

---

# Endommagement de la pâte de ciment : intérêt et apport d'une nouvelle approche de modélisation micromécanique

**Abderrahmane RHARDANE**

*Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM), UMR 6183 CNRS/ECN/UN, Ecole Centrale de Nantes. Nantes, France (abderrahmane.rhardane@ec-nantes.fr)*

---

*RÉSUMÉ. La réponse globale des matériaux cimentaires hydratés sous chargement extérieur ou exposés à des conditions environnementales préjudiciables dépend étroitement du comportement de la matrice cimentaire. Une évaluation des propriétés de ces matériaux à travers des simulations numériques doit prendre en compte les aspects microstructuraux de la pâte comme l'assemblage des phases cimentaires et la distribution de la taille des pores. S'inscrivant dans la continuité des modèles développés à l'échelle de la pâte de ciment, l'approche de modélisation de l'endommagement proposée ici s'appuie sur une microstructure virtuelle, une loi d'endommagement et des propriétés intrinsèques pour les phases cimentaires. Cette description explicite des hétérogénéités permet à la fois de déterminer les propriétés macroscopiques des matériaux cimentaires sans avoir recours aux essais de calibration, et d'examiner finement le rôle des mécanismes internes sur la localisation de l'endommagement pour toute composition cimentaire et sous plusieurs sollicitations mécanique, thermique, hydrique et viscoélastique.*

*ABSTRACT. The macroscopic response of hydrated cementitious materials under external loads and in various environmental conditions is strongly linked to the local behaviour of the binding cement matrix. In fact, cement paste is comprised of a heterogeneous assemblage of different phases and a complex porous network, and any numerical evaluation of macroscopic properties must take into account these microstructural aspects. Following previous works in the literature, the proposed modelling approach uses a virtual microstructure of cement paste and a constitutive damage law applied to cement phases with experimentally-validated micromechanical properties. This explicit description of the material allows the civil engineer to determine the properties of cementitious materials without the need for experimental tests and makes it possible to investigate the role of internal mechanisms in the localisation of damage for cement pastes with different compositions and under different environmental loads.*

*MOTS-CLÉS : pâte de ciment, endommagement, micromécanique, multi-physiques, hautes températures.*

*KEYWORDS: cement paste, damage, micromechanics, multi-physics, high temperatures.*

---

## 1. Introduction

La caractérisation des propriétés mécaniques et de l'état de fissuration des matériaux cimentaires peut être réalisée avec des outils expérimentaux (technique d'excitation impulsionnelle, essai de compression, flexion trois-points, corrélation d'images, émission acoustique, etc.) ou numériques (simulations numériques). Dans certains cas, les essais expérimentaux sont très coûteux en termes de matériaux et de temps d'essai (ceci est le cas des essais de fluage, des essais de cycles de gel-dégel, des essais sur grandes poutres, etc.). En outre, sous conditions sévères, il est parfois difficile de discerner le rôle de chaque mécanisme interne sur la fissuration du matériau lorsque les phénomènes sont couplés. Généralement, le comportement du béton est étroitement lié au comportement de la matrice cimentaire. Ceci est le cas pour le retrait (pressions capillaires dans les mésopores) fluage (dislocations dans les C-S-H), gel-dégel (pressions internes dans la capillarité de la pâte), incendie (déshydratation et décomposition des hydrates, pression induite par l'évaporation) et carbonatation (transformation de la portlandite). Ainsi, une étude numérique du matériau macroscopique même à l'échelle de la pâte de ciment ne permet pas d'élucider le rôle de ces mécanismes internes sur la localisation des microfissures dans le matériau homogénéisé, d'où l'intérêt d'utiliser une approche micromécanique qui tient compte de l'hétérogénéité de la microstructure. Une telle approche peut aussi révéler l'évolution de l'état d'endommagement du matériau cimentaire et de repérer les mécanismes les plus préjudiciables. Dans cet article, une approche micromécanique de modélisation de l'endommagement à l'échelle de la pâte de ciment est proposée. Cette approche, testée et validée contre des résultats expérimentaux, permet un calcul rapide des propriétés de la pâte de ciment et une investigation minutieuse de l'endommagement à l'échelle micro.

## 2. Etat de l'art de la modélisation de l'endommagement de pâte de ciment à l'échelle microscopique : modèles proposées et points d'amélioration

Le calcul des propriétés mécaniques d'une pâte de ciment à partir de sa composition à un degré d'hydratation donné et des propriétés de phases cimentaires a débuté avec les méthodes classiques d'homogénéisation [BER 03]. Ces études se sont basées sur une approche simple : les fractions volumiques des phases cimentaires ont été calculées à partir d'un modèle d'hydratation basique (de type Arrhenius), alors que les propriétés physiques utilisées pour les phases cimentaires ont été compilées à partir de la littérature. Cette approche reste toutefois limitée à l'élasticité linéaire et ne permet pas de déterminer explicitement la localisation des déformations. Une approche plus sophistiquée a nécessité le développement d'outils numériques de simulation de l'hydratation comme CEMHYD3D, permettant de générer une microstructure virtuelle de la pâte de ciment (pour un état de l'art détaillant ces outils numériques, voir [THO 11, DOL 11]). Le travail précurseur de Haecker et al. [HAE 05] ainsi que d'autres études conséquentes [ŠMI 06, BER 12] ont montré l'intérêt d'utiliser une approche micromécanique basée sur la microstructure virtuelle dans les simulations multi-échelles. A ce stade-là, les propriétés élastiques des phases cimentaires ont été entièrement tirées de la littérature sans calibration.

L'utilisation de l'approche micromécanique pour simuler le comportement à la fissuration de la pâte est relativement récente. La première interrogation se pose quant au choix du modèle et des paramètres de fissuration. Dans l'étude numérique de Bernard et al. [BER 12, BER 08], un comportement élastique fragile parfait (critère de Rankine) avec une limite d'élasticité proportionnelle au module élastique a été affecté aux différentes phases. D'autres [QIA 10] ont proposé un modèle similaire basé sur des éléments « lattice ». Les résultats montrent que la pâte de ciment présente un comportement plus fragile, vraisemblablement dû à l'absence d'une résistance à la propagation des macrofissures. En s'inspirant du comportement des céramiques, Luković et al. [LUK 15] ont suggéré une amélioration du modèle de Qian et al. [QIA 10] en introduisant une relation entre les résistances de traction  $f_t$  et de compression  $f_c$  et la dureté  $H$  de la phase cimentaire, tel que :

$$H = 3f_c = 30f_t \quad [1]$$

Finalement, Hlobil et al. [HLO 16] ont utilisé une approche micromécanique comparable pour simuler la rupture par nanoindentation. Dans ce modèle, seuls les C-S-H suivent une loi cohésive (critère de Griffith-Rankine) dans laquelle une énergie de fissuration considérée intrinsèque à la phase liante est intégrée.

Après une analyse des modèles proposés, il s'avère que certains choix de paramètres ne sont pas justifiés et il y a peu de validation sur des essais expérimentaux, surtout dans la simulation de la fissuration. Tenant compte de toutes ces propositions énoncées ci-dessus, une approche de modélisation micromécanique est proposée. Dans cette approche, une loi d'endommagement adoucissante est retenue pour toutes les phases et les paramètres du modèle sont déterminés à partir des propriétés physiques et par calibration sur des essais expérimentaux. Afin de valider l'approche micromécanique, cette dernière est mise à l'épreuve sur des pâtes de ciment avec différentes

compositions et différents ciments. Finalement, l'approche numérique est exploitée pour la simulation de la pâte de ciment exposée aux sollicitations thermohygro-mécaniques à hautes températures (incendie).

### 3. Approche de modélisation micromécanique de l'endommagement de la pâte de ciment : principes, simulations et validation de l'approche

#### 3.1. Création de la microstructure virtuelle

Le modèle d'hydratation retenu pour cette approche micromécanique est le programme VCCTL basé sur le code CEMHYD3D. Dans ce modèle, les données relatives à la composition de la pâte de ciment, comme le type du ciment, sa composition minéralogique et sa granulométrie, ainsi que le rapport E/C, les fractions volumiques des sulfates et des additions sont introduites comme entrée de calcul. Ces données peuvent être tirées de la fiche du ciment et ne nécessitent pas la réalisation d'essais expérimentaux ni de calibration. Le modèle génère une microstructure 3D de la pâte et permet de suivre l'évolution de certaines propriétés (fractions des phases, porosité, retrait chimique, etc.). En raison des limitations imposées par la faisabilité du calcul en version 3D, des sections ont été extraites de la microstructure d'origine et ont été utilisées dans le calcul en 2D, comme le montre la Figure 1. Les résultats sont ainsi moyennés sur l'ensemble des quatre sections.

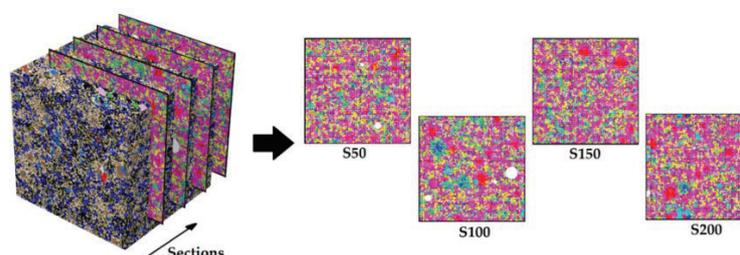


Figure 1. Extraction des sections à partir de VER de la pâte de ciment virtuelle.

#### 3.2. Elaboration de l'approche micromécanique : simulations et validations

L'élaboration de l'approche micromécanique consiste à définir le volume élémentaire représentatif de la pâte de ciment à partir de la microstructure, le modèle d'endommagement adéquat pour les phases cimentaires ainsi que les propriétés micromécaniques à affecter. Afin de permettre une représentation explicite des phases cimentaires tout en gardant un modèle de calcul simple et rapide, une distinction des échelles s'avère nécessaire, comme le montre la Figure 2. La taille du VER a été prise égale à  $50\mu\text{m}$  pour le calcul du comportement élastique [ŠMI 06], alors que des études numériques montrent qu'une taille variant de  $100\mu\text{m}$  à  $400\mu\text{m}$  est nécessaire pour le comportement à la fissuration ou au jeune âge [HAE 05, BER 12]. Compte tenu de la granulométrie du ciment ( $d_{99\%}=60\mu\text{m}$ ) et à partir d'une étude paramétrique, la taille choisie du VER a été fixée à  $200\mu\text{m}$  (environ trois fois le diamètre maximal). Cette valeur est un compromis entre la représentativité, la répétabilité et la rapidité du calcul. Le modèle d'endommagement retenu pour toutes les phases cimentaires est le modèle de Fichant et al. [FIC 97] proposé comme une simplification du modèle Microplan et inspiré dans sa formulation du modèle de Mazars. La loi d'évolution de la variable d'endommagement prend la forme :

$$dD = \frac{\kappa_0 (1 + B\tilde{\varepsilon})}{\tilde{\varepsilon}^2} e^{-B(\tilde{\varepsilon} - \kappa_0)} d\tilde{\varepsilon} \quad [2]$$

Où  $\tilde{\varepsilon} = \sqrt{\sum_{ii} \max(\varepsilon_{ii}, 0)^2}$  est la déformation équivalente de Mazars. Les paramètres du modèle comme le seuil d'endommagement  $\kappa_0$  et le coefficient d'adoucissement  $B$  sont calculés à partir des propriétés micromécaniques des phases cimentaires, à savoir les modules élastiques  $E$  et  $\nu$ , la résistance  $f_t$  et l'énergie de fissuration  $G_f$  [MAT 13]. Ainsi, le modèle d'endommagement est affecté à toutes les phases cimentaires avec des propriétés intrinsèques à chaque phase. Les modules élastiques sont dans la plupart compilés à partir de plusieurs études numériques (simulation atomistique) et expérimentales (nanoindentation)<sup>1</sup>. Concernant les propriétés de rupture,

<sup>1</sup> Une pâte de ciment Portland est composée d'une quinzaine de phases (anhydres et produits de l'hydratation). Ce nombre augmente rapidement avec les additions minérales. Il n'est pas possible, sur le plan pratique, de lister ici toutes les références exploitées pour déterminer les propriétés des phases cimentaires. Une liste exhaustive de toutes les phases considérées dans VCCTL ainsi que leurs propriétés thermomécaniques est fournie dans [RHA 18].

les données sont peu voire pas présentes. Afin de considérer des valeurs effectives validées expérimentalement, certaines hypothèses ont été formulées :

- Un voxel de taille  $1\mu\text{m}^3$  constitue une seule phase homogène et isotrope avec des propriétés de la phase.
- En se servant de l'équation 1, la résistance  $f_i$  de la phase est fixée proportionnellement à la microdureté :

$$H = \alpha_{fi} \times f_i \quad [3]$$

- L'énergie de fissuration de chaque phase est proportionnelle à l'énergie élastique de déformation :

$$G_f = \beta_{Gf} (1 + \nu) \frac{f_i^2}{E} \quad [4]$$

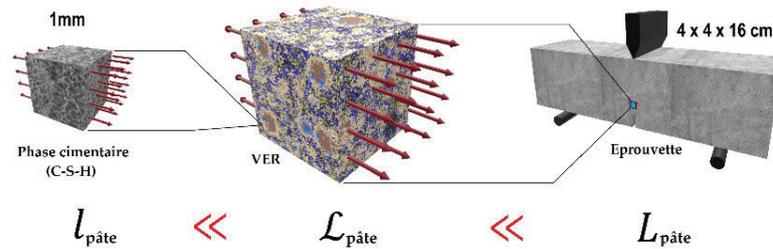


Figure 2. Distinction des échelles et définition du volume élémentaire représentatif.

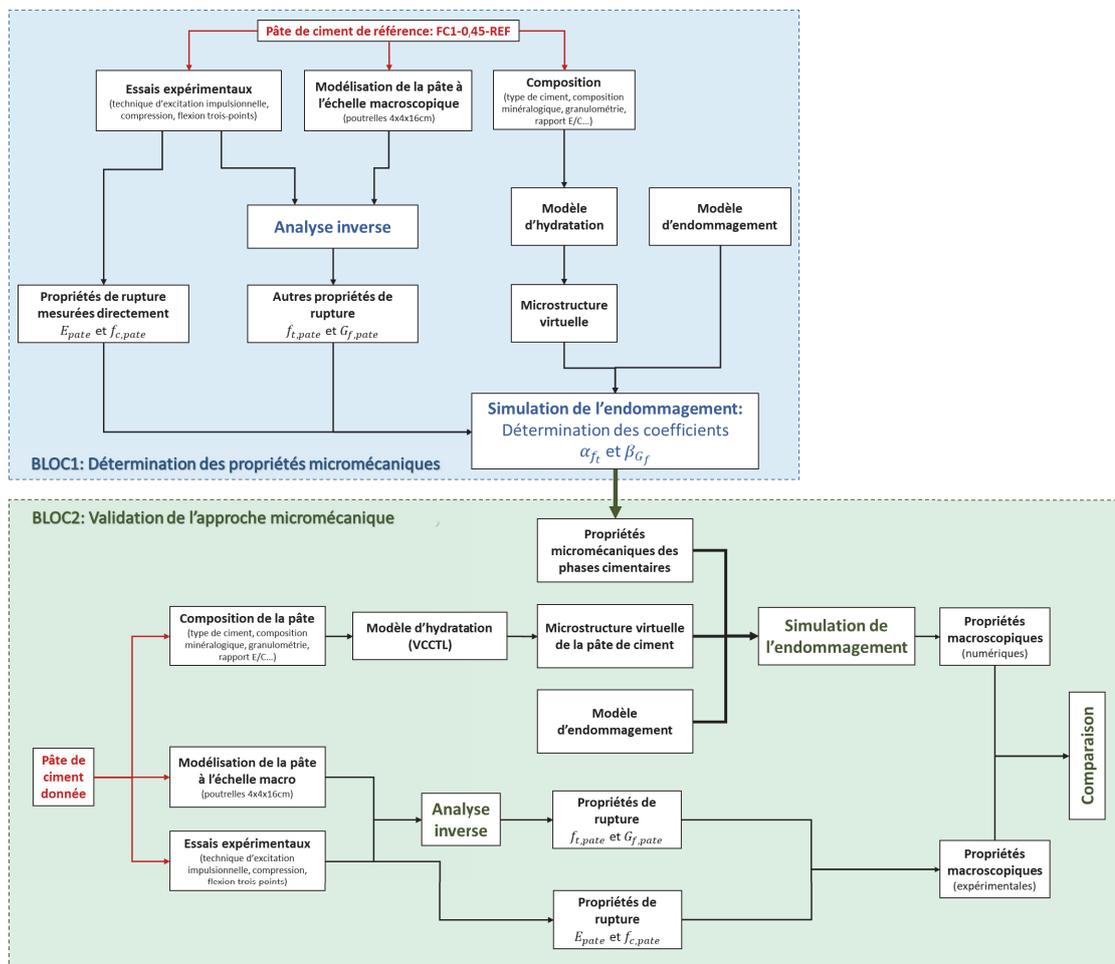


Figure 3. Méthodologie de détermination des propriétés des phases cimentaires (BLOC1) et de validation de l'approche micromécanique sur des pâtes de ciment différentes (BLOC2).

Les deux dernières hypothèses réduisent le nombre d'inconnues à deux coefficients  $\alpha_{fi}$  et  $\beta_{Gf}$ . La méthode de détermination de ces paramètres est illustrée sur la Figure 3 (BLOC 1). D'une part, la composition d'une pâte de

référence, appelée FC1-0,45-REF, a été importée dans le modèle d'hydratation VCCTL pour construire la microstructure virtuelle de la pâte, introduite après dans le code Cast3M comme un maillage EF. Le modèle d'endommagement est affecté aux phases avec les propriétés micromécaniques correspondantes. D'autre part, des essais ont été réalisés pour déterminer les propriétés macroscopiques de la pâte de référence. Le but est d'identifier le couple  $(\alpha_{fi}, \beta_{Gf})$  qui permet de donner des propriétés numériques identiques à celles retrouvées expérimentalement. Une étude paramétrique sur le couple  $(\alpha_{fi}, \beta_{Gf})$  a été réalisée et montre la convergence et l'unicité de la solution [RHA 18]. Les résultats expérimentaux sont utilisés comme référence pour la calibration, donnant :  $\alpha_{fi}=20,2$  et  $\beta_{Gf}=37,5 \times 10^{-6}$ . Le Tableau 1 montre une comparaison entre les valeurs numériques et expérimentales pour la pâte de ciment de référence FC1-0,45-REF. Une fois ces deux valeurs sont identifiées, les propriétés de rupture de toutes les phases sont calculées puis considérées intrinsèques. Dans un deuxième temps et dans le but de tester l'approche proposée, les mêmes principes sont appliqués pour d'autres pâtes de ciment, soit en variant le rapport E/C (FC1-0,4 et FC1-0,5) ou en utilisant un type de ciment différent (FC2-0,45), comme l'illustre la Figure 3 (BLOC 2). Dans ce cas, aucune nouvelle calibration n'est nécessaire. Les propriétés macroscopiques des pâtes de ciment sont calculées et comparées aux valeurs expérimentales. Les résultats de la comparaison, donnés dans le Tableau 1, montrent que l'approche adoptée permet d'estimer les propriétés de la pâte avec une marge d'erreur acceptable et sans avoir besoin de réaliser les essais correspondants.

**Tableau 1.** Propriétés macroscopiques de la pâte de ciment : comparaison numérique et expérimentale.

Pâtes de ciment	Module d'Young		Résistance à la traction		Energie de fissuration		Résistance à la compression	
	$E_{ex}$	$E_{num}$	$f_{t,ex}$	$f_{t,num}$	$G_{f,ex}$	$G_{f,num}$	$f_{c,ex}$	$f_{c,num}$
<b>FC1-0,45-REF</b>	15,69	16	6,77	6,77	6,66	6,81	52,4	52,7
<b>FC1-0,4</b>	17,4	17,11	7,66	7,54	7,63	7,96	59,3	60,8
<b>FC1-0,5</b>	14,34	14,39	5,39	5,25	6,28	5,22	41,7	39,8
<b>FC2-0,45</b>	14,4	13,87	4,92	5,45	5,66	4,73	*non mesuré	27.0

Pour illustrer l'utilité de l'approche micromécanique, cette dernière est exploitée pour étudier l'effet des hautes températures sur le comportement mécanique et l'évolution de l'endommagement dans la pâte de ciment. Cette étude est présentée dans la section suivante.

#### 4. Application de la modélisation micromécanique dans les couplages multi-physiques : simulation de la microfissuration et du comportement de la pâte de ciment à hautes températures

##### 4.1. Mécanismes associés aux transformations des phases cimentaires à hautes températures

Expérimentalement, il est difficile de quantifier le rôle de chaque mécanisme à températures élevées, et les modèles développés à l'échelle du béton (voir [GAW 11] pour une comparaison analytique et numérique) ne sont pas assez fins pour permettre une évaluation de l'endommagement à l'échelle micro. Les mécanismes internes associés aux transformations des phases cimentaires à hautes températures sont déjà identifiés : lorsque la pâte de ciment à température ambiante est incendiée, celle-ci se dilate avec un coefficient de dilatation moyen entre 10 et 22  $\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$  jusqu'à 100°C, température de l'évaporation de l'eau capillaire. On observe la déshydratation progressive des C-S-H et la décomposition de la portlandite entre ~450°C et ~550°C. A très hautes températures, les C-S-H se transforment en  $\beta$ -C<sub>2</sub>S (bélite) (~700°C) [DIE 89]. Ces transformations libèrent de la vapeur d'eau et induisent un retrait et une fissuration qui mène à la ruine de la matrice cimentaire.

L'incorporation de ces mécanismes commence par une réécriture de la loi d'endommagement des phases déshydratantes (C-S-H, portlandite, hydrogarnet, AFm et AFt) sous la forme [GAW 04] :

$$\bar{\sigma} = (1 - D)(1 - V)\mathbf{C}^0 : \left[ \bar{\varepsilon}_{tot} - \bar{\varepsilon}_{th}(T) - \bar{\varepsilon}_{ichm}(T, \xi) \right] \quad [5]$$

Où  $\varepsilon_{th} = \alpha \Delta T$  est la dilatation thermique de la chaque phase et  $\varepsilon_{ichm}$  est le retrait thermochimique induit par la décomposition de la phase hydratée après libération de la vapeur d'eau. Son expression est liée au degré de déshydratation  $\xi_d$  à travers un modèle combinant la cinétique et l'équilibre de la transformation (voir [WAN 16] pour une description complète). L'endommagement thermochimique  $V$  décrit la perte de résistance de la phase et donc l'endommagement induit par la seule élévation de la température [GAW 04] :

$$(1-D)(1-V) = \frac{C^{end}(T)}{C^0(T)} \times \frac{C^0(T)}{C^0(T_0)} \quad [6]$$

Les propriétés thermomécaniques comme la densité, la conductivité, la capacité thermique et le coefficient de dilatation des phases cimentaires sont tirées de la littérature [RHA 18], ainsi que les paramètres du modèle de déshydratation [WAN 16] et de l'endommagement thermochimique [DEJ 07]. Pour introduire la pression induite par l'évaporation de l'eau dans la capillarité, le modèle BSB a été retenu et adapté au cas non isotherme pour déduire la courbe d'adsorption de la pâte de ciment. Ce modèle est injecté dans l'équation de conservation de la masse de l'humidité et dans la loi de diffusion pour calculer la pression locale dans la porosité.

#### 4.2. Résultats de la simulation et discussions

La simulation à hautes températures a été effectuée sur une pâte de ciment composée de ciment Portland avec E/C= 0,45 et une température initiale de 20°C. La Figure 4 montre la courbe de déformation moyenne des quatre sections, comparée à la courbe expérimentale donnée par [DIE 89]. L'évolution de l'état d'endommagement est présentée sur la Figure 5 à différentes températures.

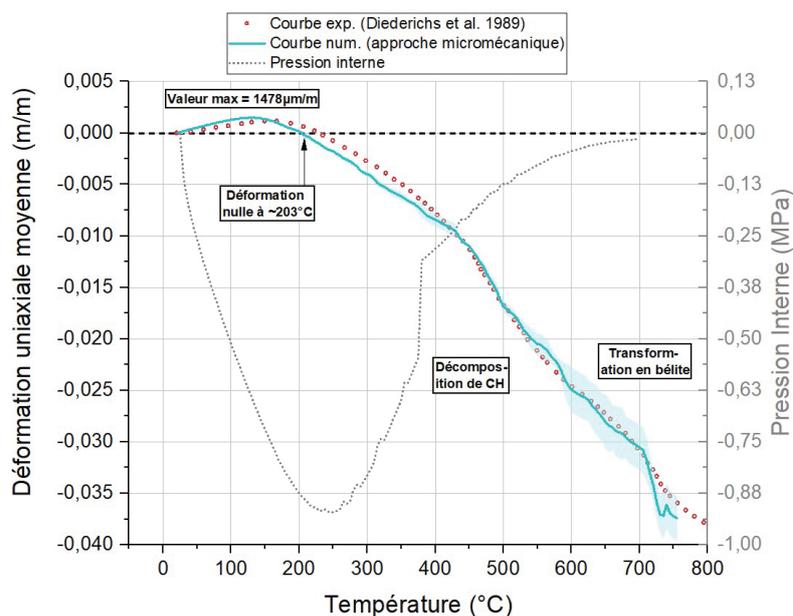
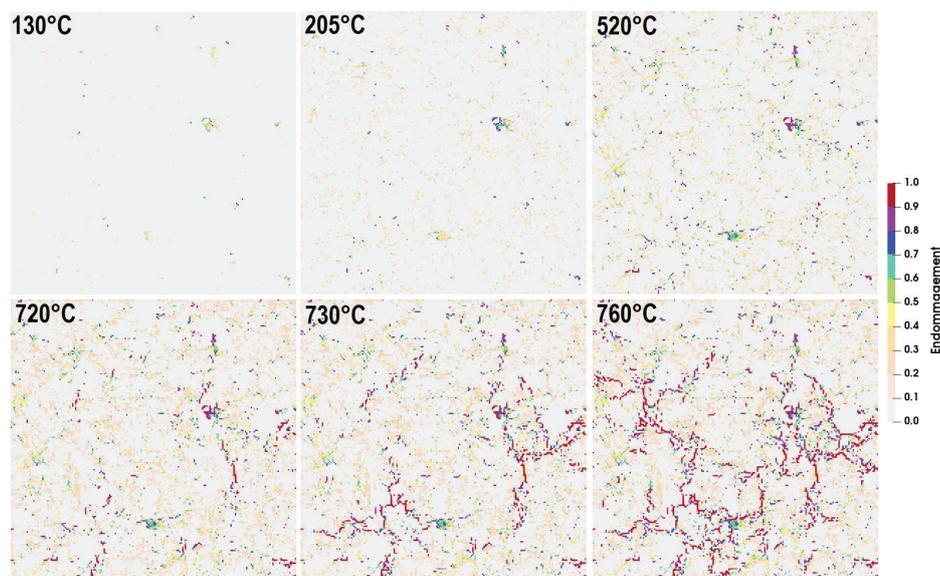


Figure 4. Déformation de la pâte de ciment et évolution de la pression interne en fonction de la température.

Initialement, la température augmente et la pâte se dilate avec un coefficient de dilatation initial de  $17,6\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$ . Le CDT moyen diminue à  $12,3\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$  à  $100^\circ\text{C}$  à cause de la contraction progressive des hydrates et de la pression dans la porosité. La valeur maximale de déformation ( $1478\mu\text{m}/\text{m}$ ) est atteinte à  $130^\circ\text{C}$  avec une pression interne de  $0,6\text{MPa}$ . A ce stade-là, une initiation de l'endommagement est observée dans les zones les plus faibles : parois des gros pores et interface hydrate-anhydre (Figure 5). Ensuite, la pâte se contracte et la déformation s'annule à  $203^\circ\text{C}$ . Une analyse de l'état d'endommagement montre que les microfissures se développent principalement dans l'ettringite (36% endommagée) avec un début d'endommagement faible de la portlandite (6%) et des C-S-H (4%). Une microfissuration apparaît dans d'autres phases solides (C3S, C4AF, C3AH6 et calcite) mais reste très limitée. A partir de  $250^\circ\text{C}$ , la pression atteint sa valeur maximale de  $0,92\text{MPa}$  et diminue à cause de la chute de saturation, puis décroît très brutalement au point critique de l'eau ( $374^\circ\text{C}$ ). La contraction de la pâte continue avec une vitesse constante jusqu'à la température proche de  $450^\circ\text{C}$  qui marque le début de la décomposition de la portlandite. Ainsi, cette accélération de la contraction entre  $450^\circ\text{C}$  et  $550^\circ\text{C}$  captée sur les courbes numérique et expérimentale est accompagnée par une croissance importante des microfissures dans la portlandite (l'endommagement passe de 12% à 37%) est une destruction totale de l'ettringite (97%). A partir de la température de la formation de la bélite ( $700^\circ\text{C}$ ), la pâte de ciment se contracte d'avantage et les microfissures commencent à se coalescer pour former des fissures dispersées autour des particules anhydres ( $720^\circ\text{C}$ ). Une élévation de la température mène à une contraction rapide de la pâte et une fusion des fissures dans la matrice cimentaire ( $730^\circ\text{C}$ ) qui mène à la rupture totale de la pâte de ciment ( $760^\circ\text{C}$ ). Cet état de fissuration important est expliqué par la transformation rapide des C-S-H en bélite, avec un endommagement passant rapidement de 7% ( $700^\circ\text{C}$ ) à 47% ( $760^\circ\text{C}$ ). La bélite, avec un coefficient de dilatation important, induit

une légère expansion de la pâte. Une telle expansion est plus prononcée dans une pâte riche en fumée de silice où les C-S-H pauvres en calcium se transforment plutôt en géhlénite et méllilite expansives [DIE 89].



**Figure 5.** Evolution de l'état d'endommagement en fonction de la température (section S50).

## 5. Conclusions

Les résultats des simulations numériques montrent que l'approche micromécanique permet d'homogénéiser rapidement les propriétés de rupture d'une pâte de ciment. Ces propriétés peuvent donc être employées dans une modélisation multi-échelles des matériaux cimentaires (mortier, béton) sans avoir recours à des essais expérimentaux pour calibrer les propriétés à affecter aux constituants du matériau. Il suffit donc de suivre une approche ascendante et injecter les propriétés homogénéisées à partir des échelles inférieures pour retrouver le comportement mécanique du béton. Une telle approche a donc une forte utilité pour un ingénieur qui espère calculer les propriétés des matériaux cimentaires sans réaliser les essais coûteux et fastidieux.

En deuxième lieu, l'approche proposée peut aussi servir à l'étude du comportement de la pâte de ciment lorsque celle-ci est soumise à de différentes conditions environnementales. Un exemple illustratif d'une pâte de ciment incendiée est présenté ci-dessus. Dans tous les cas, les mécanismes associés aux comportements multiphysiques sont incorporés directement aux phases correspondantes, puisque ces différentes phases sont explicitement représentées dans la microstructure virtuelle. Par exemple :

- La prise en compte du comportement viscoélastique des C-S-H permet d'étudier l'interaction fluage-endommagement à l'échelle micro difficilement accessible aux outils expérimentaux. L'intégration d'une loi de diffusion de l'humidité dans le réseau poreux offre une possibilité d'investiguer le rôle de la dessiccation sur le fluage et l'endommagement et d'étudier le fluage de dessiccation (une étude de l'interaction fluage-endommagement en présence de la dessiccation est présentée dans [RHA 18]).
- L'approche proposée peut servir dans l'analyse microscopique des mécanismes induits par la formation de la glace dans le réseau poreux de la pâte de ciment exposée aux cycles de gel-dégel. Cette étude offre une possibilité d'évaluer le rôle des pressions internes théorisées pour expliquer l'endommagement des matériaux cimentaires. Elle permet aussi d'examiner le rôle de la saturation, de la présence des sels de déverglaçage, de la réabsorption d'eau et du vide entraîné pour toute composition de pâte de ciment (voir [RHA 18] pour une étude plus détaillée).
- En intégrant un modèle de cicatrisation au modèle d'hydratation, l'approche micromécanique peut être exploitée pour étudier le rôle de la charge du fluage sur la cicatrisation des fissures, ce qui permet d'identifier le seuil de charge à appliquer pour que la microstructure en cours de cicatrisation puisse résister à la propagation des fissures.
- Le risque à la fissuration d'une pâte par la forte chaleur d'hydratation ou par le retrait de dessiccation au jeune âge peut être exploré en réalisant un couplage entre le modèle d'hydratation et l'approche actuelle. Ce couplage est conçu de façon à mettre à jour la microstructure à chaque pas du calcul en fonction de l'avancement de l'hydratation, donnant une simulation plus réaliste de l'endommagement au jeune âge.

## 6. Bibliographie

- [BER 03] BERNARD O., ULM F.-J., LEMARCHAND E., « A multiscale micromechanics-hydration model for the early-age elastic properties of cement-based materials », *Cement and Concrete Research*, vol. 33, n° 9, 2003, p. 1293-1309.
- [BER 08] BERNARD F., KAMALI-BERNARD S., PRINCE W., « 3D multi-scale modelling of mechanical behaviour of sound and leached mortar », *Cement and Concrete Research*, vol. 38, n° 4, 2008, p. 449-458.
- [BER 12] BERNARD F., KAMALI-BERNARD S., « Predicting the evolution of mechanical and diffusivity properties of cement pastes and mortars for various hydration degrees – A numerical simulation investigation », *Computational Materials Science*, vol. 61, 2012, p. 106-115.
- [DEJ 07] DEJONG M. J., ULM F.-J., « The nanogranular behavior of C-S-H at elevated temperatures (up to 700 °C) », *Cement and Concrete Research*, vol. 37, 2007, p. 1-12.
- [DIE 89] DIEDERICHS U., JUMPPANEN U.-M., PENTTALA V., Behaviour of high strength concrete at high temperatures, rapport de recherché n° 92, 1989.
- [DOL 11] DOLADO J. S., VAN BREUGEL K., « Recent advances in modeling for cementitious materials », *Cement and Concrete Research*, vol. 41, n° 7, 2011, p. 711-726.
- [FIC 97] FICHANT S., PIJAUDIER-CABOT G., LA BORDERIE C., « Continuum damage modelling: Approximation of crack induced anisotropy », *Mechanics Research Communications*, vol. 24, n° 2, 1997, p. 109-114.
- [GAW 04] GAWIN D., PESAVENTO F., SCHREFLER B. A., « Modelling of deformations of high strength concrete at elevated temperatures », *Materials and Structures*, vol. 37, n° 4, 2004, p. 218-236
- [GAW 11] GAWIN D., PESAVENTO F., SCHREFLER B. A., « What physical phenomena can be neglected when modelling concrete at high temperature? A comparative study. Part 2: Comparison between models », *International Journal of Solids and Structures*, vol. 48, n° 13, 2011, p. 1945-1961.
- [HAE 05] HAECKER C.-J. et al., « Modeling the linear elastic properties of Portland cement paste », *Cement and Concrete Research*, vol. 35, n° 10, 2005, p. 1948-1960.
- [HLO 16] HLOBIL M., ŠMILAUER V., CHANVILLARD G., « Micromechanical multiscale fracture model for compressive strength of blended cement pastes », *Cement and Concrete Research*, vol. 83, 2016, p. 188-202.
- [LUK 15] LUKOVIĆ M., SCHLANGEN E., YE G., « Combined experimental and numerical study of fracture behaviour of cement paste at the microlevel », *Cement and Concrete Research*, vol. 73, 2015, p. 123-135.
- [MAT 13] MATALLAH M., FARAH M., GRONDIN F., LOUKILI A., ROZIÈRE E. « Size-independent fracture energy of concrete at very early ages by inverse analysis », *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 109, 2013, p. 1-16.
- [QIA 10] QIAN Z., SCHLANGEN E., YE G., VAN BREUGEL K., « Prediction of mechanical properties of cement paste at microscale », *Materiales de Construcción*, vol. 60, n° 297, 2010, p. 7-18.
- [RHA 18] RHARDANE A., Élaboration d'une approche micromécanique pour modéliser l'endommagement des matériaux cimentaires sous fluage et cycles de gel-dégel, Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2018.
- [ŠMI 06] ŠMILAUER V., BITTNER Z., « Microstructure-based micromechanical prediction of elastic properties in hydrating cement paste », *Cement and Concrete Research*, vol. 36, n° 9, 2006, p. 1708-1718.
- [THO 11] THOMAS J. J. et al., « Modeling and simulation of cement hydration kinetics and microstructure development », *Cement and Concrete Research*, vol. 41, n° 12, 2011, p. 1257-1278.
- [WAN 16] WANG J., Modeling of concrete dehydration and multiphase transfer in nuclear containment concrete wall during loss of cooling accident, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2016.