



**HAL**  
open science

# MODÉLISATION EXPLICITE DE LA FISSURATION INDUITE PAR LE RETRAIT DE SÉCHAGE

Cécile Oliver Oliver-Leblond, Nicolas Chan, Farid Benboudjema, Frédéric  
Ragueneau

► **To cite this version:**

Cécile Oliver Oliver-Leblond, Nicolas Chan, Farid Benboudjema, Frédéric Ragueneau. MODÉLISATION EXPLICITE DE LA FISSURATION INDUITE PAR LE RETRAIT DE SÉCHAGE. 20<sup>e</sup> édition Journées Scientifiques du Regroupement Francophone pour la Recherche et la Formation sur le Béton (RF)2B, Jul 2019, Bruxelles, Belgique. hal-03229225

**HAL Id: hal-03229225**

**<https://hal.science/hal-03229225>**

Submitted on 18 May 2021

**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.

20<sup>e</sup> Edition des Journées scientifiques  
du Regroupement Francophone pour la Recherche et la Formation sur le Béton  
(RF)<sup>2</sup>B

---

Services BATir et 4MAT, Université Libre de Bruxelles, Belgique  
1 au 3 juillet 2019

## MODÉLISATION EXPLICITE DE LA FISSURATION INDUITE PAR LE RETRAIT DE SÉCHAGE

C. Oliver-Leblond<sup>A</sup>, N. Chan<sup>A</sup>, F. Benboudjema<sup>A</sup>, F. Ragueneau<sup>A</sup>  
A LMT, ENS Paris-Saclay, CNRS, Université Paris-Saclay, Cachan, France

**RÉSUMÉ :** Dans cette étude, un modèle particulaire-lattice est utilisé pour analyser l'impact sur le comportement mécanique de la fissuration induite par le retrait de séchage. Dans un premier temps, le champ de déformation de retrait de dessiccation est évalué à partir d'une résolution éléments finis classique. Ce champ de déformation est ensuite transféré au modèle discret via un couplage faible. Le modèle discret est utilisé car il permet de représenter de manière explicite la fissuration, en alliant les avantages des modélisations lattice et particulaires. La cohésion des particules est obtenue avec un réseau de poutres d'Euler-Bernoulli élasto-fragiles. En cas de fissuration, la cohésion disparaît et une loi de contact avec friction est prise en compte entre les particules polygonales. La comparaison avec une approche modélisant la fissuration de manière continue, du type modèle d'endommagement, montre d'importantes différences.

### 1. INTRODUCTION

La prédiction de la durabilité d'une structure en béton est étroitement liée à la prédiction de la fissuration apparaissant au jeune âge. En effet, le séchage différentiel entre la surface et le cœur de la structure conduit à un état de contrainte hétérogène et peut induire des microfissures significatives à la surface (Bisschop et al., 2002; Sicard et al., 1992). Ces microfissures auront un impact non seulement sur les propriétés mécaniques mais aussi sur la perméabilité de la structure (Yurtdas et al., 2006).

Dans cette étude, une analyse séquentielle est proposée pour modéliser l'évolution du séchage et le faciès de fissuration correspondant. Dans un premier temps, une modélisation éléments finis est utilisée pour effectuer des simulations de séchage et obtenir des champs de déformation de retrait de dessiccation. Ensuite, le champ de déformation de retrait est utilisé comme condition aux limites d'un modèle particulaire-lattice pour obtenir le faciès de fissuration. En effet, ce modèle de type éléments discrets est conçu pour décrire des milieux discontinus et peut donc naturellement prédire l'apparition de fissures ainsi que leur propagation et leur fermeture (Vassaux et al., 2016). A ce stade de l'analyse, nous avons modélisé explicitement la fissuration induite par le retrait de séchage. Des simulations d'essais mécaniques sont ensuite réalisées sur ces éprouvettes fissurées afin d'analyser l'impact du séchage sur les propriétés mécaniques du béton.

Les résultats de l'étude numérique proposée ici sont confrontés à une étude expérimentale réalisée sur des éprouvettes dont le béton a une formulation équivalente à celle du projet VeRCoRs (Soleilhet et al., 2016).

## 2. MODELISATION

Dans cette étude, une analyse séquentielle est mise en place pour capturer l'évolution du séchage et de la fissuration associée. Ce type d'analyse a un principe similaire à l'approche globale/locale permettant le couplage faible entre une approche continue et une approche discrète (Oliver-Leblond et al., 2013). Dans un premier temps, une modélisation éléments finis permet de réaliser les simulations de séchage et d'obtenir les déformations de retrait de dessiccation. Dans un second temps, le modèle particulaire-lattice fournit la déformée sous séchage et le faciès de fissuration associé.

### 2.1 Séchage et Retrait

Pour modéliser le phénomène de séchage, la résolution des équations de conservation de la masse des trois constituants présents dans le milieu poreux -- l'eau liquide, la vapeur d'eau et l'air sec -- est normalement nécessaire. Il est cependant possible de faire plusieurs hypothèses (Thiery et al., 2007) afin de considérer seulement l'équation de conservation de la masse de l'eau liquide (1).

$$\phi \frac{\partial S}{\partial P_c} \frac{\partial P_c}{\partial t} = \left( \frac{K \cdot k_r}{\mu} \text{grad}(P_c) \right) \quad (1)$$

avec  $\phi$  la porosité,  $S$  le degré de saturation,  $P_c$  la pression capillaire,  $k_r$  la perméabilité relative,  $K$  la perméabilité intrinsèque  $\mu$  et la viscosité de l'eau.

La pression capillaire et la perméabilité relative sont reliées au degré de saturation via le modèle de désorption isotherme de Van Genuchten (2).

$$S(P_c) = \left( 1 + \left( \frac{|P_c|}{a} \right)^{\frac{1}{1-m}} \right)^{-m} \quad (2)$$

$$k_r = \sqrt{S} \left( 1 - \left( 1 - S^{\frac{1}{m}} \right)^m \right)^2$$

avec  $a$  et  $m$  des paramètres matériaux.

Une relation linéaire phénoménologique (3) est ensuite utilisée pour obtenir le retrait de dessiccation à partir de la teneur en eau (Carlson et al., 1937).

$$\dot{\epsilon}_{sh} = k_{sh} \dot{\theta}_{sh} I \quad (3)$$

Ce modèle a été implémenté dans le code éléments finis Cast3m (Hilaire, 2014).

### 2.2 Fissuration

L'approche particulaire-lattice associe un ensemble de particules, dont le comportement est régi par la mécanique des solides rigides, et un réseau de poutres. Ces deux ensembles sont générés de manière aléatoire à l'aide de deux opérations de maillage de l'espace duales : la tessellation de Voronoï et la triangulation de Delaunay (voir figure 1).

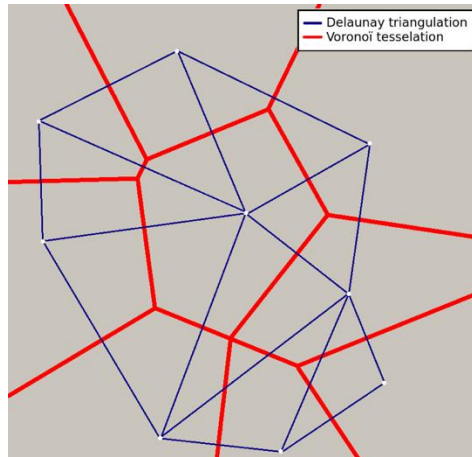


Figure 1 : Discrétisation spatiale, particules polygonales (rouge) et réseau de poutres (bleu).

En deux dimensions, chaque particule a trois degrés de liberté (deux en translation et un en rotation). La cohésion du matériau est définie via le réseau de poutres d'Euler-Bernoulli qui relie les particules deux-à-deux (voir figure 2).

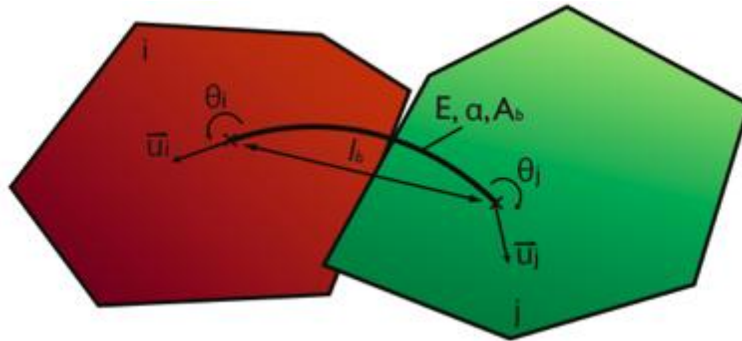


Figure 2 : Deux particules rigides reliées par une poutre déformée (Vassaux et al., 2016)

Afin de représenter la rupture du milieu, un critère de rupture fragile portant sur l'élongation et la courbure de la poutre est défini (voir figure 3). Une fois ce critère atteint, la poutre casse et la cohésion entre les deux particules est perdue. L'interaction entre les deux particules est ensuite régie par une loi de contact avec frottement de Coulomb qui permettra de représenter correctement la refermeture et le glissement des fissures.

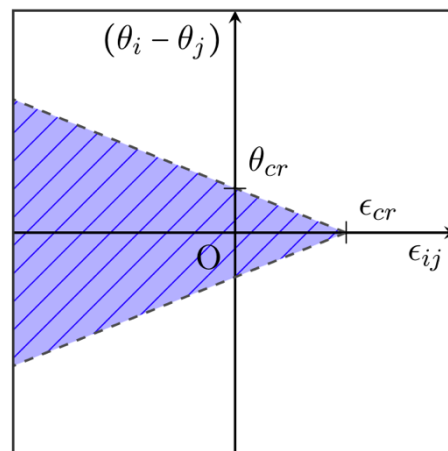


Figure 3 : Critère de rupture d'une poutre (Vassaux et al., 2016)

### 2.3 Du continu vers le discret

La déformation de retrait est transférée de la simulation de séchage continue vers la simulation de fissuration discrète en affectant à chaque particule un déplacement de retrait équivalent. Celui-ci est évalué en considérant que chaque poutre du modèle discret subit une déformation longitudinale équivalente à la déformation de dessiccation. L'équation d'équilibre discrète à résoudre devient donc :

$$\underline{\underline{K}}(\underline{u} - \underline{u}_{sh}) = \underline{f}_{ext} \Rightarrow \underline{\underline{K}} \underline{u} = \underline{f}_{ext} + \underline{\underline{K}} \underline{u}_{sh} \quad (4)$$

Le mécanisme de séchage est donc pris en compte dans la simulation discrète de manière découplée. Cela revient à supposer que chaque poutre du système est chargée mécaniquement par un effort axial, proportionnel à la déformation de retrait de dessiccation (Luković et al., 2016).

### 3. CAMPAGNE EXPERIMENTALE

Afin de valider l'approche numérique proposée, les résultats des simulations sont comparés aux données expérimentales issues de (Soleilhet, 2018).



Figure 4 : Éprouvettes séchées (à gauche) et humides (à droite) d'après (Soleilhet, 2018)

Plusieurs éprouvettes parallélépipédiques de dimension 10x10x84 cm en béton de formulation type VeRCoRs sont coulées. Une moitié est ensuite conservée pendant 70 jours dans une salle où la température et l'humidité sont contrôlées (25°C et 30%HR respectivement) alors que l'autre moitié est conservée dans l'eau à la même température pour comparaison (voir figure 4). Une partie des éprouvettes (séchées et humides) sont ensuite entaillées. Des essais de flexion trois points sont finalement réalisés sur ces éprouvettes.

### 4. SIMULATIONS ET RESULTATS

La procédure pour identifier les paramètres du modèle de séchage et du modèle de retrait est présentée dans (Soleilhet, 2018). Ensuite, le modèle particulaire-lattice est identifié à partir des essais mécaniques sur les éprouvettes humides suivant la procédure proposée par (Vassaux et al., 2016). Les paramètres de ce modèle discret ne sont pas ré-identifiés sur les éprouvettes séchées. Ces derniers résultats sont donc prédictifs en terme d'impact sur la raideur, l'effort au pic et le faciès de fissuration.

## 4.1 Impact du retrait de séchage

Au cours du séchage, un gradient hydrique en raison de la différence d'humidité entre le matériau et l'environnement. Ce gradient hydrique entraîne une différence de retrait de dessiccation entre le cœur du spécimen et la surface. Des contraintes de compression apparaissent au cœur de l'éprouvette alors que la surface subit des contraintes de traction. En raison de la faible résistance à la traction du béton, celui-ci se fissure. La figure 5 présente un faciès de fissuration discret suite au séchage de l'éprouvette pendant 70 jours. On remarque plusieurs fissures s'initiant à la surface du spécimen de manière aléatoire de manière orthogonale à celle-ci.

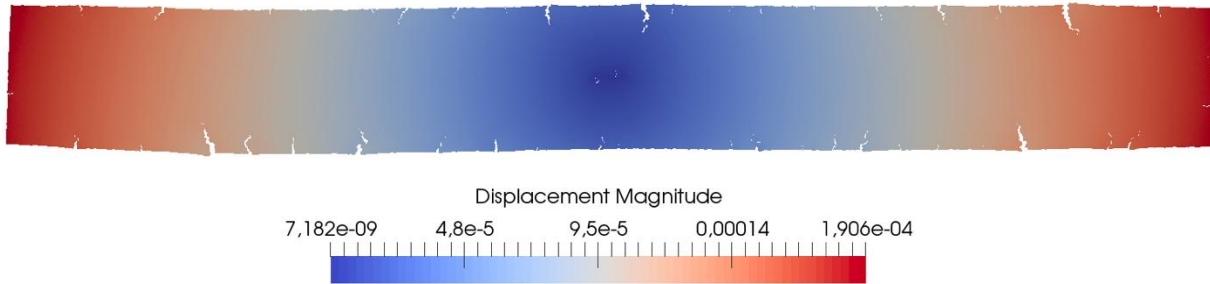


Figure 5 : Déformée et faciès de fissuration discret après 70j de séchage (x400)

Pour comparaison, le champ d'endommagement obtenu pour une simulation éléments finis avec le modèle de Mazars sous Cast3m est présenté sur la figure 6. Les frontières de l'éprouvettes sont totalement endommagées de manière diffuse. Cette représentation de la fissuration est peu réaliste.

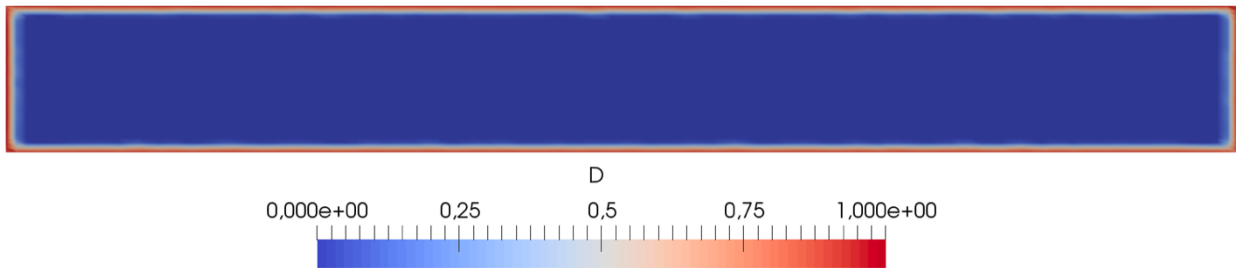


Figure 6 : Champ d'endommagement continu après 70j de séchage

## 4.2 Comportement mécanique

Dans cette partie, l'impact du séchage sur le comportement mécanique de la poutre est évalué via un essai de flexion trois points. Pour chaque cas (séché/humide, entaillé/non-entaillé), les courbes force-flèches expérimentales sont comparées aux courbes numériques. Ces dernières sont moyennées sur un grand nombre de simulations car le modèle discret n'est pas déterministe.

### 4.2.1 Éprouvettes humides

Comme mentionné précédemment, le modèle discret est identifié de manière à retrouver les résultats en flexion trois points des éprouvettes humides. On considère ainsi que les éprouvettes conservées dans l'eau sont des éprouvettes témoins ayant subies les mêmes transformations physiques et chimiques que les éprouvettes séchées en dehors du séchage en tant que tel.



L'essai de flexion trois points numérique est appliqué sur les éprouvettes saines c'est-à-dire sans déformation ou fissuration initiale.

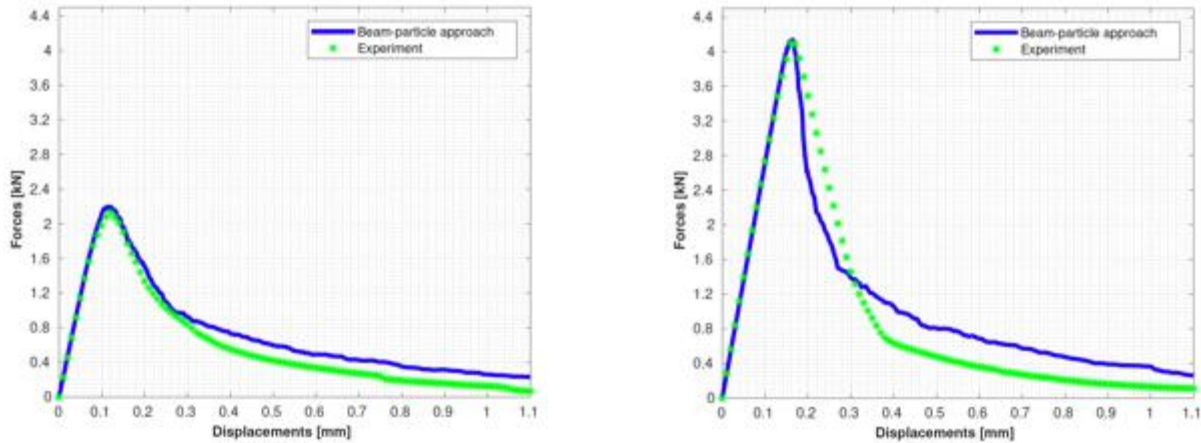


Figure 7 : Courbe force-flèche des éprouvettes humides entaillées (gauche) et non-entaillées (droite)

On observe sur la figure 7 que les paramètres matériaux sont correctement identifiés. La raideur initiale, le pic en effort et la valeur du déplacement au pic sont capturés. La partie post-pic de la courbe est aussi globalement reproduite. L'écart dans la partie post-pic pour les éprouvettes non-entaillées peut être dû à une propagation rapide et instable de la fissure juste après le pic.

#### 4.2.2 Éprouvettes séchées

Dans le cas des éprouvettes séchées, la simulation de flexion trois points est réalisée sur des éprouvettes dont la déformation initiale et la fissuration initiale est extraite du calcul de séchage. Cet état initial numérique impacte fortement le comportement mécanique dans le cas des éprouvettes non-entaillées contrairement aux éprouvettes entaillées (figure 8). La faible baisse de raideur induite par le retrait de dessiccation est correctement reproduite. Ceci est lié au fait que le contact est pris en compte dans le modèle discret et il y a une reprise de raideur au niveau des fissures qui se referment sur la fibre supérieure. En revanche, la baisse de l'effort au pic est conséquemment surestimée dans le cas non-entaillé.

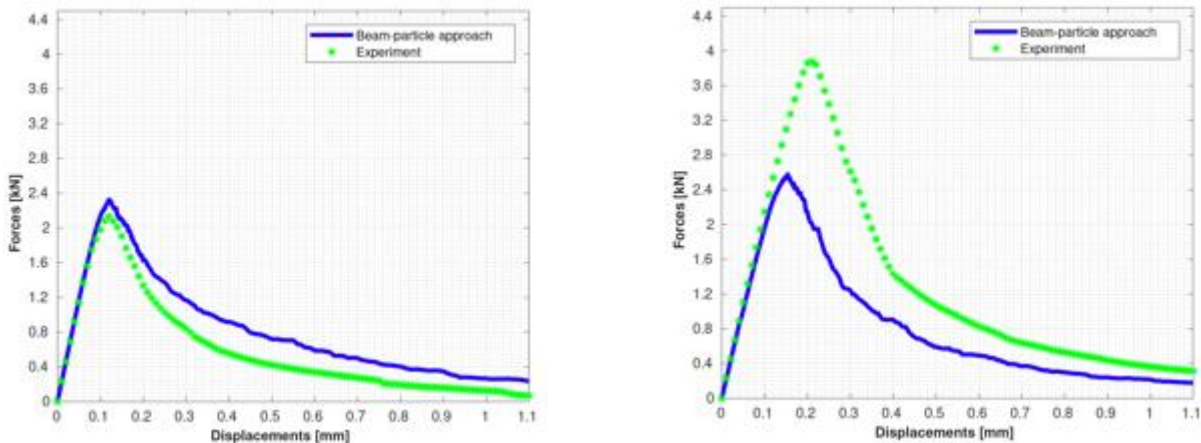


Figure 7 : Courbe force-flèche des éprouvettes séchées entaillées (gauche) et non-entaillées (droite)

On remarque sur la figure 8 que les fissures initiales liées au séchage peuvent jouer un rôle d'entaille et ainsi fragiliser la poutre. On note que la fissure mécanique ne s'initie pas pour autant systématiquement sur une fissure de séchage.

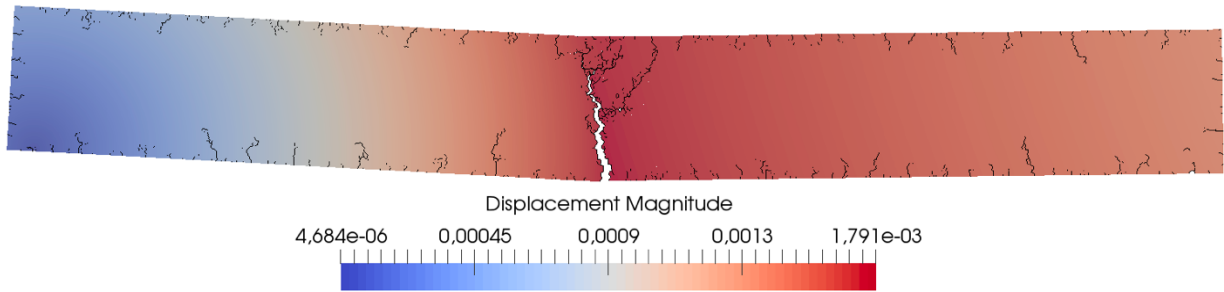


Figure 8 : Déformée et faciès de fissuration discret après 70j de séchage puis flexion (x8)

Dans le cas où une entaille était déjà présente comme sur la figure 9, les fissures initiales ne sont pas sources de localisation pour la fissure mécanique car celles-ci sont moins longues que l'entaille. On rappelle que l'entaille a été créée après le séchage. Ainsi, aucune fissure ne se produit au niveau du front de l'entaille.

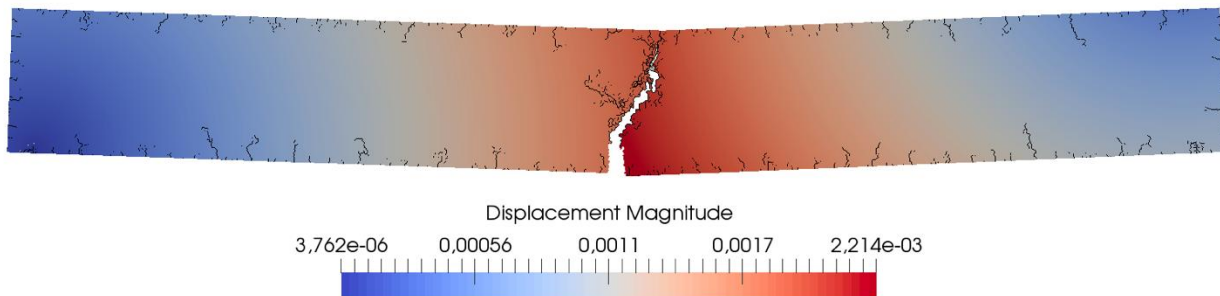


Figure 9 : Déformée et faciès de fissuration discret après 70j de séchage, entaillage, puis flexion (x8)

## 5. CONCLUSION

L'influence du séchage sur la déformée, la fissuration et les caractéristiques mécaniques d'une éprouvette en béton a été analysée à l'aide d'une modélisation association éléments finis et éléments discrets. On peut observer l'importance d'une modélisation explicite des discontinuités qui permet de localiser les fissures. L'impact du séchage est surestimé dans l'étude numérique d'après la comparaison avec les résultats expérimentaux. Les phénomènes de fluage et de capillarité n'ont pas été pris en compte et il a été observée lors d'une étude avec un modèle continu d'endommagement qu'ils avaient une forte influence sur l'effort au pic en flexion (Soleilhet, 2018). La prise en compte de ces phénomènes est donc une perspective à court terme de ce travail. Une étude numérique 3D serait aussi intéressante pour mieux capturer le faciès de fissuration après séchage sous forme de faïençage.

## REFERENCES

- Bisschop J., van Mier J.G.M., How to study drying shrinkage microcracking in cement-based materials using optical and scanning electron microscopy, *Cement and Concrete Research*, 32: 279-287, 2002.  
 Carlson R.W., Drying shrinkage of large concrete members, *International Concrete Abstracts Portal*, 33: 327-336, 1937.



- Hilaire A., Étude des déformations différées des bétons en compression et en traction, du jeune au long terme: application aux enceintes de confinement, *Thèse de doctorat de l'École normale supérieure de Cachan*, France, 2014.
- Luković M., Šavija B., Schlangen E., Ye G., van Breugel K., A 3D lattice modelling study of drying shrinkage damage in concrete repair systems, *Materials*, 9(7) : 575, 2016.
- Oliver-Leblond C., Delaplace A., Ragueneau F., Richard B., Non-intrusive global/local analysis for the study of fine cracking. *Int. J. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 37(8): 973-992, 2013.
- Sicard V., François R., Ringot E., Pons G., Influence of creep and shrinkage on cracking in high strength concrete. *Cement and Concrete Research*, 22: 159-168, 1992.
- Soleilhet F., Benboudjema F., Gatuingt F., Jourdain X., Experimental and numerical investigation of drying effects on concrete's mechanical properties, *International RILEM Conference on Materials, Systems and Structures in Civil Engineering Conference segment on Service life of cement-based materials and structures*, Lyngby, Danemark, 2016.
- Soleilhet F., Étude expérimentale et numérique des matériaux cimentaires sous sollicitations hydro-mécaniques, *Thèse de doctorat de l'École normale supérieure Paris-Saclay*, France, 2018.
- Thierry M., Baroghel-Bouny V., Bourneton N., Villain G., Stéfani C., Modélisation du séchage des bétons: analyse des différents modes de transfert hydrique. *Revue européenne de génie civil*, 11(5): 541-577, 2007.
- Vassaux M., Oliver-Leblond C., Richard B., Ragueneau F., Beam-particle approach to model cracking and energy dissipation in concrete: Identification strategy and validation. *Cement and Concrete Composites*, 70: 1-14, 2016.
- Yurtdas I., Peng H., Burlion N., Skoczylas F., Influences of water by cement ratio on mechanical properties of mortars submitted to drying, *Cement and Concrete Composites*, 36: 1286-1293, 2006.