

# Modélisation des couplages poromécaniques et chimiques des bétons de structures atteints de formation d'ettringite différée (DEF)

Pierre Morenon<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Electricité de France, Centre d'Ingénierie Hydraulique, EDF-CIH Technolac, 73373 Le Bourget du Lac Cedex France (morenon@insa-toulouse.fr)

<sup>2</sup> LMDC, Université de Toulouse, INSA/UPS Génie Civil, 135 Avenue de Rangueil, 31077 Toulouse cedex 04 France

---

Prix Jeunes Chercheurs « René Houpert »

---

*Les réactions de gonflement interne (RGI) qui dégradent le béton, posent des problèmes de durabilité et de sûreté des ouvrages. Ces pathologies se développent préférentiellement dans les structures humides et massives telles que les barrages. Dans le but de prédire l'évolution des dégradations, des modèles numériques sont développés en partenariat avec EDF. Ils permettent la modélisation du comportement du béton des barrages à partir de tests de laboratoire sur éprouvettes, de données initiales des matériaux et de relevés in situ. Dans ce travail, un modèle poromécanique permet la prise en compte de la fissuration anisotrope, qu'elle soit localisée (structurelle) ou diffuse (issue de Formation d'Ettringite Différée (DEF)). Suite à un chargement ou un confinement de la structure, le gonflement du béton peut être reporté dans une ou plusieurs directions libres. L'endommagement y devient anisotrope. La prise en compte de ce phénomène poromécanique est nécessaire dans la modélisation des ouvrages pour retrouver les déplacements, les contraintes et le faciès de fissuration in situ. La simulation, validée par ces indicateurs, permet de prédire la sûreté et la durabilité des structures atteintes.*

*Internal swelling reactions (ISR) can induce damage to concrete. It is a problem for durability and safety of structures. These pathologies mainly occur in moist and massive structures such as dams. In order to predict the damage evolution, numerical models are developed in partnership with EDF. Thus, the concrete dams behaviour is predictable from lab tests on coring samples, initial material characteristics and in situ surveys. In this work, a poromechanical model is set in order to take in account anisotropic cracking. It can be structural localized cracks or diffuse microcracking due to delayed ettringite formation (DEF). An external loading or a structural restraint can lead to transfer the concrete swelling in one or several free directions. Damage becomes anisotropic. This poromechanical phenomenon is necessary to model structures in order to explain in situ displacements, stresses and cracking patterns. The modelling, validated by these indicators, can predict safety and durability of affected structures.*

*MOTS-CLÉS: formation d'ettringite différée, poromécanique, fissuration anisotrope, précontrainte chimique.*

*KEY WORDS: delayed ettringite formation, poromechanics, anisotropic cracking, chemical prestress.*

---

## 1. Introduction

Les réactions de gonflement interne (RGI) sont des pathologies qui dégradent le béton de nombreux ouvrages. A terme, la durabilité et la sûreté des structures peuvent être mises en cause. L'humidité et la forte température atteinte lors de la phase d'hydratation du ciment sont des paramètres essentiels au développement de la formation d'ettringite différée (DEF). Les ouvrages tels que les barrages sont donc particulièrement sensibles à celle-ci. Dans le but de prédire l'évolution des dégradations dans les ouvrages, des modèles numériques sont développés en partenariat avec EDF.

Dans ce travail, un modèle chimique reproduit les cinétiques et les amplitudes des réactions de DEF. Le volume de produit expansif est ensuite inséré dans un modèle poromécanique qui permet de représenter les fissurations locales (structurelles) et diffuses (issues de DEF) de façon anisotrope. Il prend également en compte les phénomènes de retrait et de fluage nécessaires à la modélisation des structures.

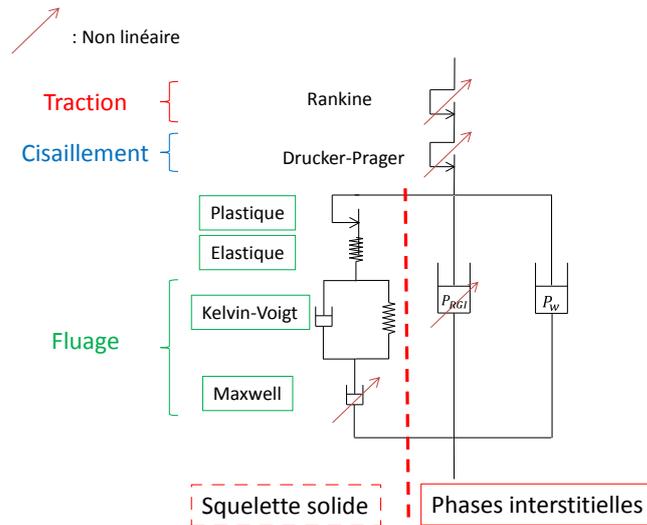
Pour un gonflement libre de DEF, le béton s'endommage de façon isotrope, ce qui fait chuter les caractéristiques mécaniques tels que le module d'Young et les résistances en traction et en compression.

Cependant, suite à un chargement, le gonflement peut être reporté dans les directions les moins sollicitées en compression. L'endommagement devient alors anisotrope. Dans le cas d'une poutre armée sur deux appuis, la fissuration sans chargement est principalement orientée parallèlement aux armatures longitudinales. Perpendiculairement aux armatures, la fissuration est retardée car le béton est confiné par les aciers longitudinaux. La contrainte issue de la dilatation chimique empêchée met en compression le béton de la structure dans cette direction. Expérimentalement, un retard de fissuration est observé lors du chargement en flexion trois points de deux poutres armées (l'une réactive et l'autre non réactive), ce qui confirme le phénomène [MAR 10]. Des simulations éléments finis de structures libres ou armées sont menées dans ce travail pour confronter les réponses du modèle aux résultats expérimentaux.

## 2. Modèle

### 2.1. Schéma rhéologique

Le comportement du béton est modélisé dans le cadre de la poromécanique. Le modèle comprend un modèle d'endommagement (inspiré de [GRI 08]) et un modèle rhéologique (Figure 1) dans le but de reproduire les interactions entre les gonflements internes, le fluage, le retrait et l'endommagement. La fissuration du béton est décrite grâce à un modèle non linéaire couplant des critères plastiques et des endommagements, tous anisotropes. En traction, les critères différencient les macro-fissures structurales localisées (critères de Rankine) et la microfissuration diffuse induite par la pression de RGI  $P_{RGI}$ . En compression, le critère de Drucker-Prager permet d'établir l'endommagement de cisaillement, en lien avec la dilatance. Le fluage est calculé grâce à un modèle poro-plastique qui peut être représenté par une chaîne de Burger (Figure 1). En première approximation, la déformation de retrait est prise proportionnelle à la pression d'eau. Celle-ci est calculée par la loi de Van



**Figure 1.** Schéma rhéologique du modèle.

Genuchten qui relie la pression capillaire  $P_w$  au degré de saturation via des paramètres de calage qui dépendent du réseau poreux. Le passage à la contrainte effective  $\tilde{\sigma}_{ij}$  est effectué grâce à l'équation de poromécanique [1]. Elle fait intervenir les pressions intraporeuses  $P_{RGI}$  (pour la pression de RGI) et  $P_w$  (pour la pression d'eau), les coefficients de Biot associés ( $b_{RGI}$  et  $b_w$ ) [BIO 41] ainsi que la contrainte dans le squelette solide encore sain  $\tilde{\sigma}_{ij}'$ . Enfin, la contrainte totale  $\sigma_{ij}$  est calculée grâce à l'endommagement  $D$  et de la contrainte effective  $\tilde{\sigma}_{ij}$  [2]. Le cadre poromécanique permet de simplifier les couplages entre le squelette solide et les phases interstitielles (eau et produit de RGI).

$$\tilde{\sigma}_{ij} = \tilde{\sigma}_{ij}' - b_{RGI} P_{RGI} - b_w P_w \quad [1]$$

$$\sigma_{ij} = (1 - D)\tilde{\sigma}_{ij} \quad [2]$$

### 2.2. Equations chimiques

Le calcul du volume de RGI créé est fondamental pour pouvoir calculer la pression intraporeuse induite. La formation d'ettringite différée, de formule chimique  $(Ca_2Al(OH)_6)_2Ca_2(SO_4)_3 \cdot 32H_2O$  est un ensemble de réactions chimiques qui se déroulent principalement dans deux périodes de la vie des structures.

La première phase gelée est le produit de la réaction exothermique de l'hydratation des ciments. Lorsqu'une température seuil est atteinte  $T^{Seuil,DEF}$ , le monosulfoaluminate et l'ettringite primaires (respectivement  $M^I$  et  $E^I$ ) passent en solution. Cette température dépend de la concentration en alcalins à cet instant précis [3] [KCH 15].  $T^{th,ref}$  est une température seuil de référence.

$$T^{Seuil,DEF}[K] = T^{th,ref} \begin{cases} Na^{-m} & \text{si } Na \geq Na^k \\ Na^{k-m} & \text{si } Na < Na^k \end{cases} \quad [3]$$

La cinétique de dissolution de  $M^I$  (monosulphoaluminate primaire) et de  $E^I$  (ettringite primaire) dépend de la température atteinte, de la durée de chauffe ainsi que de la concentration en alcalins via le temps caractéristique de dissolution  $\tau^{diss}$  [4].

$$\begin{cases} \frac{\partial E^I}{\partial t} = -\frac{E^I}{\tau^{diss}} \\ \frac{\partial M^I}{\partial t} = -\frac{M^I}{\tau^{diss}} \end{cases} \quad [4]$$

Les ions aluminiums  $\tilde{A}$  (issus de  $Al_2O_3$ ) et sulfates  $\tilde{S}$  (issus de  $SO_3$ ) contenus dans les phases primaires d'ettringite et de monosulphoaluminate se retrouvent en solution [5]. Si la durée de chauffe et la température sont suffisantes, des ions aluminiums sont fixés durablement sur les C-S-H. En effet, ces complexes, appelés hydro-grenats, sont stables en dessous d'une certaine température ( $\approx 70^\circ C$ ). Ce phénomène chimique permet d'expliquer l'effet pessimum observé entre le couple température/durée de chauffe et le gonflement obtenu [KCH 15].  $\tau^{Fix}$  est le temps caractéristique pour la fixation des aluminiums. Il dépend de la température et de la concentration en alcalins. Le terme  $E^{II}$  ([5] et [6]), représentant ici l'ettringite différée, conduit à la diminution des aluminiums ( $\tilde{A}$ ) et des sulfates disponibles ( $\tilde{S}$ ) suite à sa création.

$$\frac{\partial \tilde{A}}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{A}}{\tau^{Fix}} = -\left(\frac{\partial E^I}{\partial t} + \frac{\partial M^I}{\partial t} + \frac{\partial E^{II}}{\partial t}\right) \quad [5]$$

$$\frac{\partial \tilde{S}}{\partial t} = -3\left(\frac{\partial E^I}{\partial t} + \frac{\partial E^{II}}{\partial t}\right) - \frac{\partial M^I}{\partial t} \quad [6]$$

Pour engendrer la DEF, une phase de refroidissement de la structure est nécessaire. Durant celle-ci, le coefficient de solubilité de l'ettringite diminue. Les aluminiums et les sulfates encore disponibles réagissent pour former le produit de la DEF. En fonction du nombre de moles de chaque espèce chimique disponible, un potentiel maximum d'ettringite  $E^{II \infty}$  est calculé (chaque molécule d'ettringite nécessite un  $\tilde{A}$  et trois  $\tilde{S}$ ).

La dernière partie du modèle chimique permet de définir la précipitation de l'ettringite différée  $E^{II}$  (potentiellement jusqu'à  $E^{II \infty}$ ) [7].

$$\frac{\partial E^{II}}{\partial t} = \frac{E^{II \infty} - E^{II}}{\tau^{Prec}} \quad [7]$$

Le terme  $\tau^{Prec}$  est un temps caractéristique de précipitation. Il dépend d'un temps caractéristique qui peut être calibré sur les courbes d'expansion, de la température, de la concentration en alcalins et du degré de saturation.

La Figure 2 permet de visualiser les résultats obtenus sur une éprouvette 11x22 cm chauffée pendant 3 jours à  $80^\circ C$ . Durant la phase de chauffe, les phases primaires passent rapidement en solution. Une partie des aluminiums libres est fixée pour former des hydro-grenats. Par la suite, l'éprouvette est immergée dans l'eau ce qui provoque la lixiviation progressive des alcalins de l'extérieur vers le cœur du spécimen. En présence d'alcalins, les sulfates disponibles sont fixés dans les C-S-H et la formation d'ettringite différé est empêchée. Quand la concentration en alcalins diminue, des sulfates sont libérés des C-S-H et l'ettringite différée (AFT secondaires) peut alors se former [DIV 98].

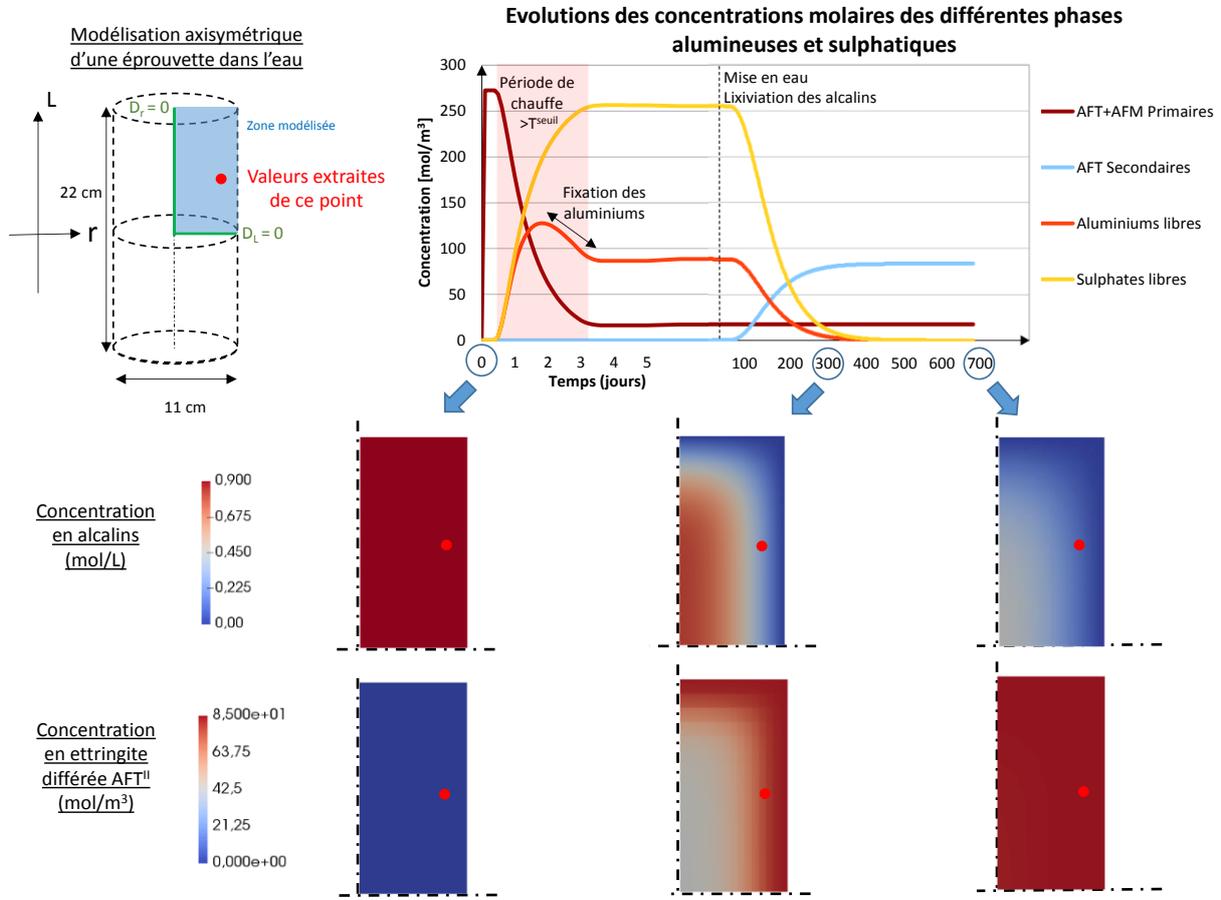


Figure 2. Géométrie, conditions aux limites et résultats chimiques d'une éprouvette chauffée à 80°C pendant 3j.

### 2.3. Pression intraporeuse de DEF

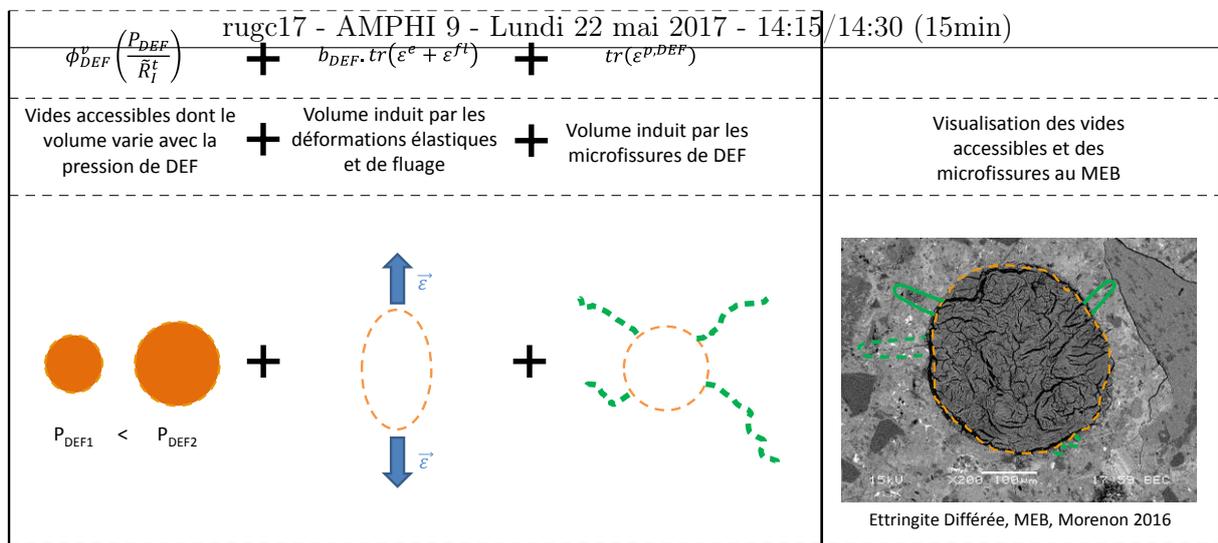
Le volume de DEF [8] est calculé grâce au volume molaire de l'ettringite différée (715 cm<sup>3</sup>/mol) et à la concentration calculée précédemment. Ce volume est ensuite utilisé pour définir la pression intraporeuse induite [9].

$$\phi_{DEF} = E^{II} \cdot V_{AFT} \quad [8]$$

$$P_{DEF} = M_{DEF} \left( \phi_{DEF} - \left( \phi_{DEF}^v \left( \frac{P_{DEF}}{\bar{R}_I^t} \right) + b_{DEF} \cdot tr(\varepsilon^e + \varepsilon^{fl}) + tr(\varepsilon^{p,DEF}) \right) \right) \quad [9]$$

Dans cette équation,  $M_{DEF}$  est le module de Biot qui gère l'interaction DEF-béton.  $\phi_{DEF}^v$  est le volume des vides accessibles qui dépend de la pression  $P_{DEF}$  et de la résistance en traction du matériau  $\bar{R}_I^t$  (Figure 3).  $tr(\varepsilon^e + \varepsilon^{fl})$  représente la trace des matrices des déformations élastiques et de fluages, soit le volume créé par celles-ci (Figure 3). Il est affecté du coefficient de Biot  $b_{DEF} = 0.25$  venant de la pomomécanique [BIO 41] qui a été calé sur des essais de gonflements soumis à divers confinements et contraintes [MOR 17].  $tr(\varepsilon^{p,DEF})$  représente le volume créé par la fissuration de DEF (Figure 3). Cette fissuration est elle-même calculée en fonction de la pression intraporeuse et des contraintes externes lorsque le critère de Rankine est atteint. Ce volume est considéré totalement rempli d'ettringite.

Les paramètres à caler pour un béton, dont la chimie initiale est inconnue, sont le temps caractéristique de précipitation  $\tau^{prec}$ , la quantité maximale de produit créable  $E^{II \infty}$  (dans des conditions de chauffage sans création d'hydro-grenats), et  $\phi_{DEF}^v$  le volume des vides accessibles. Il faut ensuite simuler les séchage/imbibition du matériau, la lixiviation des alcalins et le cycle thermique durant l'hydratation avant le calcul pomomécanique.

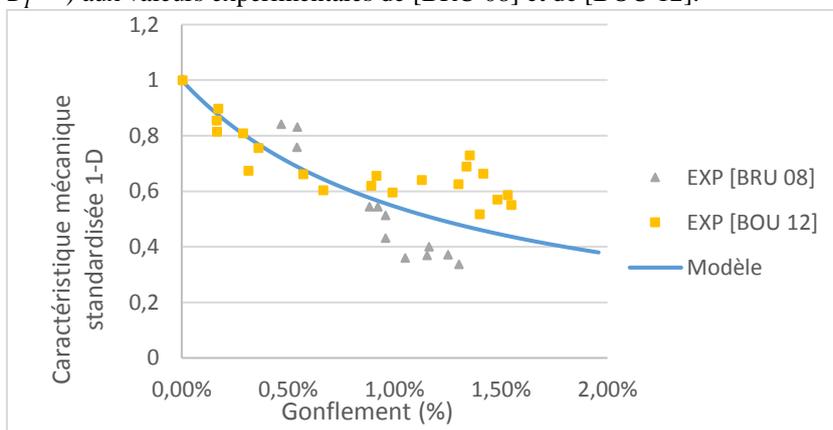


**Figure 3.** Volume accessible à l'ettringite secondaire sans ajout de pression.

#### 2.4. Endommagement dû aux réactions de gonflement interne

La pression exercée par le volume formé provoque une déformation du squelette solide. Celle-ci est élastique tant que la pression est inférieure à la résistance en traction du matériau. Elle devient ensuite plastique en fonction de la valeur de la pression grâce à un écrouissage positif. Le phénomène de fissuration anisotrope observé expérimentalement sous chargement uniaxial ou biaxial est retrouvé numériquement grâce à trois critères de plasticité anisotrope [MOR 17]. Le couplage entre le fluage et la DEF est géré par la pomomécanique.

L'endommagement correspondant  $D_I^{t,RGI}$  est également anisotrope. Il est calculé avec les déformations plastiques de RGI  $\varepsilon_I^{pl,RGI}$  et un paramètre matériau  $\varepsilon^{k,RGI}$  (ici 1.2%) permettant de calibrer son évolution ([10] issu de [CAP 00]). La Figure 4 permet de confronter l'évolution de la caractéristique mécanique standardisée (1 -  $D_I^{t,isr}$ ) aux valeurs expérimentales de [BRU 08] et de [BOU 12].



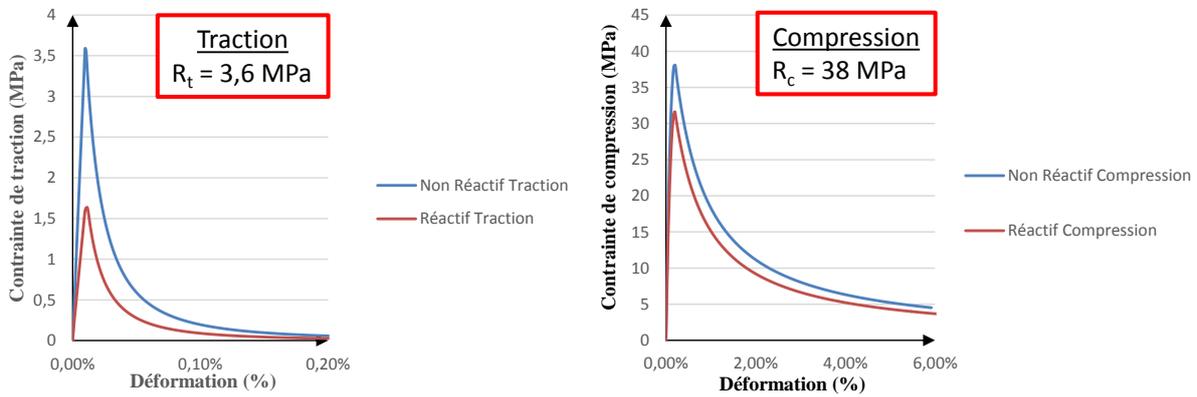
**Figure 4.** Evolution de la caractéristique mécanique standardisée (1-D) en fonction du gonflement [BRU 08] et de [BOU 12],  $\varepsilon^{k,RGI}=1.2\%$ .

$$D_I^{t,RGI} = \frac{\varepsilon_I^{pl,RGI}}{\varepsilon_I^{pl,RGI} + \varepsilon^{k,RGI}} \quad [10]$$

La Figure 5 représente les réponses contraintes-déformations (en traction et en compression) obtenues avec le modèle sur deux bétons : l'un sain, l'autre ayant subi un gonflement de DEF de 1.1%. En traction, le matériau est fortement endommagé car sa résistance a chuté de 3.6 MPa à 1.6 MPa, soit une baisse de 55%. En compression, la perte de résistance est moindre (17%). Le pic de compression passe de 38 MPa à 31.5 MPa. Le matériau est donc affaibli par la DEF.

Cependant, lorsqu'un chargement externe de compression ou un confinement est présent, le gonflement est reporté dans les directions libres qui s'endommagent d'autant plus [MOR 17]. Dans la direction chargée ou

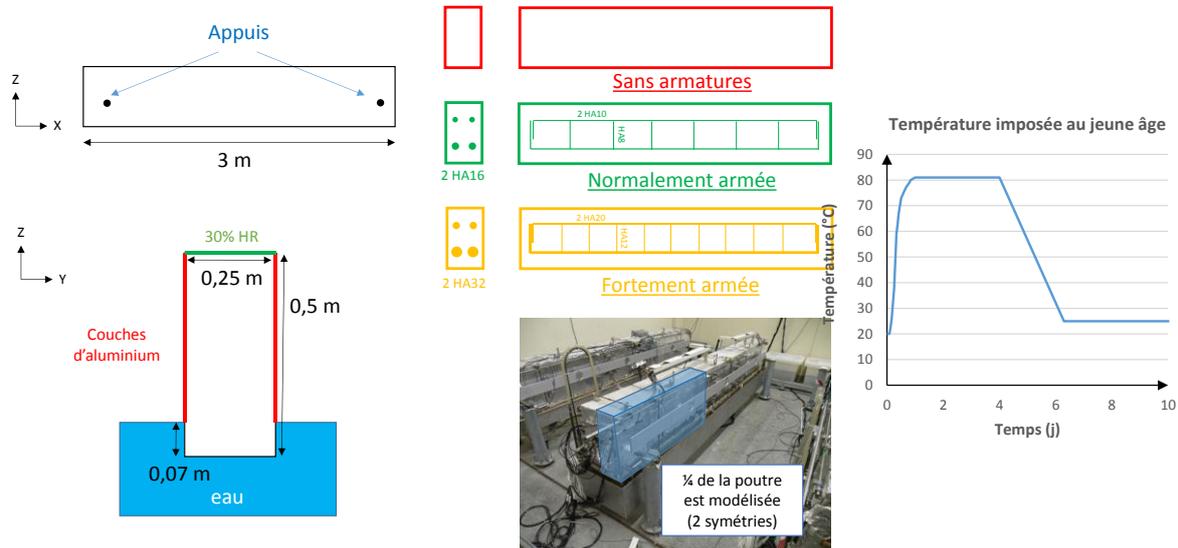
confinée, le béton est comprimé. Cette contrainte d'origine chimique peut être ajoutée au béton dans cette direction car la fissuration y sera retardée ou annulée.



**Figure 5.** Courbes contraintes-déformations en traction et en compression pour un matériau Non Réactif et un matériau ayant subi un gonflement de 1.1%.

### 3. Simulation de poutres soumises à gonflement

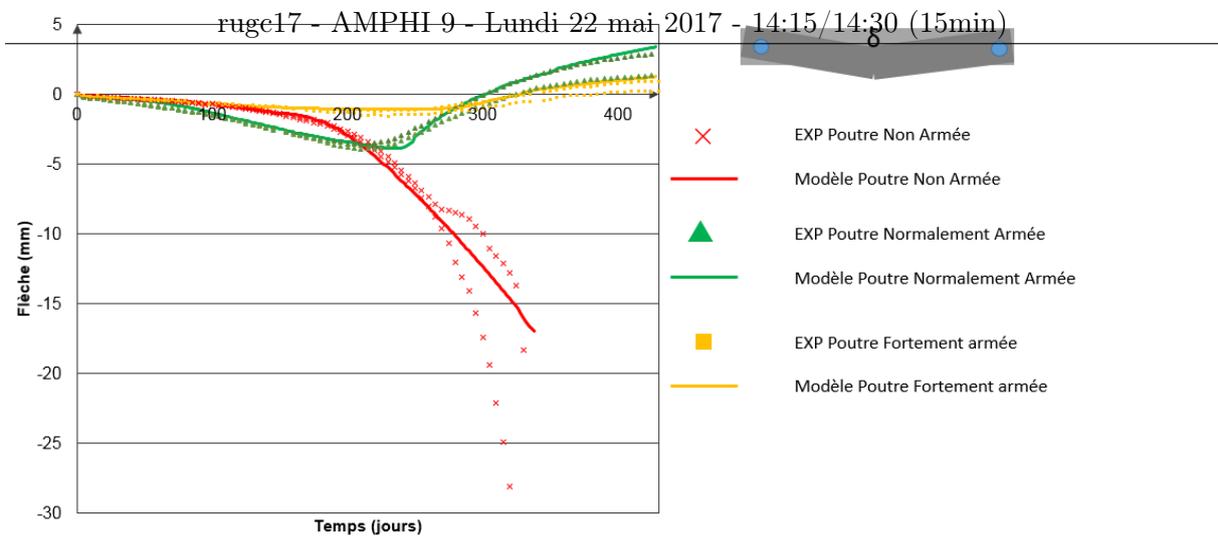
Pour confronter le modèle à des éléments plus ou moins confinés, le comportement de poutres plus ou moins armées est simulé [MAR 10] (Figure 6). Leur géométrie est de 3 x 0,5 x 0,25 mètres. La première poutre n'est pas armée, la deuxième est normalement armée (2 HA 16 en acier longitudinaux inférieurs) et la troisième est fortement armée (2 HA 32 en acier longitudinaux inférieurs). Elles sont immergées dans la partie basse sur 7 centimètres et soumises à un séchage en air à 30% d'humidité relative (HR) et 38°C en partie haute durant 428 jours (Figure 6). Ces poutres sont simplement appuyées sur des barres en acier à 0,1 mètre de chaque extrémité et à mi-hauteur. La température au jeune âge est imposée pendant 6 jours (Figure 6) avec un maximum à 80°C.



**Figure 6.** Géométrie, conditions aux limites et environnementales des poutres de [MAR 10] et de sa modélisation.

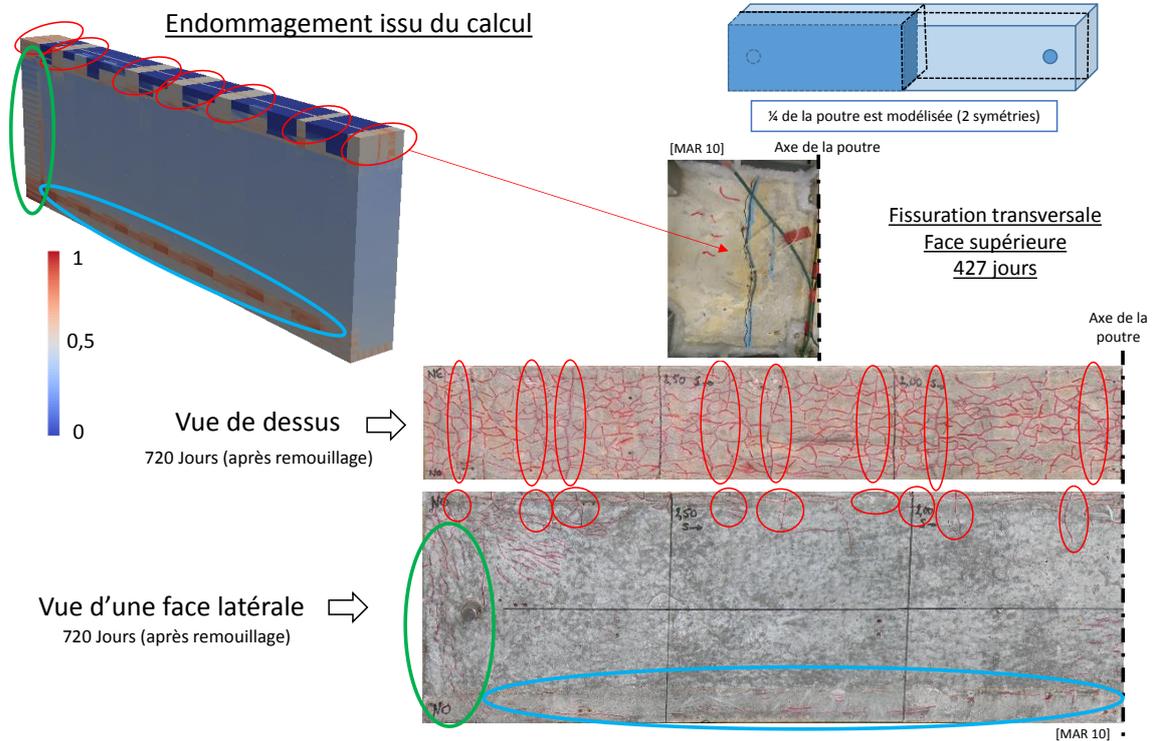
Un fort gradient d'humidité est présent dans la hauteur de la poutre. Il est reproduit par un calcul hydrique préalable avec la loi de Mensi [MEN 88]. La lixiviation des alcalins est majoritairement localisée dans la zone en contact direct avec l'eau (7 cm immergés dans la partie basse). Ce phénomène est ici simulé par diffusion. La perte de masse d'eau est calée par rapport aux données expérimentales [MAR 10]. Le retrait et le fluage ont été calés avec des bétons semblables à celui de ces poutres [MUL 03]. Les données relatives au gonflement sont établies sur une éprouvette en gonflement libre de [MAR 10].

Les résultats obtenus pour les poutres, en termes de flèches, peuvent être observés sur la Figure 7. Les résultats expérimentaux de la poutre non armée (courbe et points rouges) s'arrêtent à 320 jours car elle a cédé sans chargement extérieur à cette échéance. La partie basse est la plus saturée, la réaction y est donc plus rapide. De plus, c'est la zone la plus lixiviée, ce qui accélère la cinétique. La poutre est entraînée vers le bas jusqu'à rupture.



**Figure 7.** Evolutions des flèches des poutres réactives [MAR 10].

Pour les poutres armées (courbes et points verts et jaunes), plusieurs phases sont à distinguer. Durant la première phase (jusqu'à 250 jours environ), la partie basse réagit, la flèche est négative mais elle est limitée par la présence d'armatures qui orientent la fissuration. La précontrainte chimique se met en place, une contrainte de compression se développe dans le béton au contact des armatures principales. De plus, de l'eau remonte par la microfissuration, la poutre s'humidifie lentement dans la hauteur. Dans une deuxième phase (après 250 jours), la partie basse est confinée par les armatures et la partie médiane commence à gonfler. L'évolution des flèches s'inverse. La précontrainte chimique se développe de plus en plus haut dans les poutres. Enfin, les flèches redeviennent positives (apparition d'une contre-flèche) et la partie haute passe en traction. C'est à ce moment



**Figure 8.** Fissuration de la poutre Normalement Armée : comparaison des faciès après 428 jours de calcul avec les résultats expérimentaux de [MAR, 2010]

qu'apparaissent des fissures transversales dans la partie haute des poutres armées. En effet, dans les cinq à dix centimètres les plus hauts des poutres armées, la réaction est faible et lente alors qu'elle est entraînée par la partie médiane, qui gonfle plus fort et plus vite. De plus, les armatures principales supérieures empêchent ce déplacement, des fissures localisées transversales se créent (entourées de rouge sur la Figure 8). Une fissuration longitudinale le

long des armatures dans la partie inférieure également présente (cf. Figure 8). Le gonflement du béton de la zone d'enrobage est dirigé vers l'extérieur car l'acier l'empêche vers l'intérieur. Enfin, à gauche de l'appui (cerclée de vert sur la Figure 8) le même phénomène est observable à cause du dernier cadre. La fissuration est orientée vers l'extérieur par rapport à la zone confinée comprise entre les cadres et les armatures principales.

Le modèle reproduit de façon cohérente les flèches et les faciès de fissuration de ces trois poutres comportant des confinements divers et un gradient d'humidité important. Cette validation montre l'importance de l'anisotropie de la fissuration dans le comportement de poutres armées endommagées par la DEF.

#### 4. Conclusion

Les modèles numériques permettant de prédire les dégradations de la DEF sur les structures sont nécessaires pour évaluer la sûreté et la durabilité des ouvrages atteints. Dans ce travail, le modèle chimique proposé permet de prendre en compte les effets de la formulation du béton, du lessivage des alcalins et du cycle de chauffe au jeune âge sur les cinétiques et les amplitudes des réactions de DEF. Le volume ainsi calculé est inséré dans un modèle poromécanique qui prend en compte l'anisotropie de fissuration (locale ou diffuse), le retrait et le fluage. Les simulations éléments finis des poutres de Martin [MAR 10] permettent d'illustrer les phénomènes considérés. Ces poutres plus ou moins armées et soumises à un fort gradient d'humidité présentent des phénomènes de report et de gradient de gonflement importants qu'il convient de simuler de façon réaliste pour expliquer les évolutions des flèches et des faciès de fissuration. Cette phase de test du modèle est essentielle avant d'aborder les problèmes d'évaluation d'ouvrages réels.

#### 5. Bibliographie

- [BIO 41] BIOT, MAURICE A.: General Theory of Three-Dimensional Consolidation. In: *Journal of Applied Physics* Bd. 12 (1941), Nr. 2, S. 155–164
- [BOU 12] BOUZABATA, HASSINA ; MULTON, STÉPHANE ; SELIER, ALAIN ; HOUARI, HACÈNE: Effects of restraint on expansion due to delayed ettringite formation. In: *Cement and Concrete Research* Bd. 42 (2012), Nr. 7, S. 1024–1031
- [BRU 8] BRUNETAUD, X. ; DIVET, L. ; DAMIDOT, D.: Impact of unrestrained Delayed Ettringite Formation-induced expansion on concrete mechanical properties. In: *Cement and Concrete Research* Bd. 38 (2008), Nr. 11, S. 1343–1348
- [CAP 00] CAPRA, BRUNO ; SELIER, ALAIN: Anisotropic modelling of alkali-aggregate reaction in concrete. In: . Quebec City, 2000, S. 929–938
- [DIV 98] DIVET, L. ; RANDRIAMBOLOLONA, R.: Delayed Ettringite Formation: The Effect of Temperature and Basicity on the Interaction of Sulphate and C-S-H Phase 1. In: *Cement and Concrete Research* Bd. 28 (1998), Nr. 3, S. 357–363
- [GRI 08] GRIMAL, ETIENNE ; SELIER, ALAIN ; LE PAPE, YANN ; BOURDAROT, ERIC: Creep, Shrinkage, and Anisotropic Damage in Alkali-Aggregate Reaction Swelling Mechanism-Part I. A Constitutive Model. In: *ACI materials journal* Bd. 105 (2008), Nr. 3, S. 227–235
- [KCH 15] KCHAKECH, BADREDDINE: *Étude de l'influence de l'échauffement subi par un béton sur le risque d'expansions associées à la Réaction Sulfatique Interne* : Paris Est, 2015
- [MAR 10] MARTIN, RENAUD-PIERRE: *Analyse sur structures modèles des effets mécaniques de la réaction sulfatique interne du béton* : Paris Est, 2010
- [MEN 88] MENS, R. ; ACKER, P. ; ATTOLOU, A.: Séchage du béton: analyse et modélisation. In: *Materials and Structures* Bd. 21 (1988), Nr. 1, S. 3–12
- [MOR 17] MORENON, PIERRE ; MULTON, STÉPHANE ; SELIER, ALAIN ; GRIMAL, ETIENNE ; HAMON, FRANÇOIS ; BOURDAROT, ERIC: Impact of stresses and restraints on ASR expansion. In: *Construction and Building Materials* Bd. 140 (2017), S. 58–74
- [MUL 03] MULTON, STEPHANE: *Évaluation expérimentale et théorique des effets mécaniques de l'alcali-réaction sur des structures modèles* : Marne-la-Vallée, 2003