

Application structurale d'un modèle THCM pour le béton au jeune âge

Laurie Buffo-Lacarrière

**LMDC – Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions – INSA/UPS 135
avenue de Rangueil – 31077 TOULOUSE Cedex 4**

RESUME. La fissuration précoce des structures est une préoccupation importante des industriels du BTP. Cet article présente un modèle d'estimation de cette fissuration ayant pour objectif de servir d'outil d'aide au choix des matériaux et des techniques permettant de minimiser ce risque tout en conservant une bonne rentabilité. L'outil de simulation développé couple un modèle d'hydratation multiphasique prenant en compte l'hydratation de plusieurs espèces anhydres (clinker, cendres volantes, fumées de silice, ...) avec un modèle mécanique basé sur une approche THCM permettant de reproduire le comportement non linéaire du béton au jeune âge (propriétés évolutives, déformations différées, endommagement).

MOTS-CLÉS : hydratation, température, fissuration précoce.

ABSTRACT. This paper presents a model predicting the early age cracking of structures. It is a promising tool to help industrials choose the materials and the constructions techniques which reduce the cracking risk. The proposed model uses a multiphasic modelling of binder hydration predicting the hydration development of several anhydrous species (clinker, fly ash, silica fume ...). The results of this first modelling are used as input data for a mechanical modelling of the non linear behaviour of concrete at early age (evolution of mechanical properties, creep, and damage).

KEYWORDS : hydration, temperature, early age cracking.

1. INTRODUCTION

La fissuration précoce des structures en béton et en béton armé est une préoccupation importante des industriels du BTP. En effet l'apparition de fissures dans les structures en cours de réalisation est de plus en plus mal acceptée par les Maîtres d'Ouvrages. Elles sont alors considérées comme un défaut de fabrication. De nombreuses interrogations quant aux choix des matériaux et des méthodes d'exécution permettant de limiter cette fissuration se posent encore. L'objectif de ce travail est de fournir un outil de simulation capable de quantifier les risques d'apparition de fissures sur une structure donnée et de justifier quantitativement une formulation de béton ainsi que les précautions de mise en œuvre et de cure aptes à éviter ou limiter cette fissuration.

Cet outil de simulation s'organise en deux axes de modélisations successives : un modèle déterminant les états hydriques et thermiques de la structure puis un modèle mécanique utilisant ces données pour estimer la fissuration. La connaissance des champs hydrique, thermique et d'hydratation permet en effet de prévoir les déformations induites par les variations de teneur en eau (retrait de séchage et d'autodessiccation) et de température (déformations thermiques) au sein de la structure. Le risque de fissuration est alors évalué avec le modèle mécanique à partir des contraintes induites par les déformations empêchées (gradients thermiques et hydriques ou conditions aux limites mécaniques).

Le modèle d'hydratation multiphasique permet de prédire l'hydratation des liants composés. Cette prise en compte de liants composés est rendue indispensable par l'utilisation de plus en plus courante de liants binaires voire ternaires. En effet, sachant que la fabrication d'une tonne de clinker produit environ 750 kg de CO₂, l'utilisation de ciments sans ajouts (CEM I) est une pratique appelée à disparaître progressivement pour être remplacée par l'utilisation de ciments composés contenant du clinker et une ou plusieurs additions pouzzolaniques.

Le modèle mécanique est basé sur une approche THCM et prend en compte le comportement non linéaire du béton (déformations différées et endommagement orthotrope).

2. MODELE D'HYDRATATION MULTIPHASIQUE

2.1. PRESENTATION DU MODELE PHENOMENOLOGIQUE

En conditions endogènes, l'hydratation des composés du liant va consommer de l'eau et dégager de la chaleur modifiant ainsi les équilibres hydriques et thermiques du matériau. Les variations de teneur en eau et de température au sein du béton vont à leur tour modifier les cinétiques d'hydratation des différents composés (activations hydrique et thermique). Notre modèle est donc basé sur un calcul couplé des évolutions des degrés d'hydratation, de la teneur en eau et de la température. Il utilise pour cela des lois de cinétique d'hydratation (propres à chaque espèce) (Eq. 1) couplées à l'équation de conservation de la masse d'eau (Eq. 2) et à l'équation de conservation de la chaleur (Eq. 3) (Buffo-Lacarrière et al. 2007).

$$\vec{\alpha} = \vec{F}(\vec{\alpha}, W, T) \quad [\text{Eq. 1}]$$

$$\dot{W} = \text{div}\left(-D_w \cdot \overrightarrow{\text{grad}} W\right) + \vec{Q}_{th}^w \cdot \vec{\alpha} \quad [\text{Eq. 2}]$$

$$\rho c \cdot \dot{T} = \text{div}\left(-\lambda \cdot \overrightarrow{\text{grad}} T\right) + \vec{Q}_{th}^T \cdot \vec{\alpha} \quad [\text{Eq. 3}]$$

Où : - $\vec{\alpha} = (X_1 \cdots X_i \cdots X_n)$ et (i=1→clinker, i=2..n→additions pouzzolaniques)

- α_i est le degré d'hydratation de la phase anhydre "i"
- W est l'eau totale présente dans le béton
- T est la température
- D_w est le coefficient de transport d'eau
- $Q_{th_i}^w$ est la quantité d'eau nécessaire à l'hydratation complète du composé anhydre "i"
- ρ , c et λ sont la masse volumique, la capacité et la conductivité thermique du béton
- $Q_{th_i}^T$ est la quantité de chaleur produite par l'hydratation complète de l'anhydre "i".

En conditions réelles (structure in situ), l'environnement va également modifier les équilibres hydriques et thermiques. Des échanges vont en effet se faire entre la structure et l'air ambiant : on peut notamment citer l'exemple d'un séchage des phases en contact avec l'air plus sec, ou encore celui de refroidissement des surfaces libres sous l'effet du vent. Ces effets sont pris en compte par l'ajout de conditions aux limites associées aux équations de conservation de la masse d'eau (Eq. 2) et de la chaleur (Eq. 3).

La modélisation phénoménologique des réactions d'hydratation multiphasique que nous proposons permet de combiner, à chaque instant, les effets de la température et de la teneur en eau sur l'hydratation de plusieurs phases solides. Le principe du couplage entre hydratation, teneur en eau et température modélisé à l'aide des équations 1 à 3 est présenté de façon schématisée sur la Figure 1.

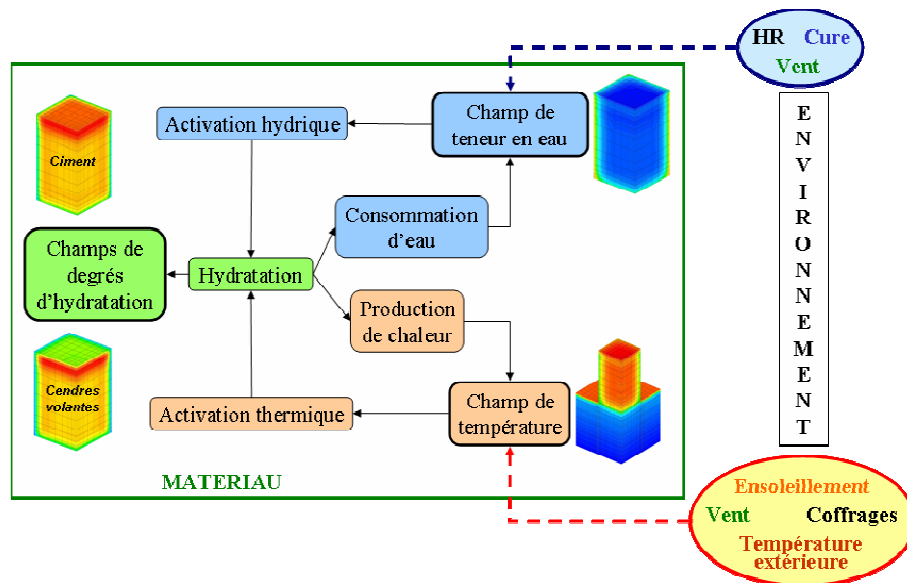


Figure 1 : Principe des couplages du modèle multiphasique.

L'apport de notre modèle par rapport aux modèles existants est double. Il réside d'une part dans la prise en compte d'équations de cinétique d'hydratation propres à chaque composé (clinker, additions pouzzolaniques) du liant. Etant donné que ces liants sont composés de produits ayant des chaleurs d'hydratation et des énergies d'activation différentes il apparaît nécessaire de modéliser leur hydratation en utilisant des lois de cinétique de réaction propres à chaque espèce (clinker, cendres volantes, fumées de silice, ...). Plusieurs modèles d'hydratation basés sur la modélisation de la microstructure prennent déjà en compte le développement de l'hydratation de plusieurs composants (CEMHYD3D (Bentz 2000), DUCOM (Maekawa et al. 1999), HYMOSTRUC (Van Breugel 1995)). Ces modèles décrivent l'évolution de la microstructure au cours de l'hydratation avec une bonne précision mais ils requièrent un temps de calcul très long et ne sont donc pas appropriés à des applications sur des structures massives, qui constituent la majorité des applications de notre modèle.

D'autre part, on peut noter l'intérêt d'un couplage entre la teneur en eau du béton et la cinétique des réactions à chaque instant puisque cela permet de prendre en compte non seulement l'effet du rapport E/C sur la cinétique et la valeur limite de l'hydratation (les réactions pouvant s'arrêter par manque d'eau pour les faibles E/C) mais aussi celui d'un éventuel départ d'eau en surface (par séchage) qui modifierait les cinétiques de réactions. Plusieurs auteurs reportent cet effet de la teneur en eau sur la cinétique de réaction et proposent des modèles couplant hydratation et évolution de la concentration en eau dans les structures (Bentz 2006 ; Oh and Cha 2003). Cependant ces modèles ne sont pas applicables à la modélisation de l'hydratation de liants composés.

2.2. DETERMINATION EN LABORATOIRE DES PARAMETRES DU MODELE

Les paramètres propres aux matériaux utilisés peuvent être, pour la plupart, calculés à partir de la composition chimique du ciment et des additions utilisées. Les paramètres de calage des lois d'hydratation implantées dans le modèle numérique sont eux aussi aisément déterminés par calage sur un essai de calorimétrie semi-adiabatique, le calage pour les liants composés étant fait sur un essai avec ciment seul puis un essai sur le liant composé. Faisant l'objet d'une norme (NF EN 196-9), ce test garantit des conditions d'essai strictement identiques d'un laboratoire à un autre et un calage fiable.

2.3. APPLICATION : BLOC D'ESSAI DU BARRAGE DE NAGA HAMMADI

Le modèle présenté aux paragraphes précédents a été appliqué sur une structure massive afin de prévoir l'évolution de la température au sein du béton.

La structure étudiée est un bloc test cubique de 27m^3 réalisé pour contrôler, dans un environnement réel, le comportement thermique du béton utilisé lors de la construction des pièces massives du barrage sur le Nil de Naga Hammadi (Egypte) par VINCI Construction Grands Projets¹. La géométrie de ce bloc test est présentée ci-dessous (Figure 2).

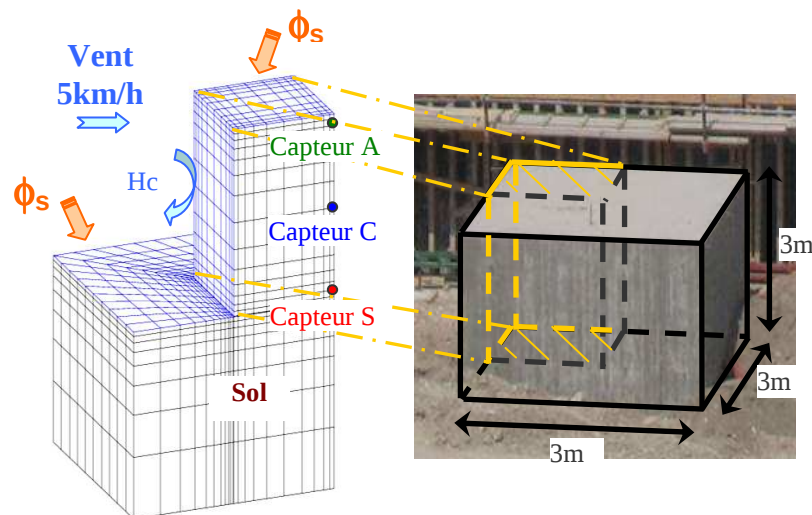


Figure 2 : Géométrie du bloc test simulé

Les calculs sur la structure présentée sur la Figure 2 ont été effectués en implantant le modèle présenté dans le code éléments finis CASTEM développé par le CEA. Les températures obtenues (Figure 3) par le modèle numérique (courbes continues sur la figure) sont comparées aux mesures faites sur site (points sur la figure) en plusieurs points de la structure : au cœur (capteur C), à 10 cm de la surface supérieure (Capteur A) et à 10 cm de l'interface sol/béton (Capteur S).

La Figure 3 permet de valider notre modèle de prédiction de la température au sein du béton dans des conditions quasi-adiabatiques (au cœur du bloc de 27m^3) mais aussi dans les zones soumises aux échanges thermiques : transfert par conduction près du sol, transfert par convection et flux solaire imposé près de la surface. Cette validation concernant la prédiction de la température de surface est notamment importante pour pouvoir prédire de façon fiable les gradients thermiques développés dans les structures massives.

¹ Nous remercions VINCI Construction Grands Projets pour son soutien technique et financier et particulièrement Laurent Boutillon et Lionel Linger pour leur collaboration.

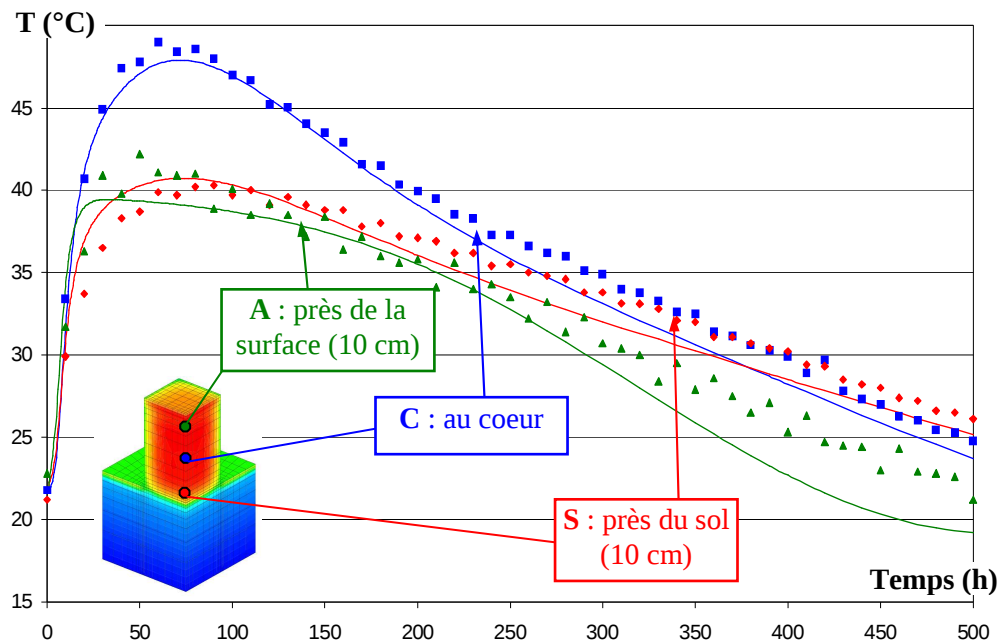


Figure 3 : Evolution des températures au sein du bloc test.

3. MODELE MECANIQUE

3.1. PRESENTATION DU MODELE

La fissuration précoce des structures est initiée quand les contraintes générées par le blocage (interne ou externe) des déformations atteignent la capacité de résistance du matériau au même instant, les déformations étant ici produites par les conséquences de l'hydratation en conditions réelles. Une modélisation fiable de ces phénomènes menant à la fissuration à court terme des structures est rendue difficile par la nécessité de prendre en compte de façon simultanée de nombreux phénomènes physiques :

- les effets de la température sur le béton : déformations internes imposées,
- les effets de l'hydratation sur le comportement du béton : caractéristiques mécaniques du matériau modifiées par l'hydratation, ce caractère évolutif du matériau impliquant une écriture incrémentale des lois de comportement intrinsèques,
- les effets de la teneur en eau sur le comportement : pressions internes dues au séchage et à la consommation d'eau par l'hydratation,
- le comportement endommageable du béton qui pilote la fissuration,
- le comportement différé du béton (et l'adaptabilité particulièrement influente au jeune âge induite lors de sollicitations prolongées). En effet la comparaison d'une expérience simple (le test de retrait empêché à l'anneau) avec les résultats d'un modèle élastique démontre que ce comportement modélise mal la réalité du fait d'un phénomène particulièrement sensible au jeune âge : le fluage ou la relaxation. A ce sujet, des recherches effectuées ces dernières décennies sur le béton au jeune âge montre qu'une modélisation fine du comportement rhéologique du béton nécessite la prise en compte d'un comportement relativement complexe (Acker 2003 ; Bernard et al. 2003).

En pratique le modèle rhéologique retenu est un modèle que l'on pourrait qualifier de visco-élastique consolidant (voir Figure 4).

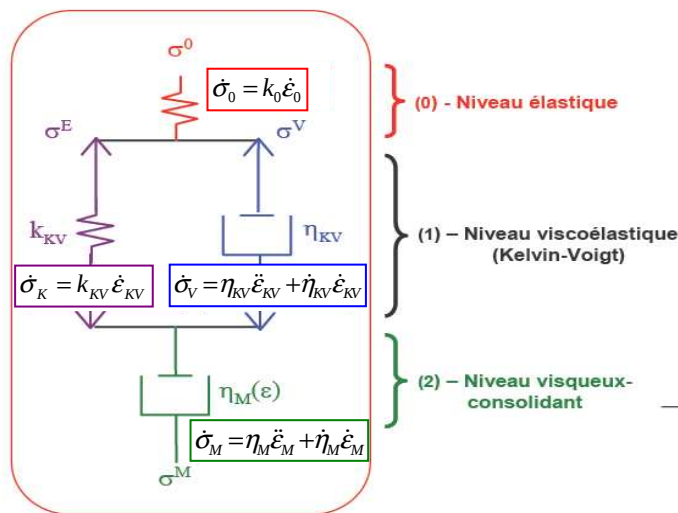


Figure 4 : Modèle rhéologique

L'originalité de ce modèle réside en la prise en compte d'une consolidation à l'étage visqueux qui modifie la viscosité de ce niveau en fonction de l'état de déformation. Cette consolidation introduit une non linéarité qui permet de reproduire le comportement à long terme observé par (Brooks 2005).

Le modèle rhéologique permet de déterminer la contrainte appliquée sur le squelette solide, cette contrainte effective étant ensuite couplée aux autres phénomènes élémentaires (endommagement et pression hydriques) comme le présente la Figure 5.

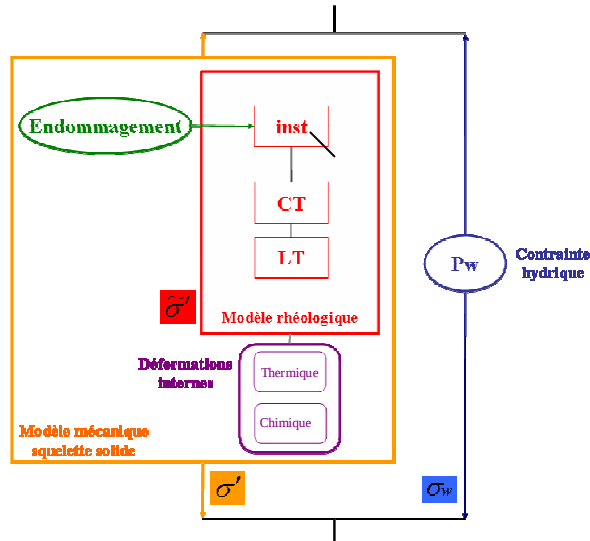


Figure 5 : Principe de couplage mécanique

Le niveau élastique représente la réponse instantanée au chargement.

Le niveau viscoélastique modélise le comportement à court terme du béton, et crée une déformation réversible. Il est associé au tassement réversible des hydrates (branche élastique) accompagné d'un mouvement d'eau dans les capillaires (branche visqueuse).

Enfin le niveau visqueux consolidant reproduit le comportement à long terme du béton. Il crée une déformation irréversible associée au comportement purement visqueux des C-S-H.

La contrainte utilisée dans le modèle rhéologique est la contrainte effective appliquée sur la partie non micro fissurée du squelette solide. On la note $\tilde{\sigma}'$. A partir de cette contrainte effective et de la variable d'endommagement on remonte à la contrainte apparente dans le squelette solide, notée σ' . Enfin, à cette contrainte subie par le squelette solide, s'ajoute la transmission de la pression d'eau au squelette solide (P_w). On obtient alors la contrainte apparente totale qui s'applique macroscopiquement sur tout le matériau (eau + squelette). On note cette contrainte σ .

3.2. DETERMINATION EN LABORATOIRE DES PARAMETRES DU MODELE

Les paramètres du modèle sont déterminés en laboratoire à partir d'essais indépendants propres à chaque aspect de la modélisation. Ces essais sont récapitulés dans le Tableau 1.

Elément du modèle	Essai associé
Rhéologie	Fluage endogène avec phase de déchargement et mesures de déformations longitudinales et transversales.
Endommagement	Essai de compression et de traction directe piloté en déplacement (ou essai de flexion 3 points sur éprouvette entaillée)
Pressions hydriques	Essais de retrait libre (et mesure de perte de masse) et de fluage total
Evolution des caractéristiques mécaniques	Mesure du module d'Young et de la résistance en compression à plusieurs échéances à court terme (au moins 2).

Tableau 1 : Détermination des paramètres du modèle mécanique

3.3. SIMULATION SUR STRUCTURE DE LABORATOIRE

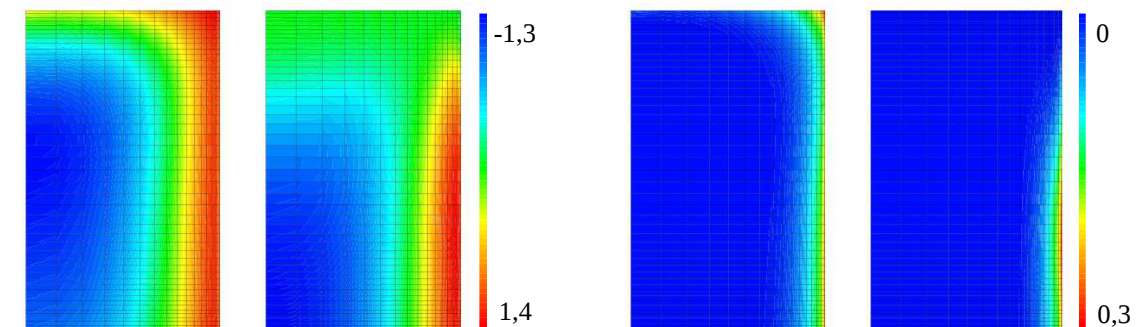
Les considérations physiques à l'origine du modèle nous ont permis de mettre au point un essai de validation en laboratoire en vue d'une application ultérieure du modèle sur structures massives in situ. La structure choisie est un cylindre de diamètre 60 cm et hauteur 50 cm ; on minimise ainsi dans un premier temps les concentrations de contraintes dues à la forme de la structure. La structure est isolée thermiquement (10 cm de laine de verre sur la surface latérale et 5 cm de polystyrène expansé sur les surfaces horizontales) et placée dans une chambre à température contrôlée. Pendant les 20 premières heures, la température est fixée à 30°C puis elle est amenée à 5°C avant d'ôter l'isolation latérale (les protections horizontales sont conservées pour minimiser le transfert vertical), favorisant ainsi le gradient thermique entre cœur et surface. La structure est présentée sur les Figure 6 et Figure 7.



Figure 6 : Structure isolée et à 30°C (0 à 20h) Figure 7 : Structure décoffrée et à 5°C (20h à 7j)

La structure est équipée à mi-hauteur, le long du rayon, de thermocouples afin de valider la prévision de la température par le modèle d'hydratation, ainsi que de jauges de déformations noyées pour les résultats du modèle mécanique. Une observation de la fissuration (position et date d'occurrence) après décoffrage permettra de tester de façon complète le modèle mécanique. Les essais étant en cours de réalisation, la comparaison avec les résultats expérimentaux n'est pas encore possible mais l'allure de la répartition des contraintes et endommagements obtenus numériquement pour un béton formulé avec un CEM I est présentée sur la Figure 8. On observe dans les directions z et θ un système d'autocontraintes avec une compression au cœur et une traction développée au bord, la surface plus froide que le cœur empêchant la dilatation du cœur de la structure.

Ces contraintes créent alors un endommagement en surface dans les directions θ et z conduisant ici à une fissuration (fissures verticales pour $dt\theta$ et horizontales pour dtz).



(a) - $\sigma_{\theta\theta}$ (en MPa) (b) - σ_{zz} (en MPa) (c) - Dt suivant θ (d) - Dt suivant z
Figure 8 : Champs de contraintes (a et b) et d'endommagement (c et d), 5h après décoffrage

4. CONCLUSION

Le modèle que nous avons développé a pour finalité de mesurer les impacts du choix des matériaux et des techniques retenus pour la construction d'une structure sur la température au sein de la structure. Il prend en compte l'hydratation de liants composés dans des conditions réelles (échanges thermiques et hydriques) tout en étant applicable sur des structures massives comme l'a montré la validation sur un bloc de 27 m³. L'association de ce modèle d'hydratation multiphasique avec un modèle mécanique reproduisant le comportement au jeune âge est un outil prometteur pour prévoir la fissuration précoce de la structure pour chaque choix de formulation et de mise en œuvre grâce la prise en compte de nombreux phénomènes comme l'évolution des propriétés mécaniques ou le rôle essentiel du comportement différé.

5. BIBLIOGRAPHIE

- Acker P.(2003) «Sur les origines du retrait et du fluage du béton.» *Revue Française de Génie Civil*, vol. 7, n°6, p. 761-776.
- Bernard O., Ulm F-J., Germaine J.T. (2003) «Volume and deviator creep of calcium-leached cement-based materials.» *Cement and Concrete Research*, vol. 33, p. 1127-1136.
- Bentz, D.P. (2000) *CEMHYD3D: A Three-Dimensional Cement Hydration and Microstructure Development Modelling Package*. Version 2.0. NISTIR 6485, U.S. Dpt of Commerce
- Bentz D.P.(2006) «Influence of water-to-cement ratio on hydration kinetics: Simple models based on spatial considerations.» *Cement and Concrete Research*, vol. 36, p. 238-244
- Brooks J.J. (2005) «30-year creep and shrinkage of concrete» *Magazine of Concrete Research*, vol. 57, n° 9, p. 545-556
- Buffo-Lacarrière L., Sellier A., Escadeillas G., Turatsinze A. (2007) «Multiphasic finite element modeling of concrete hydration.» *Cement and Concrete Research*, vol. 37, n°2, p. 131-138
- Maekawa K., Chaube R., Kishi T. (1999) *Modeling of Concrete Performance: Hydration. Microstructure Formation and Mass Transport.*, E&FN SPON, London
- Oh B.H., Cha S.W. (2003) «Nonlinear analysis of temperature and moisture distributions in early-age concrete structures based on degree of hydration.» *ACI Material Journal*, vol. 100, n°5, p. 361-370
- Van Breugel K. (1995) «Numerical simulation of hydration and microstructural development in hardening cement-based materials. » *Cement and Concrete Research*, vol.25, p. 319-331