



**HAL**  
open science

# Analyse par approche numérique mésoscopique des propriétés mécaniques résiduelles du béton après un chargement de type fluage

Matthieu Briffaut, Zainab Kammouna, Yann Malecot

► **To cite this version:**

Matthieu Briffaut, Zainab Kammouna, Yann Malecot. Analyse par approche numérique mésoscopique des propriétés mécaniques résiduelles du béton après un chargement de type fluage. Rencontres Universitaires de Génie Civil, May 2015, Bayonne, France. hal-01167715

**HAL Id: hal-01167715**

**<https://hal.science/hal-01167715>**

Submitted on 24 Jun 2015

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

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

---

# Analyse par approche numérique mésoscopique des propriétés mécaniques résiduelles du béton après un chargement de type fluage

**Briffaut Matthieu<sup>1,2</sup>, Kammouna Zainab<sup>1,2</sup>, Malecot Yann<sup>1,2</sup>**

1 Univ. Grenoble Alpes, 3SR, F-38000Grenoble, France

2 CNRS, 3SR, F-38000Grenoble, France

Author Email: [matthieu.briffaut@3sr-grenoble.fr](mailto:matthieu.briffaut@3sr-grenoble.fr)

---

*RÉSUMÉ. Les modèles existants pour estimer le fluage du béton basés sur une modélisation rhéologique, supposent généralement que le béton est un matériau homogène. Par conséquent les incompatibilités de déformations entre la pâte de ciment et les granulats lorsque le béton est soumis à un chargement de type fluage ne peuvent pas être prise en compte alors qu'elles peuvent être à l'origine d'une microfissuration. Ces microfissures peuvent entraîner une diminution du module d'élasticité et de la résistance du béton, et une augmentation de la quantité de déformation par fluage sous le même niveau de chargement. Cette augmentation des déformations de fluage peut être considérée comme la source de non linéarités avec le niveau de contrainte.*

*Pour étudier l'influence de ces microfissures, un modèle visco-élastique-endommageable a été adopté pour le calcul de fluage en utilisant une technique de maillage mésoscopique. Les résultats montrent qu'une part importante des non linéarités peut être expliquée par les microfissurations liées aux incompatibilités de déformations et que l'approche mésoscopique permet de reproduire fidèlement des essais de fluage jusqu'à la rupture.*

*ABSTRACT. Existing models for estimating the creep of concrete based on rheological modelling, generally assume that concrete is an homogeneous material. Therefore, strains incompatibilities between the cement paste and aggregates when the concrete is subjected to a creep loading cannot be taken into account whereas they can generate microcracking. These microcracks may cause a decrease in the elasticity modulus and in the strength of concrete, and an increase in the amount of creep strains under the same loading level. This increase in creep strains can be considered as the source of nonlinearity with the stress level.*

*To study the influence of these microcracks, a viscoelastic-damageable model has been adopted for the calculation of creep using a mesoscopic meshing approach. The results show that a significant proportion of non-linearity can be explained by the microcracks and that the mesoscopic approach allows to reproduce creep tests until failure.*

*MOTS-CLÉS : béton, fluage, approche mésoscopique, incompatibilité de déformation.*

*KEYWORDS: concrete, creep, mesoscopic approach, strains incompatibilities.*

---

## 1. Introduction

Les modèles existants pour estimer le fluage du béton basés sur la modélisation rhéologique, supposent généralement que le béton est un matériau homogène. Par conséquent les incompatibilités de déformations entre la pâte de ciment et les granulats lorsque le béton est soumis à un chargement de type fluage ne peuvent pas être prises en compte. Le fluage du béton se produit majoritairement en raison du fluage de la pâte de ciment. Les granulats agissent donc comme une résistance au fluage macroscopique. En conséquence, des contraintes de traction sont générées dans la pâte de ciment et conduisent à l'apparition de microfissures à l'interface entre la pâte de ciment et les agrégats. Ces microfissures peuvent entraîner une diminution du module d'élasticité et de la résistance du béton, et une augmentation de la quantité de déformation par fluage sous le même niveau de chargement. Cette augmentation des déformations de fluage peut être considérée comme la source d'une non linéarité avec le niveau de contrainte.

Pour reproduire cette non-linéarité à l'échelle macroscopique, un couplage entre l'endommagement et le fluage est régulièrement introduit dans le calcul de la déformation équivalente permettant le calcul de l'endommagement, mais ce coefficient de couplage reste difficile à calibrer. Une autre solution consiste à utiliser une loi rhéologique non linéaire avec le niveau de contrainte. Néanmoins, d'une part ce n'est pas en accord avec les constatations expérimentales à faibles taux de chargement et d'autre part le fluage tertiaire et la rupture du béton ne peuvent pas être obtenus tant que le béton est considéré comme un matériau homogène. Certains chercheurs représentent le béton en tant que matériau composite, qui se compose d'inclusions sphériques élastiques (agrégats et/ou des vides) noyées dans une matrice de viscoélastique linéaire. Ainsi, ils considèrent également que la déformation est linéaire par rapport à la contrainte. Récemment, une approche mésoscopique a été utilisée pour étudier la rupture de poutres en béton sous une charge de flexion et pour mettre en évidence la présence de microfissures au cours d'un chargement soutenu [SAL 13].

Le but de cet article est d'étudier l'influence des microfissures dues aux déformations incompatibles entre la pâte de ciment et les granulats sur l'amplitude du fluage. Pour ce faire, un modèle visco-élastique-endommageable a été adopté pour le calcul de fluage en utilisant une technique de maillage mésoscopique pour représenter les plus gros granulats du béton (diamètre > 1 mm) et le mortier.

La première partie de cette étude est consacrée à l'étude fluage du béton en compression et en traction et notamment l'étude de la non-linéarité de déformation de fluage par rapport au niveau de contrainte. Pour vérifier la capacité de ce modèle à estimer fluage du béton sous des niveaux de chargement variables des données expérimentales de fluage en compression et en traction disponibles dans la littérature ont été utilisées. De plus, des essais à l'anneau thermique actif ont été simulés. En effet, dans ces essais, le fluage en traction du béton est activé, et les essais vont jusqu'à la rupture de l'anneau de béton.

Expérimentalement, les effets des déformations de fluage sur les propriétés mécaniques résiduelles du béton comme le module de Young, la résistance à la compression et à la traction ne sont pas clairement établis. Toutefois, les modèles existants pour estimer le fluage du béton prennent en général en compte un changement de ces propriétés mécaniques pendant la durée du chargement par le biais de l'endommagement. La seconde partie de cet article présentera l'évolution de la loi de comportement du béton en raison des déformations incompatibles et des microfissures générées au cours d'un chargement de type fluage.

## 2. Modélisation des essais de fluage uniaxiaux

### 2.1. Maillage et modèles

L'algorithme de génération du maillage mésoscopique a été développé par Nguyen [NGU 10]. Les simulations numériques sont effectuées sur VER bidimensionnelle de béton ( $100 \times 100 \text{ mm}^2$ ) pour lesquels la matrice de ciment et de granulats sont représentés. Les calculs sont effectués en contraintes planes. Le maillage n'est pas adapté à la présence d'agrégats, mais les propriétés du matériau sont projetées dans une grille de maillage d'éléments finis. La figure 1 montre un exemple de maillage utilisé pour les simulations de fluage.

Le modèle utilisé pour les granulats est un modèle élastique endommageable alors que les déformations de la pâte de ciment sont décrites par un modèle visco-élastique-endommageable. L'intérêt de l'utilisation d'un maillage mésoscopique réside dans l'utilisation, à l'échelle des matériaux constituant le béton, de loi constitutive les plus simples possible. Pour cela, l'endommagement en compression est désactivé. La représentation

géométrique des constituants et le contraste entre les propriétés des matériaux doit alors être la source des comportements complexes observés à l'échelle macroscopique.

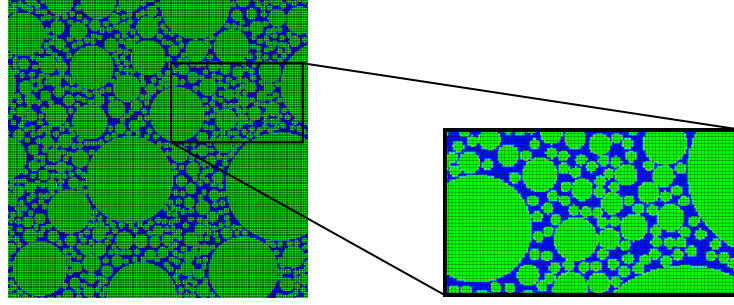


Figure 1 : exemple de maillage utilisé

Les lois de comportement élastique endommageable s'appuient sur la théorie développée par Mazars [MAZ 86] et la composante visqueuse pour la pâte de ciment est décrite par un modèle rhéologique développé par Benboudjema [BEN 08]. Il s'agit d'un assemblage d'éléments de Kelvin-Voigt en série.

La relation entre la contrainte apparente  $\boldsymbol{\sigma}$ , la contrainte effective  $\tilde{\boldsymbol{\sigma}}$ , la variable d'endommagement  $D$ , le tenseur élastique  $\mathbf{E}$ , la déformation élastique  $\boldsymbol{\varepsilon}_e$ , la déformation de fluage  $\boldsymbol{\varepsilon}_{bc}$ , la déformation thermique  $\boldsymbol{\varepsilon}_{th}$ , la déformation de retrait  $\boldsymbol{\varepsilon}_{au}$  et la déformation totale  $\boldsymbol{\varepsilon}$ , s'écrit:

$$\boldsymbol{\sigma} = (1 - D)\tilde{\boldsymbol{\sigma}} = (1 - D)\mathbf{E}(\boldsymbol{\xi})\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_e = (1 - D)\mathbf{E}(\boldsymbol{\xi})(\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} - \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{bc} - \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{au} - \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{th}) \quad (1)$$

Le modèle prend en compte directement les effets de l'hydratation. Afin de reproduire la partie réversible du fluage propre trois chaînes de Kelvin Voigt (KV) et un amortisseur sont utilisés. La déformation d'une chaîne de KV peut être obtenue en résolvant l'équation différentielle suivante [BEN 08]:

$$\tau_{bc}^i \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{bc}^i + \left( \tau_{bc}^i \frac{k_{bc}^i(\boldsymbol{\xi})}{k_{bc}^i(\boldsymbol{\xi})} + 1 \right) \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{bc}^i = \frac{\dot{\tilde{\boldsymbol{\sigma}}}}{k_{bc}^i(\boldsymbol{\xi})} \text{ and } \tilde{\boldsymbol{\sigma}} = \eta_{bc}^j(\boldsymbol{\xi}) \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{bc}^j \quad (2)$$

où  $\tau_{bc}^i$  est le temps caractéristique (constant),  $k_{bc}^i(\boldsymbol{\xi})$  et  $\eta_{bc}^j(\boldsymbol{\xi})$  sont respectivement les raideurs des ressorts et les viscosités (fonction du degré d'hydratation) et  $\tilde{\boldsymbol{\sigma}}$  est la contrainte effective précédemment définie (équation 1).

Les paramètres de raideur pour chaque chaîne sont calculés à partir des équations suivantes [DES 99]:

$$k_{bc}^i(\boldsymbol{\xi}) = k_{bc-\infty}^i \frac{0.473}{2.081 - 1.608\bar{\xi}} \bar{\xi}^\psi \text{ et } \eta_{bc}^j(\boldsymbol{\xi}) = \eta_{bc-\infty}^j \frac{0.473}{2.081 - 1.608\bar{\xi}} \bar{\xi}^\psi \quad (3)$$

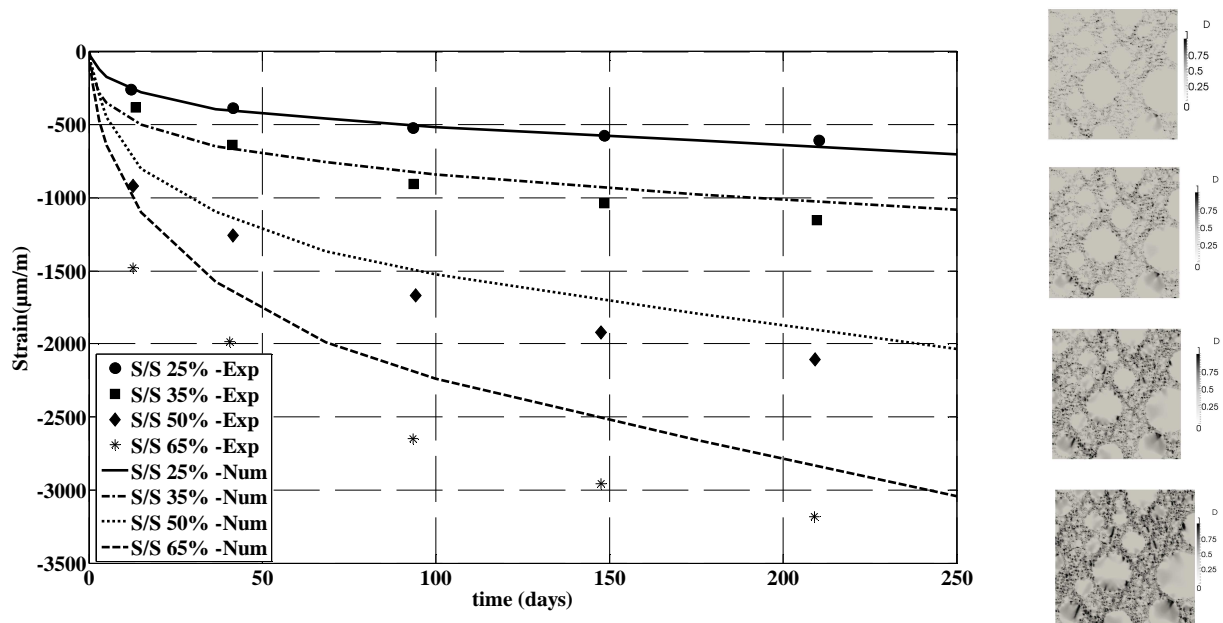
où  $k_{bc-\infty}^i$  et  $\eta_{bc-\infty}^j$  sont respectivement les raideurs et la viscosité pour un temps infini. Les temps caractéristiques sont considérés constants pour chaque chaîne de Kelvin-Voigt.

## 2.2. Modélisation du fluage en compression

Les essais de fluage de Roll [ROL 64], réalisés sous quatre niveaux de contraintes différents ont été utilisés pour déterminer la capacité des simulations à reproduire les non-linéarités du fluage avec la contrainte. En effet, à l'échelle macroscopique, on observe une augmentation des déformations de fluage avec l'augmentation du taux de charge. Pour reproduire cette non-linéarité à l'échelle du matériau, un couplage entre les déformations de fluage et les déformations élastiques a été proposé par Mazotti and Savoia [MAZ 03]. Néanmoins, le paramètre de couplage reste difficile à calibrer. Une autre alternative consiste à adopter un modèle rhéologique dépendant du taux de contrainte ce qui n'est pas validé expérimentalement pour de faibles niveaux de chargement. L'objectif des simulations de cette étude est de montrer l'influence des incompatibilités de déformations sur la prédiction des déformations de fluage.

Les paramètres du modèle ont donc été calibrés sur les déformations de fluage sous le chargement le plus faible (25% de la résistance en compression) en s'assurant qu'aucun endommagement ne se développe lors de la partie

élastique. Les trois niveaux de chargement plus élevés sont ensuite prédits par le modèle et le jeu de paramètres identifié et comparé aux résultats expérimentaux (cf. figure 2).



**Figure 2 :** Comparaison des déformations de fluage obtenue expérimentalement [ROL 64] et avec les simulations mésoscopiques et champs d'endommagement associés (à 250j)

On constate que les déformations de fluage sous un niveau de chargement élevé sont correctement reproduites bien que légèrement sous-estimées. L'endommagement de la matrice cimentaire visible sur les champs d'endommagement présentés sur la figure 2 (les endommagements présentés sont ceux obtenus à la fin de la période de fluage (250 jours)), dû aux incompatibilités de déformation entre la pâte de ciment et les granulats provoque une augmentation des déformations (diminution de la raideur mais charge constante). En effet, les déformations de la pâte de ciment sous l'effet du chargement extérieur sont empêchées par les granulats générant à l'interface des contraintes de traction qui mèneront à la rupture (micro fissuration). Cette augmentation de la déformation liée à l'endommagement (par rapport à un calcul viscoélastique) peut être interprétée comme une non-linéarité des déformations de fluage avec le taux de contrainte. L'utilisation d'un maillage mésoscopique permet de retrouver une grande partie de cette non-linéarité sans avoir à introduire de couplage entre le fluage et l'endommagement. En effet, bien que ces simulations mésoscopique soit basées sur certaines hypothèses comme la forme des granulats (sphériques), l'absence d'ITZ, les dimensions du calcul (2D contraintes planes), on remarque que pour le chargement égal à 65%, le pourcentage de non linéarité expliqué par les incompatibilités de déformation et l'endommagement associé est de l'ordre de 80%.

### 2.3. Loi de comportement résiduelle du béton

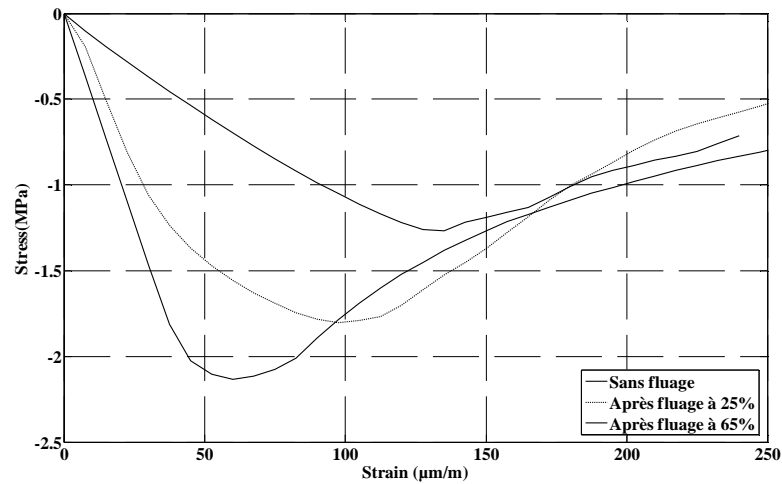
La microfissuration induite par la déformation de la pâte de ciment lors d'une sollicitation de type fluage provoque également une modification des propriétés résiduelles du béton. Les figures 3 et 4 montrent les relations entre la déformation et la contrainte (lois de comportement) obtenues par des essais de traction et de compression virtuels quasi-instantanés sur une mésostructure pour 3 situations:

- 1 **Sans fluage** : la mésostructure n'a pas subi de fluage; pas d'endommagement initial.
- 2 **Après fluage à 25%** : la mésostructure à subir une contrainte égale à 25% de sa résistance pendant 250 jours
- 3 **Après fluage à 65%** : la mésostructure à subir une contrainte égale à 65% de sa résistance pendant 250 jours

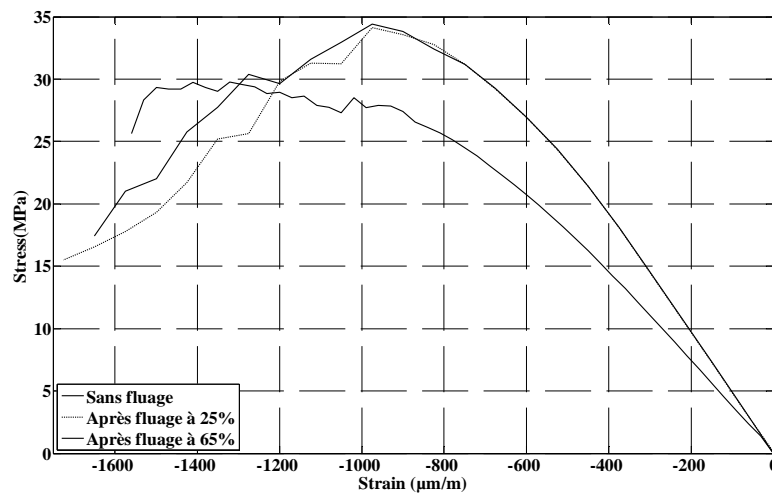
Les champs d'endommagement initiaux de ces simulations sont les champs d'endommagement obtenu à la fin des simulations de fluage. L'influence de la sollicitation de fluage préalable semble plus importante en traction qu'en compression puisque les effets de la microfissuration sont visibles sur le module d'Young et sur la résistance en traction dès le premier niveau de chargement (25%) alors qu'en compression les effets ne sont importants que pour un niveau de chargement de 65%. Le tableau 1 récapitule les diminutions de résistance et de module d'Young obtenues.

Il est à noter que lors d'un chargement en déplacement, le modèle mécanique présenté précédemment ne permet pas d'obtenir la rupture en cisaillement (la contrainte résiduelle en cisaillement ne tend pas vers 0MPa). Ainsi, pour ces simulations, le modèle d'endommagement développé par [FIC 99] a été utilisé. En effet, ce modèle permet avec les paramètres utilisés d'obtenir une contrainte de cisaillement qui tend vers 0 lorsque la déformation est grande.

Il est intéressant de noter que lorsqu'un important champ d'endommagement initial est obtenu après fluage, le comportement global semble être plus ductile. Les mêmes résultats ont été obtenus par Heinfling et al. [HEI 98] et [BRI 13]. Cela s'explique par une augmentation des sites de fissurations à cause de l'endommagement initial généré par le fluage et donc une dissipation d'énergie plus importante.



(a)



(b)

**Figure 3 :** Loi de comportement résiduelle du béton après sollicitation de fluage en traction (a) et en compression (b)

**Tableau 1.** Diminution des propriétés mécaniques après fluage ( $E$  : Module d'Young ;  $R_c$  : résistance en compression,  $R_t$  : résistance en traction)

	E (en compression)	E (traction)	$R_c$	$R_t$
Après fluage à 25%	0%	26%	0%	15%
Après fluage à 65%	25%	75%	13%	40%

### 3. Modélisation des essais à l'anneau thermique actif

#### 3.1. Modèle utilisé

Pour valider la capacité de notre approche à reproduire des essais de fluage jusqu'à la rupture les essais à l'anneau thermique actif ont été choisis car ils sollicitent le béton en traction quasi-uniaxiale, au jeune âge en température et jusqu'à la rupture. Ce sont donc des essais complexes à modéliser. Ce dispositif expérimental a été développé à partir de l'anneau classique. Une modification de cet essai a été proposée par [BRI 11a] afin de reproduire le retrait thermique in situ qui n'existe pas en laboratoire, car les dimensions des échantillons sont trop petites pour être représentatives de l'évolution de température d'une structure massive. Cette modification consiste à contrôler au moyen d'une circulation de fluide (eau) l'expansion de l'anneau métallique. Étant donné que la dilatation thermique du métal (laiton) est environ trois fois supérieure à celle du béton, des contraintes de traction sont générées.

L'histoire de température imposée est choisie pour être représentatives des contraintes générées dans les structures massives en béton. Les déformations orthoradiales sur l'anneau en laiton sont mesurées sur le rayon interne (trois jauges de contrainte sont installées) pour déterminer l'âge de la fissuration (pour l'analyse de sensibilité à la fissuration). Après une légère évolution de la température liée à l'hydratation du béton, la température de l'anneau métallique est augmenté jusqu'à obtenir un saut dans l'évolution des déformations ce qui correspond à la libération de contrainte interne directement liée à la fissuration du béton.

Dans les simulations des essais à l'anneau thermique actif, l'évolution de la maturité du béton doit être prise en compte.

La prédiction du comportement au jeune âge requière de connaître l'évolution de l'hydratation du béton.

##### 3.1.1. Hydratation du béton

Cette évolution peut être obtenue par l'utilisation d'une affinité chimique et en considérant que la réaction est thermo-activé suivant la loi d'Arrhenius:

$$\dot{\xi} = \tilde{A}(\xi) \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (4)$$

où  $E_a$  est l'énergie d'activation [ $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$ ],  $R$  est la constante du gaz idéal  $8,3145 [\text{JK}^{-1} \text{mol}^{-1}]$ ,  $T$  est la température [K],  $\xi$  est le degré d'hydratation,  $\tilde{A}(\xi)$  est l'affinité chimique [ $\text{s}^{-1}$ ].

L'équation d'équilibre d'énergie, qui comprend le dégagement de chaleur dû à la réaction d'hydratation, est résolue pour obtenir l'évolution de la température:

$$CT\dot{} = \nabla(k\nabla T) + L\dot{\xi} \quad (5)$$

dans laquelle  $L$  est la chaleur d'hydratation latente [ $\text{Jm}^{-3}$ ],  $k$  est la conductivité thermique [ $\text{Wm}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ] et  $C$  est la capacité thermique volumétrique [ $\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$ ], qui sont supposés être constants.

Les conditions aux limites sont de type convection ; le flux de chaleur par convection  $\phi [\text{Wm}^{-2}]$  s'écrit:

$$\phi = h(T_s - T_{ext})\mathbf{n} \quad (6)$$

où  $T_s$  est la température à la surface [K],  $T_{ext}$  est la température ambiante [K] et  $h$  est le coefficient d'échange, y compris convection et rayonnement.

##### 3.1.2. Retrait thermique et endogène

Le retrait endogène et déformation thermique peuvent être modélisés par les équations suivantes:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{au} = -\kappa \bar{\xi} \mathbf{1} \quad \text{and} \quad \boldsymbol{\varepsilon}_{th} = \alpha(T - T_0)\mathbf{1} \quad \text{with} \quad \bar{\xi} = \left\langle \frac{\xi - \xi_0}{\xi_\infty - \xi_0} \right\rangle_+ \quad (7)$$

où  $K$  est un paramètre constant du matériau, ce  $\xi_0$  est le seuil de percolation mécanique,  $\xi_\infty$  est le degré d'hydratation finale et  $\langle \cdot \rangle_+$  est l'opérateur de partie positive.

### 3.1.3. Modèle elasto-endommageable vieillissant

Le module d'Young  $E$  et la résistance à la traction augmentent en raison de l'hydratation de la manière suivante:

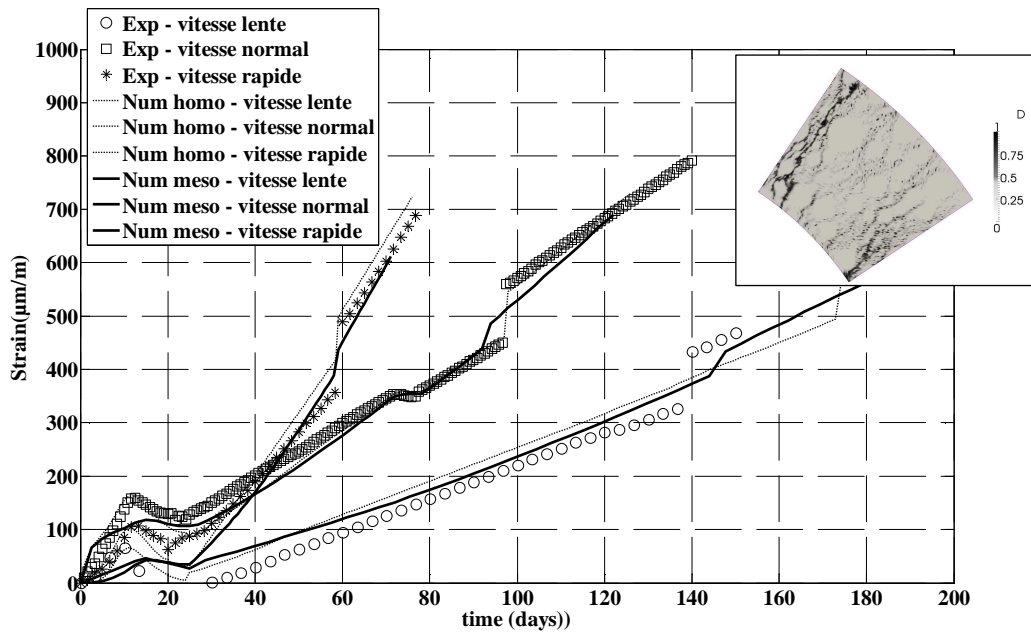
$$E(\xi) = E_\infty \bar{\xi}^{a_E} \quad \text{and} \quad f_t(\xi) = f_{t_\infty} \bar{\xi}^{a_{f_t}} \quad (6)$$

où  $E_\infty$  et  $f_{t_\infty}$  sont respectivement le module d'Young et la résistance à la traction à l'infini (ce est à dire quand  $\xi = \xi_\infty$ ),  $a_E$  et  $a_{f_t}$  sont des paramètres constants du matériau.

## 3.2. Comparaison entre approche homogène et mésoscopique

Une approche macroscopique (i.e. homogène) a permis d'identifier un coefficient de couplage entre fluage et endommagement (d'après les travaux de Mazzotti and Savoia [MAZ 03] une partie de la déformation de fluage est introduite dans le calcul de la déformation équivalente) mais ce coefficient ne permet pas de reproduire correctement les essais lorsque les vitesses de montée en température évoluent [BRI 11a]. On constate notamment que pour la vitesse de montée en température la plus lente, l'instant de fissuration est largement surestimé (cf. figure 4).

L'approche mésoscopique (sans couplage entre fluage et endommagement) permet de reproduire avec le même jeu de paramètres l'instant de fissuration pour les 3 vitesses de montée en température (les paramètres sont calibrés sur la vitesse la plus rapide). En effet, la figure 4 montre l'évolution de déformations mesurées sur l'anneau métallique et les prévisions des simulations macroscopiques et mésoscopiques. Ce résultats confirme que le modèle est capable de reproduire le comportement complexe du béton sous fort niveau de chargement et que le couplage fluage endommagement apparent à l'échelle macroscopique est majoritairement dû à une microfissuration générée par les incompatibilités de déformations entre la pâte de ciment et les granulats. D'après ces résultats, l'identification d'un coefficient de couplage unique pour la réalisation de simulation d'ouvrage complet apparait délicate puisque la non-linéarité du fluage avec le taux de chargement dépend des constituants des matériaux (résistance et déformabilité des agrégats et de la pâte de ciment) mais aussi de l'histoire du béton et la présence éventuelle de microfissuration.



**Figure 4 :** Evolution des déformations des essais à l'anneau thermique actif : comparaison entre les mesures expérimentales, les prévisions d'un modèle macroscopique (homogène) et mésoscopique.



#### 4. Conclusion

Cette étude avait pour objectif d'analyser l'influence d'une micro fissuration générées sous une sollicitation de type fluage sur la prédiction des déformations et notamment les non linéarités entre déformation de fluage et taux de contraintes. Pour cela deux types d'essais de la littérature ont été utilisés afin d'investiguer des directions de sollicitations différentes (traction et compression). Les résultats des simulations mésoscopique montrent qu'une part importante des non-linéarités entre les déformations et le taux de contrainte peut être expliquée par les incompatibilités de déformations entre la pâte de ciment et les granulats qui génèrent localement des contraintes de traction et une microfissuration. Cette microfissuration semble avoir un impact important sur le comportement mécanique résiduel du béton puisqu'une diminution importante des propriétés mécaniques est prédite notamment en traction. Par ailleurs, des essais de traction quasi-uniaxiale jusqu'à la rupture ont permis de valider cette approche dans le contexte d'un béton en cours de maturation. Ces résultats mettent en lumière le fait que pour la simulation de structures à l'échelle macroscopique, l'utilisation d'une variable scalaire pour coupler le fluage et l'endommagement n'est pas suffisante et ne peut pas être généralisée. Une perspective intéressante serait d'utiliser des méthodes multi-échelle de type FEM<sup>2</sup> pour intégrer la richesse des informations obtenues à l'échelle mésoscopique à un calcul structurel.

#### 5. Bibliographie

- [BEN 08] BENBOUDJEMA F., TORRENTI J.M. (2008), Early-age behaviour of concrete nuclear containments, *Nuclear Engineering and Design*, vol. 238(10), pp. 2495-2506.
- [BRI 11a] BRIFFAUT M., BENBOUDJEMA F., TORRENTI J.M., NAHAS G. (2011) A thermal active restrained shrinkage ring test to study the early age concrete behaviour of massive structures, *Cement and Concrete Research*, vol.41(1), pp. 56-63.
- [BRI 11b] BRIFFAUT M., BENBOUDJEMA F., TORRENTI J.M., NAHAS G. (2011), Numerical analysis of the thermal active restrained shrinkage ring test to study the early age behaviour of massive concrete structures, *Engineering Structures*, vol.33(4), pp. 1390-1401
- [BRI 13] BRIFFAUT M., BENBOUDJEMA, F., LABORDERIE, C., TORRENTI J.M. (2013), Creep Consideration Effect on Meso-Scale Modeling of Concrete Hydration Process and Consequences on the Mechanical Behavior, *Journal of engineering mechanics*, Vol. 139 (12), pp.1808-1817
- [DES 99] DE SCHUTTER G., Degree of hydration based Kelvin model for the basic creep of early age concrete, *Materials and Structures*, pp. 260-265, Vol. 32, 1999.
- [FIC 99] FICHANT S. LA BORDERIE C. AND PIAUDIER-CABOT G. (1999), Isotropic and anisotropic description of damage in concrete structures, *Mech. Cohes.-Fric Mater.*, Vol. 4, pp. 339-359.
- [HEI 98] HEINFLING G, STABLER J., BAKER G. AND REYNOUARD J.M. (1998), Effects of high temperatures on the fracture energy of concrete, *International Conference on Fracture Mechanics of Concrete Structures*, FRAMCOS 3 (3rd), 1998
- [MAZ 03] MAZOTTI C., SAVOIA M. (2003), Nonlinear Creep Damage Model for Concrete under Uniaxial Compression. *Journal of Engineering Mechanics*, vol.129(9), p.1065-1075.
- [MAZ 86] MAZARS J. (1986) A description of micro and macroscale damage of concrete structures, *Engineering Fracture Mechanics*, 25(5:6), p. 729-737.
- [NGU 10] NGUYEN T.D., LAWRENCE C., LA BORDERIE C., MATALLAH M. and NAHAS G. (2010), A mesoscopic model for a better understanding of the transition from diffuse damage to localized damage, *European Journal of Environment and Civil Engineering*, 14(6-7), p. 751-776.
- [ROL 64] ROLL, R. (1964). "Long time creep-recovery of highly stressed concrete cylinders". In ACI SP-9, Symp. on Creep, Detroit, pp. 115-128. Portland Cement Association.
- [SAL 13] SALIBA J., GRONDIN F., MATALLAH M., LOUKILI A., BOUSSA H. (2013), Relevance of a mesoscopic modeling for the coupling between creep and damage in concrete, *Mechanics of Time-Dependent Materials* Volume 17, Issue 3, pp 481-499