

Lyon, France
5-6 juillet 2012

Etude de l'effet de la température sur le fluage en compression des bétons - résultats et interprétations

T. Vidal^A, W. Ladaoui^A, A. Sellier^A

A Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, INSA - Université Paul Sabatier, Toulouse, France

RÉSUMÉ: Cette étude concerne le fluage propre en compression uniaxiale, en température modérée, de quatre Bétons à Hautes Performances (BHP), dont deux fibrés, destinés aux futures structures de stockage des déchets radioactifs de l'Andra. Les conditions particulières in situ et le peu de données expérimentales disponibles ont incité la réalisation de ce programme expérimental de fluage propre pour trois températures : 20°C, 50°C et 80°C. Les objectifs sont d'estimer l'effet des températures modérées sur le fluage propre et d'améliorer la compréhension des interactions entre l'endommagement et le fluage propre en vue d'une prise en compte dans des modèles Thermo-Hydro-Mécanique (THM). Les résultats montrent une activation non linéaire du fluage propre par la température. A 80°C, un endommagement d'origine thermique, caractérisé par une réduction des modules d'élasticité des BHP non fibrés, amplifie le fluage. L'utilisation d'une loi d'activation thermique globale de type Arrhenius permet de retranscrire correctement l'effet d'une température modérée et semble pertinente pour intégrer ce paramètre dans des modèles THM.

MOTS CLES : Fluage, Retrait, Température, Hygrométrie, Mécanique.

1. INTRODUCTION

La connaissance des comportements instantanés et différés du béton en température est nécessaire pour appréhender le fonctionnement en service des structures soumises à une température d'exploitation relativement élevée (entre 20 et 80°C) sur du long terme (centrale nucléaire, ouvrage de stockage de déchets radioactifs etc...). La plupart des études ayant investigué l'effet de la température sur le fluage sont anciennes et par conséquent concernent principalement les bétons ordinaires (BO), comme l'ont constaté Ladaoui et al (2011) dans une synthèse bibliographique. Toutefois, les résultats obtenus par Hannant (1967), and Nasser and Neville (1965) sur des bétons ordinaires de fortes résistances en compression montrent une augmentation plus importante des amplitudes du fluage propre sous l'effet de la température. Ce constat semble ainsi présager d'une sensibilité plus forte du fluage en température pour le cas des BHP. Les formulations de ces matériaux se distinguent de celles des BO par l'ajout d'additions minérales réactives, de superplastifiant, de rapport E/L réduit leur permettant de former davantage de C-S-H et d'acquies de fortes compacités. Les impacts de ces spécificités des BHP sur le comportement mécanique à température ambiante sont désormais bien connus (Acker, 2003 ; Jianyong et Yan, 2001). Néanmoins, ces différences entre BO et BHP rendent difficile l'extrapolation des résultats de fluage propre des BO à ceux des BHP. L'absence d'études sur le comportement différé des BHP justifie

l'importance et la nécessité d'un travail de recherche visant à mieux appréhender la réponse à long terme des BHP soumis à des contraintes thermo- mécaniques.

La présente étude s'intéresse à cette problématique. Elle consiste à fournir des données relatives aux évolutions de fluage propre de quatre BHP à base de CEM I et CEM V, dont deux formulations avec fibres inoxydables et fumée de silice. L'analyse comparative des évolutions des modules d'élasticité des éprouvettes de retrait et de fluage, avant et après essai de fluage en température, permettra de mettre en évidence l'effet de la température sur l'état mécanique du matériau.

2. Programme expérimental

2.1 Matériaux

L'étude concerne quatre types de BHP à base d'un ciment CEM I et d'un CEM V avec cendres volantes et laitier de haut fourneau destinés à la réalisation des futurs ouvrages de stockage de déchets radioactifs MAVL (Moyenne Activité Vie Longue). Ces formulations ont été mises au point par l'Andra lors d'études préalables (Camps et al. 2008, Ladaoui et al. 2011). Les BHP nommés CEM I et CEM V sont non fibrés, alors que ceux nommés CEM IF et CEM VF incorporent des fibres acier inoxydables (longueur 30 mm et de diamètre 0.6 mm). De la fumée de silice est ajoutée aux BHP fibrés pour compenser les pertes de maniabilité à l'état frais et de compacité liées à la présence des fibres. Les bétons sont confectionnés avec des granulats calcaires (sable 0/4 et gravier 4/12.5) provenant de la carrière du Boulonnais. Le rapport E/L des bétons non fibrés est égal à 0,45 et 0,41 respectivement pour le CEM I et le CEM V. Il est quasiment similaire pour les BHP fibrés, i.e. 0.32 et 0.33 pour le CEM IF et le CEM VF. Les quantités de ciment sont de 400 kg/m³ pour le CEM I et 450 kg/m³ pour le CEM V. Pour les BHP fibrés, elle est identique et égale à 454 kg/m³. Le tableau 1 détaille les compositions de ces quatre formulations.

Tableau 1. Compositions des BHP en kg/m³

Constituants	CEM I	CEM V	CEM IF	CEM VF
CEM I 52.5 R CE PM-ES-CP2 (Lafarge, Val d'Azergues)	400	-	454	-
CEM V/A 42.5 N PM-ES-CP1 (Calcia, Airvault)	-	450	-	454
Sable Calcaire 0/4 mm, Boulonnais	858	800	984	984
Gravier Calcaire 4/12.5 mm, Boulonnais	945	984	672	672
Superplastifiant Glénium 27, MBT	10	11.25	-	-
Fumée de Silice Condensil S95 DM	-	-	45	45
Fibre inoxydable IFT (L = 30 mm, Ø = 0.6 mm)	-	-	85	85
Superplastifiant SIKA Viscocrete 5400F	-	-	13.70	17.25
Eau/Liant	0.45	0.41	0.32	0.33
Eau totale	178	183	172	178

Pour chaque BHP, dès le démoulage à un jour, des éprouvettes cylindriques (Ø=110 mm, h=220 mm) ont été placées dans l'eau jusqu'à l'échéance des essais. Certaines ont été utilisées pour suivre l'évolution des résistances en compression et des modules d'élasticité à différentes dates. Les éprouvettes destinées au fluage propre ont également été conservées dans l'eau jusqu'à l'âge de chargement, supérieur ou égal à 300 jours (300 jours pour les essais à 20°C et 50°C et 427 jours pour ceux à 80°C), ceci afin de stabiliser l'hydratation et saturer la porosité. Cette cure de longue durée a permis de découpler le fluage de l'effet de l'hydratation du ciment et des ajouts pouzzolaniques. Le choix de travailler sur béton saturé a été fait dans le but de limiter autant que possible toute dépression capillaire due à l'auto-dessiccation pendant l'essai de fluage. En effet, les dépressions capillaires sont sujettes à la température et constitue de ce fait un couplage avec le fluage de dessiccation (ou d'autodessiccation) qui pourrait « parasiter » les mesures de cinétique de fluage propre.

Le tableau 2 récapitule les valeurs des caractéristiques mécaniques à l'état durci, correspondant à la moyenne de trois essais sur éprouvettes cylindriques, i.e. la résistance moyenne en compression f_{cm} , le module d'élasticité E_{cm} mesuré selon les recommandations RILEM et le coefficient de Poisson ν à 28 jours et à l'échéance de chargement. Compte tenu des moyens expérimentaux disponibles, deux coulages ont dû être réalisés afin de constituer les corps d'épreuve destinés à la série d'essai de

fluage propre à 50°C et celle à 20°C et 80°C. Ceci explique notamment la dispersion des valeurs des caractéristiques des matériaux à 28 jours suivant la série d'essai.

Tableau 2. Caractéristiques mécaniques des BHP à à 28 jours et au jour de mise en charge de fluage.

Age	Propriétés Mécaniques	CEM I	CEM V	CEM IF	CEM VF
Série d'essai à 50°C					
28 jours	f_{cm} [MPa]	77	65	95	83
	E_{cm} [GPa]	42,9	40,7	44,6	41,5
	ν	0,27	0,26	0,27	0,27
date de mise en charge (427 jours)	f_{cm} [MPa]	86	75	113	99
	E_{cm}^* [GPa]	45,5	44,8	46,2	45,1
	σ_{fluage} [MPa]	25,8	22,5	33,9	29,7
	ϵ_{inst} à 50°C [$\mu\text{m}/\text{m}$]	620	503	791	670
	(E_{cm} mesuré lors essai fluage)	(41,6 GPa)	(44,7 GPa)	(43,0 GPa)	(44,3 GPa)
	ν	0,27	0,27	0,29	0,28
Série d'essai à 20°C et 80°C					
28 jours	f_{cm} [MPa]	74	73	115	90,7
	E_{cm} [GPa]	42,1	43,0	46,7	44,7
	ν	0,27	0,28	0,28	0,28
date de mise en charge (300 jours)	f_{cm} [MPa]	87	99	130	122
	E_{cm}^* [GPa]	44,7	45,1	48,8	46,2
	σ_{fluage} [MPa]	26,1	29,7	32,5	36,6
	ϵ_{inst} à 80°C [$\mu\text{m}/\text{m}$]	751	858	700	882
	(E_{cm} mesuré lors essai fluage)	(34,8 GPa)	(34,6 GPa)	(46,4 GPa)	(41,5 GPa)
	ν	0,28	0,29	0,27	0,29

* Module d'élasticité à 20°C (mesuré sur des éprouvettes différentes de celles testées en fluage)

De manière générale, on constate que les résistances en compression et les modules d'élasticité des BHP avec CEM I sont supérieures à celles des BHP avec CEM V, sauf dans le cas des BHP non fibrés de la série à 20°C et 80°C. On remarque également que ces caractéristiques mécaniques sont plus élevées pour les BHP fibrés, probablement du fait de l'ajout de fumée de silice. Les coefficients de Poisson sont globalement identiques quels que soient les BHP et l'échéance de mesure.

Le tableau 3 donne les porosités à l'eau des quatre BHP mesurées à 90 jours. Il est à noter que la porosité globale à l'eau du béton CEM V est la plus élevée. Néanmoins, une étude portant sur ces mêmes bétons a montré, grâce à des mesures au porosimètre à mercure, que le CEM V se caractérisait par une porosité plus fine et par une grande proportion de petits pores (Ranaivomanana, 2010).

Tableau 3. Porosités accessibles à l'eau mesurées à 90 jours

	CEM I	CEM V	CEM IF	CEM VF
Porosité accessible à l'eau (%)	13.2±0.7	13.6±0.2	10.5±0.1	10.4±0.3

2.2 Dispositifs des essais de fluage

Les essais de fluage propre en température ont été réalisés dans une étuve équipée d'un système de fluage en compression uniaxiale répondant aux recommandations RILEM TC 129-MTH (Janvier-Février 2000), et RILEM TC 129-MTH (Mai 2000) et ASTM C 512-02 (2005). La figure 1 montre le montage expérimental pour les essais à 50°C et 80°C ($\pm 2^\circ\text{C}$).

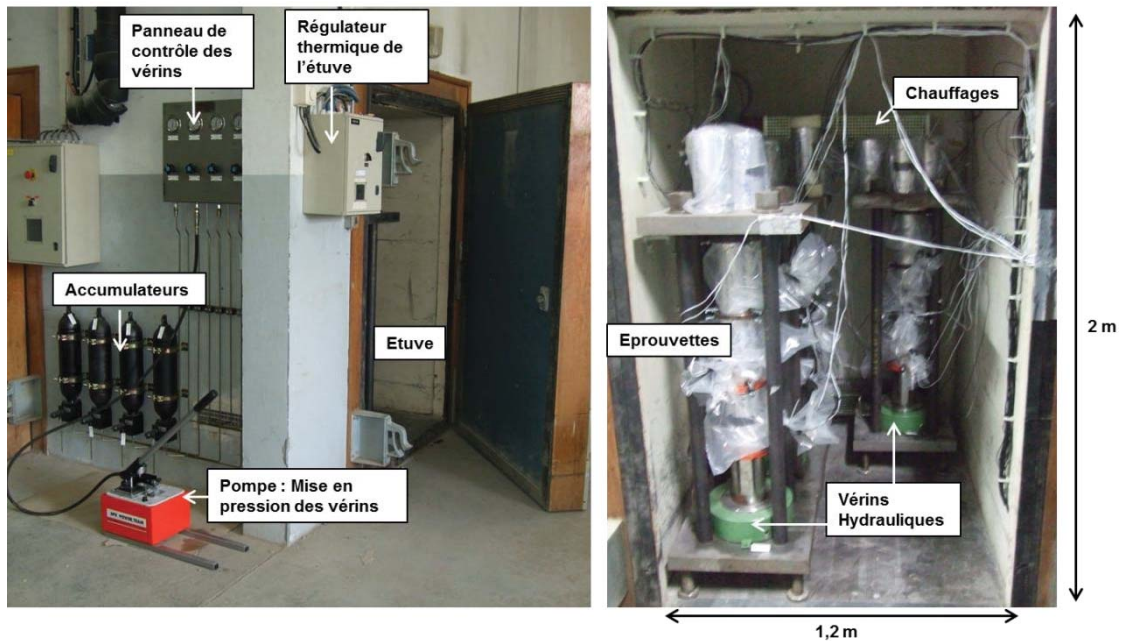


Figure 1. Système de fluage propre en température du LMDC.

Cette étuve est contrôlable en température assurant ainsi un maintien d'une température constante ($\pm 2^{\circ}\text{C}$) et homogène. Elle permet également de faire varier la vitesse de montée en température selon le gradient souhaité, et de ce fait, d'éviter tout risque de fissuration du béton dû à des gradients de température pouvant compromettre l'essai (vitesse appliquée dans notre cas $0.1^{\circ}\text{C}/\text{min}$). Les bâtis de fluage sont munis de vérins reliés individuellement à un circuit hydraulique sur lequel un accumulateur est monté en dérivation de façon à pouvoir restituer la perte de pression en cas de besoin. Ce dispositif permet ainsi d'assurer une pression constante tout au long de l'essai.

La chronologie des sollicitations thermo-mécanique suit la recommandation RILEM pour les essais sur éprouvettes soumises à un état thermo-mécanique stable. Les éprouvettes sont donc, dans un premier, portées à la température voulue. Des thermocouples situés dans une réservation au centre des quelques éprouvettes permettent de vérifier la stabilisation et l'homogénéisation de la température. La mise en fluage est alors réalisée. Cette manière de procéder évite le fluage transitoire (Hansen et Eriksson, 1966 ; Hager et Pimienta, 2005).

Les essais de fluage à 20°C sont réalisés dans une seconde salle à atmosphère régulé (20°C et $50\%HR$). Le taux de chargement de fluage à 20°C et en température correspond à 30% de la résistance en compression mesurée à 20°C , à l'échéance du lancement de l'essai de fluage. Les déformations longitudinales de fluage et de retrait sont enregistrées par l'intermédiaire d'un capteur LVDT positionné dans une réservation située au centre de chaque échantillon et créée lors du coulage (Muñoz, 2000).

Pour chaque formulation, trois éprouvettes cylindriques ($\varnothing = 110 \text{ mm}$, $h = 220 \text{ mm}$) sont testées en fluage propre en compression uniaxiale sur un même bâti et trois autres éprouvettes de même forme sont testées en retrait. Les éprouvettes sont scellées par trois couches d'aluminium étanche autocollant et enveloppées dans un film plastique lui aussi étanche.

3. RESULTATS

Les figures 2 à 4 présentent les évolutions du retrait endogène et du fluage propre à 20°C et 50°C (durant 300 jours), et à 80°C (durée maximale de 52 jours) à partir de l'instant t_0 de début des essais de fluage. Un problème expérimental survenu sur le bâti de fluage utilisé pour les éprouvettes du CEM IF à 50°C a empêché d'obtenir des résultats. Pour les essais de fluage à 80°C , les capteurs n'ont assuré l'enregistrement que pour des durées comprises entre 20 et 52 jours, bien que leur fonctionnement fût garanti par le fabricant pour de telles conditions thermo-hydriques.

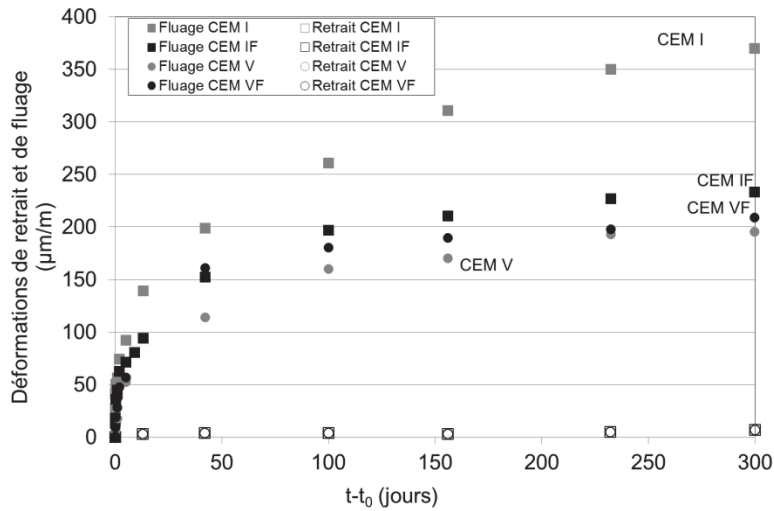


Figure 2. Evolutions des déformations de retrait endogène et de fluage propre des BHP à 20°C.

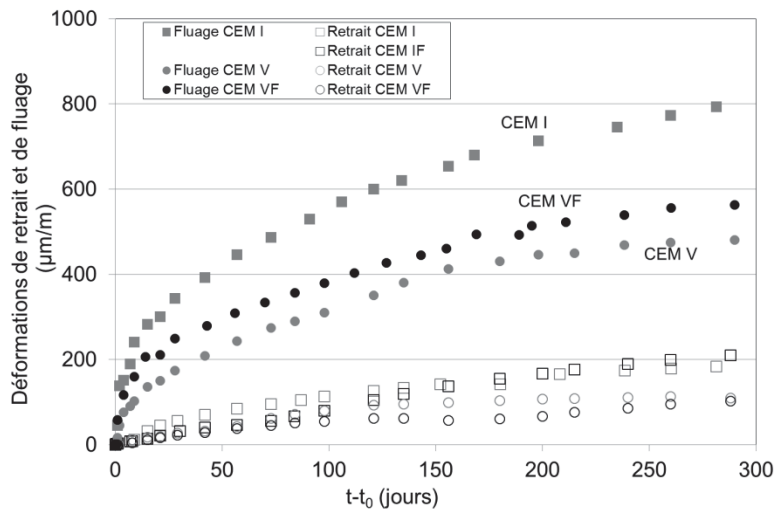


Figure 3. Evolutions des déformations de retrait endogène et de fluage propre des BHP à 50°C.

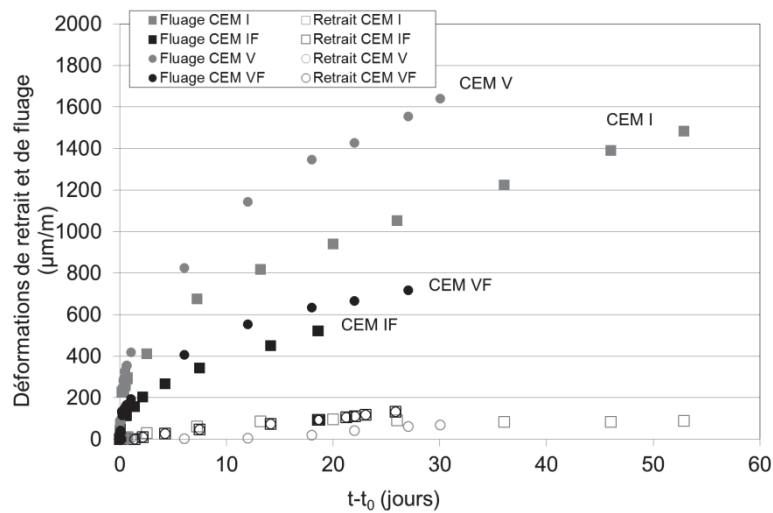


Figure 4. Evolutions des déformations de retrait endogène et de fluage propre des BHP à 80°C.

Une analyse globale de ces résultats montre une forte activation du fluage propre avec la température avec des augmentations de cinétique et d'amplitudes importantes et un effet intense à 80°C. Ainsi, après 300 jours de chargement, les amplitudes de déformations de fluage, comprises entre 200 and

400 $\mu\text{m}/\text{m}$ à 20°C (figure 2), atteignent 500 and 820 $\mu\text{m}/\text{m}$ (figure 3) à 50°C. A 80°C (figure 4), dès 30 jours de fluage, des intensités de 1600 $\mu\text{m}/\text{m}$ sont enregistrées pour le CEM V.

L'analyse comparative entre BHP montre que le CEM I est le béton qui flue le plus à 20°C et 50°C. L'absence de fines pouzzolaniques dans ce béton (fumée de silice pour les formulations fibrées et cendres volantes et laitier de haut fourneau pour le CEM V) pourrait expliquer ces résultats, sachant qu'il est connu que ces additions entraînent une densification de la matrice avec une réduction de la porosité par effet filler et par formation de C-S-H secondaires en présence de fumée de silice (Persson, 1998) comme l'illustre les résultats de porosité accessible à l'eau (tableau 3). Dans le cas du CEM V, une étude récente a montré une porosité plus fine (Ranaivomanana, 2010). A 80°C, le CEM V, et à un degré moindre le CEM I, développe un fluage propre significativement supérieur à ceux des formulations fibrées. Ce résultat sera discuté dans le paragraphe « Discussions ».

En ce qui concerne le retrait endogène, on remarque qu'il est quasiment négligeable à 20°C du fait des 300 jours préalables de cure humide (figure 2). En revanche, à 50°C et 80°C (figures 3 et 4), des valeurs de déformations de l'ordre de 100 à 200 $\mu\text{m}/\text{m}$ sont enregistrées. Toutefois, les relevés de masse de ces éprouvettes de retrait avant et après les essais, présentés dans le tableau 4, a mis en évidence de légères pertes de masses, correspondant à des variations de l'ordre de 5% du degré de saturation des matériaux. Ces déformations seraient donc attribuables à une dessiccation parasite malgré le système de protection appliqué aux échantillons et constitueraient non pas un retrait endogène, mais plutôt un retrait de dessiccation.

Tableau 4. Pertes de masses des éprouvettes de retrait.

BHP	Pertes de masses (%)		
	20°C (> 300 jours)	50°C (300 jours)	80°C (< 50 jours)
CEM I	0	0,15	0,76
CEM V	0	0,12	0,60
CEM IF	0	0,13	0,59
CEM VF	0	0,18	0,70

La figure 5 présente les évolutions des fluages propres respectivement des BHP non fibrés CEM I et CEM V, et fibrés CEM I F et CEM VF pour les 3 températures. Nous rappelons que le fluage spécifique correspond à la déformation de fluage (déformation totale à laquelle on retranche la déformation de retrait et instantanée) rapportée à la contrainte de fluage appliquée.

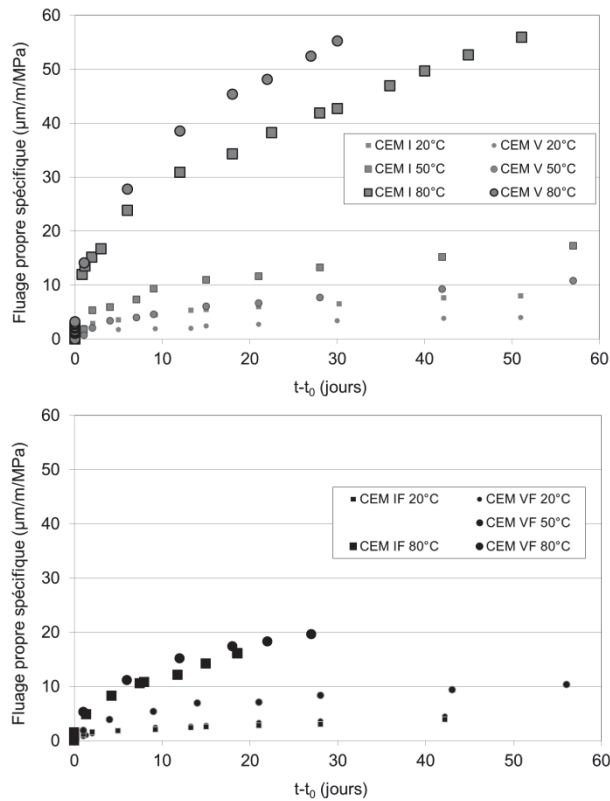


Figure 5. Evolutions du fluage spécifique propre des BHP non fibrés et fibrés à 20°C, 50°C et 80°C.

Le chauffage de 20°C à 50°C multiplie les amplitudes de fluage propre à 300 jours par 2,0, 3,7 and 3,0 respectivement pour le CEM I, CEM V et CEM VF. L'effet de la température est finalement moindre pour le CEM I alors qu'il s'agit du BHP qui développe le plus de fluage propre spécifique à ces deux températures. A 80°C, les cinétiques et amplitudes sont fortement amplifiés et la confrontation avec les évolutions à 50°C démontrent que l'effet de la température sur le fluage propre spécifique est non linéaire. On distingue des différences significatives entre les comportements des formulations fibrées et celles non fibrées, avec des ratios d'amplitude calculés à la dernière échéance de mesure de 5,0 pour CEM IF et 5,7 pour le CEM VF, et de 6,7 pour le CEM I et 15,7 pour le CEM V

4. DISCUSSIONS

La figure 6 présente les variations des ratios des amplitudes de fluage propre spécifique à la température d'essai par rapport à celui à la température de référence de 20°C en fonction de la température d'essai, et ce à différentes échéances (10 et 20 jours pour 50°C et 80°C, et également 300 jours pour 50°C uniquement). Nous pouvons constater que les évolutions de ces ratios sont non-linéaires. Leurs valeurs varient peu selon l'échéance à laquelle ils sont déterminés, ce qui semble traduire que l'effet de la température n'évolue pas avec le temps. Les valeurs sont comprises approximativement entre 2 et 3,7 à 50°C, quels que soient le BHP et l'échéance. A 80°C, les ratios sont très fortement augmentés, la majorité des valeurs se situant entre 5 et 6. On peut relever que les bétons non fibrés sont davantage affectés par la température de 80°C avec des valeurs de 6,7 pour le CEM I et de 15,7 pour le CEM V.

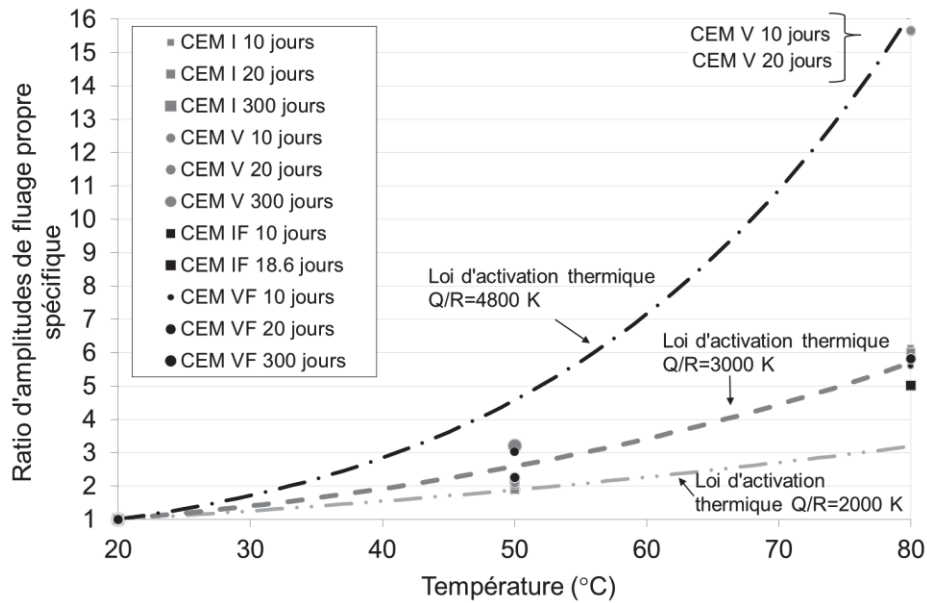


Figure 6. Variations des ratios des amplitudes de fluage propre spécifique à la température d'essai 50°C et 80°C par rapport à celui à la température de référence (20°C) mesurés à différentes échéances. Comparaison avec les évolutions selon une loi d'activation thermique avec différentes valeurs d'énergies d'activation Q/R.

Sur la Figure 6, des évolutions de loi d'activation thermique « globale » sont tracées avec différentes valeurs Q/R d'énergie d'activation Q (J/mol.) rapportées à la valeur de la constante des gaz parfaits. La loi d'activation thermique utilisée est de type Arrhenius comme l'indique la relation (1) :

$$A^T = \exp\left(-\frac{Q}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right) \quad (1)$$

avec T_{ref} la température de référence (K), à savoir 20°C dans notre cas ;
 T est la température d'essai ;
 R est la constant des gaz parfaits (8.3144 J/mol.K).

Ce mécanisme d'activation thermique est très souvent utilisée dans les modèles de fluage prenant en compte l'effet thermique (Bazant et al., 2004 ; Torrenti et al., 2008, Briffaut, 2010). Dans le cas de la figure 6, la loi représente une activation thermique que l'on peut considérer comme globale dans le sens où tous les phénomènes physiques (viscosité, module de compressibilité, modification microstructurale, ...) sont affectés de la même manière par la température. On constate qu'une valeur de Q/R de l'ordre de 2000 K permet de décrire correctement l'activation globale de fluage propre sur la plage 20°C-50°C. En revanche, il faut appliquer une énergie de 3000 K pour tenir compte de l'effet à 80°C pour les CEM I, CEM IF et CEM VF, et de 4800 K pour le CEM V.

On peut noter que la première valeur est proche de celle régissant la viscosité de l'eau, soit 2100 K (Briffaut, 2010), ce qui sous-entend que, jusqu'à la 50°C, la prise en compte de la réduction de la viscosité de l'eau pourrait faciliter les glissements des feuillets de C-S-H considérés comme étant le mécanisme à l'origine du fluage. Toutefois, au-delà de 50°C, d'autres processus physiques semblent intervenir et entraîner le fort accroissement du fluage propre constaté.

La figure 7 présente une comparaison des valeurs des modules d'élasticité :

- mesurés à 20°C sur des éprouvettes le jour précédant le début de l'essai de fluage ;
- mesurés pendant la mise en charge de fluage sur des éprouvettes préalablement chauffées à 80°C ;
- mesurés après refroidissement à 20°C sur des éprouvettes de retrait conservées à 80°C pendant la totalité de la durée de l'essai de fluage ;
- mesurés après refroidissement à 20°C sur des éprouvettes de fluage à l'issue de l'essai à 80°C ;

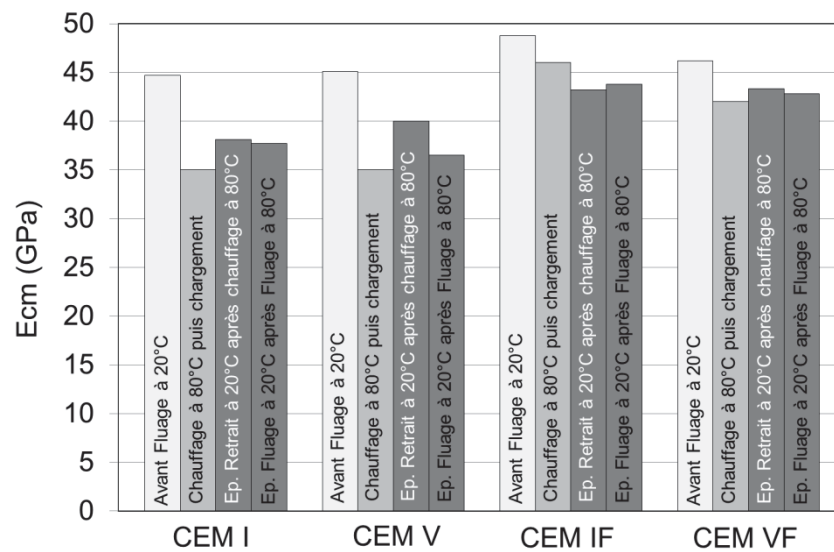


Figure 7. Comparaison des modules d'élasticité mesurés avant le fluage, pendant la mise en fluage après chauffage préalable à 80°C, sur éprouvettes de retrait à 20°C après chauffage à 80°C pendant la durée de l'essai de fluage, et sur éprouvettes de fluage à l'issue de l'essai de fluage et après refroidissement à 20°C.

L'analyse de la figure 7 montre une réduction significative des modules d'élasticité après le chauffage à 80°C durant la mise en charge de fluage pour les bétons non fibrés CEM I et CEM V. Les BHP fibrés semblent quant à eux plus faiblement affectés. Les mesures relevées à l'issue des essais de fluage sur les éprouvettes de fluage et de retrait n'ayant subi aucun chargement n'indique aucune évolution des rigidités des bétons. A partir de ces résultats, on peut donc en déduire qu'un endommagement se produit à 80°C sur les BHP non fibrés et qu'il est d'origine thermique et non mécanique. En outre, l'action des fibres tendrait à limiter cet endommagement. On peut émettre l'hypothèse d'une microfissuration, sans doute en lien avec des phénomènes de gradient de déformations entre la pâte et les granulats.

Cet endommagement thermique augmenterait donc le potentiel de déformation différée (Acker, 2003). L'amplification du fluage par couplage avec un endommagement est d'ailleurs un phénomène constaté à 20°C (Torrenti et al. 2008, de Larrard 2010, Briffaut 2010). Cette modification microstructurale ne se produisant que pour des températures supérieures à 50°C, ceci expliquerait le fait qu'une activation thermique globale à partir d'une unique température de référence ne permette pas de caler avec exactitude l'accroissement du fluage propre sur l'ensemble de la gamme de température 20°C-80°C.

5. CONCLUSIONS

Cette étude s'intéresse au fluage propre en compression uniaxiale, à température modérée 20-50-80°C, de quatre BHP composés de deux types de ciments, CEM I et CEM V, et dont deux formulations incorporent des fibres inoxydables et de la fumée de silice. Les essais de fluage propre ont été réalisés sur des matériaux ayant subi une cure humide de longue durée afin de limiter les couplages avec les réactions d'hydratation et avec les phénomènes d'auto-dessiccation. Les résultats montrent un effet significatif de la température avec des augmentations des cinétiques et des amplitudes à 50°C et 80°C pour l'ensemble des BHP. Par rapport aux valeurs obtenues à température de référence de 20°C, les fluages propres spécifiques sont ainsi multipliés par un facteur de 2 à 3,7 à 50°C. Les résultats à 80°C mettent en évidence que l'effet de la température sur le fluage propre est non-linéaire. Ainsi, pour la température la plus élevée, les ratios de fluage propre spécifique par rapport à leur valeur à la température de référence sont compris entre 5,0 et 5,7 respectivement pour le CEM IF et le CEM VF et de 6,7 et 15,7 respectivement pour le CEM I et le CEM V.

Le calage des résultats de ratio de fluage propre spécifique en température avec une loi d'activation globale de type Arrhenius permet d'obtenir des valeurs d'énergie d'activation Q/R comprises entre

2000 K et 4800 K. La valeur de 2000 K, proche de celle qui régit la viscosité de l'eau, permet de corrélérer correctement l'activation à 50°C. Toutefois, elle la sous-estime à 80°C du fait d'un endommagement se produisant à cette température pour les formulations non fibrées. En effet, l'analyse comparative des modules d'élasticité des éprouvettes de retrait et de fluage avant, lors du chargement de fluage et après le fluage, a permis de détecter une diminution des rigidités des BHP non fibrés pour la température la plus élevée. Cette réduction entre la valeur du module d'élasticité mesurée avant l'essai de fluage et celles obtenues lors de la mise en charge de fluage après chauffage de l'éprouvette à 80°C, semble traduire une origine thermique de cet endommagement. L'hypothèse d'une microfissuration, sans doute en lien avec des phénomènes de gradient de déformations entre la pâte et les granulats peut être avancé. Dans le cas des bétons fibrés, les fibres pourraient couturer et ainsi limiter cette microfissuration.

L'ensemble de ces données expérimentales montre que l'utilisation d'une loi d'activation thermique du fluage propre dans des modèles Thermo-Hydro-Mécanique permet de retranscrire correctement l'effet de la température sur le fluage propre. Entre 20°C et 50°C, l'activation thermique semble corrélée à la diminution de la viscosité de l'eau, facilitant les glissements de feuillet C-S-H à l'origine des déformations de fluage. Au-delà de 50°C, un endommagement thermique amplifie le fluage propre du fait d'une augmentation du potentiel de déformation différée.

Remerciements

Cette étude a été réalisée au LMDC de Toulouse en collaboration et grâce au support de l'Andra. Elle constitue également une contribution de la part de l'Andra et du LMDC au Projet National Français CEOS.Fr, qui traite du dimensionnement des structures spéciales en béton (<http://www.ceosfr.org>).

Références

- Acker P (2003) Sur les origines du retrait et du fluage du béton, *Revue Française de Génie Civil*, 7(6): 761-776.
- Andra (2005) Référentiel des matériaux de stockage de déchets à haute activité et à vie longue (in French). ref C RP ASCM.04.0015.A., éditions Andra, 429p.
- ASTM C512-02 (2005) Standard test method for creep of concrete in compression. ASTM International, West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/C0512-02.
- Bazant ZP, Cusatis G, Cedolin L (2004) Temperature effect on concrete creep modeled by microprestress-solidification theory. *J Eng Mech ASCE* 130(6): 691-699.
- Briffaut M (2010) Etude de la fissuration au jeune âge des structures massives: influence de la vitesse de refroidissement, des reprises de bétonnage et des armatures, Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure de Cachan, 202p.
- Camps G, Turatsinze A, Sellier A, Escadeillas G, Bourbon X (2008) Steel-fibre-reinforcement and hydration coupled effects on concrete tensile behavior, *Engineering Fracture Mechanics*, 75(18): 5207-5216.
- de Larrard T (2010) Variabilité des propriétés du béton: caractérisation expérimentale et modélisation probabiliste de la lixiviation, Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure de Cachan, 164p.
- Hager IG, Pimienta P (2005) Transient thermal strains of High Performance Concretes. In: Pijaudier-Cabot et al (ed) *Creep, shrinkage and durability of concrete and concrete structures CONCREEP 7*, Hermès science publishing. Nantes, France, 460-471.
- Hannant DJ (1967) Strain behaviour of concrete up to 95°C under compressive stresses. In: *Proceedings of conference on prestressed concrete pressure vessels, group C*, Institution of Civil Engineers. London, 57-71.
- Hansen TC, Eriksson L (1966) Temperature change effect on behaviour of cement paste, mortar and concrete under load. *ACI Journal* 63(4): 489-502.
- Jianyong L, Yan Y (2001) A study on creep and drying shrinkage of high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 31, pp 1203-1206
- Ladaoui W (2010) Etude expérimentale du comportement Thermo-Hydro-Mécanique à long terme des BHP destinés aux ouvrages de stockage des déchets radioactifs, Thèse de l'Université de Toulouse, France, 282p.
- Ladaoui W, Vidal T, Sellier A, Bourbon X (2011) Effect of a temperature change from 20 to 50°C on the basic creep of HPC and HPFRC. *Materials and Structures*, Volume 44, Issue 9 (2011) : 1629-1639.

- Muñoz P. (2000) Rhéologie des bétons durcis: approche couplée de la modélisation des retraits et fluages de Bétons à Hautes et Très Hautes Performances, Thèse de l'INSA Toulouse, France, 201p.
- Nasser KW, Neville AM (1965) Creep of Concrete at Elevated Temperatures. *ACI J Proceedings* 62(12): 1567–1579.
- Ranaivomanana H (2010) Transferts dans les milieux poreux réactifs non saturés : application à la cicatrisation de fissure dans les matériaux cimentaires par carbonatation, Thèse de l'Université de Toulouse, France, 347 p.
- RILEM TC 129-MHT (January-February 2000) Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures, Part 8: Steady-state creep and creep recovery for service and accident conditions, *Materials and Structures* 33(1): 6-13.
- RILEM TC 129-MHT (May 2000) Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures, Part 9: Shrinkage for service and accident conditions, *Materials and Structures* 33(4): 224-228.
- Torrenti JM, Nguyen VH, Colina H, Le Maou F, Benboudjema F, Deleruyelle F (2008) Coupling between leaching and creep of concrete. *Cement and Concrete Research* 38(6): 816-821.