

Simulations par Modèles de Zones Cohésives de la fissuration en mode mixte de la pâte de ciment et de l'interface pâte de ciment/granulat sous flexion 3 points

S. Al Dandachli^{1,2}, F. Perales^{1,2}, Y. Monerie^{2,3}, C. Pelissou^{1,2}, F. Jamin^{2,3}, M.S. El Youssoufi^{2,3}

¹ Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire IRSN, PSN-RES/SEMIA/LSMA, B.P. 3, Saint-Paul-lez-Durance Cedex, 13115, France

² MIST Lab., IRSN, CNRS, Université de Montpellier, France

³ LMGC, Université de Montpellier Montpellier, CNRS, Montpellier, France

Résumé — Ce papier présente des simulations 2D de propagation de fissures en mode I et en mode mixte (I et II) à l'échelle de la matière (dite locale) dans un matériau cimentaire. Deux types d'essais de flexion 3 points sont modélisés : avec chargement excentré sur des échantillons de pâte de ciment pré-entaillées et avec chargement centré sur des composites constitués de pâte de ciment et granulat. Les simulations, reposant sur les Modèles de Zones Cohésives, ont montré une efficacité à prédire la propagation des fissures et l'évolution de l'endommagement à l'échelle locale.

Mots clefs — Pâte de ciment, interface, Modèle de Zones Cohésive, fissuration, flexion 3 points.

1. Introduction générale

Le béton est un matériau quasi fragile caractérisé par une forte hétérogénéité. La présence de différentes phases dans le béton (pâte de ciment, sable, graviers, ...) génère un gradient des propriétés mécaniques surtout aux alentours des granulats où se forme une zone d'interface ITZ (Interfacial Transition Zone). Ce contraste des propriétés de la microstructure influe largement sur le mécanisme d'endommagement et de fissuration, ce qui rend difficile la prédiction de propagation de fissure dans le béton.

Les résultats expérimentaux montrent que dans des matériaux très hétérogènes comme le béton, des fissures peuvent s'amorcer aux interfaces du fait de la décohéation puis se propagent dans la matrice, ou inversement. Ces observations montrent l'importance de l'étude numérique locale de propagation de fissure au niveau de la pâte de ciment pure et de l'interface entre la pâte de ciment et le granulat. Analytiquement, le phénomène de propagation de fissure locale est généralement divisé en deux mécanismes : l'apparition d'une zone endommagée à la pointe de fissure et l'occurrence de la fissure. Ces mécanismes se traduisent numériquement par deux comportements : (i) linéaire en cas d'absence de fissuration dans le matériau ; (ii) non linéaire éventuellement lié à l'apparition de microfissures et endommagement ou à la croissance stable des fissures. Parmi les approches de modélisation de processus de fissures dans les matériaux hétérogènes, on utilise ici le Modèle de Zones Cohésives (MZC) [1]. Ce modèle permet de décrire la fissure comme un saut de déplacement entre éléments cohésifs.

Le but de ce papier est de présenter des campagnes numériques et expérimentales qui visent à évaluer la propagation de fissures en mode mixte à l'échelle locale du béton sous chargement centré sur des modèles composites (échantillons pâte de ciment/ granulat) et sous chargement excentré sur des modèles pré-entaillées d'échantillon de pâte de ciment. Cette méthodologie pourra fournir une gamme de trajectoires de fissures et des informations utiles comme référence pour les codes numériques consacrés à la prédiction des trajectoires des fissures. Ces résultats numériques seront ultérieurement confrontés à des essais expérimentaux qui sont en cours de réalisation et dont le programme expérimental est décrit dans la section 2.

2. Propriétés des matériaux et configuration des essais expérimentaux

2.1. Eprouvettes : matériaux et géométrie

Les tests envisagés dans ce travail sont effectués sur deux types d'échantillons parallélépipédiques : une éprouvette de pâte de ciment pré-entaillée d'un angle de 60° , et un composite formé de pâte de ciment collé à un granulat de type silice (quartz) dont l'angle noté α d'interface varie entre 30° et 90° (voir Figure 1). La pré-entaille sur les éprouvettes de pâte de ciment permet de localiser l'initiation de la fissure. Notons qu'une pré-entaille n'est pas nécessaire sur les éprouvettes composites puisque l'interface avec le granulat suffit à localiser la fissure (rupture interfaciale).

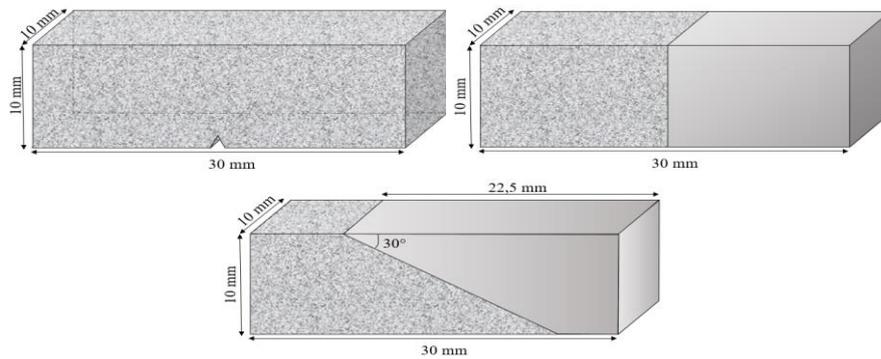


Figure 1 – Géométrie des éprouvettes : pâte de ciment s(en haut à gauche); composite à granulat droit d'angle d'interface 90° (en haut à droite); composite à granulat incliné d'angle 30° .

Les matériaux choisis pour la réalisation des éprouvettes sont donnés dans les Tableau 1 et Tableau 2. Les éprouvettes sont préparées à l'aide de moules en silicone. Après la préparation, les composites sont retirés après 24 h des moules et conditionnés en eau saturée avec de la chaux pour être testé après 40 jours.

Granulat	
Nature	Quartz (98% SiO_2)
Pâte de ciment	
Type de ciment	CEM I 52,5 R CE CP2 NF
Rapport Eau/ciment	0,47

Tableau 1 - Caractéristiques des matériaux utilisés.

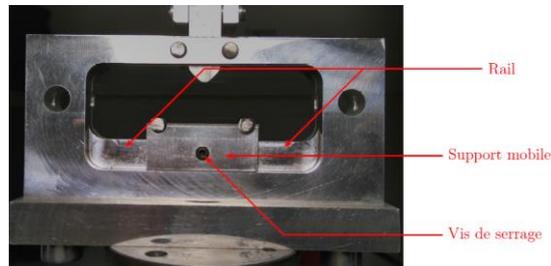
Composant	C_3A	C_4AF	C_2S	C_3S
Teneur (%)	11	8	66	10

Tableau 2 - Composition minéralogique et chimique du ciment.

2.2. Essais de flexion 3 points

La connaissance du comportement du béton à l'échelle locale demande son étude dans des conditions de chargements complexes. Afin de répondre à cette exigence, un banc d'essai de flexion 3 points modulable (voir Figure 2) a été conçu pour permettre la variation des conditions de chargement et des géométries des éprouvettes utilisées.

Figure 2 – Conception du banc de flexion 3 points modulable [1].



Dans la suite, on appelle l'excentricité dx , la distance entre le point d'application de charge et le centre de l'échantillon. Pour les éprouvettes en pâte de ciment pré-entaillées, six positions de chargement sont testées expérimentalement avec dx égale à : 0 cm (chargement centré) ; 2,5 ; 5 et 7,5 mm. Les éprouvettes composites sont testées avec le même banc de flexion et un chargement centré ($dx = 0$) mais un changement de configuration de l'éprouvette de sorte que dans la première configuration (notée C_1) on applique le chargement sur le granulat silice et dans la deuxième (notée C_2) on applique le chargement sur la pâte de ciment (voir Figure 3). Expérimentalement, trois formes de composites sont préparées pour être testées : (i) avec un granulat droit (angle 90°) ; (ii) avec un granulat incliné de 30° ; (iii) avec un granulat incliné de 60° .

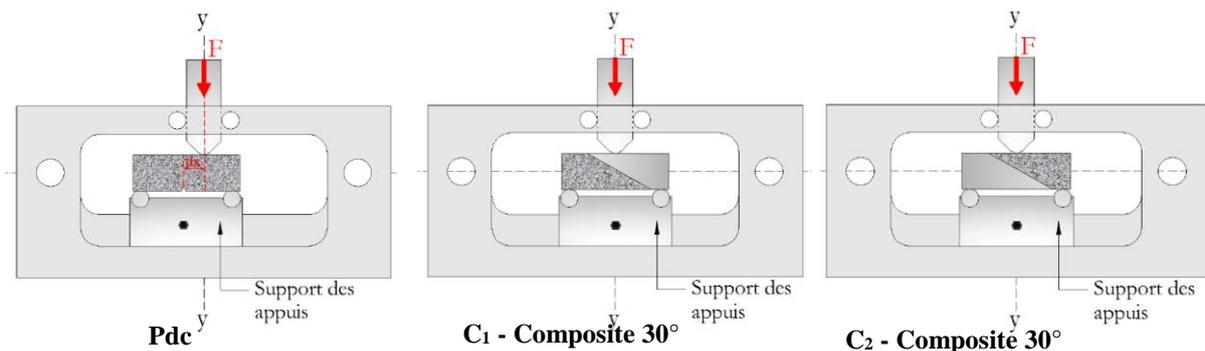


Figure 3 – Conception du banc de flexion 3 points modulable.

L'éprouvette est positionnée sur le banc de flexion de telle sorte que la face mouchetée soit dirigée vers une caméra haute résolution « acA5472-17um - Basler ace », positionnée sur un portique fixe. Une vitesse de chargement de 0,6 mm/min est appliquée moyennant un pilotage fin de la machine de compression « MTS ». Un post traitement des résultats avec un logiciel de corrélation d'image numérique CIN permet de visualiser expérimentalement le champ de déplacement, dont on déduit le trajet de propagation de fissures au sein des éprouvettes dans les deux cas.

Ces essais de flexion 3 points sont conçus et en cours de réalisation. Un test préliminaire sur la flexion avec chargement excentré est réalisé sur les éprouvettes de pâte de ciment.

3. Modèles de Zones Cohésives – MZC

3.1. Définition de la loi cohésive

La méthode des Éléments Finis Volumiques-Cohésifs (EFVC) consiste à « exploser » le maillage éléments finis où une décohésion des interfaces de ses éléments volumiques est considérée. Les éléments finis sont reliés par une loi surfacique endommageable dite « cohésive ». Généralement, ces lois cohésives lient la contrainte au niveau des lèvres des fissures au saut de déplacement. La zone

cohésive à l'interface est représentée par deux « ressorts » endommageables à deux raideurs (noté C_N et C_T) qui permet la modélisation de deux modes de rupture : normal et tangentiel (voir Figure 4)

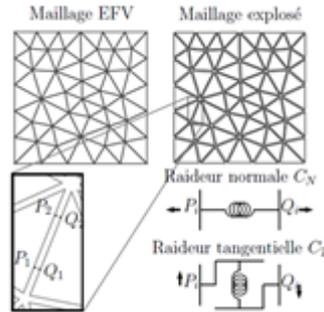
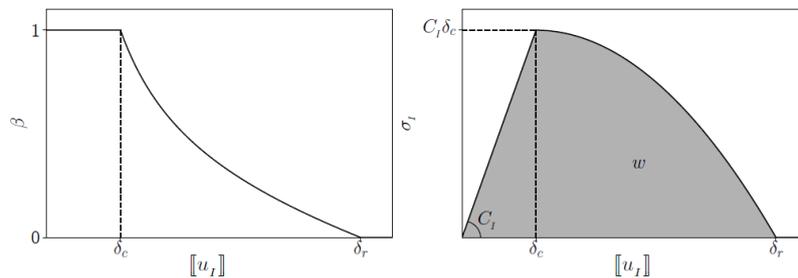


Figure 4 – Schématisation du principe de l'approche aux Éléments Finis Volumiques- Cohésifs EFVC [6].

L'outil numérique utilisé est le logiciel « XPER » [4, 5] développé à l'IRSN dans le cadre du laboratoire commun MIST (laboratoire commun IRSN/CNRS/Université de Montpellier).

La loi cohésive, appelée MAL dans XPER, a été choisie pour les simulations numériques des matériaux cimentaires [2]. Cette loi cohésive dépend de trois paramètres, σ_i (contrainte cohésive critique), w_i (énergie cohésive) et C_i (raideurs cohésives initiales) pour chaque mode normal ($i=1$) et



tangentiel ($i=2$) (Figure 5).

Figure 5 – Forme de la loi cohésive utilisée. À gauche : évolution de l'endommagement en fonction d'un saut de déplacement normal/tangent. À droite : contrainte cohésive associée à un saut de déplacement normal/tangent.

Un endommagement se produit entre les éléments à partir d'un saut de déplacement critique (δ_c) ($\llbracket u \rrbracket > \delta_c$) indépendant de la mixité du chargement (le même en modes normal et tangent). De plus, les contraintes cohésives critiques des modes normal et tangentiel sont données par :

$$\sigma_N^{max} = C_N \delta_c = \left(\frac{1}{2} + \frac{C_N}{2C_T} \right) \sigma^{max} \quad (1)$$

$$\sigma_T^{max} = C_T \delta_c = \left(\frac{1}{2} + \frac{C_T}{2C_N} \right) \sigma^{max} \quad (2)$$

et les énergies cohésives par :

$$\omega_N = \left(\frac{1}{2} + \frac{C_N}{2C_T} \right) \omega \quad (3)$$

$$\omega_T = \left(\frac{1}{2} + \frac{C_T}{2C_N} \right) \omega \quad (4)$$

Notons que les rapports entre les contraintes cohésives et les énergies cohésives normales et tangentielles sont égaux.

3.2. Maillage EF et étude paramétrique

Un maillage uniforme de type Delaunay et de taille caractéristique $l_{\text{mesh}} = 0,2$ mm (voir Figure 6) est considéré pour les deux éprouvettes. En se basant sur les calculs effectués lors de la thèse de Delaume [3], un pas de temps de 10^{-8} s est retenu pour les simulations des essais. On applique une vitesse de 0,01 mm/s comme chargement vertical [6]. Une loi est introduite entre tous les éléments du maillage. Ainsi une loi de zones cohésives est définie pour toutes les interfaces : pâte de ciment/pâte de ciment, interface pâte de ciment/granulat et granulat/granulat.

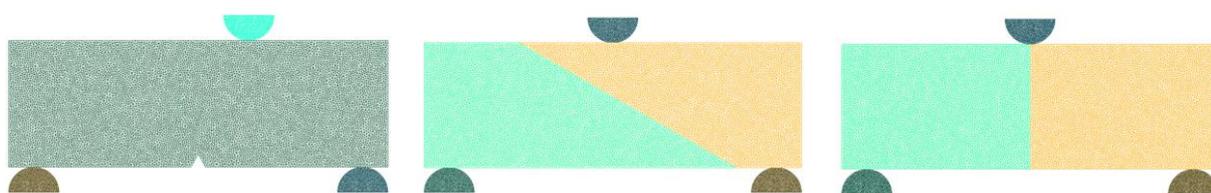


Figure 6 – A gauche : maillage de la pâte de ciment pour l’essai de flexion 3 points excentré. Au milieu : maillage de composite avec granulat incliné de 30°. A droite : maillage de composite avec granulat droit (90°).

Les valeurs des raideurs cohésives initiales C_N et C_T , pour l’essai de flexion 3 points sur les pâtes de ciment pré-entaillées, ont été choisies selon le critère pratique de Blal [7] de façon à limiter la dépendance de la réponse mécanique (force/déplacement) à la taille caractéristique du maillage. Le Tableau 3 liste les différents paramètres cohésifs initiaux. Un rapport de 10 est préconisé entre les valeurs normales et tangentielles [2].

	C_N [MPa/m]	C_T [MPa/m]	σ_N [MPa]	σ_T [MPa]	w_N [J/m ²]	w_T [J/m ²]	E [MPa]	ν
Pâte de ciment	$7,7 \times 10^{11}$	$9,8 \times 10^{11}$	3,1	31	25	250	15×10^3	0,2
Interface	$6,7 \times 10^{11}$	$8,8 \times 10^{11}$	0,4	3,1	2,5	25	-	-
Granulat	$1,21 \times 10^{13}$	$5,1 \times 10^{13}$	6×10^2	6×10^3	10^5	10^6	65×10^3	0,2

Tableau 3 - Paramètres élastiques et cohésifs des différents matériaux utilisés.

4. Résultats numériques

4.1. Essais de flexion 3 points non symétriques sur pâte de ciment

Les simulations sont réalisées sur les éprouvettes de pâte de ciment avec une excentricité de charge de 0 ; 2,5 ; 4 ; 5 ; 6 ; et 7,5 mm. La visualisation du champ de déplacement est présentée sur la Figure 7.

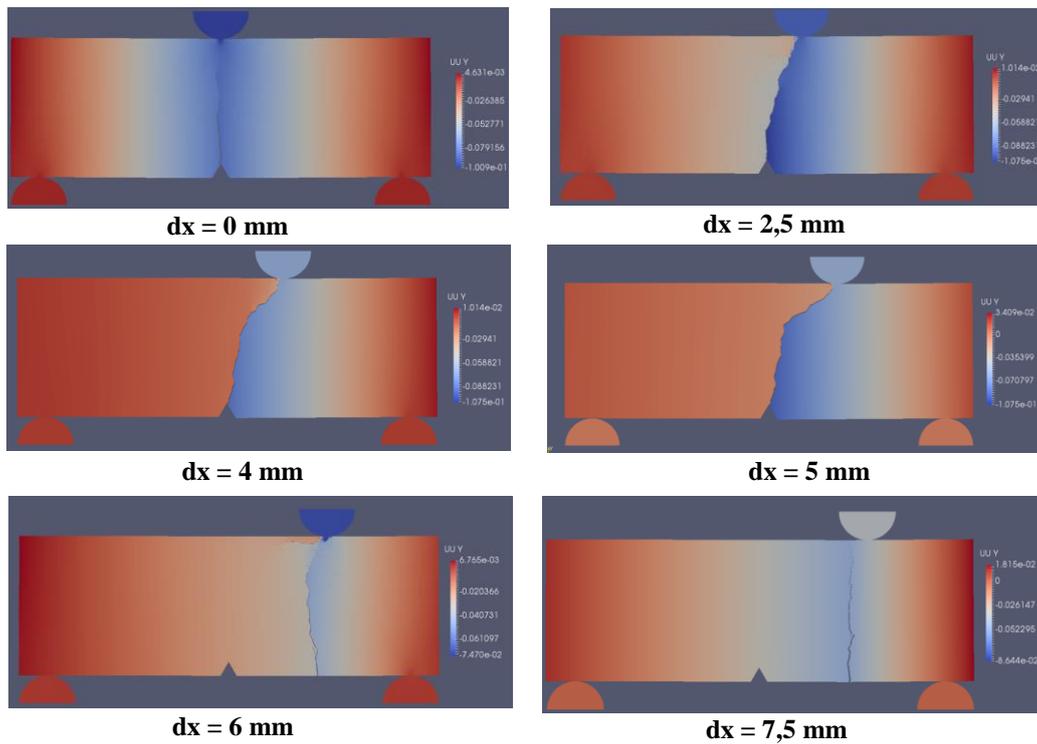


Figure 7 – Champs de déplacement des éprouvettes de pâte de ciment en flexion 3 points avec une excentré de charge de dx .

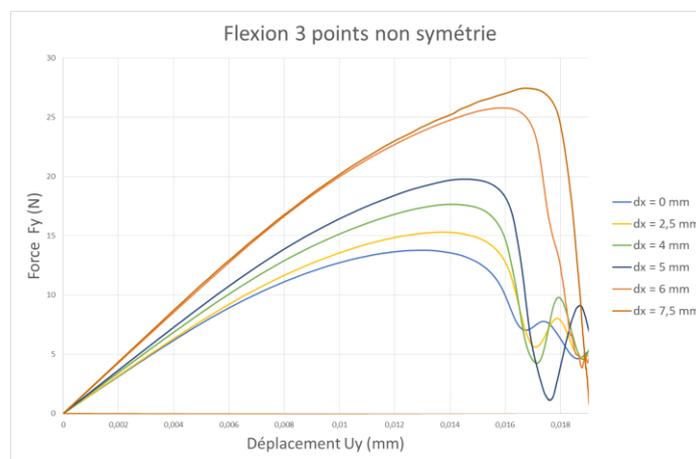


Figure 8 – Réponse mécanique des éprouvettes de pâte de ciment en flexion 3 points non symétrique.

Dans le cas de $dx = 0$ mm, une fissure se propage depuis l'entaille (concentration de contraintes) au milieu de l'éprouvette en mode I. Pour $dx = 2,5$; 4 et 5 mm, la propagation est en mode mixte et la fissure s'initie à partir de l'entaille et rejoint le point d'application du chargement. Par contre différemment dans les cas d'excentricité de 6mm et 7,5 mm, l'initiation de la fissure ne se fait pas à partir de l'entaille mais sur le bord inférieur de l'éprouvette à la même côte horizontale que le point d'application du chargement.

Ces résultats sont quantifiés sur les courbes de la Figure 8. On constate que plus l'éprouvette est sollicitée en mode mixte plus la rigidité de la structure augmente ainsi que sa résistance à la rupture. Une étude effectuée par Y.S. Jenq [9] dans le cadre de l'étude de la mixité de propagation des fissures

lors d'une flexion 3 points sur des prismes en béton en déplaçant l'entaille par rapport au chargement centré conforte nos résultats .

4.2. Essais de flexion 3 points avec chargement symétrique sur composite avec granulat incliné

Deux configurations, C1 et C2, de l'éprouvette composite sont considérées et pour chaque configuration, trois inclinaisons de l'interface pâte de ciment/granulat (30°, 45° et 60°) sont choisies en plus d'un composite avec interface verticale. La Figure 9 représente les champs de déplacement et la propagation de la fissure.

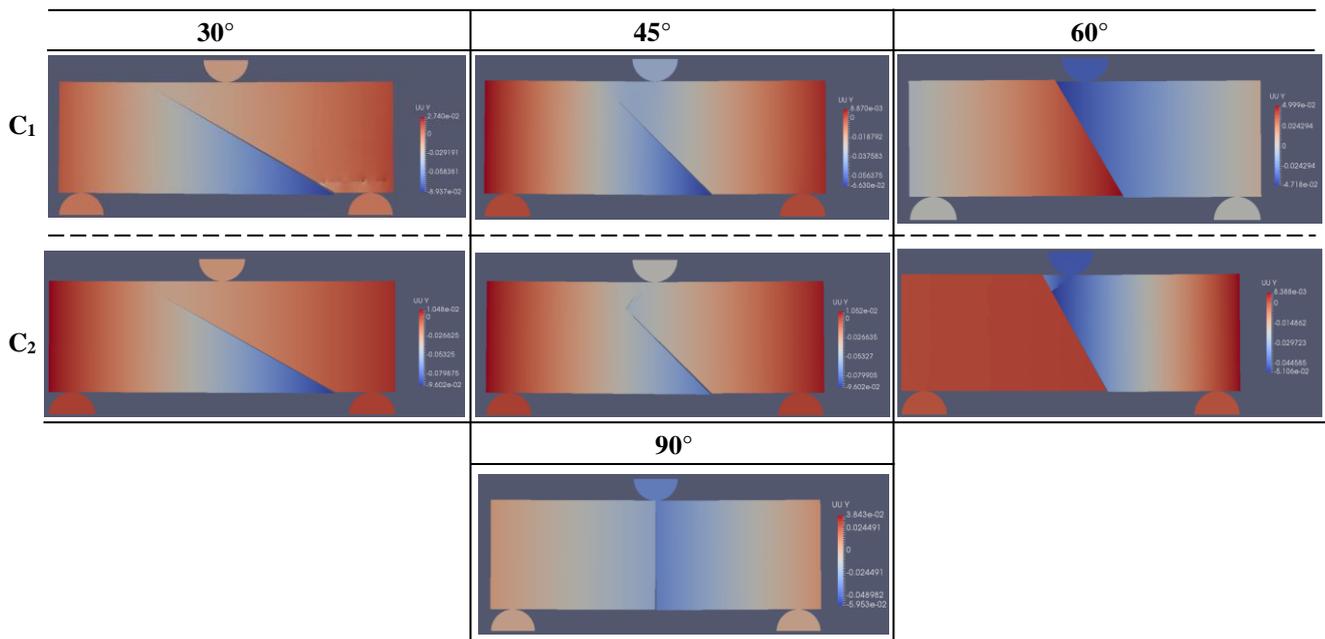


Figure 9 – Champs de déplacement des éprouvettes composites avec granulat incliné (30°, 45° et 60°) et granulat droit en deux configurations (C1 et C2) en flexion 3 points avec chargement symétrique.

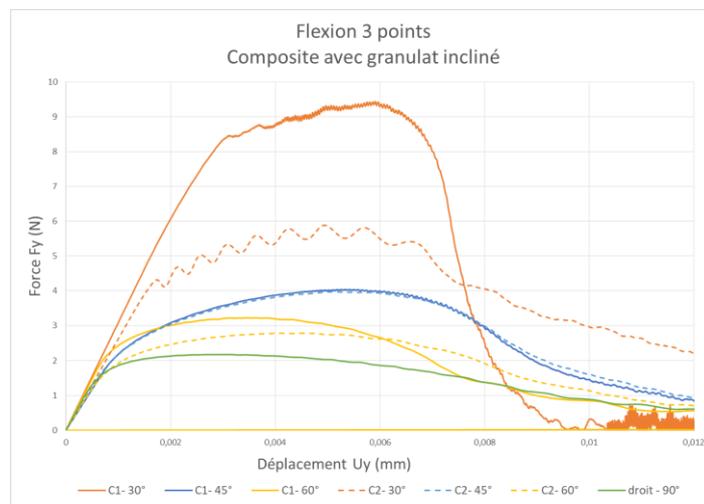


Figure 10 – Réponse mécanique des éprouvettes composites en flexion 3 points avec chargement symétrique.

Pour les deux configurations C_1 et C_2 , la fissure se propage le long de l'interface (phase la plus fragile). Cependant, pour la configuration C_2 où la charge est appliquée sur la pâte de ciment, la fissure propageant dans l'interface dévie dans la pâte de ciment vers le point de chargement.

Les courbes de la Figure 10 montrent que plus l'interface est sollicitée en mode mixte en augmentant l'inclinaison de granulat, plus la résistance de l'éprouvette augmente ainsi que son énergie de fissuration. Ainsi, les éprouvettes de la configuration C_1 où le chargement est appliqué sur le granulat silice résistent plus que celles de la configuration C_2 .

5. Conclusion

Ce papier résume les simulations à l'échelle locale du comportement mécanique de la pâte de ciment et de l'interface pâte de ciment/granulat sous sollicitations en mode normal et en mode mixte par un dispositif de flexion 3 points adapté pour chaque éprouvette. La modélisation de la fissuration repose sur les Modèles de Zones Cohésives. Une loi cohésive est introduite sur toutes les interfaces du maillage. Les simulations sont conformes aux résultats expérimentaux disponibles. Les résultats numériques montrent que plus le rapport de mixité est élevé, plus l'énergie de fissuration et la résistance des matériaux sont importantes.

Dans la suite de ce travail, le protocole expérimental sera complété sur les deux types d'essais avec la mise en place de corrélation d'images numérique. Une comparaison des simulations numériques et des résultats expérimentaux sera réalisée afin de vérifier l'efficacité du modèle à prédire la propagation de fissure en mode mixte.

Références

- [1] A.S. Girboveanu. Approche multi-échelle de la dégradation chimique de matériaux cimentaires : Application à la durabilité des ouvrages en béton. Thèse de doctorat, Université de Montpellier, 2020.
- [2] A. Socie . Modélisation chimio-mécanique de la fissuration de matériaux cimentaires : vieillissement et tenue des enceintes de confinement des centrales nucléaires. Thèse de doctorat, Université de Montpellier, 2019.
- [3] É. Delaume. Méthode de raffinement local adaptatif multi-niveaux pour la fissuration des matériaux hétérogènes. Thèse de doctorat, Université de Montpellier, 2017.
- [4] F. Perales, S. Bourgeois, A. Chrysochoos et Y. Monerie. Two field multibody method for periodic homogenization in fracture mechanics of nonlinear heterogeneous materials. *Engineering Fracture Mechanics*, 75(11):3378–3398, 2008.
- [5] F. Perales, F. Dubois, Y. Monerie, B. Piar et L. Stainier. A NonSmooth Contact Dynamics-based multi-domain solver. *European Journal of Computational Mechanics*, 21(3-6):242–253, 2010.
- [6] J. Lhonneur. Approche par changement d'échelle du vieillissement des bétons : expérimentations et simulations numériques. Génie civil. Thèse de doctorat, Université de Montpellier, 2021.
- [7] N. Blal. Modélisation Micromécanique et identification Inverse de l'Endommagement par Approches Cohésives. Thèse de doctorat, Université de Montpellier, 2013.
- [8] S. Eckardt. Adaptive heterogeneous multiscale models for the nonlinear simulation of concrete. Thèse de doctorat, Université du Bauhaus du Weimar, Allemande, 2009.
- [9] Y.S. JENQ et S.P. SHAH. Mixed-mode fracture of concrete. *International Journal of Fracture* 38:123-142 . (1988).