

Liège, Belgique
7-8 Novembre 2018

ÉVALUATION DE LA SENSIBILITÉ À LA FISSURATION DES BÉTONS PROJETÉS AU JEUNE ÂGE

MENU Bruce^A, JOLIN Marc^A, BISSONNETTE Benoit^A, MOLEZ Laurent^B

A Centre de recherche sur les infrastructures en béton, Université Laval, Québec, Canada

B Laboratoire de Génie civil et Génie mécanique, INSA, 1065, Rennes, France

Résumé : Le béton projeté est une technique de mise en place largement utilisée pour la réhabilitation, la réalisation des travaux miniers et souterrains ainsi que pour les réparations. L'un des principaux avantages du béton projeté est sa capacité à couvrir de grandes surfaces sans coffrage. Cependant, cela peut entraîner une grande surface de béton projeté frais non protégé ; l'évaporation de l'eau de surface peut rapidement conduire à un retrait différentiel à travers la couche de béton projeté relativement mince qui peut mener à la fissuration au jeune âge lorsqu'il est soumis aux effets du séchage. Le potentiel de fissuration dépend en réalité du retrait, de l'évolution des contraintes de traction et de la relaxation des contraintes. L'objectif de ce projet de recherche est de développer des bétons qui auront une tendance à la fissuration significativement réduite. Le programme expérimental comporte l'étude du retrait libre et de la fissuration par retrait empêché en laboratoire et sous conditions contrôlées basée sur des essais à l'anneau. Exploitant les résultats recueillis, une approche croisée expérimentale et numérique est développée pour estimer la sensibilité à la fissuration des bétons en fonction de leurs propriétés individuelles. Ceci permettra une analyse plus poussée pour expliquer les tendances observées. Les résultats démontrent entre autres que la sensibilité à la fissuration dépend du rapport volume/surface exposé au séchage. Ainsi, les résultats démontrent que la diminution du rapport eau/ciment augmente le risque de fissuration par retrait. Ce phénomène s'explique par le fait que le retrait endogène se développe plus rapidement et est plus important pour un rapport eau/ciment plus faible.

Mots-clés : béton projeté, retrait, fissuration retrait empêché, essai à l'anneau.

1 INTRODUCTION

Le béton projeté est un moyen rapide de mise en œuvre du béton par projection à grande vitesse sur une surface au moyen d'air comprimé, sans coffrage. Il y a deux procédés utilisés pour faire du béton projeté, le procédé par voie sèche et celui par voie humide (ACI-506R-16, 2016). Vu les nombreux avantages que présente le béton projeté, de nombreuses constructions et réparations sont réalisées avec ce type de matériau. Le béton projeté par voie sèche est particulièrement bien adapté pour les réparations. Bien que le béton projeté soit un matériau généralement très performant, il existe encore des phénomènes de retrait et fissuration qui sont mal compris par les chercheurs et les ingénieurs en pratique. En fait, les bétons projetés ont généralement des potentiels de retrait plus importants que les bétons conventionnels. Le retrait est la principale cause de fissuration non structurale des ouvrages en béton projeté. Le béton a tendance à subir un retrait lors de l'hydratation du ciment. Lorsque le béton se déforme en condition empêchée, ce retrait génère des contraintes internes importantes qui peuvent mener à la fissuration du matériau. Par exemple le retrait du matériau de réparation est empêché par le substrat (Modjabi-Sangnier et al., 2008). Toutefois, peu d'informations sont disponibles dans la littérature concernant le retrait et fissuration du béton projeté. Une bonne maîtrise du comportement au jeune âge des bétons projetés est l'assurance performance à long terme de ces matériaux. Cette étude vise donc à améliorer les connaissances sur la fissuration par des études expérimentales et numériques. Ces résultats serviront à tous les domaines utilisant le béton projeté afin de produire des bétons qui fissurent moins.

2 CAMPAGNE EXPÉRIMENTALE

2.1 Composition des mélanges

Ce travail porte sur la fissuration des bétons projetés soumis à un chargement hygrothermique. Six (6) mélanges de bétons projetés ont été testés dans le cadre de ce projet. Les proportions des différents constituants entrant dans la formulation de béton projeté sont présentées dans les Tableau 1 et 2. Le mélange M4 correspond au mélange M2 avec une partie du ciment remplacée par de la fumée de silice. Le ciment utilisé est de type Portland GU (utilisation générale). Les mélanges ont été mis en place grâce à deux techniques différentes. Deux mélanges ont été coulés sur place alors que quatre mélanges ont été projetés par voie sèche dans la salle de projection du CRIB de l'Université Laval, Québec, Canada. Les mélanges ont été ensachés par la compagnie King Packaged Materials à Blainville, au Québec. Dans le cas de mélanges projetés, les matériaux secs, pré-ensachés et livrés au laboratoire, sont introduits directement dans la benne de l'appareil de projection. L'air comprimé amène les matériaux à la lance, où l'on introduit l'eau, et le béton est projeté directement dans les moules.

Mélanges	Ciment GU (%)	Pierre (%)	Sable (%)	Fumée de silice (%)	Eau/liant (kg/kg)
C1	19,9	15,0	64,0	0,0	0,45
C2	19,9	15,0	64,0	0,0	0,60

Tableau 1 Compositions des mélanges coulés en place

Mélanges	Ciment GU (%)	Pierre (%)	Sable (%)	Fumée de silice (%)	Eau/liant (kg/kg)
M1	16,0	16,0	68,0	0,0	0,48
M2	21,0	24,0	55,0	0,0	0,40
M3	25,0	14,0	61,0	0,0	0,32
M4	19,4	24,0	55,0	1,6	0,55

Tableau 2 Compositions des mélanges projetés par voie sèche

2.2 Procédure des essais

Les éprouvettes destinées aux essais de résistance en compression, de résistance à la traction et de module élastique ont été carottées dans les panneaux de caractérisation. L'essai a été mené selon les normes ASTM C39, C496 et C469, respectivement à des échéances de 28 jours. La cure des éprouvettes s'est faite dans une chambre à 100% d'humidité relative (H.R.). La résistance en compression à 28 jours de ces bétons est de 37.4 MPa, 33.4 MPa, 35.6 MPa, 48.8 MPa, 54.4 MPa, 49.2 MPa, respectivement pour les mélanges C1, C2, M1, M2, M3, et M4.

2.2.1 Essais de retrait libre

Les essais de retrait libre sont réalisés au moyen de prismes et d'anneaux. L'essai de retrait sur les prismes a été réalisé conformément à la norme ASTM C157 sur des éprouvettes coulées. En revanche, l'essai de retrait libre annulaire est basé sur la norme AASHTO T334-08 à la différence que l'anneau interne a été remplacé par un cœur en polystyrène de même dimension (Menu et al., 2017). La cure de ces éprouvettes s'est faite avec de la jute et des toiles de polyéthylène maintenues humides. Les surfaces supérieures et inférieures des anneaux ont été scellées à l'aide de papier d'aluminium autocollant afin de limiter le séchage selon l'axe circonférentiel. Aussitôt que le séchage a débuté, des plots ont été appliqués sur la surface supérieure de l'anneau du béton pour la mesure des variations volumétriques. Les retraits des éprouvettes prismatiques et annulaires ont été pris régulièrement, ce qui a permis de tracer les courbes de retrait avec une très bonne précision. Pendant toute la durée de l'essai, les éprouvettes ont été conservées dans une chambre contrôlée (température de 21 ± 1.7 °C et humidité relative à 50 ± 4 %). Les éprouvettes prismatiques et annulaires ont des rapports surface/volume (S_d/V) exposés au séchage de 0.0604 mm^{-1} et 0.0158 mm^{-1} respectivement.

2.2.2 Essais de retrait restreint

Parallèlement, les essais de retrait restreint sont effectués au moyen d'une éprouvette annulaire selon la norme AASHTO T334-08 (Girard, 2013). Deux éprouvettes annulaires ont été réalisées pour chacun des mélanges testés. L'anneau a été démoulé au bout de 24 heures et recouvert de jutes humides et de toiles de polyéthylène pour 2 jours supplémentaires. Une fois leur cure humide terminée, les surfaces supérieures des anneaux des bétons sont scellées par une couche d'aluminium autocollant et la surface circonférentielle est exposée au séchage dans une chambre contrôlée (température de 21 ± 1.7 °C et humidité relative à 50 ± 4 %). La mesure du retrait a été effectuée à l'aide de jauges de déformation posées à mi-hauteur de la face intérieure de l'anneau d'acier. L'acquisition automatique des données se fait toutes les 5 minutes. L'analyse de retrait empêché conjointement celle du retrait libre permet de déduire le fluage au cours de séchage. L'extraction du fluage au cours du retrait restreint est basée sur l'hypothèse de la décomposition additive des déformations :

$$[1] \quad \varepsilon_{tot}(t) = \varepsilon_s(t) + \varepsilon_e(t) + \varepsilon_f(t)$$

où ε_{tot} est la déformation totale, ε_s est la déformation due au séchage, ε_e est la déformation élastique et ε_f est le fluage

2.3 Modélisation numérique

Dans le béton, plusieurs phénomènes se produisent simultanément au jeune âge. Ces phénomènes (hydratation, retrait endogène, fluage ...) sont pris en compte dans le cadre de cette étude par le modèle proposé par Molez (Molez, 2003). Nous avons intégré les phénomènes physiques des bétons dans un code aux éléments finis existant (CAST3M, code du CEA). Dans ce modèle, l'évolution de la résistance en compression est liée à l'avancement de la réaction hydratation. Selon (Ulm, 1999), le taux d'hydratation peut être déterminé à partir de l'évolution des résistances mécaniques à l'aide de la relation suivante :

$$[2] \quad \xi(t) = \xi_0 + (1 - \xi_0) \frac{f_c(t)}{f_c(t_\infty)}$$

où ξ_0 est le seuil de percolation tel que défini par Acker (Acker, 1987), $f_c(t)$ est la résistance au temps t et $f_c(t_\infty)$ est la résistance à un temps infini. L'évolution des propriétés mécaniques due à la structuration est prise en compte, par la suite, par une fonction de lissage du type proposé par Molez (Molez, 2003):

$$[3] \quad f_c(t) = f_c(t_\infty) \frac{t^{m_1}}{m_2 + t^{m_1}}$$

où m_1 et m_2 sont des paramètres de forme déterminés à partir des résultats expérimentaux en Figure 1.

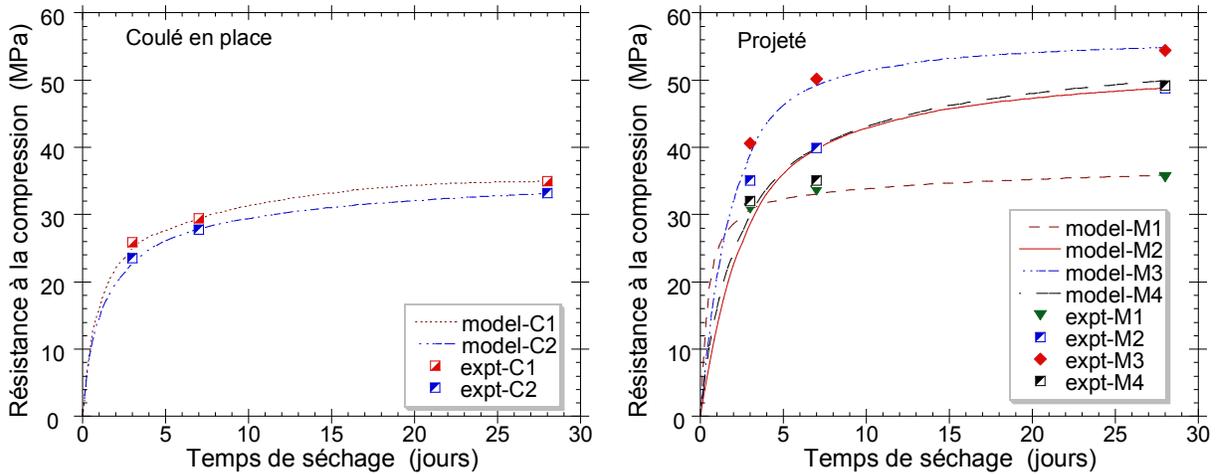


Figure 1: Évolution de la résistance à la compression

Le retrait causé par séchage est un phénomène donnant lieu au déséquilibre hygrométrique dans le béton et son environnement extérieur. En effet, le facteur initiant le séchage du béton est le gradient d'humidité relative existant entre l'environnement (extérieur) et le béton (intérieur) (Benboudjema, 2002). Ce déséquilibre se traduit par le transport de l'eau et la perte de masse dans le béton. La modélisation du phénomène de séchage peut être alors faite à l'aide des équations de conservation de la masse. L'équation de conservation de la masse, exprimée en fonction de la teneur en eau massique w , permet d'écrire localement (voir Molez, 2003) :

$$[4] \quad \frac{\partial w}{\partial t} = -\text{div}(J_v + J_l) + \frac{\partial w_{ad}}{\partial t}$$

Les termes J_v et J_l représentent le flux d'eau liquide et vapeur, et le terme $\partial w_{ad}/\partial t$ représente la variation de teneur en eau due à l'auto-dessiccation lors de la progression des réactions d'hydratation. Ensuite, pour les H.R. comprises entre 0,40 et 0,95, le séchage peut être modélisé plus simplement à l'aide d'une seule équation de diffusion :

$$[5] \quad \frac{\partial h_r}{\partial t} = \text{div}(D(h_r)\underline{\text{grad}} h_r)$$

où $D(h_r)$ est le coefficient de diffusion de l'eau. Nous utilisons le modèle de Bažant (Bažant et al., 1971).

$$[6] \quad D(h_r) = D_0 \left(a + \frac{1-a}{1 + \left(\frac{1-h_r}{1-h_c}\right)^n} \right)$$

où D_0 , a , n et h_c sont des paramètres à déterminer par l'évolution expérimentale de la perte en masse. La variation de D_0 en fonction de la maturation du béton est prise en compte par l'inverse de l'évolution de la résistance en compression (Molez, 2003).

$$[7] \quad D_0(t) = D_0(t_\infty) \frac{m_2 + t^{m_1}}{t^{m_1}}$$

Les coefficients m_1 et m_2 seront déterminés à partir de l'équation (3). Les conditions aux limites sur les surfaces séchantes sont du type convectif. Le flux d'eau à la surface d'échange J_s (en $\text{lm}^{-2}\text{s}^{-1}$) est déterminé alors à partir de la relation suivante :

$$[8] \quad J_s = \beta(h_r^s - h_r^a)$$

où β est le coefficient d'échange par convection (fixe à 5 mm/jours), h_r^s est la teneur en eau sur la surface, et h_r^a est la teneur en eau à l'humidité relative environnante. Le retrait provoqué par les variations d'humidité relative est donc défini en fonction du coefficient de dilatation hydrique (α_h) comme :

$$[9] \quad \underline{\underline{\varepsilon_{ds}}} = \alpha_h \underline{\underline{h_r}}$$

Le comportement viscoélastique est modélisé par un modèle rhéologique de Kelvin. La décomposition en série de Dirichlet permet d'éviter le stockage de l'historique de chargement (voir Molez, 2003). En ce qui concerne le comportement du béton à la fissuration, le critère en déformation de Mazars (Mazars, 1984) sera utilisé. La relation entre la contrainte σ , la variable d'endommagement D , la déformation totale ε_{tot} , le retrait endogène ε_{end} , le retrait de séchage ε_s , la déformation élastique ε_e , et le fluage ε_f , sont alors donnés par la relation suivante :

$$[10] \quad \sigma = (1 - D)\bar{\sigma} = (1 - D)\mathbf{E}\dot{\varepsilon}_e = (1 - D)\mathbf{E}(\dot{\varepsilon}_{tot} - \dot{\varepsilon}_f - \dot{\varepsilon}_s - \dot{\varepsilon}_{end})$$

La variable d'endommagement, D , est comprise entre 0 (matériau sain) et 1 (matériau rompu), voir Figure 6. Les paramètres du modèle sont calibrés par la suite sur des essais expérimentaux de caractérisation. On notera que pour des raisons de symétrie, seule le ¼ l'éprouvette a été maillé pour les simulations pour reproduire l'essai complet. Le paramètre α_h est identifié à partir de la courbe expérimentale du retrait de séchage. Les simulations sont menées en imposant une H.R. extérieure égale à 50 %.

3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Retrait libre: ASTM C157 et annulaire

Les comparaisons des résultats obtenus numériquement et les résultats expérimentaux sont présentées dans la Figure 2 et 3. La Figure 2 présente le retrait mesuré sur des prismes. La Figure 3 présente le retrait mesure sur les anneaux. On constate une bonne concordance entre les courbes expérimentales et numériques pour les différents mélanges de béton étudiés, à la fois à court terme et à long terme. La comparaison entre les résultats expérimentaux et les simulations numériques met en évidence que les cinétiques du processus de séchage sont différents. En effet, le modèle proposé permet de reproduire l'effet de la cinétique de séchage et déformation identique aux résultats expérimentaux, quel que soit le mélange (coulé ou projeté) ou la géométrie d'éprouvette. Comme on s'y attendait, le mélange à haute teneur en ciment (M3) a subi les plus importantes déformations alors que le mélange à faible teneur en ciment (M1) a subi les plus faibles. Ensuite, on constate que le mélanges avec la fume de silice (M4) a développé des déformations nettement plus élevées que le mélange sans fumée de silice (M2). Les variations du rapport eau/liant amplifient ces variations.

En comparant les Figure 2 et 3, on constate que pour un même mélange (C1 ou C2), le retrait de séchage de ces bétons dépend de la géométrie des éprouvettes et, par conséquent, le S_d/V exposé au séchage. On constate que des valeurs plus élevées de retrait étaient enregistrées sur des éprouvettes prismatiques

comparées aux éprouvettes de géométrie annulaires. En fait, plus le rapport surface/volume est grand, plus le taux de séchage est important ce qui mène à un retrait important.

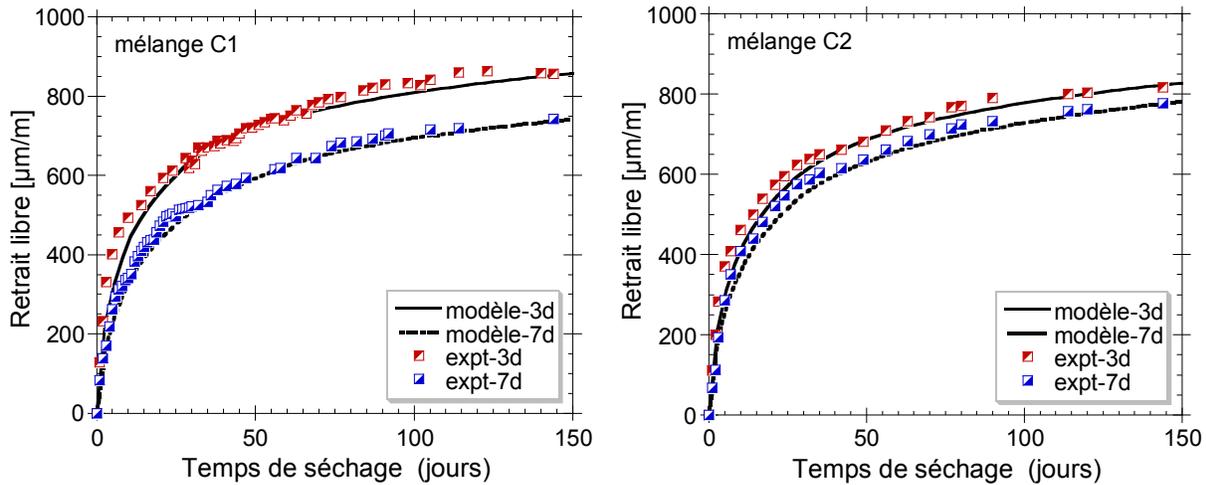


Figure 2 Évolution du retrait sur prisme après 3 et 7 jours de mûrissement à 100 % H.R. ($t_0 = 3$ d et 7 d) : Comparaison des résultats expérimentaux et de la modélisation - Cas du béton coulé en place

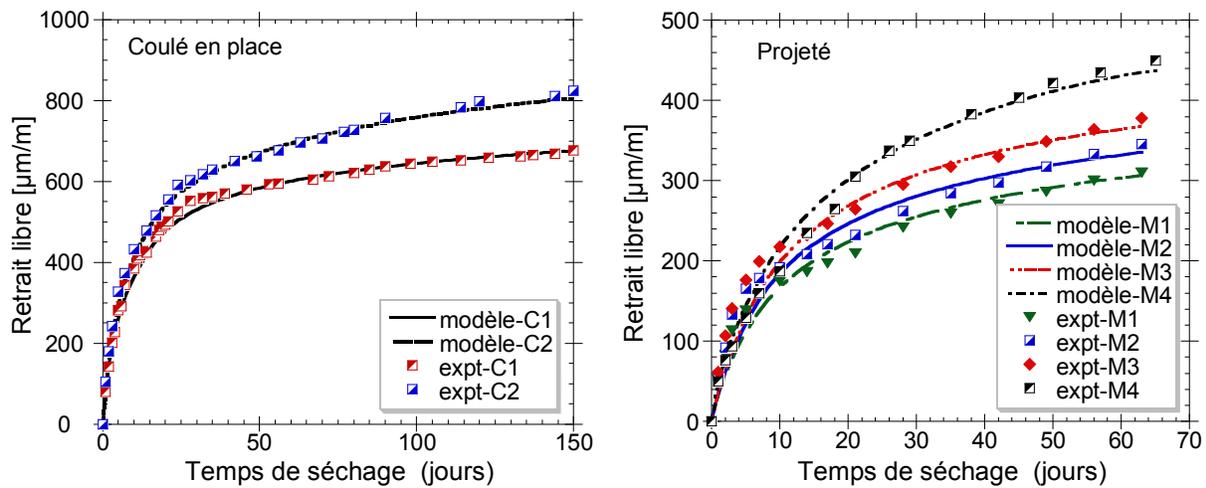


Figure 3 Évolution du retrait sur anneau après 3 jours de mûrissement à 100 % H.R. : comparaison des résultats expérimentaux et de la modélisation - Cas du béton coulé en place et projeté

3.2 Sensibilité à la fissuration du béton projeté

Les Figure 4 et 5 donnent les évolutions expérimentales et simulées de la contrainte moyenne dans le cas de l'essai de retrait restreint annulaire. La Figure 4 présente les graphiques pour les mélanges coulé en place et la Figure 5 présente les graphiques pour les mélanges projeté par voie sèche. On observe à nouveau que le modèle permet de reproduire la cinétique observée expérimentalement. On voit sur cette figure que l'évolution des contraintes circonférentielles et le temps à la fissuration sont correctement décrits, en utilisant les paramètres identifiés sur l'essai expérimental. Ainsi, le modèle est capable de reproduire correctement la dépendance à la cinétique de séchage, quel que soit le mélange, la géométrie ou la méthode de mise en place. En effet, plus la vitesse de séchage est importante, moins le matériau a de temps disponible pour développer sa résistance et fluer. Par

conséquent, la sensibilité à la fissuration est plus élevée. On peut observer que la sensibilité à la fissuration au jeune âge croît avec l'augmentation de la quantité de ciment. En fait, une diminution de la teneur en ciment réduit le taux d'évolution de contrainte moyenne. On constate également que l'ajout de fumée de silice en remplacement partiel du ciment se traduit par l'augmentation du potentiel de fissuration. Ainsi, les résultats démontrent que pour les mélanges sans fumée de silice, la diminution du rapport eau/ciment augmente le risque de fissuration par retrait. Ce phénomène s'explique par le fait que le retrait endogène se développe plus rapidement et est plus important pour un rapport eau/ciment plus faible.

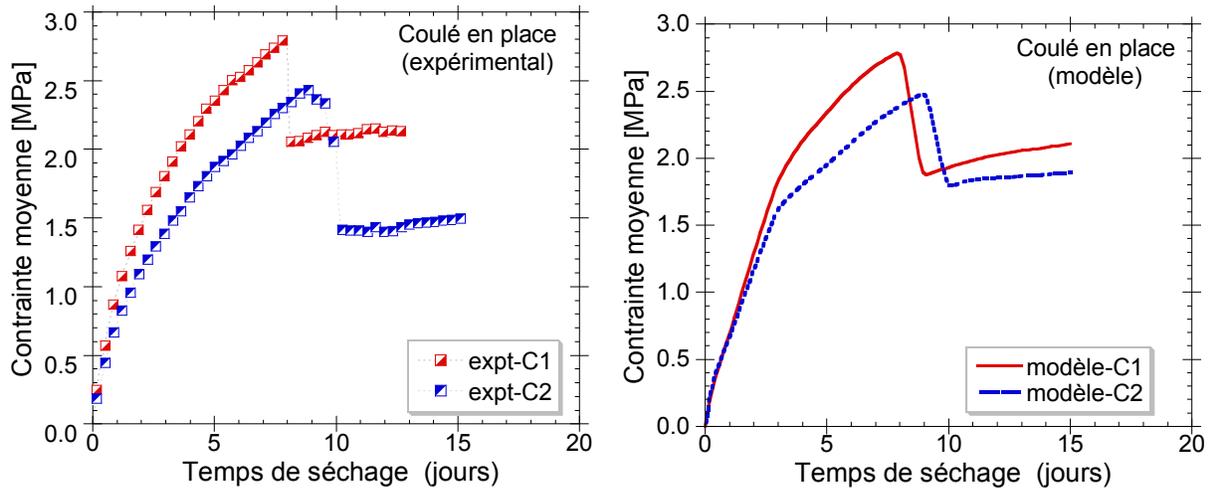


Figure 4 Évolution de la contrainte moyenne après 3 jours de mûrissement à 100 % H.R. : comparaison des résultats expérimentaux et de la modélisation - Cas du béton coulé en place

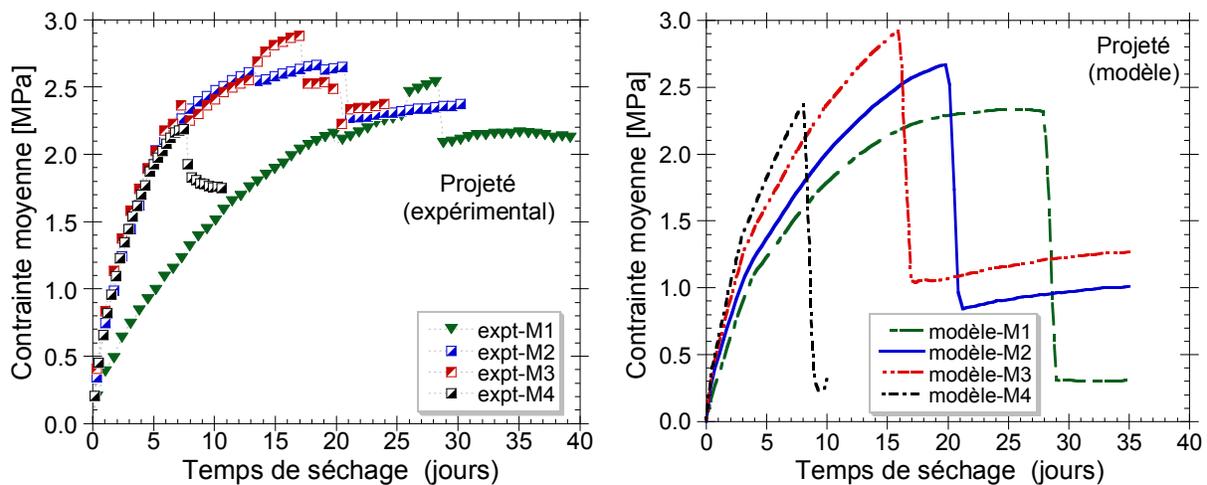


Figure 5 Évolution de la contrainte moyenne après 3 jours de mûrissement à 100 % H.R. : comparaison des résultats expérimentaux et de la modélisation - Cas du béton projeté par voie sèche

La fissuration observée expérimentalement et dans le modèle sont comparés à la Figure 6. On peut observer, en outre, que la fissure s'initie au bord extérieur et se propage vers le bord intérieur. On voit que la variable d'endommagement est plus importante au bord extérieur. En effet, le gradient d'humidité induit à cet endroit une concentration de contraintes de traction qui mènent à la fissuration du béton.

Le même phénomène est observé expérimentalement à l'aide d'une méthode d'émission acoustique par Hossain et Weiss (Hossain et al., 2004). Cela est conforme à l'idée que la contrainte de traction maximale se développe sur le bord extérieur dans l'anneau de béton en raison des gradients d'humidité (Menu et al., 2017). Il apparaît clairement sur la Figure 6 que la fissuration de retrait présente des zones d'endommagement distinctes entre 0 (matériau sain) et 1 (matériau rompu). Ceci signifie que la distribution des contraintes dans l'anneau n'est pas uniforme.

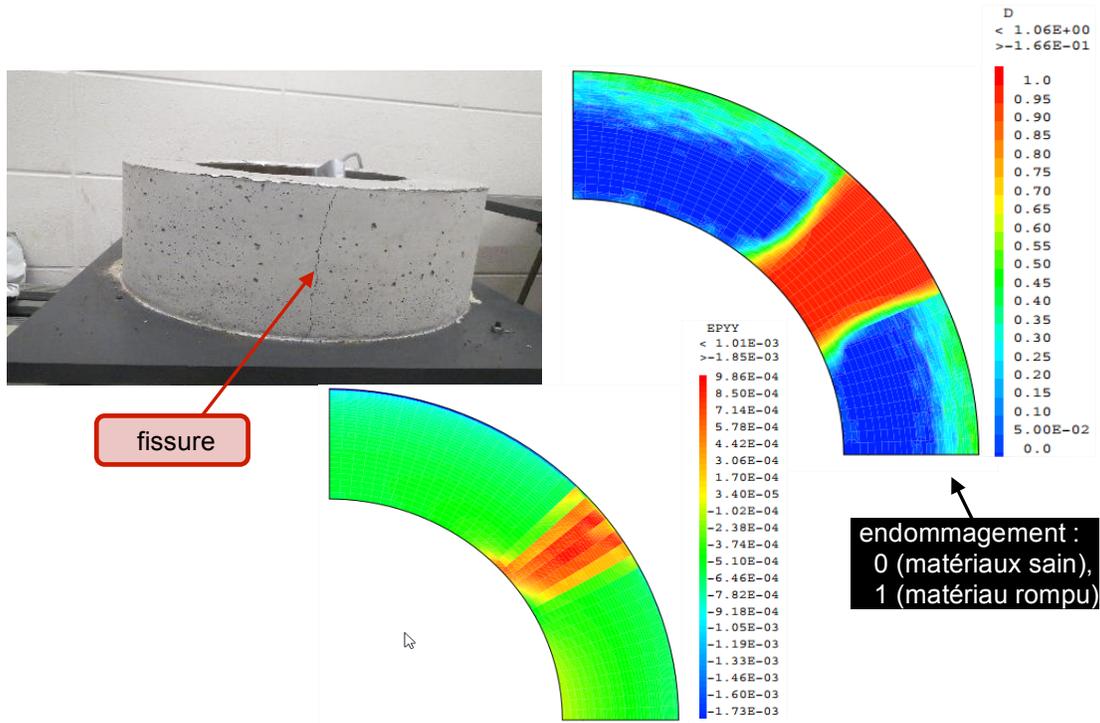


Figure 6: Patron des fissurations expérimental (a) et numérique (b) après 3 jours de cure

4 CONCLUSIONS

Cet article présente l'analyse des sensibilités à la fissuration des bétons projetés au jeune âge par une étude expérimentale et modélisation numérique. Globalement, les résultats obtenus démontrent que le retrait et le potentiel de fissuration des bétons projetés dépendent de leurs propriétés individuelles. Les résultats démontrent entre autres que le retrait dépend du rapport volume/surface exposé au séchage. Aussi, les résultats révèlent que la présence de fumée de silice augmente nettement le taux de retrait libre. On remarque que la sensibilité à la fissuration au jeune âge augmente avec l'augmentation de la quantité de ciment dans le mélange. On constate également que l'ajout de fumée de silice en remplacement partiel du ciment se traduit par la diminution de la résistance à la fissuration des bétons. Ainsi, on observe que pour les mélanges sans fumée de silice, le faible rapport eau/ciment augmente le risque de fissuration par retrait. Enfin, le modèle développé permet de faire un choix sélectif des matériaux de réparations moins vulnérables face à la fissuration. Dans ce modèle, seuls le retrait endogène, la perte de masse et les propriétés mécaniques doivent être connus. Ces résultats serviront à tous les domaines utilisant le béton projeté afin de produire des bétons plus robustes et résistant à la fissuration.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) et King Package Materials and Co. pour leur participation financière. Les auteurs remercient également Alexandre Pepin Beuset (étudiant à la maîtrise) pour les projections et soutiens techniques exceptionnels.

RÉFÉRENCES

- ACI-506R-16. (2016). Guide to shotcrete. *American Concrete Institute, Farmington Hills, USA*.
- Acker, P. (1987). The mechanical behavior of concrete: contributions of the physico-chemical approach. *These de doctorat, École nationale des ponts et chaussées*.
- Bazant, Z., & Najjar, L. (1971). Drying of concrete as a nonlinear diffusion problem. *Cement and Concrete Research*, 1(5), 461-473.
- Benboudjema, F. (2002). *Modélisation des déformations différées du béton sous sollicitations biaxiales. Application aux enceintes de confinement de bâtiments réacteurs des centrales nucléaires*. Université de Marne la Vallée.
- Girard, S. (2013). *Etude du bilan deformationnel des bétons projetés*. (Mémoire de Maîtrise), Université Laval.
- Hossain, A. B., & Weiss, J. (2004). Assessing residual stress development and stress relaxation in restrained concrete ring specimens. *Cement and concrete composites*, 26(5), 531-540.
- Mazars, J. (1984). Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non linéaire et à la rupture du béton de structure. Thèse de doctorat en sciences présentée à l'Université Pierre et Marie Curie-Paris 6.
- Menu, B., Jolin, M., & Bissonnette, B. (2017). Studies on the influence of drying shrinkage test procedure, specimen geometry, and boundary conditions on free shrinkage. *Advances in Materials Science and Engineering*, (2017), 9.
- Modjabi-Sangnier, F., Ghezal, A., Bissonnette, B., & Jolin, M. (2008). Réduction du potentiel de fissuration des bétons de réparation: approche quantitative de la notion de compatibilité.
- Molez, L. (2003). *Comportement des réparations structurales en béton: couplage des effets hydriques et mécaniques*. (These de doctorat), École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, France.
- Ulm, F.-J. (1999). Couplages thermo-chémomécaniques dans les bétons (un premier bilan). *Etudes et recherches des Laboratoires des ponts et chaussées. Série Ouvrages d'art*.