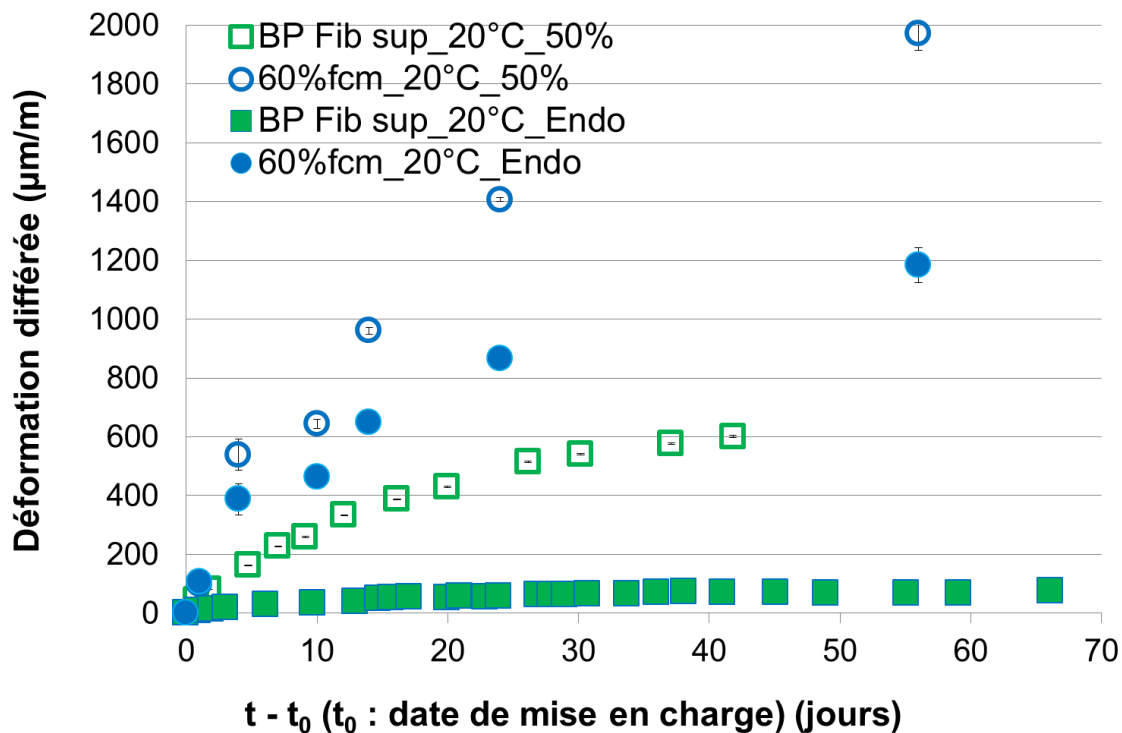


Figure 11. Comparaison des évolutions des déformations différées mesurées en fibre supérieure des poutres précontraintes durant le fluage en flexion et sur cylindres en fluage en compression à 20°C , en condition endogène et à 50% HR

On remarque que dans tous les cas, les amplitudes des déformations des poutres sont beaucoup plus faibles que celles des cylindres. Au début de fluage en flexion, les poutres ont déjà subi environ 250 jours de fluage propre dû à la mise en tension. Par conséquent, les pertes de précontrainte pourraient être suffisamment conséquentes pour réduire la contrainte appliquée sur la fibre comprimée, alors qu'il existe un effet important du taux de charge sur le fluage comme présenté dans la partie (3.1). En outre, les déformations plus faibles mesurées sur les poutres pourraient également s'expliquer par une forte consolidation du matériau induite par la longue période d'application de la précontrainte préalable à l'essai de fluage, qui aurait consommé le potentiel de déformation différé du matériau, conformément à ce concept avancé par des études antérieures [13, 14]. De plus, les poutres sont chargées à 250 jours soit 160 jours après les éprouvettes cylindriques. Le comportement vieillissant du béton pourrait expliquer aussi une partie de cette différence au niveau des amplitudes de déformations.

La Figure 12 compare les déformations différées des fibres supérieures à partir de la stabilisation en température avec celles des cylindres soumis à $60\%f_{cm}$, dans les mêmes conditions thermo-hydriques : 40°C et en endogène. Comme à 20°C , les valeurs mesurées sur les cylindres sont plus élevées que celles des poutres. La forte augmentation des déformations des éprouvettes cylindriques dans les premiers jours, pour un béton peu consolidé, serait du fluage thermique transitoire. L'absence d'un tel phénomène dans le cas des poutres précontraintes, qui ont subi du fluage propre sous le seul effet de la précontrainte à 20°C pendant une longue période, pourrait confirmer que le fluage transitoire ne se produit pas s'il y a eu de consolidation préalable significative du matériau [3].

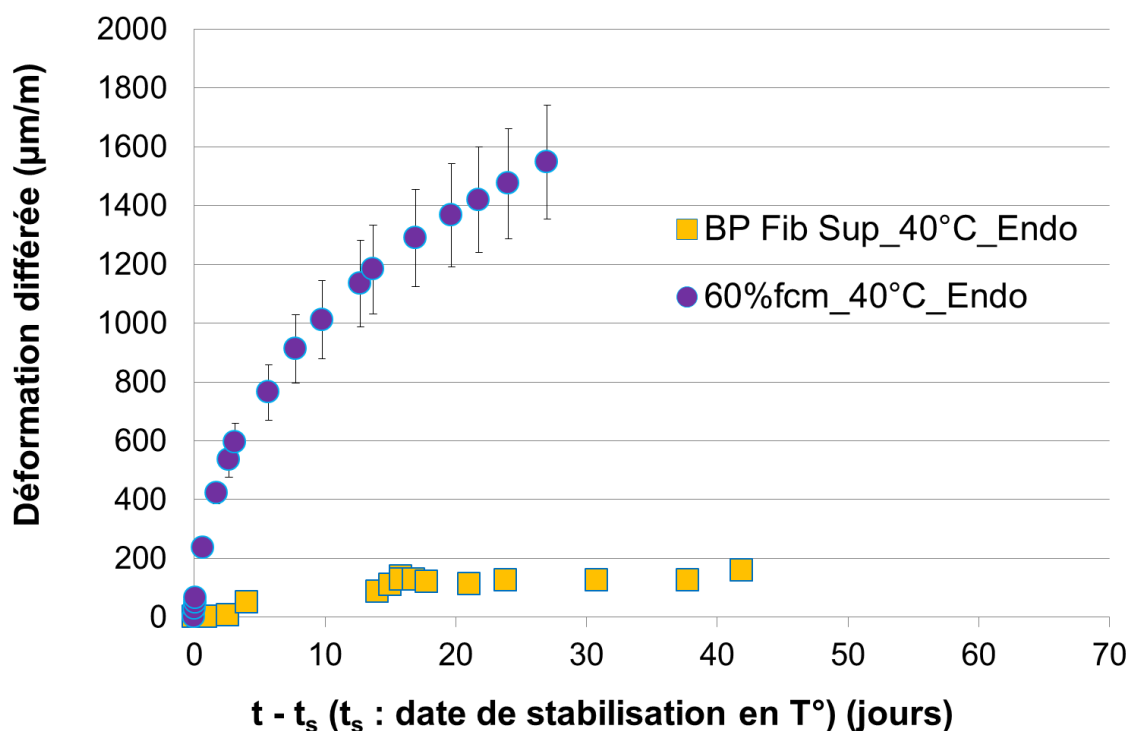


Figure 12. Comparaison des évolutions des déformations différées mesurées en fibre supérieure des poutres précontraintes durant le fluage en flexion et sur cylindres en fluage en compression, après stabilisation de la température à 40°C , en condition endogène

4 Conclusions

La présente communication traite des premiers résultats de la vaste campagne d'essais de fluage réalisée dans le cadre du projet ANR MACENA qui concerne l'étude de l'enceinte interne en béton précontraint d'une enceinte nucléaire en conditions accidentelles. Cette étude a pour objectif principal de fournir des données expérimentales de déformations à l'échelle du matériau béton via des essais de fluage en compression uniaxiale sur cylindres et à l'échelle de l'élément de structure via des essais de fluage en flexion quatre points de poutres précontraintes. Plusieurs configurations Thermo-Hydro-Mécaniques sont appliquées associant différentes températures, conditions hydriques, et taux de chargement de fluage. Les résultats présentés concernent les températures 20°C et 40°C , les conditions hydriques en endogène (sans séchage) et à 50%HR (avec séchage) et deux taux de chargement modéré ou intense pour le fluage en compression.

L'analyse comparative des déformations de fluage en compression aux deux taux de chargement de

fluage à 20°C et à 40°C met évidence la non linéarité du fluage, sans couplage thermique pour cette gamme de températures. Les résultats à 20°C et 40°C montrent l'activation thermique des déformations différées et le couplage avec le séchage. Ce phénomène d'augmentation des cinétiques et des amplitudes des déformations de fluage lorsqu'on chauffe un béton préalablement chargé est appelé fluage thermique transitoire. Néanmoins, le fluage thermique transitoire observé se caractérise par des cinétiques moins élevées que celles constatées dans les rares études qui s'y sont intéressées. Les résultats des essais de fluage de flexion sur poutres précontraintes mettent en évidence du fluage de compression sur la fibre comprimée, et un léger fluage de traction en fibre tendue en condition endogène, voire de la contraction lorsque le retrait en dessiccation à 50%HR devient prépondérant. La comparaison des données expérimentales des deux types d'essais de fluage montre que, pour un même taux de chargement, les déformations différées en compression uniaxiale sont plus importantes que celles mesurées sur la fibre comprimée des poutres précontraintes. Ce résultat pourrait être attribué aux pertes de précontraintes induites par le retrait, le fluage et la relaxation de l'acier de précontrainte qui diminuent la contrainte due à la précontrainte alors que la contrainte appliquée en fluage en compression est maintenue constante grâce à un système de compensation de charge. A 40°C, le fluage thermique transitoire modéré observé en fluage en compression n'apparaît pas sur la fibre comprimée des poutres précontraintes. Ce constat pourrait confirmer que le fluage transitoire ne se produit pas s'il y a eu de la consolidation préalable significative du matériau.

Références

- [1] W. Ladaoui, Etude expérimentale du comportement Thermo-Hydro-Mécanique à long terme des BHP destinés aux ouvrages de stockage des déchets radioactifs, Thèse, Université Toulouse III, 2010.
- [2] W. Ladaoui, T. Vidal, A. Sellier, Effect of a temperature change from 20 to 50°C on the basic creep of HPC and HPFRC, *Materials and Structures* 44 (2011) 1629-1639.
- [3] H. Cagnon, Influence des variations Thermo-Hydro-Mécaniques sur le comportement différé du béton, Thèse, Université Toulouse III, 2015.
- [4] W. Ladaoui, T. Vidal, A. Sellier, X. Bourbon, Analysis of interactions between damage and basic creep of HPC and HPFRC heated between 20 and 80°C, *Materials and Structures* 46 (2013) 13-23.
- [5] H.M. Fahmi, M. Polivka, B. Bresler, Effects of sustained and cyclic elevated temperature on creep of concrete, *Cement and Concrete Research* 2 (1972) 591-606.
- [6] G.A. Khoury, B.N. Grainger, P.J.E. Sullivan, Transient thermal strain of concrete: literature review, conditions within specimen and behavior of individual constituents, *Magazine of Concrete Research* 37 (1985) 131-144.
- [7] G.A. Khoury, Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment, *Magazine of Concrete Research* 44 (1992) 291-309.
- [8] P. Acker, A. Barral, Étude critique des essais classiques de fluage et de relaxation des bétons durcis, *Cahiers du groupe français de rhéologie*, tome VI, n° 4, 1983, pp. 243-251.
- [9] N. Ranaivomanana, S. Multon, A. Turatsinze, Tensile, compressive and flexural basic creep of concrete at different stress levels, *Cement and Concrete Research* 52 (2013) 1-10.
- [10] NF EN 1992-1-1. Eurocode 2 : Calcul des structures en béton. Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments, octobre 2005.
- [11] P. Pezzani, Propriétés thermodynamiques de l'eau, 1992.
- [12] S. Ghabezloo, Micromechanics analysis of thermal expansion and thermal pressurization of a hardened cement paste, *Cement and Concrete Research* 41 (2011) 520-532.
- [13] P. Acker, J.M. Torrenti, F. Ulm, Comportement du béton au jeune âge - Traité mécanique et

ingénierie des matériaux, Hermès-Lavoisier, Paris, 2004.

[14] A. Sellier, S. Multon, L. Buffo-Lacarrière, T. Vidal, X. Bourbon, G. Camps, Concrete creep modelling for structural applications: non-linearity, multi-axiality, hydration, temperature and drying effects, *Cement and Concrete Research* 79 (2016) 301-315.