



HAL
open science

Analyse du risque de fissuration du béton au jeune âge au moyen d'un essai de retrait gêné

Agathe Bourchy, Boumediene Nedjar, Jean Michel Torrenti

► To cite this version:

Agathe Bourchy, Boumediene Nedjar, Jean Michel Torrenti. Analyse du risque de fissuration du béton au jeune âge au moyen d'un essai de retrait gêné. 25e Congrès Français de Mécanique, Association française de mécanique - AFM, Aug 2022, Nantes, France. 8 p. hal-04280075

HAL Id: hal-04280075

<https://hal.science/hal-04280075v1>

Submitted on 13 Nov 2023

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.

Analyse du risque de fissuration du béton au jeune âge au moyen d'un essai de retrait gêné

A. BOURCHY^a, B. NEDJAR^b, J.M. TORRENTI^c

a. Energy and Environment Directorate, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA, USA - agathe.bourchy@pnl.gov

b. Univ Gustave Eiffel, MAST/EMGCU – boumediene.nedjar@univ-eiffel.fr

c. Univ Gustave Eiffel, CEREMA, UMR MCD – jean-michel.torrenti@univ-eiffel.fr

Résumé :

Dans les structures massives en béton, au jeune âge, des déformations d'origine thermique et dues au retrait endogène du béton apparaissent. Si ces déformations sont gênées, elles peuvent créer dès le jeune âge une fissuration qui pourra affecter la durabilité à long terme. Dans cette étude, le risque de fissuration d'un béton au jeune âge est évalué au moyen d'un essai spécifique BTRing comprenant deux anneaux concentriques en Invar, le béton étant coulé entre ces deux anneaux. Ceux-ci, étant en Invar, se déforment très peu avec la température et gênent donc les déformations du béton créant des contraintes de compression lors de la montée en température et de traction lors du refroidissement. Ces anneaux sont chauffés afin de simuler pour le béton entre les anneaux une histoire de température d'une structure massive. L'analyse de l'essai BTRing permet de déduire l'évolution des contraintes dans le béton. Enfin, l'essai est comparé à une modélisation couplée thermo-chemo-mécanique intégrant le fluage du béton au jeune âge. La comparaison essai-expérience montre que si tous les paramètres du modèle sont correctement caractérisés l'estimation du risque de fissuration au jeune âge par la modélisation est possible.

Abstract :

In massive concrete structures, at early age, deformations of thermal origin and due to the autogenous shrinkage of the concrete appear. If these deformations are restrained, they can create cracking from a young age that can affect long-term durability. In this study, the risk of cracking of concrete at a young age is evaluated by means of a specific BTRing test comprising two concentric rings in Invar, the concrete being poured between these two rings. These, being in Invar, deform very little with temperature and therefore hinder the deformations of the concrete creating compressive stresses during the rise in temperature and tensile stresses during cooling. These rings are heated in order to simulate for the concrete between the rings a temperature history of a massive structure. The analysis of the BTRing test makes it possible to deduce the evolution of the stresses in the concrete. Finally, the test is compared to a coupled thermo-chemo-mechanical modeling integrating the creep of concrete at a young age. The test-experiment comparison shows that if all the parameters of the model are correctly characterized, the estimation of the risk of cracking at a young age by modeling is possible.

Mots clefs : béton, retrait gêné, jeune âge, fissuration

1 Introduction

Dans les structures massives en béton, au jeune âge, des déformations d'origine thermique et dues au retrait endogène du béton apparaissent. Si ces déformations sont gênées, elles peuvent créer dès le jeune âge une fissuration qui pourra affecter la durabilité à long terme. La prédiction du comportement au jeune âge fait intervenir plusieurs phénomènes de nature différente mais couplés et concomitants : la chaleur d'hydratation et le retrait endogène, la déformation thermique, l'évolution du module d'Young avec l'hydratation, du fluage si des contraintes sont générées parce que les déformations ne sont pas libres, de la fissuration éventuellement... La composition du béton influe de plus grandement sur ce comportement. A l'heure où se développent des bétons bas carbone, il est important de disposer d'un essai permettant de tester le comportement au jeune âge de ces bétons en mettant en jeu l'ensemble des phénomènes. Après avoir présenté notre essai à l'anneau BTRing, les résultats obtenus sur un béton témoin sont comparés avec un modèle couplé de béton au jeune âge.

2 L'essai BTRing

Il existe différents essais pour mesurer l'effet d'un retrait thermique gêné : l'essai peut être linéaire [1, 2] ou utiliser un ou des anneaux. Dans ce dernier cas, les anneaux peuvent être passifs ou actifs [3, 4, 5, 6]. L'essai développé ici reprend l'idée proposée par Schlitter et al. [4] où deux anneaux en invar (donc peu déformables sous l'effet de la température) gênent la déformation du béton qui subit une histoire de température correspondant à celle d'une pièce massive. Les anneaux sont en effet percés afin qu'une circulation d'eau à température pilotée par un bain thermostaté permette d'imposer une histoire de température donnée au béton compris entre les deux anneaux.

Lors de l'élévation de température l'anneau extérieur empêche les dilatations et des contraintes de compressions sont générées. Lors de la phase de refroidissement, au contraire, c'est l'anneau interne qui gêne les déformations et des contraintes de traction sont générées. L'intérêt de cet essai est qu'il permet de mettre en œuvre l'ensemble des phénomènes affectant le béton au jeune âge : déformation thermique, retrait endogène, fluage au jeune âge, évolution du module d'Young.

Les anneaux sont équipés de jauges de déformations afin de pouvoir estimer les contraintes dans le béton. L'essai constitue donc un compromis entre un retrait totalement gêné (anneaux très rigides) mais où on ne mesurerait pas de déformations et un retrait libre qui ne représenterait pas le phénomène étudié. La Figure 1 présente le principe de l'essai.

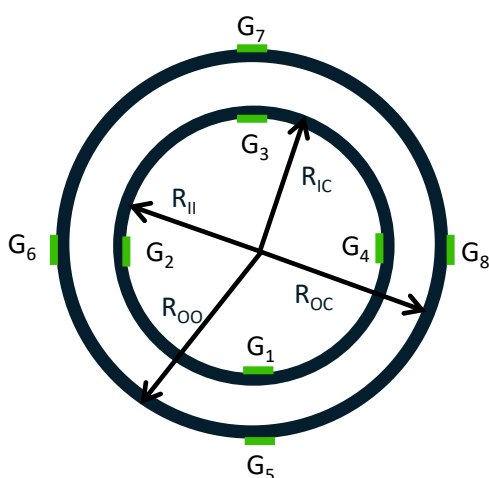


Figure 1: principe de l'essai BTRing avec position des jauges de déformation.

Les contraintes générées peuvent être estimées au moyen des équations (1) à (3) :

$$P_{in} = -\varepsilon_{in} \cdot E_{invar} \cdot \left(\frac{R_{IC}^2 - R_{II}^2}{2R_{IC}^2} \right) \quad (1)$$

$$P_{out} = \varepsilon_{out} \cdot E_{invar} \cdot \left(\frac{R_{OO}^2 - R_{OC}^2}{2R_{OC}^2} \right) \quad (2)$$

$$\sigma_{\theta}(R_{IC}) = P_{in} \cdot \left(\frac{R_{OC}^2 + R_{IC}^2}{R_{OC}^2 - R_{IC}^2} \right) - P_{out} \cdot \left(\frac{2R_{OC}^2}{R_{OC}^2 - R_{IC}^2} \right) \quad (3)$$

où ε_{in} et ε_{out} sont respectivement la déformation moyenne mesurée sur l'anneau interne (jauges G₁ à G₄) et l'anneau externe (G₅ to G₈), E_{invar} est le module d'Young de l'invar, P_{in} et P_{out} sont respectivement la pression sur l'anneau interne et externe et R_{II} , R_{IC} , R_{OC} , R_{OO} sont les rayons indiqués Figure 1 respectivement égaux à 140 mm, 165 mm, 203 mm et 222 mm. Les anneaux ont une hauteur de 72.6 mm et sont épais de 19 mm.

3 Le matériau testé et ses propriétés

3.1 Composition du béton

Le béton testé est le béton R1bis qui a été utilisé dans le laboratoire pour l'étude du risque de réaction sulfatique interne par Martin [7] et qui a une chaleur d'hydratation élevée. La Table 1 donne la composition de ce béton.

Table 1 : Composition du béton R1.

Béton	Ciment CEM I (kg.m ⁻³)	K ₂ O (kg.m ⁻³)	Eau (kg.m ⁻³)	Sable 0/4 (kg.m ⁻³)	Gravillons 4/8 (kg.m ⁻³)	Gravillons 8/12 (kg.m ⁻³)	E/C
R1bis	410	1.75	203	864	100	829	0.46

3.2 Chaleur d'hydratation

La chaleur d'hydratation du béton est mesurée au moyen d'un essai quasi-adiabatique (norme EN 12390 [8]). La courbe de dégagement de chaleur mesurée dans cet essai est reproduite dans l'essai BTRing au moyen d'un bain thermostaté. La Figure 2 présente l'évolution de la température mesurée au moyen de thermocouple dans le béton, près des jauges et dans le bain thermostaté.

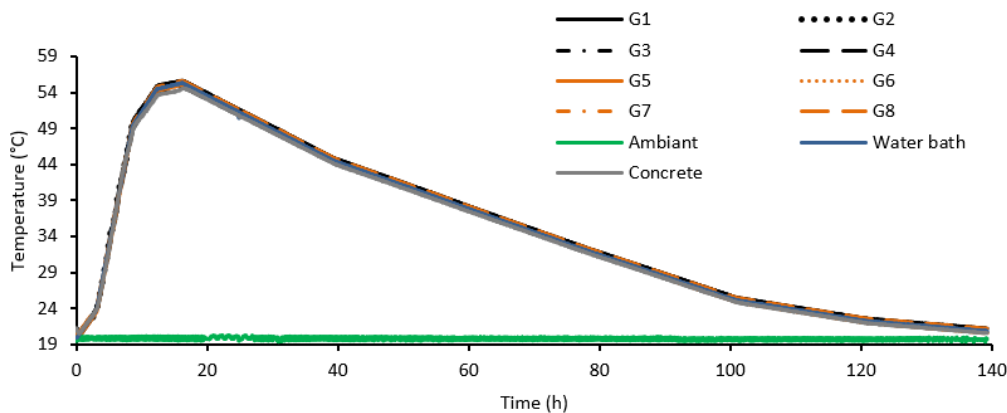


Figure 2 : évolution des températures durant l'essai du béton R1bis mesurées près des jauges sur les anneaux en invar (G1-G4 en noir et G5-G8 en orange), dans l'ambiance (vert), dans le béton (gris) et dans le bain thermostaté (bleu).

4 Résultats expérimentaux

4.1 Exploitation de l'essai

Après application de la correction donnée par le fabricant sur les mesures des jauges en fonction de la température, les équations (1) à (3) permettent de déduire la contrainte du béton au niveau de l'anneau intérieur (Figure 3 gauche). On constate qu'une contrainte de traction élevée existe juste avant une fissuration (Figure 3 droite) qui apparaît vers $t=62h$.

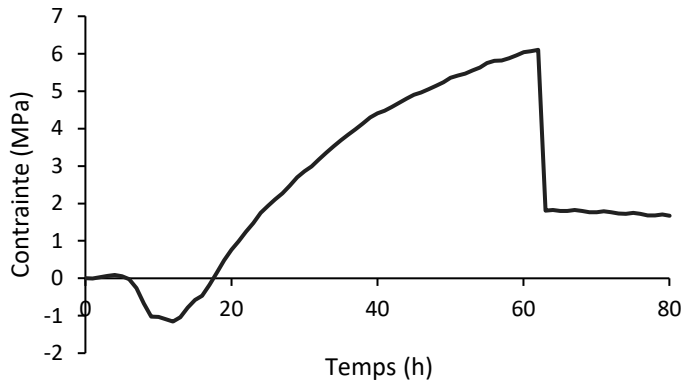


Figure 3 : à gauche, évolution de la contrainte (traction positive) ; à droite, vue de la fissure apparaissant à $t=62h$.

4.2 Analyse des résultats

L'évolution des contraintes est conforme à ce qui était attendu : après une phase à contrainte nulle, lorsque l'hydratation démarre vers $t=6h$, la dilatation due à l'élévation de température est gênée par l'anneau extérieur ce qui génère une contrainte de compression. Ensuite, à cause du retrait endogène et du refroidissement, mais aussi parce que le module d'Young du béton a évolué, des contraintes de traction apparaissent, la déformation du béton étant cette fois gênée par l'anneau intérieur. La contrainte de traction atteint 6 MPa ce qui est supérieur à la contrainte de traction du béton (mesurée à 3,8 MPa à 30 jours). Ceci indique que le béton proche de l'anneau intérieur est certainement fissuré depuis au moins $t=40h$. Mais cette fissuration n'est pas traversante. Elle ne le devient que plus tard lorsque, en moyenne, la contrainte dans la section de béton dépasse la résistance en traction. Cette grandeur n'étant accessible que par le calcul, une modélisation doit être menée.

5 Modélisation thermo-mécanique

Le problème est couplé mais faiblement car on peut négliger l'influence de la partie mécanique sur le problème thermique.

5.1 Modélisation de la partie thermique

L'évolution des propriétés du béton va être exprimée en fonction du degré d'hydratation du béton ξ . Ce paramètre est défini par la relation (4) :

$$\xi(t) = \xi_{\infty} Q(t) / Q_{\infty} \quad (4)$$

Où ξ_{∞} est le degré d'hydratation final estimé ici égal à 0,8, $Q(t)$ est la chaleur dégagée au temps t et Q_{∞} la chaleur dégagée finale. Dans notre cas ces grandeurs sont estimées au moyen de l'essai quasi-adiabatique. Cet essai permet aussi d'estimer l'affinité chimique $\tilde{A}(\xi)$ qui est liée au degré d'hydratation par une loi d'Arrhenius au moyen de l'équation (5) :

$$\dot{\xi} = \tilde{A}(\xi) \exp\left(-\frac{Ea}{RT(t)}\right) \quad (5)$$

Cette affinité permet ensuite de calculer pour n'importe quelle température et degré d'hydratation le taux de dégagement de chaleur en mariant l'équation (4) et l'équation (5) pour obtenir (6) :

$$\dot{Q} = \tilde{A}(\xi) \frac{Q_\infty}{\xi_\infty} \exp\left(\frac{-Ea}{RT(t)}\right) \quad (6)$$

L'évolution des températures est enfin calculée au moyen de l'équation de chaleur (7) :

$$C_{th} \frac{dT}{dt} + k\nabla^2 T = \dot{Q} \quad (7)$$

5.2 Modélisation de la partie mécanique

Le problème mécanique est modélisé au moyen de la relation constitutive incrémentale (8) :

$$\dot{\sigma} = \mathbf{C}(\xi) \dot{\varepsilon}_{el} = \mathbf{C}(\xi) (\dot{\varepsilon} - \dot{\varepsilon}_{au} - \dot{\varepsilon}_{th} - \dot{\varepsilon}_{bc}) \quad (8)$$

où σ est le tenseur de contrainte, ε le tenseur de déformation, \mathbf{C} le tenseur de rigidité dépendant de $E(\xi)$ le module élastique et du coefficient de Poisson supposé constant, ε_{el} la déformation élastique, ε_{au} le retrait endogène, ε_{th} le retrait thermique (avec un coefficient de dilatation thermique égal à $9 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$), ε_{bc} la déformation due au fluage propre.

Le retrait endogène est mesuré expérimentalement à l'aide l'essai BTJADE qui permet de l'estimer dès le coulage du béton [9]. La Figure 4 donne l'évolution du retrait endogène en fonction du degré d'hydratation. On constate tout d'abord un gonflement puis ensuite un retrait. Cette évolution est approchée par la relation suivante :

$$\varepsilon_{au} = 35 - 900 (\xi - 0,32)^2 \quad (9)$$

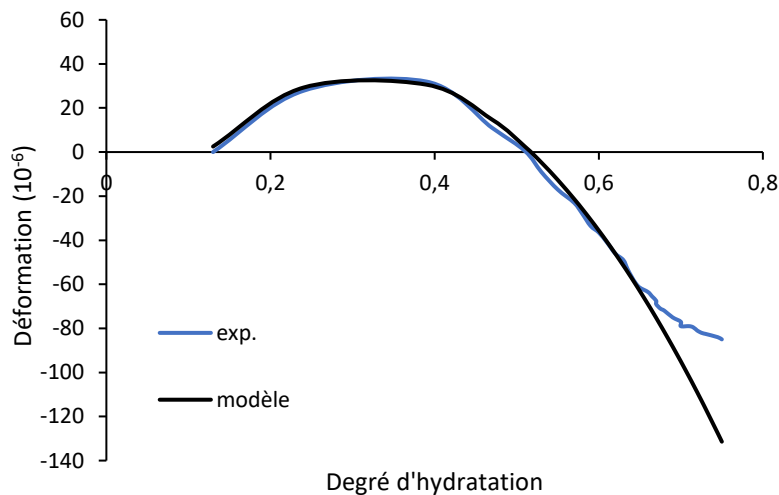


Figure 4 : évolution du retrait endogène avec le degré d'hydratation : comparaison entre les résultats expérimentaux et la modélisation à l'aide de l'équation (9).

La Figure 5 présente l'évolution du module d'Young qui est mesurée au moyen de l'essai BTJASPE [10]. Cette évolution est approchée par la relation (10) :

$$E(\xi) = E(\xi_\infty) \left(\frac{\xi - \xi_0}{\xi_\infty - \xi_0} \right)^\beta \quad (10)$$

où $E(\xi_\infty)$ est le module final égal à 41,5 GPa, ξ_0 correspond à un seuil de percolation mécanique [11, 12] égal à 0,14, et β un paramètre d'ajustement égal ici à 0,6.

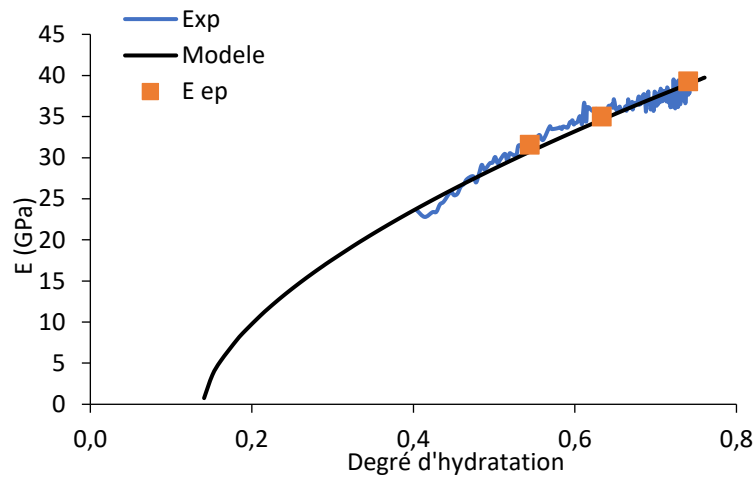


Figure 5 : évolution du module d'Young en fonction du degré d'hydratation, comparée à l'équation (10). Les 3 points oranges correspondent à des mesures statiques classiques du module.

En fin d'essai de mesure du module, il est pratiqué un essai de fluage. La déformation de fluage est approchée au moyen d'un modèle rhéologique constitué de 3 éléments de Kelvin-Voigt en série (Figure 6). La Table 2 donne les caractéristiques de ce modèle rhéologique.

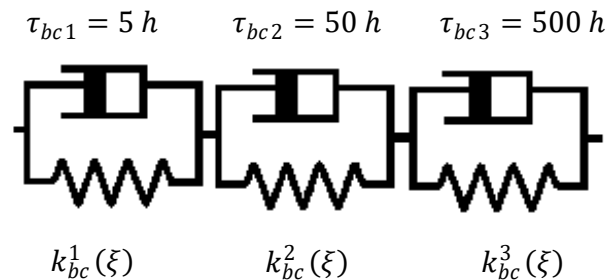


Figure 6 : modèle rhéologique pour la déformation de fluage.

Table 2 : valeurs des paramètres du modèle de la Figure 6.

τ_{bc}^i (h)	5	50	500
k_{bc}^i (MPa)	443100	63830	73020

5.3 Comparaison modèle – expérience

La Figure 7 présente le maillage utilisé pour le calcul. Dans un premier temps, on effectue un calcul thermique selon les équations (5) et (7). Le résultat (Figure 8) au pic de température dans l'éprouvette montre que la température est assez homogène (moins de 0,5°C de différence).

Le calcul mécanique permet de comparer Figure 9 l'évolution de la contrainte orthoradiale au niveau de l'anneau intérieur, présentée à la Figure 3. On voit que l'accord est bon. Le calcul permet aussi de calculer la contrainte orthoradiale moyenne dans la section et de la comparer à l'évolution de la résistance en traction (Figure 10). La contrainte moyenne est voisine de cette résistance au moment où la section se fissure. Cela valide le scénario proposé d'une fissuration qui démarre près de l'anneau

intérieur et se propage dans l'ensemble de la section lorsque la résistance en traction est dépassée en moyenne.

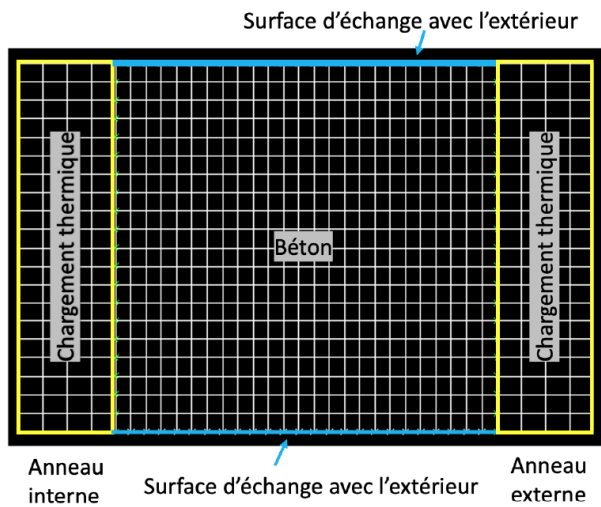


Figure 7 : maillage du calcul.

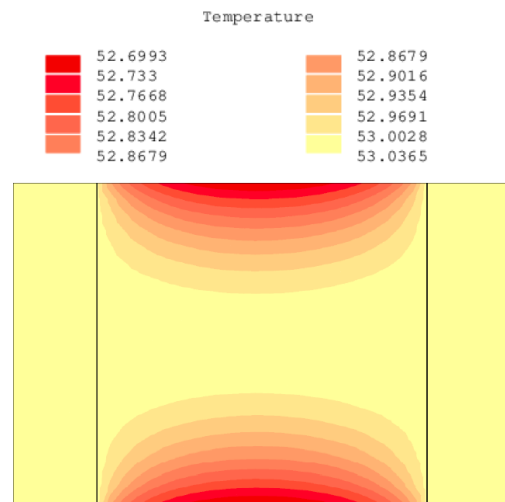


Figure 8 : champ de température au pic de température (t=18h).

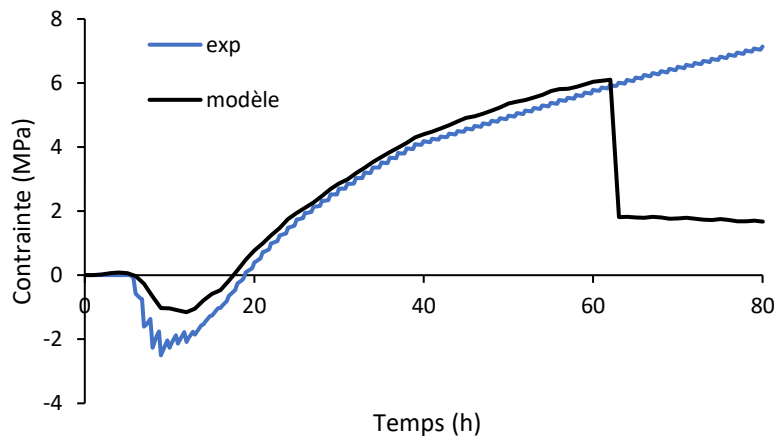


Figure 9 : évolution comparée de la contrainte orthoradiale mesurée et issue du modèle, près de l'anneau intérieur.

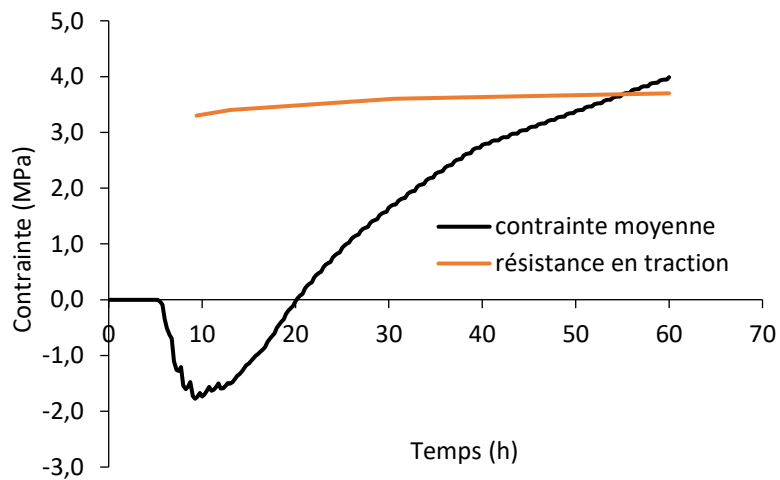


Figure 10 : comparaison entre contrainte orthoradiale moyenne et évolution de la résistance en traction.

6 Conclusions

Un essai a été développé afin de permettre de tester le comportement au jeune âge de pièces massives en béton. Grâce à deux anneaux en invar qui peuvent être chauffés afin de reproduire l'histoire de température dans une pièce massive, les déformations du béton sont gênées ce qui génère des contraintes de compression puis des contraintes de traction.

Une modélisation couplée permet, si l'on a des mesures des différents phénomènes mis en jeu, de retrouver le comportement mis en évidence expérimentalement. Cet ensemble de techniques expérimentales et la modélisation du comportement au jeune âge permettra de tester de nouvelles formules de béton vis-à-vis d'un risque potentiel de fissuration au jeune âge.

Références

- [1] Springenschmid, R., Breitenbacher, R., & Mangold, M. (1994, October). Development of the cracking frame and the temperature-stress testing machine. In *Thermal Cracking in Concrete at Early Ages: Proceedings of the International RILEM Symposium* (p. 137). CRC Press.
- [2] Charron, J. P., Bissonnette, B., Marchand, J., & Pigeon, M. (2004). Test device for studying the early-age stresses and strains in concrete. *ACI Special Publication*, 220, 113-124.
- [3] 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.
- [4] J.L. Schlitter, A.H. Senter, D.P. Bentz, T. Nantung, W.J. Weiss (2010), A dual concentric ring test for evaluation residual stress development due to restrained volume change, *Journal of ASTM International* 7(9).
- [5] Briffaut, M., Benboudjema, F., Torrenti, J. M., & Nahas, G. (2011). Numerical analysis of the thermal active restrained shrinkage ring test to study the early age behavior of massive concrete structures. *Engineering Structures*, 33(4), 1390-1401.
- [6] Briffaut, M., Benboudjema, F., Torrenti, J. M., & Nahas, G. (2011). A thermal active restrained shrinkage ring test to study the early age concrete behaviour of massive structures. *Cement and concrete research*, 41(1), 56-63.
- [7] Martin, R. P., & Toutlemonde, F. (2013). Theoretical and experimental validation of a simple method to reproduce representative DEF-prone conditions in laboratory. *Materials and structures*, 46(8), 1245-1255.
- [8] AFNOR, (2012), NF EN 12390-6 Essais pour béton durci Partie 6 : Détermination de la résistance en traction par fendage d'éprouvettes.
- [9] Boulay, C. (2012, March). Test ring for early age measurements of the autogenous shrinkage of a concrete. In *RILEM-JCI International Workshop ConCrack 3* (pp. 111-122).
- [10] Boulay, C., Staquet, S., Delsaute, B., Carette, J., Crespini, M., Yazoghli-Marzouk, O., Merliot, E., & Ramanich, S. (2014). How to monitor the modulus of elasticity of concrete, automatically since the earliest age? *Materials and structures*, 47(1), 141-155.
- [11] Torrenti J.M., Benboudjema F., Mechanical threshold of concrete at an early age, *Materials and Structures*, vol. 38, no. 277, 2005, p.299-304.
- [12] Stefan L., Benboudjema F., Torrenti J.M., Bissonnette B., Prediction of elastic properties of cement pastes at early ages, *Computational Materials Science*, 47 (2010) 775–784.