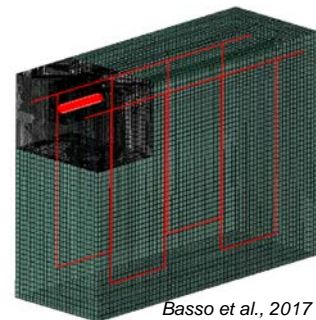
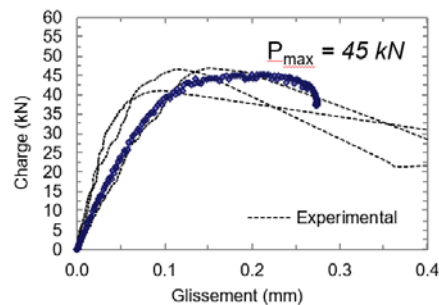


## Actes de la 18<sup>e</sup> édition des Journées Scientifiques

**(RF)<sup>2</sup>B** Regroupement Francophone  
pour la Recherche et la  
Formation sur le Béton

« Les nouveaux matériaux et les méthodes innovantes utilisés dans un  
contexte de développement durable »



6 et 7 Juillet 2017

Université Laval  
CRIB Québec





## TABLE DES MATIÈRES

Programme des Journées pp. iv

Liste des affiches pp. viii

### Articles

*UTILISATION DU BÉTON RECYCLÉ DANS LA FORMULATION DES  
BÉTONS AUTO-COMPACTANTS* pp.1-11

Md El K. Bouarroudj<sup>A,B</sup>, C. Colman<sup>A,B</sup>, E. Robinet<sup>A</sup>, Z. Zhao<sup>A</sup>, F. Michel<sup>A</sup>, L. Courard<sup>A</sup>, S. Remond<sup>B</sup>, D. Bulteel<sup>B</sup>

A : Laboratoire des Matériaux de Construction, Urban and Environmental Engineering, – Université de Liège Belgique

B : IMT Lille Douai, Univ. Lille, EA 4515 LGCgE – Laboratoire de Génie Civil et Géo Environnement, Département Génie Civil & Environnemental, F-59000 Lille, France

*STRATEGIE MULTI-ECHELLE DE MODELISATION NUMERIQUE DE LA  
FISSURATION DES STRUCTURES EN BETON ARME DE GRANDES  
DIMENSIONS* pp. 12-22

C. Nader<sup>A</sup>, P. Rossi<sup>A</sup>, J-L. Tailhan<sup>A</sup>

A : Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR), Université Paris-Est

*VALORISATION DE LAITIERS D'ACIÉRIE DANS DES BLOCS DE  
BÉTONS D'ENROCHEMENT* pp. 23-33

C. Perlot<sup>A</sup>, H. Carré<sup>A</sup>

A : Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur Appliquées à la Mécanique et au génie électrique, ISA BTP - Université de Pau et des Pays de l'Adour, Anglet, France

*PRÉ-MÉLANGES DE SABLES NATURELS AVEC DE FAIBLES  
PROPORTIONS DE SABLES DE BÉTONS RECYCLÉS : PROPRIÉTÉS  
ET DOSAGES* pp. 34-42

R. Trauchessec<sup>A</sup>, E. Ghorbel<sup>B</sup>, A. Lecomte<sup>A</sup>, O. Safiuallah<sup>B</sup>, Z. Ben Aouda<sup>A</sup>, G. Wardeh<sup>B</sup>

A : Équipe Matériaux pour le Génie Civil, Institut Jean Lamour - Université de Lorraine, Nancy, France

B : Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil - Université de Cergy-Pontoise, France



*ÉTUDE DE L'AUTOCICATRISATION DE MORTIERS CONTENANT DES  
ADDITIONS REACTIVES* pp. 43-58

S. Fattahi<sup>A</sup>, R. Gagné<sup>A</sup>

A : Centre de recherche sur les infrastructures en béton (CRIB), Université  
de Sherbrooke, Québec, Canada

*FLUAGE DU BÉTON ET DU BÉTON PRÉCONTRAIT SOUS  
CONDITIONS THERMO-HYGRO-MÉCANIQUES VARIABLES* pp. 59-69

H. Cagnon<sup>A</sup>, V.N. Nguyen<sup>B</sup>, T. Vidal<sup>A</sup>, J.M. Torrenti<sup>B</sup>, A. Sellier<sup>A</sup>

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

B : 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.

*RÉCENTS DÉVELOPPEMENTS DANS LA RECHERCHE ET LES  
SPÉCIFICATIONS SUR LES GRANULATS À BÉTON INCORPORANT  
DES SULFURES DE FER* pp. 70-80

B. Fournier<sup>A</sup>, J. Duchesne<sup>A</sup>, A. Rodrigues<sup>B</sup>

A : Département de géologie et de génie géologique, Université Laval,  
Québec, Canada

B : GHD Consultants Ltée, Québec, Canada

*EFFET DE LA PRÉSENCE DE VIDES SUR LA QUALITÉ DE  
L'ADHÉRENCE D'UNE BARRE D'ARMATURE* pp. 81-89

P. Basso Trujillo<sup>A</sup>, M. Jolin<sup>A</sup>, B. Massicotte<sup>B</sup>, B. Bissonnette<sup>A</sup>

A : Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton, Université Laval,  
Québec, Canada

B : Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton, Polytechnique  
de Montréal, Québec, Canada

*AMELIORER L'EVALUATION DES STRUCTURES ENDOMMAGEES PAR  
DES REACTIONS DE GONFLEMENT INTERNE A L'AIDE DE  
MODELISATIONS PHYSICO-CHIMIQUES* pp. 90-98

S. Multon<sup>A</sup>, A. Sellier<sup>A</sup>

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

*INFLUENCE DU TYPE DE FIBRES ET DE LEUR ORIENTATION SUR LA  
FISSURATION ET LA PERMÉABILITÉ DU BÉTON ARMÉ SOLlicitÉ EN  
TRACTION* pp. 99-117

T. Plagué<sup>A</sup>, C. Desmettre<sup>A</sup>, J.-P. Charron<sup>A</sup>

A : Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton (CRIB), École  
Polytechnique, Montréal, QC, Canada



UNIVERSITÉ  
LAVAL



Centre de recherche sur les  
infrastructures en béton (CRIB)

PASSERELLE PIETONNE ISABEY-DARNLEY – UTILISATION DE  
DALLES PREFABRIQUEES EN BFUP

pp. 118-143

É. Cantin-Bellemare<sup>A</sup>, J.-P. Charron<sup>B</sup>

A : Ville de Montréal, QC, Canada

B : Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton (CRIB), École  
Polytechnique, Montréal, QC, Canada



## PROGRAMME DU 6 JUILLET 2017

### 8h30 Accueil des participants

9h00 Mot de bienvenue et présentation du (RF)<sup>2</sup>B par Gilles Escadeillas

9h15 **Conférencier invité** : Jacques Marchand, SIMCO Technologies  
Titre : L'ingénierie de la durabilité - Concevoir des structures qui atteindront une durée de vie de 100 ans et plus

10h15 **Étude du comportement résiduel de structures atteintes par la RAG**  
Farid Benboudjema (1), Georges Nahas (1, 2), Ejona Kishta (1)  
(1) LMT (ENS Cachan, CNRS, Université Paris Saclay), France  
(2) Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, France

### 10h45 : Pause-café – (affiches)

11h15 **Mécanismes d'hydratation des liants à base de ciments alumineux en système dilué - confrontation mesures expérimentales et modélisation numérique**  
Nicolas Maach (1), Jean-François Georgin (1), Judith Pommay (2)  
(1) LGCIE – INSA de Lyon, France  
(2) Kerneos, France

11h45 **Passerelle piétonne Isabey-Darnley – Utilisation de dalles préfabriquées en BFUP**  
Étienne Cantin-Bellemare (1), Jean-Philippe Charron (2)  
(1) Ville de Montréal  
(2) École Polytechnique de Montréal

### 12h15 Repas

13h45 **Utilisation de bétons recyclés dans la formulation de bétons autocompactants**  
Mohamed El Karim Bouarroudj (1,2), Charlotte Colman (1,2), Eva Robinet (1), Zengfeng Zhao (1), Frédéric Michel (1) Luc Courard (1), Sébastien Remond (2), David Bulteel (2)  
(1) Laboratoire des Matériaux de Construction, Urban and Environmental Engineering, – Université de Liège, Belgique  
(2) IMT Lille Douai, Université de Lille, France

14h15 **Stratégie multi-échelle de modélisation numérique de la fissuration des structures en béton armé de grandes dimensions**  
Christian Nader, Pierre Rossi, Jean-Louis Tailhan  
IFSTTAR, France



14h45 **Valorisation de laitiers d'aciérie dans des blocs de bétons d'enrochement**

Céline Perlot, Hélène Carré

Université de Pau et des Pays de l'Adour - laboratoire SIAME, France

15h15 **Mélange de sable naturel avec une faible proportion de sables de bétons recyclés : dosages et propriétés**

Romain Trauchessec (1), Elhem Ghorbel (2), André Lecomte (1), Omary Safiuallah (2), Zakaria Ben-Aouda (1), George Wardeh (2)

(1) Équipe Matériaux pour le Génie Civil, Institut Jean Lamour - Université de Lorraine, Nancy, France

(2) Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil - Université de Cergy-Pontoise, France

15h45 **Visite des laboratoires de l'Université Laval**

19h00 **Restaurant Le Cosmos** (terrasse), 2813 boulevard Laurier, Québec



## PROGRAMME DU 7 JUILLET 2017

### **8h30 Accueil des participants**

9h00 **Conférencier invité** : Luc Bédard, Association béton Québec (ABQ)  
Titre : L'avenir de l'industrie du béton et l'intégration du développement durable

10h00 **Influence des additions cimentaires à forte teneur en chaux libre sur l'autocicatrisation naturelle des mortiers**  
Salma Fattahi, Richard Gagné  
Université de Sherbrooke

### **10h30 Pause-café (affiches)**

11h00 **Fluage du béton et du béton précontraint sous conditions thermo-hygro-mécaniques variables**  
Hugo Cagnon (1), V.N. Nguyen (2), T. Vidal (2), J.M. Torrenti (2), A. Sellier (1)  
(1) LMDC, France  
(2) IFSTTAR, France

11h30 **Récents développements dans la recherche et les spécifications sur les granulats à béton incorporant des sulfures de fer**  
Benoit Fournier, Josée Duchesne et Andreia Rodrigues  
CRIB, Université Laval

### **12h00 Repas**

13h30 **Analyse du cycle de vie pour les infrastructures en génie civil : passé, présent et futur**  
Ben Amor, Jean-Martin Lessard  
CRIB, Université de Sherbrooke

14h00 **Calcul de la longueur de développement en présence de défauts**  
Pasquale Basso (1), Marc Jolin (1), Bruno Massicotte (2)  
(1) CRIB, Université Laval  
(2) CRIB, École Polytechnique de Montréal

14h30 **Améliorer l'évaluation des structures endommagées par des réactions de gonflement interne à l'aide de modélisations physico-chimiques.**  
Stéphane Multon, Alain Sellier  
LMDC, France





15h00 **Influence de l'orientation et du type de fibres sur la fissuration et la perméabilité à l'eau du béton armé**

Thibault Plagué, Clélia Desmettre, Jean-Philippe Charron  
École Polytechnique de Montréal

15h30 Clôture des Journées scientifiques

15h45 Réunion du Conseil d'orientation (interne)  
Salle 3347, pavillon Alphonse-Desjardins



## **AFFICHES POUR LES JOURNÉES SCIENTIFIQUES DU (RF)2B**

BÉDARD, Frédéric. *Renforcement à l'effort tranchant des dalles épaisses en béton en conditions de service*. Université Laval

COLMAN, Charlotte. *Residues de plâtre dans les fines de recyclage*. Université de Liège

ESSALIK, Samy-Joseph. *Nouvel essai annulaire adapté aux bétons à retrait compensé*. Université Laval

FAUCON, Samuel. *Réactions de gonflement interne (RAS et DEF) soumis à des chocs thermiques*. Université de Sherbrooke

FRECH-BARONET, Jessy. *Influence de l'humidité relative sur le comportement du fluage et de la relaxation de la pâte de ciment à l'échelle de la microstructure*. Université Laval

GAGNON, Antoine. *Conception et évaluation de la performance du béton projeté renforcé de fibres : concepts et défis*. Université Laval

HILT, Mélodie. *Production de béton en usine et développement durable : utilisation de technologie de contrôle continu*. Université Laval

MENU, Bruce-Ghandi. *Comportement différé des bétons au jeune âge*. Université Laval

MBINA, Mihindou. *Évaluation non-destructive de la qualité de l'adhérence entre deux bétons par la méthode de la réponse impulsionnelle (RI)*. Université de Sherbrooke

VU, Viet Anh. *Mur radiant : panneaux composite hybride bois et matériel inorganique*. Université Laval

MASOUD, Hosseinpoor. *Simulation numérique de l'écoulement du béton autoplaçant (BAP)*. Université de Sherbrooke

AHMED, Mostafa. *Nouvelle méthode pour quantifier la structuration des suspensions cimentaires*. Université de Sherbrooke

DIMA, Youness. *Caractérisation améliorée de l'écoulement des liants, ajouts cimentaires et liants alternatifs*. Université de Sherbrooke

18<sup>e</sup> édition des Journées scientifiques  
du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton  
(RF)<sup>2</sup>B

---

Université Laval, Québec, Canada  
6 et 7 juillet 2017

## FLUAGE DU BETON ET DU BETON PRECONTRAIT SOUS CONDITIONS THERMO-HYDRO-MECANIKES VARIABLES

H. Cagnon<sup>A</sup>, V.N. Nguyen<sup>B</sup>, T. Vidal<sup>A</sup>, J.M. Torrenti<sup>B</sup>, A. Sellier<sup>A</sup>

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

B 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.

**RÉSUMÉ** : Cette étude porte sur l'évolution des déformations du béton et du béton précontraint sous l'effet de conditions Thermo-Hydro-Mécaniques (THM) variables. Elle regroupe deux projets : le projet Cigéo, initié par l'Andra (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs en France), pour le stockage des déchets radioactifs à Moyenne Activité et à Vie Longue (MA-VL) en couche profonde, qui concerne l'étude expérimentale du comportement de Bétons à Hautes Performances sous sollicitations Thermo-Hydro-Mécaniques variables dans le temps ; et le projet ANR MACENA (MAîtrise du Confinement d'une ENceinte en Accident) qui porte sur 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'objectif final est de fournir des données expérimentales dans des conditions peu étudiées, comme dans le cas du fluage thermique transitoire, afin d'amélioration des modèles existants et d'être ainsi capable d'estimer la réponse mécanique de structures en béton dans des conditions accidentelles ou d'exploitation singulière.

### 1. INTRODUCTION

Le stockage des déchets radioactifs (projet Cigéo) dans le temps ou la maîtrise de l'étanchéité des ouvrages de confinement dans les centrales nucléaires (ANR MACENA : réalisation de la maquette VERCORS d'une enceinte de confinement nucléaire à l'échelle 1/3) constituent un enjeu majeur dans le monde entier. Ces ouvrages permettent d'éviter la dispersion potentielle de radionucléides dans l'environnement, ce qui constitue, actuellement, une problématique internationale. Les quelques études existantes sur le comportement du béton à température modérée (inférieure à 100°C) montrent un fort impact de la température sur les déformations du béton (Fahmi et al. 1972, Khoury et al. 1985, Khoury 1992, Ladaoui 2010, Ladaoui et al. 2011, Ladaoui et al. 2013, Cagnon 2015).

L'élévation de température entraîne une augmentation non linéaire des amplitudes et des cinétiques de fluage (Ladaoui 2010, Ladaoui et al. 2011). Cela signifie qu'il pourrait exister un seuil au-delà duquel le matériau s'endommage thermiquement (Ladaoui et al. 2013). Cet endommagement pourrait être fortement dépendant du type de béton et notamment de sa porosité (Noumowe et al. 1996), de la composition minéralogique des granulats qui ont des coefficients de dilatation très variables (Bažant et al. 1996) et de la teneur en eau des matériaux dont les propriétés sont fortement dépendantes de la pression et de la température (Ghabezloo 2011).

Un paramètre qui semblerait également primordial dans les déformations différées sous charge serait la chronologie des sollicitations thermique et mécanique. En effet, la permutation des sollicitations engendre une différence de comportement du matériau : ce phénomène est appelé le fluage thermique transitoire. Lorsqu'un matériau est chauffé sous charge, une déformation supplémentaire apparaît par rapport à celle obtenue sur un béton chauffé puis chargé. Il semblerait que les mécanismes à l'origine des déformations soient quelque peu modifiés en fonction de la chronologie de l'application de la charge et du chauffage. La modification des propriétés du matériau et de son eau, pourrait être à l'origine du supplément de déformation lorsqu'il est chauffé sous charge (Khoury 1983, Khoury et al. 1985, Khoury 1992, Cagnon 2015).

La présente étude a pour principal objectif d'apporter des nouvelles données expérimentales sur le fluage thermique transitoire à l'échelle du matériau (éprouvettes cylindriques) mais aussi à l'échelle de l'élément structure (poutres en béton précontraint). Cette base de données permettra de valider les modèles à l'échelle des poutres précontraintes, en vue de modéliser les tunnels de stockage et les enceintes de confinement nucléaire qui sont notamment précontraintes bi-axialement.

La première partie du programme expérimental réalisé concerne l'étude d'un BHP en compression uniaxiale durant laquelle plusieurs configurations sont testées afin de répondre à deux questions : le fluage thermique transitoire est-il unique ? Le fluage thermique transitoire est-il réversible ?

La seconde partie porte sur l'étude de d'éprouvettes cylindriques et de poutres en béton précontraint en flexion quatre points.

## **2. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL**

### **2.1 Étude à l'échelle du matériau (BHP Andra)**

L'objectif principal de la première partie du programme expérimental est de quantifier le fluage thermique transitoire sur Béton Hautes Performances pour des températures modérées (40°C) sous compression uniaxiale.

Quatre conditions différentes ont été testées afin d'atteindre cet objectif. Toutes les éprouvettes ont été conservées pendant au moins 90 jours dans une eau saturée en chaux afin de saturer la porosité et d'éviter les dépressions capillaires. La période de cure permet aussi une bonne hydratation du béton et de découpler le comportement mécanique à long terme de l'hydratation du ciment. Pendant toute la période de l'essai, les échantillons sont protégés du séchage par trois couches de papier aluminium autocollant étanche. Cela permettra, dans un premier temps, de s'affranchir des problèmes de couplage avec le séchage et le retrait. Les cycles thermiques entre 20°C et 40°C sont choisis pour éviter également le couplage du fluage thermique transitoire avec l'endommagement du béton détecté par Ladaoui (Ladaoui 2010) aux environs de 50°C. Les cinétiques de montée et descente en température sont choisies pour limiter le gradient de température entre le cœur et la surface des échantillons (Ladaoui et al. 2011). Cette procédure a été utilisée pour éviter la microfissuration thermique. La lente cinétique de changement de température de 0,1°C par minute proposée par Ladaoui et al. a été adoptée (Ladaoui et al. 2011, Ladaoui et al. 2013). Les quatre différentes conditions sont présentées dans la Figure 1. La notation a été définie de la manière suivante : T pour température,  $\sigma$  pour chargement mécanique, E pour endogène, 40 pour la température maximale atteinte et le numéro (1 ou 2) pour les deux configurations. T $\sigma$  signifie que l'échantillon est chauffé puis chargé et  $\sigma$ T qu'il est chargé puis chauffé.

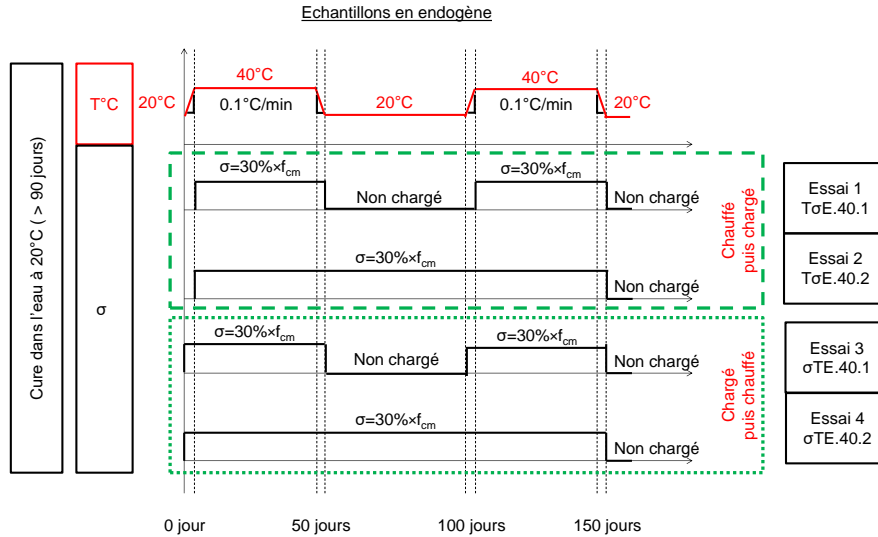


Figure 1. Programme expérimental entre 20°C et 40°C sur BHP Andra en conditions Thermo-Mécanique variables

Les essais 1 et 2 représentent les éprouvettes chauffées puis chargées. Seule la durée de chargement diffère entre les deux. Les essais 3 et 4 représentent les éprouvettes chargées puis chauffées. De la même manière la durée de chargement diffère entre les deux. En comparant les essais 1 et 3, il sera possible de savoir si le fluage thermique transitoire est unique ou non. En comparant les essais 2 et 4, il sera possible de savoir comment se comporte le béton lorsqu'il est refroidi sous charge et gardé chargé lors d'un second cycle de chauffage.

## 2.2 Caractéristiques du BHP Andra et taille des échantillons

Le BHP de cette première partie expérimentale est celui utilisé précédemment par (Ladaoui et al. 2011, Ladaoui et al. 2013, Vidal et al. 2015). Cette formulation a été définie par l'Andra pour le site de stockage de déchets radioactifs en couche profonde. Il est à base de CEM I 52.5N PM-EN CP2. Le tableau 1 donne la composition de ce béton dont le E/C est de 0,43.

Tableau 1. Composition du BHP Andra à base de CEM I,  $E_{eff}/C = 0,43$

Constituants	$E_{eff}/C = 0,43$
	Masse [kg/m <sup>3</sup> ]
CEM I 52,5 N CE PM-ES-CP 2 NF (Lafarge, Val d'Azergues)	400
Sable calcaire 0/4 mm, Boulonnais	858
Gravier calcaire 4/12, Boulonnais	945
Superplastifiant Glénium 27, MBT	10
Eau efficace, $E_{eff}$	171

Toutes les éprouvettes sont cylindriques de 11,8cm de diamètre et 24cm de hauteur. Chaque mesure de fluage correspond à la moyenne réalisée sur trois éprouvettes. Les mesures de fluage sont faites par un capteur de déplacement interne et par trois jauges de déformation collées à 120° sur la partie latérale de l'éprouvette hors zone de frettage pour les périodes transitoires en température.

Le tableau 2 présente les propriétés mécaniques à l'état durci du BHP Andra à base de CEM I. Les échantillons chargés puis chauffés sont mis en charge après 131 jours de cure eau et les échantillons chauffés puis chargés après 291 jours de cure eau. Toutefois, l'âge avancé du béton ne semble pas modifier de manière significative la microstructure du béton.

Tableau 2. Propriétés mécaniques à l'état durci du BHP Andra à base de CEM I

Échéance (jours)	Résistance en compression (MPa)	Module de Young (GPa)	Résistance en traction (MPa)	Porosité (%)
28	71.0±0.8	44.3±0.4	3.6±0.7	12.1±0.4

### 2.3 Étude à l'échelle du matériau (Béton VERCORS)

Le fluage en compression uniaxiale est réalisé sur éprouvettes cylindriques de 11,28cm de diamètre et 22cm de hauteur. Les éprouvettes sont instrumentées avec trois jauges collées à 120°C sur le périmètre de l'éprouvette hors zone de frettage. Les mesures de déformations en période de chauffage et de refroidissement sont compensées de la déformation intrinsèque de la jauge par une seconde jauge collée sur une plaque de silicate de titane dont on considèrera un coefficient de dilatation nul. Les quatre essais réalisés sont présentés dans la Figure 2.

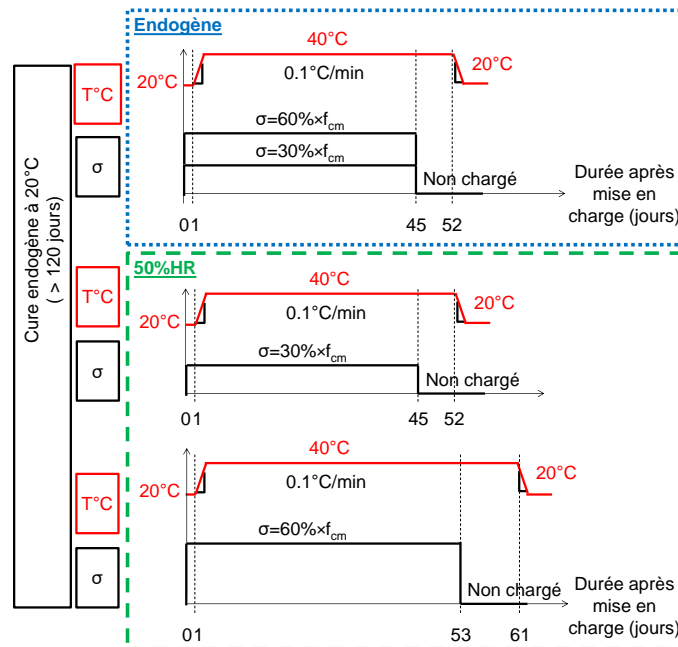


Figure 2. Programme expérimental entre 20°C et 40°C sur éprouvettes cylindriques du béton VERCORS en conditions Thermo-Mécanique variables

Les éprouvettes sont toutes démoulées après 24h de conservation en salle humide (99%HR et à 20°C). Elles sont conservées en endogène pendant une durée minimum de 120 jours afin de stabiliser l'hydratation. Elles sont placées dans une chambre climatique régulée à l'humidité de l'essai. La contrainte est appliquée (30% $f_{cm}$  et 60% $f_{cm}$ ) pendant 1 jour avant que les échantillons soient chauffés sous charge avec la même cinétique et pour les mêmes raisons que présentées dans la partie 2.1. La charge reste constante pendant au moins 45 jours. Ils sont ensuite déchargés pour calculer le module d'élasticité après essai. Pour finir les échantillons sont refroidis.

### 2.4 Étude à l'échelle de l'élément de structure (Béton VERCORS)

L'objectif de cette seconde partie est d'étudier le fluage thermique transitoire sur poutre en béton précontraint pour des températures modérées (40°C) en flexion quatre points.

Deux conditions différentes ont été testées. Toutes les éprouvettes ont été conservées pendant 64 jours en endogène. Au bout de cette période, l'humidité relative interne du béton est de 88%HR. La période de cure permet d'achever l'hydratation du béton et de découpler le comportement mécanique à long terme de l'hydratation du ciment. Pendant la cure, les poutres sont enveloppées dans un film plastique et placées dans deux sacs plastiques étanches. La température modérée a été choisie afin de limiter l'endommagement thermique comme présenté dans la partie 2.1. Les essais sont présentés dans la Figure 3. Certaines éprouvettes sont conservées en endogène pendant toute la durée de l'essai, tandis que d'autres seront conservées à 50% HR.

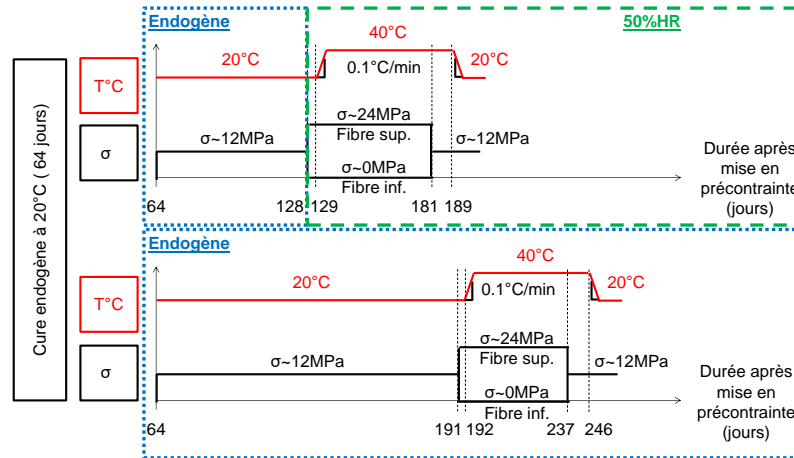


Figure 3. Programme expérimental entre 20°C et 40°C sur poutres en béton précontraint en conditions Thermo-Mécanique variables

Les poutres ont été précontraintes par post-tension après 64 jours de cure endogène. Le câble de précontrainte est centré dans la hauteur de la poutre afin d'obtenir un profil de contrainte normale uniforme de 12 MPa correspondant à la valeur de la précontrainte orthoradiale dans les enceintes de confinement nucléaire. La tension du câble de précontrainte a été calculée de sorte à prendre en compte les pertes de précontraintes instantanées. Lors de l'application de la flexion, la contrainte théorique en fibre supérieure (fibre sur laquelle s'appliquent les deux charges ponctuelles) correspond à une compression de 24MPa et en fibre inférieure à une contrainte nulle. Néanmoins, cet état de contrainte reste purement théorique puisque plusieurs effets différés : la relaxation différée des aciers de précontrainte, les déformations de retrait et de fluage du béton modifieront cette distribution des contraintes dans le temps.

La Figure 4 représente, d'une part, la géométrie d'une poutre BP (a) et d'autre part, le schéma mécanique de chargement de la poutre (b).

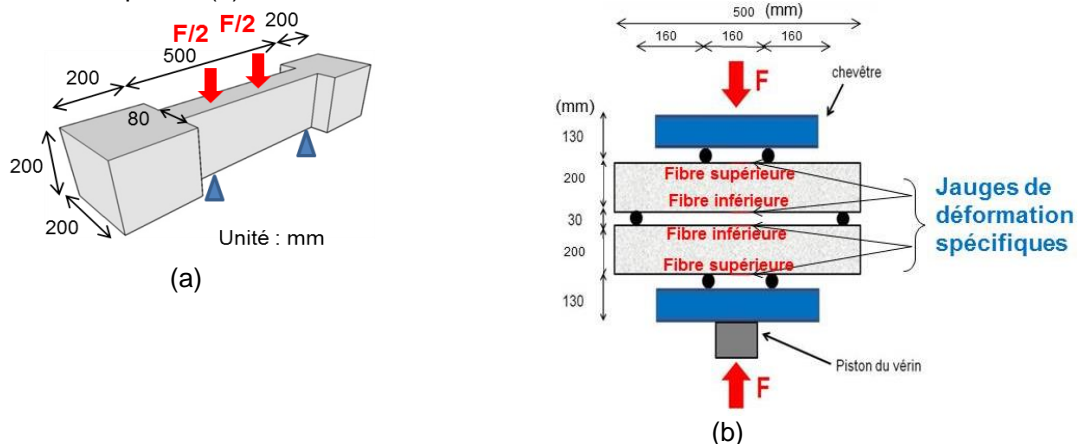


Figure 4. Géométrie des poutres BP et schéma mécanique du chargement en flexion quatre points

## 2.5 Caractéristique du béton VERCORS pour les poutres en béton précontraint

La composition du béton utilisé pour la confection des poutres précontraintes est la même que celle utilisée lors de la réalisation de la maquette VERCORS. Elle est décrite dans le tableau 3.

Tableau 3. Composition du béton VERCORS à base de CEM I,  $E_{eff}/C = 0,52$

Constituants	$E_{eff}/C = 0,52$
	Masse [kg/m <sup>3</sup> ]
0/4 REC GSM LGP1	830
4/11 R GSM LGP1	445
8/16 R BALLOY	550
CEM I 52.5 NCE CP2 NF Gaurain	320
Techno 80 Sika plast (% de ciment)	2,4 (0,75%)
Eau totale	198
Eau efficace $E_{eff}$	167

La classe de résistance du béton est C40/50. Dans le tableau 4, les propriétés à l'état durci sont données.

Tableau 4. Propriétés mécaniques à l'état durci du béton VERCORS à base de CEM I

Échéance (jours)	Résistance en compression (MPa)	Module de Young (GPa)	Résistance en traction (MPa)	Porosité (%)
28	46,1 ± 1,2	35,1 ± 0,6	3,9 ± 0,2	14,9±0,6

## 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

### 3.1 Unicité et irréversibilité du fluage thermique transitoire (BHP Andra) à 40°C

La Figure 5 présente les déformations totales des éprouvettes chargées puis chauffées et chauffées puis chargées à 40°C conservées en endogène. Si la chronologie des sollicitations thermique et mécanique diffère, en revanche la durée de chargement globale reste la même. Lors du chauffage des éprouvettes  $\sigma_{TE.40.1}$  un supplément de déformation apparaît dans les premières heures après le chargement par rapport à celle des échantillons  $T\sigma_{E.40.1}$ . Cette part de déformation notée FTT sur la Figure 5 appelé fluage ou déformation thermique transitoire existe après 2 jours de chargement et demeure irréversible jusqu'à la fin de l'essai. En revanche, elle semblerait unique puisqu'elle ne réapparaît pas lors du second chauffage des éprouvettes sous charge.

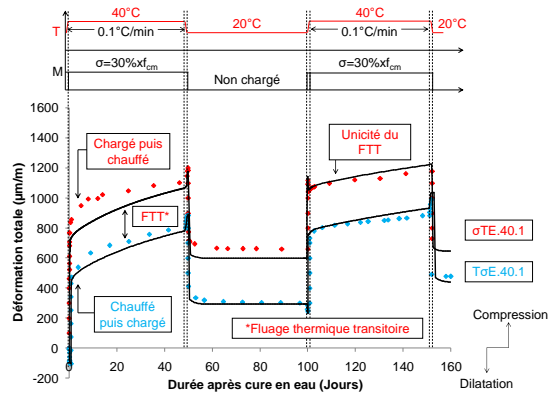


Figure 5. Unicité de la déformation thermique transitoire après 2 cycles Thermo-Mécaniques



Pour expliquer ce phénomène plusieurs hypothèses peuvent être avancées. Lorsque le béton est chargé puis chauffé l'application de la charge modifie la micro-diffusion de l'eau. En effet, l'eau se dilate beaucoup plus que la matrice cimentaire ou que les granulats (Bažant et al. 1996, Ghabezloo 2011, Cagnon 2015). Cette dilatation est empêchée de manière verticale par la charge de compression uniaxiale appliquée sur l'éprouvette. De plus, le chargement préalable au chauffage entraîne une fermeture de la porosité et une compression de l'eau. Cela entraîne une augmentation de la pression de l'eau par rapport à une éprouvette libre. Pour que cette surpression due à la déformation partiellement empêchée se dissipe, l'eau doit se microdiffuser latéralement dans l'échantillon. En l'absence de charge la microdiffusion se ferait de manière isotrope. Cette diffusion de l'eau anisotrope pourrait conduire à un réarrangement de certains hydrates comme les C-S-H connus pour être à l'origine du fluage du béton entraînant à l'échelle macroscopique un surplus de contraction observée pendant la période de chauffe des matériaux.

De plus, la modification locale des propriétés de l'eau (viscosité, coefficient de dilatation thermique) pourraient entraîner une diminution apparente de la viscosité du béton ce qui se traduit par une contraction de fluage importante.

La Figure 6 présente la comparaison des déformations entre les échantillons chargés puis chauffés et chauffés puis chargés lors de deux cycles thermiques à 40°C en condition endogène et chargés pendant 150 jours.

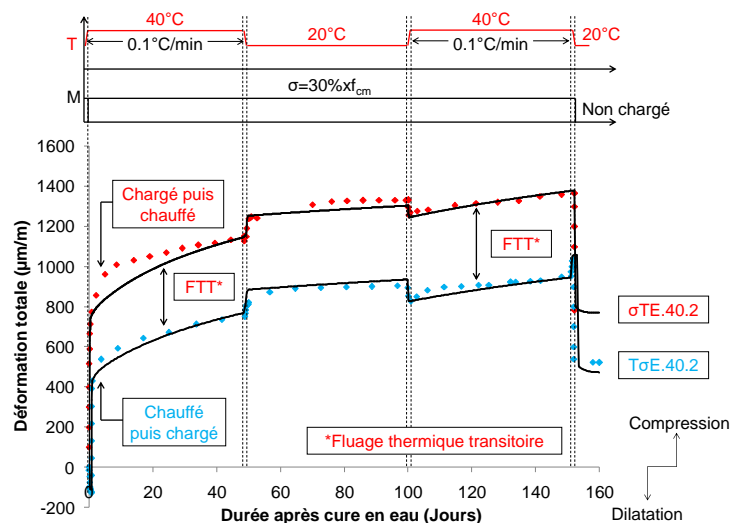


Figure 6. Différence de déformation entre les échantillons chauffés puis chargés et chargés puis chauffés en condition endogène pendant 150 jours de chargement

Les éprouvettes chargées puis chauffées développent plus de déformation que celles chauffées puis chargées. Cette différence de déformation apparaît dès les premières heures de chauffage puis reste constante jusqu'à 150 jours. Les éprouvettes se contractent sous charge et le fluage thermique transitoire ne semble pas augmenter après l'application du second cycle thermique ce qui confirme son unicité. Finalement, en compression uniaxiale avec des éprouvettes totalement saturées, pour que le fluage thermique transitoire ait lieu il faut que le chauffage des éprouvettes se fasse juste après la mise en charge, c'est-à-dire que les possibles surpressions dues à la déformation partiellement empêchée n'aient pas eu le temps de se dissiper. Cela permet de coupler simultanément les suppressions dues à l'effet mécanique et à l'effet physique de la dilatation thermique différentielle entre la pâte de ciment et les granulats. C'est pourquoi lorsqu'il y a eu un chargement préalable des éprouvettes le fluage thermique transitoire n'apparaît qu'une fois. La consolidation du matériau doit également être prise en compte, le matériau ne peut pas se déformer indéfiniment. Son potentiel de déformation différé se voit réduit lorsque le fluage thermique transitoire a eu lieu une première fois. Toutes ces considérations ont été prises en compte et implémentées dans le modèle développé par Sellier et al. (Sellier et al. 2012 a, Sellier et al. 2012 b).

### 3.2 Modélisation du fluage thermique transitoire sur BHP Andra à 40°C

Dans le modèle rhéologique développé par Sellier et *al.* (Sellier et al. 2012 a, Sellier et al. 2012 b), il est apparu nécessaire d'implémenter une partie qui permettrait de prendre en compte le fluage thermique transitoire. D'après les résultats expérimentaux le fluage thermique transitoire apparaît lorsque les éprouvettes sont chauffées sous charge, lorsqu'elles sont soumises à une contrainte de compression et il diminue avec la consolidation du matériau. L'équation 1 retranscrit les observations expérimentales :

$$\frac{\partial \varepsilon_I^{DTT}}{\partial t} = K_{DTT} \frac{\min(\sigma_I, 0)}{e^{c_I^T}} \left[ \frac{\partial T}{\partial t} \right]^+ \quad (\text{Équation 1})$$

Le paramètre de calage est appelé  $K_{DTT}$  (pour déformation thermique transitoire). Il est compris entre  $1,2 \cdot 10^{-6}$  et  $1,5 \cdot 10^{-6}$  dans le cas des simulations réalisées. Dans cette équation, seule la contrainte principale de compression  $\sigma_I$  peut engendrer le fluage thermique transitoire, à condition que la variation de température  $\partial T / \partial t$  soit positive. Le fluage thermique transitoire ne semble apparaître que lors des périodes de chauffage et pour le moment son comportement sous charge de traction n'est pas connu. Le coefficient de consolidation  $e^{c_I^T}$  intègre la déformation de fluage et la déformation de fluage thermique transitoire. Toute la partie relative à l'activation thermique du fluage est identique à celle mise au point dans la thèse de Ladaoui (Ladaoui et al. 2011, Ladaoui et al. 2013). Elle n'est donc pas détaillée ici, cette partie consiste à activer les viscosités avec une énergie d'activation associée à l'évolution de la viscosité de l'eau en fonction de l'élévation de température et, au-dessus de 45°C, une amplification des déformations différées sous charge apparaît pour prendre en compte les aspects liés à l'endommagement thermique associés à la dilatation thermique différentielle entre la pâte de ciment et les granulats.

### 3.3 Déformation sous charges totales des éprouvettes cylindriques (béton VERCORS) à 40°C

La Figure 7 présente les déformations totales sous charge des éprouvettes cylindriques réalisées avec le béton VERCORS. A gauche les éprouvettes sont placées à 50% HR pour deux taux de chargement différents : 30% $f_{cm}$  et 60% $f_{cm}$ . A droite les éprouvettes sont conservées en endogène pour deux taux de chargement différents : 30% $f_{cm}$  et 60% $f_{cm}$ .

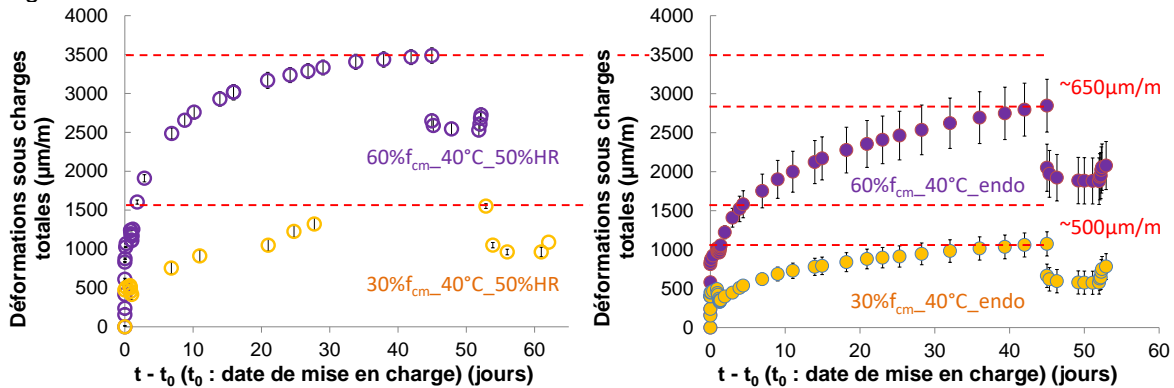


Figure 7. Evolution des déformations totales sous charge à 30% $f_{cm}$  et 60% $f_{cm}$  à 40°C en condition de séchage à gauche à 50%HR et en condition endogène à droite

Durant un jour après chargement les éprouvettes développent du fluage en endogène ou en dessiccation à 50%HR. Le chauffage des échantillons entre 20°C et 40°C entraîne une dilatation thermique sous charge. Elle est plus marquée que lors du second cycle de chauffage pour les essais présentés dans la partie 3.1. Le coefficient de dilatation libre du BHP Andra est plus de deux fois inférieur à celui du béton VERCORS (respectivement 4-5 $\mu\text{m}/\text{m}/\text{K}$  et 10-12 $\mu\text{m}/\text{m}/\text{K}$ , (Ladaoui 2010, Cagnon 2015)). Les échantillons libres de sécher et chargés à 60% $f_{cm}$  ont une déformation supérieure de 650 $\mu\text{m}/\text{m}$  à la fin de l'essai par rapport à ceux en endogène. Cette différence est de 500 $\mu\text{m}/\text{m}$  pour ceux chargés à 30% $f_{cm}$ . Il semblerait que l'effet de dessiccation soit d'autant moins marqué que la charge est grande.

Les très fortes cinétiques remarquées dans la partie 3.1 sur le BHP Andra n'apparaissent pas sur ces bétons. Plusieurs hypothèses peuvent être faites : dans l'étude sur le BHP Andra les échantillons sont chauffés directement après l'application de la charge, ce qui n'est pas le cas ici puisqu'ils sont chauffés 1 jour après. L'état de saturation initial du béton n'est pas le même. Le BHP Andra est conservé en cure en eau pendant au moins 90 jours ce qui conduit à une quasi saturation des éprouvettes. Le béton VERCORS est conservé en endogène, ce qui signifie que les échantillons sont partiellement saturés.

### 3.4 Déformation sous charges totales des poutres en béton précontraint (béton VERCORS) à 40°C

La Figure 8 présente les évolutions des déformations totales mesurées en fibre supérieure et inférieure des poutres précontraintes après la mise en tension du câble de précontrainte à 20°C après 64 jours de cure endogène puis après la mise en flexion quatre points pour les deux essais suivants : à 40°C et 50% d'humidité relative et à 40°C et en endogène.

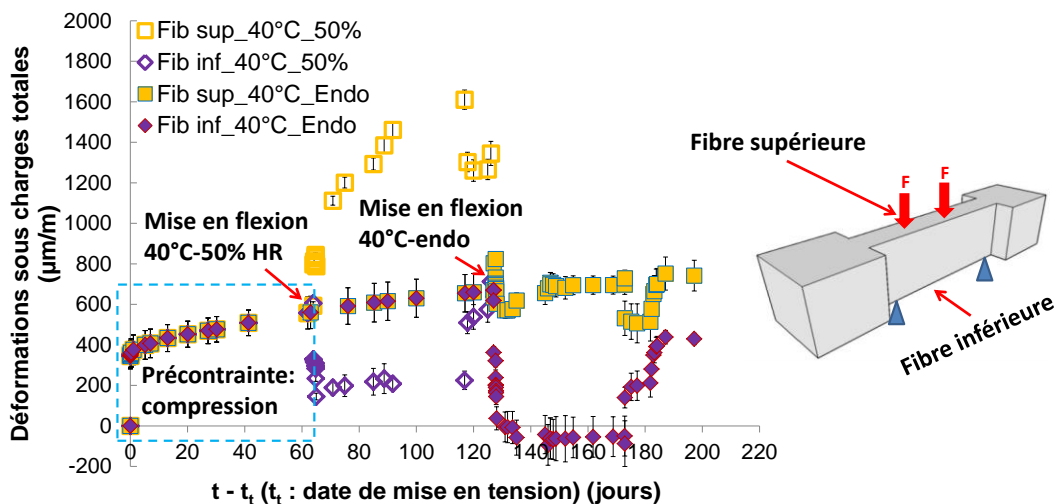


Figure 8. Evolution des déformations totales en fibres supérieure et inférieure à partir de la mise en tension des poutres précontraintes entre 20°C et 40°C en condition endogène et à 50%HR

Les poutres conservées en endogène pendant toute la durée de l'essai sont mises en flexion quatre points après 125 jours de fluage en compression dû à la précontrainte. Ce chargement entraîne une déformation instantanée de contraction en fibre supérieure et de traction en fibre inférieure. Après un jour de chargement les échantillons sont chauffés sous charge jusqu'à 40°C. Le béton se dilate fortement en fibre tendue (les déformations de dilatation thermique et de traction s'additionnent) tandis qu'il se dilate très faiblement en fibre comprimée (les déformations de dilatation thermique et de compression s'opposent). Après cette phase de chauffage le béton se contracte en fibre supérieure et subit un léger fluage en traction en fibre inférieure qui se stabilise rapidement dans le temps.

Les poutres conservées à 50%HR pendant l'essai sont chargées après 65 jours de précontrainte. Après mise en charge et en condition de séchage la fibre supérieure est fortement comprimée due au couplage entre la charge mécanique et le séchage thermiquement activé. La fibre inférieure est légèrement comprimée. Cela signifie que le retrait en dessiccation semble plus important que la part de traction dans cette fibre qui est supposée nulle.

Au vu des résultats présentés dans la partie 3.1, les cinétiques de déformations des poutres auraient pu être plus importantes notamment pendant la période de chauffage et des premières heures qui suivent la stabilisation en température. Les poutres ont été conservées en condition endogène sous précontrainte pendant 64 jours. Cela entraîne un profil de contrainte uniforme dans la poutre qui est comprimée de manière homogène à 12 MPa. Elle est donc fortement consolidée avant le chauffage sous charge. Ce

résultat semble en accord avec ceux présentés dans la partie 3.1. La présence d'une cage d'armatures passives de type haute adhérence, de cadres d'effort tranchant et du câble de précontrainte pourraient restreindre les déformations différées du béton. L'état de saturation initial du matériau pourrait également jouer un rôle important. Les poutres sont partiellement saturées à la fin de la cure endogène tandis que les échantillons cylindriques de BHP sont totalement saturés. L'eau peut se dilater jusqu'à 60 fois plus que la pâte de ciment et provoquer d'important désordres (Cagnon 2015) notamment en cas de saturation totale et d'essais en condition endogène. La finesse de la porosité entre le BHP et le BO pourrait avoir une importance. L'eau présente dans une porosité fine caractéristique des BHP (<15 nm) ou l'eau dans les zones d'adsorption empêchée présente une dilatation thermique jusqu'à 60 fois plus grande que l'eau libre (Valenza et al. 2005, Ghabezloo 2011). Les surpressions pourraient être beaucoup plus importantes en cas de saturation et de porosité fine. Cela pourrait être préjudiciable aux structures en BHP.

#### **4. CONCLUSIONS**

Le fluage thermique transitoire, qui est définie comme la différence de déformation entre les échantillons chargés puis chauffés et ceux chauffés puis chargés ne semble exister qu'après la première montée en température.

Le fluage thermique transitoire ne semble pas exister si le matériau a été longuement chargé avant le chauffage des éprouvettes. Cela signifie que la consolidation jouerait un rôle important sur cette déformation supplémentaire. Ce constant expérimental a été implémenté dans le modèle développé au LMDC dans la théorie de la consolidation.

Le fluage thermique transitoire semble être une diminution apparente momentanée de la viscosité du béton due aux surpressions de l'eau et à ses changements de propriétés physiques locales. La microdiffusion de l'eau dans les zones de fortes pressions pourrait être à l'origine de nouveaux sites de fluage. Ceci expliquerait pourquoi le fluage thermique transitoire est une déformation supplémentaire inexistante en cas de fluage en condition stabilisée de température.

Les cinétiques de déformations très importantes observées sur éprouvettes cylindriques de BHP n'ont pas été retrouvées avec les essais sur poutres précontraintes. Plusieurs analyses peuvent être faites : la forte consolidation initiale des poutres semble prouver que le fluage thermique transitoire ne peut avoir lieu que sur matériau non consolidé. La présence d'une cage d'armatures passives de type haute adhérence, de cadres d'effort tranchant et la consolidation due au fluage et au retrait pourraient restreindre les déformations différées du béton lors du chauffage. La partielle saturation des poutres précontraintes et la porosité plus importante pourraient aussi expliquer une telle différence.

#### **5. REMERCIEMENTS**

Ce travail a été mené au LMDC (Université de Toulouse, France) en collaboration et avec le support de l'Andra (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs) et l'ANR MACENA (MAîtrise du Confinement d'une ENceinte en Accident).

#### **6. RÉFÉRENCES**

- Bažant Z. P., Kaplan M. F., (1996) Concrete at High Temperatures: .Materials Properties and Mathematical Models, *Concrete design and construction series*, SBN: 0582086264, 9780582086265 Pages 412.
- Cagnon. H. (2015) Influence des variations Thermo-Hydro-Mécaniques sur le comportement différé du béton, *Thèse, Université Toulouse III*, 270 pages.
- Ghabezloo S., (2011) Micromechanics analysis of thermal expansion and thermal pressurization of a hardened cement paste, *Cement and Concrete Research*, 41: 520-532.

- Khoury G. A., (1983) Transient thermal creep of nuclear reactors pressure vessel type concretes, *Thesis submitted to the University of London for the degree of PhD*, Volume 1, Pages 1126. Volume 2, Pages. 418.
- Khoury G. A. Grainger B. N., Sullivan P. J. E., (1985) Transient thermal strain of concrete: literature review, conditions within specimen and behavior of individual constituents, *Magazine of Concrete Research*, 37: 131-144.
- Khoury G. A., (1992) Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment, *Magazine of concrete Research*, 44: 291-309.
- Ladaoui. W. (2010) Etude expérimentale du comportement Thermo-Hydro-Mécanique à long terme des BHP destinés aux ouvrages de stockage des déchets radioactifs, *Thèse, Université Toulouse III*, 270 pages.
- 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*, 44: 1629-1639.
- 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, *Materials and Structures*, 46: 13-23.
- Nouwome A. N., Clastres P., Debicki G., Costaz J.-L. (1996) Transient heating effect on high strength concrete, *Nuclear Engineering and Design*, 166: 99-108.
- Sellier A., Buffo-Lacarrière L., (2012) Toward a simple and unified modelling of basic creep, shrinkage and drying creep for concrete, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 13: 1161-1182.
- Sellier A., Buffo-Lacarrière L., Multon S., Vidal T., Bourbon X. (2012) Nonlinear basic creep and drying creep modeling, *Rossi and Tailhan editions, SSCS conference, Aix en Provence, France*.
- Valenza II J. J., Scherer G. W., T., (2005) Evidence of anomalous thermal expansion of water in cement paste, *Cement and Concrete Research*, 35: 57-66.
- Vidal T., Sellier A., Ladaoui. W., Bourbon X. (2015) Effect of Temperature on the Basic Creep of High-Performance Concretes Heated between 20 and 80°C, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27.

# MERCI À NOS PRÉCIEUX COMMANDITAIRES



UNIVERSITÉ  
**LAVAL**

Faculté des sciences et de génie  
Département de génie civil  
et de génie des eaux



**CRIB**  
Centre de recherche sur les  
infrastructures en béton

Québec 



Association  
**Béton**  
Québec  
LA référence



Association  
Canadienne  
du Ciment



MISSION CONCRÈTE INSTITUTE  
QUEBEC &  
E. ONTARIO



@ BEKAERT  
MACCAFERRI  
UNDERGROUND SOLUTIONS  
[www.bm-underground.com](http://www.bm-underground.com)



**Ciment Québec**



EUCLID CANADA



INTERNATIONAL  
CONCRETE REPAIR  
INSTITUTE

SECTION  
Québec



**LAFARGE**