



**HAL**  
open science

## Modélisation chimio-mécanique de la fissuration de matériaux cimentaires : vieillissement et tenue des enceintes de confinement des centrales nucléaires

Adrien Socié, Frédéric Dubois, Yann Monerie, Frédéric Perales

### ► To cite this version:

Adrien Socié, Frédéric Dubois, Yann Monerie, Frédéric Perales. Modélisation chimio-mécanique de la fissuration de matériaux cimentaires : vieillissement et tenue des enceintes de confinement des centrales nucléaires. Aussois 2018 - Colloque National Mécamat " Matériaux Numériques : Microstructures et comportements thermomécaniques", Jan 2018, Aussois, France. hal-02347790

**HAL Id: hal-02347790**

**<https://hal.science/hal-02347790>**

Submitted on 5 Nov 2019

**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.

## MODÉLISATION CHIMIO-MÉCANIQUE DE LA FISSURATION DE MATÉRIAUX CIMENTAIRES : VIEILLISSEMENT ET TENUE DES ENCEINTES DE CONFINEMENT DES CENTRALES NUCLÉAIRES

A. Socié <sup>a,c</sup>, F. Dubois <sup>b,c</sup>, Y. Monerie <sup>b,c</sup>, F. Perales <sup>a,c</sup>

<sup>a</sup> IRSN : Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, B.P. 3, 13115 Saint-Paul-lez-Durance Cedex, France, adrien.socie@irsn.fr, frederic.perales@irsn.fr ;

<sup>b</sup> LMGC : Laboratoire Mécanique et Génie Civil, CNRS, CC 048, 34095 Montpellier Cedex, France, frederic.dubois@umontpellier.fr, yann.monerie@umontpellier.fr ;

<sup>c</sup>MIST : Laboratoire de Micromécanique et Intégrité des Structures, IRSN-CNRS-Univ. Montpellier, France

**Mots-clefs :** Béton, Diffusion, Fissuration, Modèles de Zone Cohésives Frottantes, Microporomécanique, Réaction Sulfatique Interne, Chimio-mécanique.

### 1 Contexte

Dans le cadre de l'extension de la durée de vie des centrales nucléaires, différents travaux de recherche sont développés par l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) afin d'évaluer le vieillissement des infrastructures nucléaires et des matériaux qui les composent. Ce travail de thèse porte sur le vieillissement des matériaux cimentaires des enceintes de confinements. Les dégradations de ces matériaux sont dues à des pathologies liées aux conditions environnementales et à la microstructure du béton. Un état avancé de dégradation peut conduire à l'apparition d'un réseau de fissures augmentant la perméabilité apparente du béton et réduisant les propriétés de confinement de l'enceinte. Les processus de fissuration et leurs conséquences mécaniques sont ici étudiés à l'échelle d'une collection de granulats : échelle dite mésoscopique.

Le laboratoire commun MIST (IRSN-CNRS-UM) a développé une approche micromécanique pour l'étude fine de l'amorçage de multifissures, de leurs propagations et des phénomènes post-ruptures de matériaux hétérogènes en présence de couplages multiphysiques. Cette approche est basée sur la méthode des éléments finis cohésifs-volumiques : chaque maille est modélisée par un comportement volumique durcissant et est reliée aux mailles adjacentes à l'aide d'un comportement adoucissant modélisant les processus surfaciques d'endommagement, de contact frottant, d'usure, etc (modèles de zone cohésive étendu). Une thèse [2] a récemment couplé cette approche à une modélisation thermomécanique afin de prendre en compte l'interaction entre la fissuration et la diffusion thermique au sein de matériaux cimentaires pré-dégradés.

L'objectif de ce travail est la compréhension à l'échelle mésoscopique de l'impact d'une dégradation chimique telle que la Réaction Sulfatique Interne (RSI) sur le coefficient de diffusion et la ténacité apparente du matériau. La RSI est une pathologie endogène issue d'une exposition à des températures supérieures à  $65^{\circ}\text{C}$  au jeune âge et à une forte humidité relative. Elle est causée par une formation tardive d'*ettringite* dans le matériau durci entraînant des gonflements locaux dans la pâte de ciment et une fissuration du matériau par déformations différentielles. Les fissures créées constituent alors le lieu privilégié d'une nouvelle précipitation d'*ettringite* [4] (Fig.1).

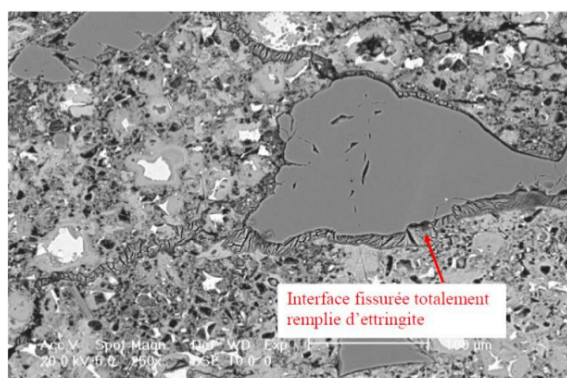


FIGURE 1 – Ettringite présente à l'interface pâte/granat [4]

## 2 Modélisation

Le point de départ de l'étude est un matériau pré-dégradé par le retrait thermique et la lixiviation. L'effet du jeune âge est pris en compte par une micro fissuration initiale. Les effets mécaniques de la lixiviation sont modélisés par homogénéisation analytique : la dégradation des C-S-H (phase liante de la pâte de ciment) induit une diminution des modules élastiques, une augmentation du coefficient de diffusion et une variation des paramètres de Biot [7]. En pratique, un modèle chimio-mécanique est utilisé pour décrire le transport d'espèces dans le milieu poreux que constitue la pâte de ciment, l'impact des fissures sur la diffusion effective et la réponse mécanique apparente du béton (Fig.2). Le comportement volumique est issu d'une étude microporomécanique prenant en compte le gonflement local dû à la RSI [1] et le comportement viscoélastique des hétérogénéités spatiales. Le comportement cohésif décrivant la fissuration prend en compte une pression additionnelle due au gonflement induit par la présence d'ettringite et ses conséquences sur la diffusion.

Le modèle prend en compte, pour un matériau dégradé : la diffusion d'espèces chimiques, le volume d'ettringite précipité, son impact sur la poromécanique et le lien fissuration-diffusion.

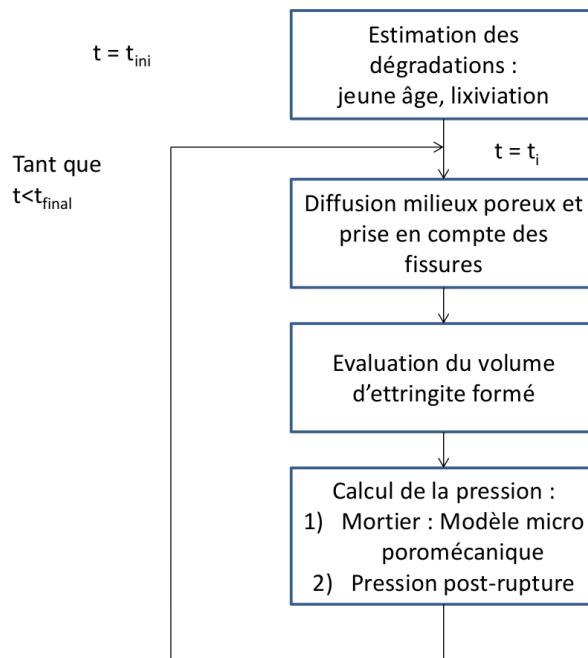


FIGURE 2 – Principales étapes du modèle

Les fissures créées étant le lien privilégié des futures précipitations d'ettringite et cette espèce chimique occupant un volume à l'état solide supérieur à celui de la somme de ses constituants chimiques, l'apparition d'ettringite après création d'une fissure est modélisé par un modèle cohésif avec gonflement post-rupture. Ce modèle, basé sur les modèles de [3] et [5], prend en compte les composantes normales et tangentes du saut de déplacement sur les lèvres de la fissure  $[u]$  et introduit progressivement une pression post rupture  $p(t)$ , voir équation (1) et Fig.3. Pour une fissure de normale  $\underline{n}$ , le vecteur contrainte cohésif  $\underline{R}^{\text{adh}}$  dépend d'une variable d'endommagement surfacique  $\beta$  ( $\beta = 1$  : interface saine,  $\beta = 0$  : interface rompue) via un tenseur d'élasticité surfacique endommageable  $\underline{K}(\beta)$  :

$$\underline{R}^{\text{adh}} = \underline{K}(\beta) \cdot [u] - (1 - \beta)^\alpha p(t) \underline{n} \quad (1)$$

où  $\alpha \geq 0$ .

L'implémentation de cette nouvelle loi cohésive avec transition progressive résistance-endommagement-gonflement est validée sur un volume élémentaire cubique dont la matrice imperméable contient une fissure ellipsoïdale sous pression, situation pour laquelle [6] a proposé une estimation analytique (Fig.4).

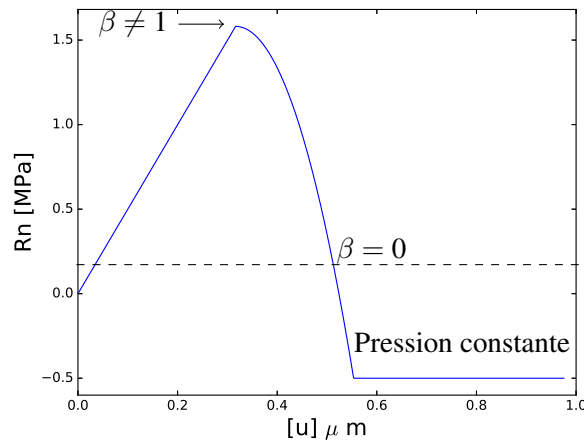


FIGURE 3 – Description de la loi cohésive soumise à un effort de traction

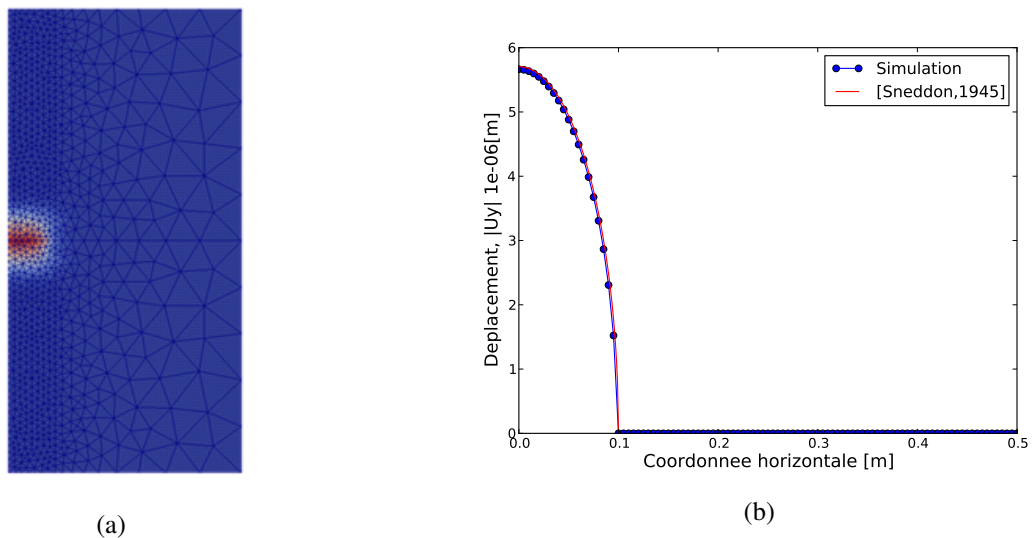


FIGURE 4 – Étude de l'ouverture d'une fissure sous pression dans une matrice élastique imperméable a) Champ de déplacement, un quart du cube a été modélisé b) Comparaison avec l'expression analytique de [6]

## Références

- [1] B. Bary. Simplified coupled chemo-mechanical modeling of cement pastes behavior subjected to combined leaching and external sulfate attack. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 32 : 1791-1816, 2008.
- [2] L. Bichet. Mécanisme de transport dans la fissuration des matériaux hétérogènes : application à la durée de vie d'exploitation des centrales nucléaires. *Thèse de l'Université de Montpellier II*, 2017.
- [3] M. Bisoffi-Sauve. Etude des ouvrages maçonneries en pierre par la méthode des éléments discrets : caractérisation et modélisation du comportement cohésif des joints. *Thèse de l'Université de Bordeaux*, 2016.
- [4] X. Brunetaud. Etude de l'influence de différents paramètres et de leurs interactions sur la cinétique et l'amplitude de la réaction sulfatique interne au béton. *Thèse de l'École Centrale des Arts et Manufactures "Ecole Centrale Paris"*, 2005.
- [5] F. Perales and S. Bourgeois and A. Chrysochoos and Y. Monerie. Two field multibody method for periodic homogenization in fracture mechanics of non linear heterogeneous materials. *Engineering Fracture Mechanics*, 75 : 3378 - 3398, 2008.
- [6] I.N. Sneddon. The distribution of stress in the neighbourhood of a crack in an elastic solid. *The Royal Society*, 229 - 258, 1945.
- [7] E. Stora and B. Bary and Q.-C. He and E. Deville and P. Montarnal. Modelling and simulations of the chemo-mechanical behaviour of leached cement-based materials Leaching process and induced loss of stiffness. *Cement And Concrete Research*, 39 : 763 - 772, 2009.