

**Titre:** Etude expérimentale et numérique multi-échelle du fluage et de la microfissuration dans les matériaux cimentaires.

**Mots clés:** fluage, microfissuration, mortier, méthode de champ de phase, modèle de zone cohésive, modélisation mésoscopique, tomographie, corrélation de volumes numériques.

**Résumé:** La sûreté des enceintes de confinement à double paroi du parc nucléaire français dépend principalement de l'intégrité du béton précontraint. Les déformations différées induites par le fluage et le retrait sont à l'origine d'une perte de précontrainte pouvant augmenter le risque de fuite en conditions accidentelles. Afin de prédire de manière fiable les performances à long terme des ouvrages nucléaires, les modèles de comportement nécessitent une base sur des mécanismes de déformation réalistes à l'échelle microscopique. Le fluage du béton dépend de plusieurs facteurs couplés parmi lesquels la microfissuration est d'une importance majeure. Ce travail visait à mieux comprendre les mécanismes de couplage de fluage/microfissuration avec les changements de teneur en eau, et à développer un modèle numérique de couplage entre fluage et endommagement à méso-échelle pour prédire des déformations différées à long terme. Cet étude reposait sur une interaction élargie entre expérimentations et modélisation. La campagne d'essais macroscopiques de fluage en compression sur le mortier et la pâte de ciment visait à découpler l'influence de plusieurs facteurs sur la vitesse de fluage : hétérogénéité du matériau (influence des inclusions), teneur en eau, niveau de contrainte et présence de séchage. Les données obtenues ont été utilisées pour

une meilleure compréhension des mécanismes physiques, la calibration du modèle numérique de fluage et en tant que référence pour les simulations numériques des interactions fluage/endommagement/séchage. L'endommagement mésoscopique a été étudié avec des essais *in situ* de microflexion sur mortier avec tomographie aux rayons X. Le test a été analysé avec une technique de corrélation de volumes numériques avec la régularisation mécanique adaptée à un matériau hétérogène pour étudier les processus d'endommagement à des échelles inférieures. La calibration des modèles d'endommagement par éléments finis a été réalisée pour la matrice cimentaire et les interfaces matrice-agrégat sur la base d'essais de microflexion *in situ*. Les simulations ont été effectuées sur des maillages basés sur des images volumiques d'échantillons réels et avec des conditions aux limites cinématiques mesurées via corrélation de volumes numériques. Les modèles calibrés de fluage et d'endommagement ont été appliqués sur des microstructures réalistes ou générées aléatoirement de mortier pour simuler le fluage propre et évaluer les effets d'endommagement sur les déformations différées. Finalement, le modèle de séchage a été introduit pour les simulations de fluage/endommagement/séchage.

**Title:** Multiscale experimental and numerical study of creep and microcracking in cementitious materials.

**Keywords:** creep, microcracking, mortar, phase-field method, cohesive zone model, mesoscale modeling, tomography, digital volume correlation.

**Abstract:** The safety of double wall concrete containment buildings in the French nuclear fleet primarily depends on the integrity of prestressed concrete. The delayed strains induced by creep and shrinkage are the cause of a loss of prestress that may increase the risk of potential leaks in accidental conditions. In order to predict in a reliable manner the long term performance of nuclear civil engineering structures, concrete constitutive models require a basis on realistic deformation mechanisms at the micro scale. Creep of concrete depends on multiple coupled factors among which microcracking is of major significance. This work aimed to gain a better understanding on the mechanisms of creep/microcracking coupling with changes in water content, and to develop a numerical creep/damage model at the mesoscale for the prediction of long-term delayed strains. This study was based on an extended interplay between experiments and modeling. The campaign of macroscopic compressive creep tests on mortar and cement paste aimed at decoupling the influence of several factors on the creep rate: material heterogeneity (influence of inclusions), water

content, stress state and drying. The obtained data were used for a better understanding of the physical mechanisms, calibration of the creep numerical model and as a benchmark for numerical simulations of creep/damage/drying interactions. The mesoscopic damage was studied with *in situ* micro-flexural tests on mortar with X-Ray tomography. The test was analysed with a mechanically regularized Digital Volume Correlation technique adapted for a heterogeneous material to study the damage processes at lower scales. The calibration of finite element damage models was carried out for the cementitious matrix and matrix-aggregate interfaces based on *in situ* micro-flexural tests. The simulations were performed on image-based meshes of real samples and with measured kinematic boundary conditions via Digital Volume Correlation. The calibrated creep and damage models were applied on realistic and artificial microstructures of mortar to simulate basic creep, and evaluate damage effects on delayed strains. Then, the drying model was introduced for drying creep/damage simulations.

