



HAL
open science

Etude du comportement à l'arrachement des matériaux cimentaires renforcés par des fibres synthétiques

Xiao.Bing. Zhang, Hana. Aljewifi, Jia. Li, Bruno. Fiorio

► **To cite this version:**

Xiao.Bing. Zhang, Hana. Aljewifi, Jia. Li, Bruno. Fiorio. Etude du comportement à l'arrachement des matériaux cimentaires renforcés par des fibres synthétiques. AUGC 2010, Jun 2010, La Bourboule, France. hal-00563841

HAL Id: hal-00563841

<https://hal.science/hal-00563841>

Submitted on 7 Feb 2011

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.

Etude du comportement à l'arrachement des matériaux cimentaires renforcés par des fibres synthétiques

X.B. Zhang¹, H. Aljewifi², J. Li³, B. Fiorio²

¹ Université B. Pascal de Clermont-Fd, LaMI, IUT de Montluçon – 03100 Montluçon, Zhang@moniut.univ-bpclermont.fr

² Université de Cergy-Pontoise, L2MGC – 95031 Cergy-Pontoise, hana.aljewifi@u-cergy.fr

³ Université de Paris XIII, LPMTM, CNRS UPR 9001, 93430 Villetaneuse, jia.li.lpmtm@gmail.com

RÉSUMÉ. Ce travail est composé de trois parties : La première est le développement d'un modèle analytique permettant d'analyser le comportement à l'arrachement d'un système fibre/matrice. Ce modèle est basé sur le concept de la mécanique de la rupture. La rupture par glissement de l'interface entre la fibre et la matrice cimentaire est considérée comme la création d'une fissure circonférentielle à l'interface. La seconde concerne la modélisation numérique, par la méthode des éléments finis, du comportement à l'arrachement et la comparaison des résultats numériques avec les résultats analytiques. La dernière partie contribue à une étude expérimentale qui permet de vérifier le modèle analytique. Il est montré que les résultats numériques et expérimentaux coïncident bien avec ceux obtenus selon le modèle analytique développé dans ce travail.

ABSTRACT. This work consists of three parts: The first is the development of an analytical model to analyze the pull-out behavior of a yarn/matrix system. This model is based on fracture mechanics concept. The shear failure of the interface between the yarn and the cementitious matrix is considered as the creation of a tunnel crack at the interface. The second is concerned with the numerical modeling, by Finite Element Method, of the pull-out behavior and the comparison of the numerical results with the analytical results. The last part contributes to an experimental study which allows us to verify the analytical model. It is shown that the numerical and experimental results are in good agreement with those obtained according to the analytical model developed in this work.

MOTS-CLÉS : essai d'arrachement, matériau cimentaire, fil multi-filamentaires, modèle analytique, modélisation numérique, expérimentation

KEY WORDS : pull-out test, cementitious material, multi-filaments yarn, analytical model, numerical modeling, experimentation

1. Introduction

Les matériaux composites composés d'une matrice cimentaire renforcé par des fibres synthétiques sont utilisés de plus en plus souvent dans le domaine de génie civil grâce à leurs nombreux avantages. Le remplacement des barres d'aciers dans le béton armé par des fibres synthétiques permet d'améliorer la durabilité des ouvrages, de réduire leurs poids et d'augmenter leurs résistances à la corrosion. Afin de conserver les propriétés de ductilité en utilisant des renforts composites, une bonne solution consiste à utiliser des fils multi-filamentaires. L'étude de l'interaction entre le fil multi-filamentaire et la matrice cimentaire permet d'avoir une bonne compréhension du mécanisme de rupture de ce type de matériau. Cette étude peut être menée à l'aide des essais d'arrachement qui est un moyen applicable dans des laboratoires. De nombreuses études sont effectuées ([LAN 04] et [LI 97] etc.). Beaucoup d'auteurs ont proposé des modèles différents pour étudier l'interface entre le fil et la matrice. Par exemple ceux de Kelly-Tyson [KEL 64], de Laws [LAW 82] et de Wang [WAN 87] etc. Tous ces modèles sont basés sur l'analyse des contraintes de cisaillement au niveau de l'interface. La figure 1 montre diverses allures des contraintes de cisaillement τ au niveau de l'interface le long de l'axe x d'un fil selon différentes théories [LI 97].

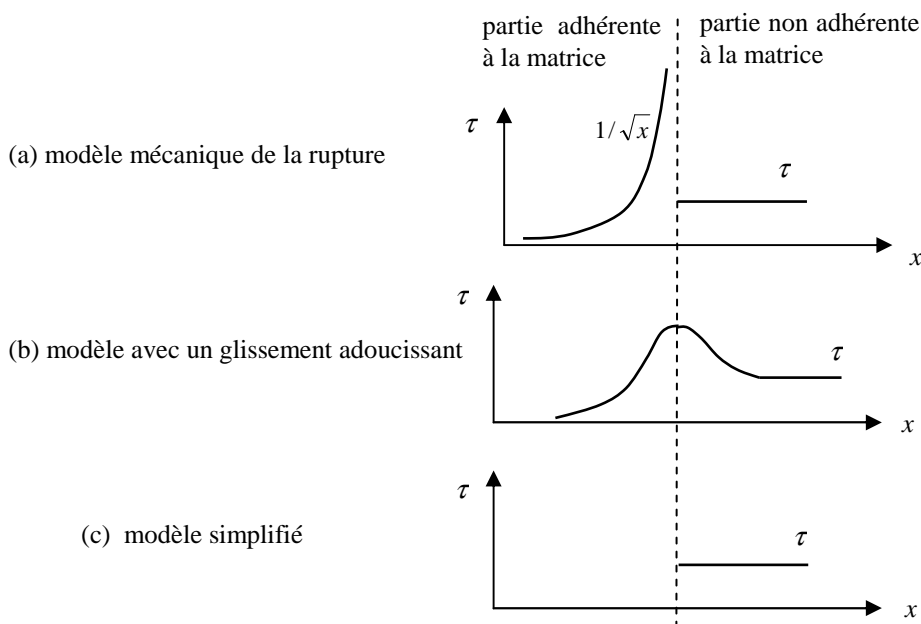


Fig.1 Allure des profils des contraintes de cisaillement au niveau de l'interface (Li and Stang [LI 97])

La plupart des modèles existants ne sont pas très faciles à utiliser à cause de nombreux paramètres employés. En se basant sur l'idée du modèle mécanique de la rupture et essayant d'améliorer le modèle simplifié, nous développons dans ce travail un modèle mécanique de la rupture simplifié pour étudier l'interaction entre le fil et la matrice. Avec ce modèle, la courbe d'arrachement peut être obtenue. L'effort d'arrachement correspondant au début du glissement du fil et la valeur maximale de l'effort d'arrachement peuvent être déterminés.

Ce travail est effectué en trois parties : La première est le développement du modèle analytique. La seconde concerne la modélisation numérique, par la méthode des éléments finis, du comportement à l'arrachement et la comparaison des résultats numériques avec les résultats analytiques. La dernière partie contribue à une étude expérimentale qui permet de vérifier le modèle analytique.

2. Développement du modèle analytique

L'idée principale de ce modèle est de considérer le glissement d'un fil dans l'interface entre le fil et la matrice comme la création d'une fissure circonférentielle à l'interface. Le taux de restitution d'énergie G de la fissure est introduit dans la formule du calcul du déplacement du fil.

Considérons un système composé d'un fil, de diamètre D et de module d'Young E , enfoncé d'une longueur L dans une matrice présentée sur la figure 2 (a). L'origine de l'axe x est à l'extrémité libre de la matrice. L'effort d'arrachement F est appliqué à l'extrémité libre du fil. Nous distinguons deux parties différentes : la partie adhérente (longueur $L - l$) du fil à la matrice et la partie non adhérente (longueur l) du fil. Cette partie non adhérente est considérée comme une fissure circonférentielle.

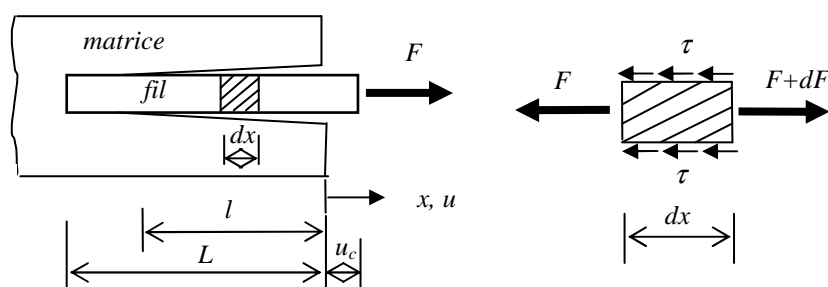


Fig.2 (a) Système fil/matrice étudié (b) Equilibre d'un tronçon dx

Les hypothèses suivantes sont prises dans cette étude :

- La matrice est considérée comme un corps rigide non déformable et seul le déplacement du fil par rapport à la matrice est étudié.
- Les matériaux du fil et de la matrice sont respectivement homogènes, isotropes et élastiques linéaires.

- La contrainte de cisaillement τ à l'interface est proportionnelle au déplacement du fil u dans la partie adhérente ($\tau = ku$). Elle atteint sa valeur maximale à l'endroit du début de glissement (considéré comme la pointe de fissure) puis elle devient constante τ_0 dans la partie non adhérente (Fig.3). k est le module de l'adhérence.

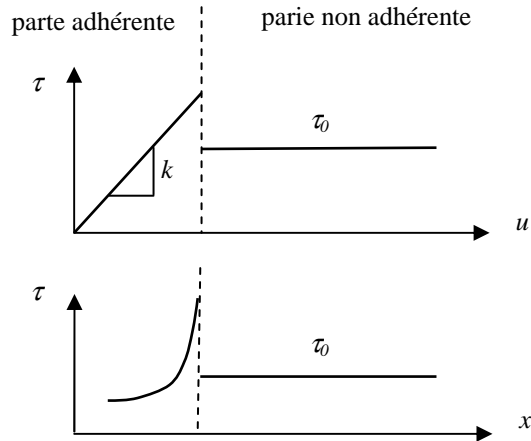


Fig.3 Allure de contrainte de cisaillement au niveau de l'interface

En étudiant l'équilibre d'un tronçon du fil dx (Fig. 2(b)), le déplacement du fil peut être écrit sous la forme suivante :

$$u(x) = \begin{cases} \frac{4(F - \pi D \tau_0 l)}{\lambda \pi D^2 E} \frac{ch \lambda (L+x)}{sh \lambda (L-l)} & -L \leq x \leq -l \\ \frac{4(F - \pi D \tau_0 l)}{\lambda \pi D^2 E th \lambda (L-l)} + \frac{4F}{\pi D^2 E} (x+l) + \frac{2\tau_0}{DE} (x^2 - l^2) & -l \leq x \leq 0 \end{cases} \quad [1]$$

Nous pouvons exprimer alors le déplacement de l'arrachement u_c en fonction de l'effort d'arrachement F , la longueur non adhérente du fil l (considérée comme une fissure), la longueur enrobée du fil L , le module d'Young E et le diamètre D du fil, ainsi que les paramètres τ_0 et λ qui dépendent de la qualité de l'adhérence entre le fil et la matrice:

$$u_c = u(x=0) = \frac{4(F - \pi D \tau_0 l)}{\lambda \pi D^2 E th \lambda (L-l)} + \frac{4F}{\pi D^2 E} l - \frac{2\tau_0}{DE} l^2 \quad [2]$$

avec $\lambda = \sqrt{4k / DE}$.

En se basant sur le concept de la mécanique de la rupture, nous introduisons le taux de restitution d'énergie pour l'accroissement d'une fissure de longueur l par sa définition:

$$G = -\frac{\partial \Pi}{\partial S} = -\frac{\partial (W(\varepsilon) - W_{ext})}{\pi D \partial l} \quad [3]$$

Avec Π : énergie potentielle, S : surface de fissure (parie non adhérente $S = \pi D l$).

$W(\varepsilon)$: énergie de déformation, en utilisant la formule de Green et les

$$\text{équations d'équilibre, on peut écrire } W(\varepsilon) = \int_V \int_0^\varepsilon \sigma d\varepsilon dV = \int_0^{u_c} F du_c$$

$$W_{ext}: \text{travail de l'effort extérieur, } W_{ext} = F u_c = \int_0^{u_c} F du_c + \int_0^F u_c dF$$

$$\text{L'expression [3] devient : } G = \frac{1}{\pi D} \frac{\partial}{\partial l} \int_0^F u_c dF \quad [4]$$

En remplaçant l'expression [2] dans [4] et en considérant le cas limite d'adhérence ($G = G_c$), nous pouvons obtenir :

$$G_c = \frac{2F^2}{\pi^2 D^3 E} - \frac{2\tau_0}{\pi D^2 E} Fl - \frac{2\tau_0 F}{\lambda \pi D^2 E h \lambda (L-l)} + \frac{2F^2 - 2\pi D \tau_0 Fl}{\pi^2 D^3 E h^2 \lambda (L-l)} \quad [5]$$

L'effort d'arrachement correspondant au début du glissement du fil, noté F_{cri} , peut être calculé en faisant $l = 0$. La valeur maximale de l'effort d'arrachement, noté F_{max} , peut être déterminée en écrivant $l = L$.

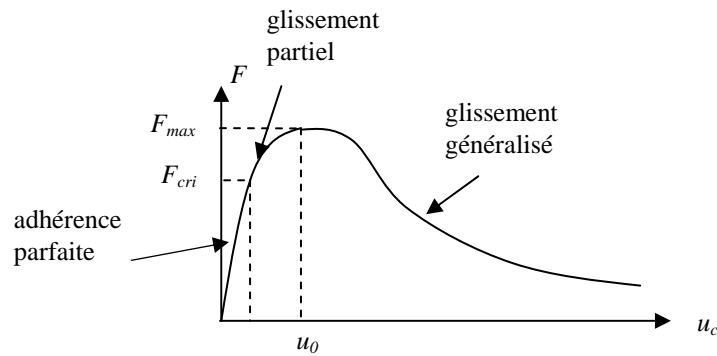


Fig.4 Courbe d'arrachement

Dans le cas du glissement généralisé (décollement total), nous pouvons écrire l'effort d'arrachement F en fonction du déplacement d'arrachement u_c comme suit :

$$F = \pi D \left[\tau_0 \exp\left(-\frac{\alpha(u_c - u_0)}{L - (u_c - u_0)}\right) + \frac{\tau_0}{\beta} \right] [L - (u_c - u_0)] \quad [6]$$

Où u_0 est le déplacement d'arrachement correspondant à F_{max} . α et β sont des coefficients qui peuvent être ajustés selon des résultats expérimentaux.

Les équations [2], [5] et [6] permettent d'obtenir la courbe d'arrachement montrée sur la figure 4.

3. Modélisation numérique

Afin de vérifier le modèle développé, nous avons effectué une modélisation numérique, par la méthode des éléments finis avec le code CAST3M [CEA 08], pour simuler un essai d'arrachement. Une structure axisymétrique composée d'un fil enfoncé dans une matrice est étudiée (Fig. 5 (a)). Au début, l'adhérence entre le fil et la matrice est supposée parfaite ($l = 0$). Cette adhérence diminue lorsque l'effort d'arrachement F augmente. La longueur non adhérente du fil l est considérée comme la longueur d'une fissure à l'interface entre le fil et la matrice. Selon le critère de Griffith [GRI 20], la fissure se propage lorsque le taux de restitution d'énergie G atteint sa valeur critique G_c . Donc la longueur l augmente avec l'augmentation de l'effort d'arrachement F . Nous avons appliqué une contrainte de cisaillement constante τ_0 sur les lèvres de la fissure (Fig. 5 (b)) puisque la contrainte de cisaillement devient constante selon l'hypothèse de cette étude. G_c et τ_0 sont des paramètres dépendant de la qualité de l'adhérence entre le fil et la matrice.

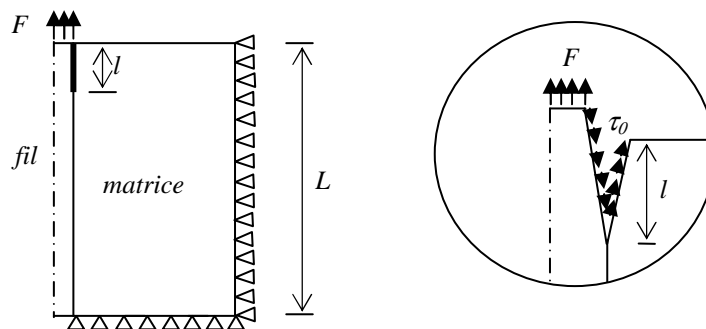


Fig.5 (a) système fil/matrice étudié

(b) Zoom au voisinage de la fissure

La simulation numérique d'un essai d'arrachement est effectuée étape par étape. A chaque étape, nous supposons une petite extension dl de la fissure et nous calculons le taux de restitution d'énergie G de la structure fissurée sous les charges F et τ_0 . Le calcul de G est effectué en utilisant la méthode de la variation d'énergie

potentielle [PET 96]. Les valeurs de l'effort d'arrachement F et du déplacement d'arrachement u_c correspondant à la configuration à laquelle G atteint sa valeur critique G_c sont notées. La courbe d'arrachement est donc obtenue. Comme un exemple, une structure de matrice cimentaire renforcée par un fil multi-filamentaire (diamètre $D=1,08\text{mm}$) est étudiée. La longueur enrobée du fil $L = 66,5\text{mm}$. Les modules d'Young du fil et de la matrice sont respectivement de 32800 MPa et 30000 MPa . Le coefficient de poisson est de $0,3$ pour le fil et la matrice. Les paramètres dépendant de la qualité de l'adhérence sont supposés comme suit : $\tau_0 = 5\text{ MPa}$ et $G_c = 0.003\text{ kJ/m}^2$. Ces valeurs sont supposées selon l'ordre de grandeur montré dans la référence [KAB 06]. La figure 6 montre la comparaison des résultats de la modélisation numérique avec les résultats analytiques. On peut constater que les résultats numériques sont très proches des résultats analytiques.

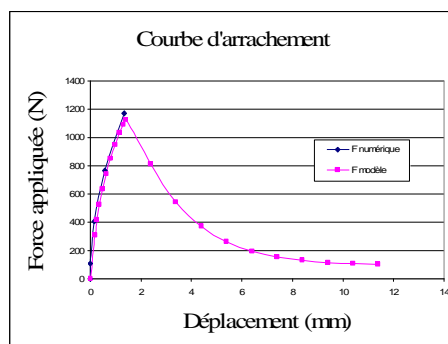
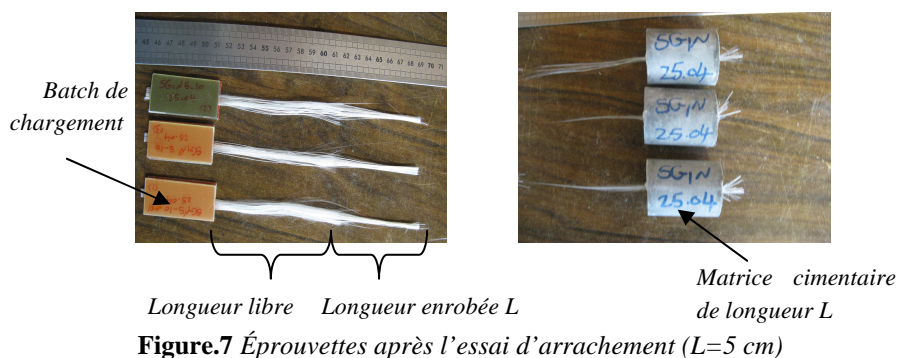


Figure 6. Comparaison des résultats numériques avec les résultats analytiques

4. Etude expérimentale

4.1 Description des expérimentations

Les essais d'arrachement sont effectués afin de vérifier le modèle développé.



Les éprouvettes sont fabriquées avec des cylindres cimentaires dans lesquels une extrémité d'un fil multi-filaments est enfoncée dans toute la longueur des cylindres.

Les cylindres cimentaires ont un diamètre de 34 mm et une longueur variable de 1 à 25 cm (Fig. 7). L'autre extrémité du fil est collée par la résine entre deux plaques d'époxy qui sont utilisées comme batch de chargement [ALJ 10]. Les propriétés des fils sont variées par l'utilisation de trois différents types de fils. Ces trois types de fils sont notés OC1, OC2 et SG1. Leurs propriétés sont données dans le tableau 1.

Matériau	unité	OC1	OC2	SG1
Type de verre		E	E	AR
Diamètre de Filament	µm	12	17	14
Type de roving		assemblé	direct	assemblé
Masse volumique	kg/m ³	2530	2530	2680
Nombre de filaments		8388	4180	5939

Tableau 1. Caractéristiques des fils multi-filamentaires.

Une augmentation monotone de charge en traction est réalisée par un déplacement du batch de chargement à l'extrémité du fil et conduite à une rupture de liaison progressive le long de l'interface du fil et la matrice avec une vitesse de chargement constante de 0.01 mm.min⁻¹. La charge est appliquée jusqu'à ce que les filaments glissent puis se cassent. Dès que la décohésion atteint la fin du fil, un dynamique mécanisme d'arrachement est observé. L'effort d'arrachement F et le déplacement d'arrachement u_c sont enregistrés au cours des essais. Les courbes d'arrachement sont alors tracées.

4.2 Résultats expérimentaux et discussions

La figure 8 montre les courbes d'arrachement des éprouvettes avec le fil OC1 pour différentes longueurs de cylindre cimentaire. Afin de vérifier le modèle analytique développé, nous avons comparé les courbes d'arrachement expérimentales avec celles obtenues selon le modèle analytique.

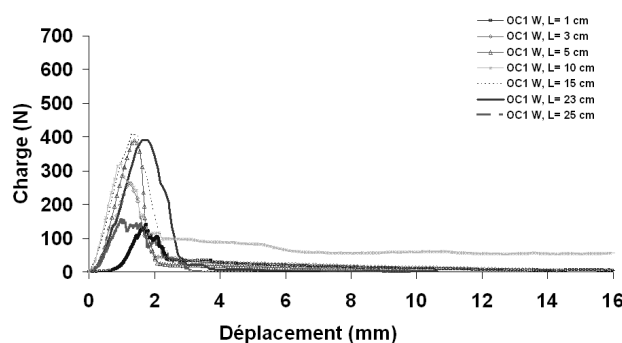


Figure 8. Courbes d'arrachement des éprouvettes avec le verre OC1

La figure 9 montre la comparaison des courbes d'arrachement selon le modèle développé avec celles obtenues par les essais expérimentaux sur les éprouvettes des fils OC1 et SG1 qui ont la même longueur L . La comparaison des courbes pour différentes longueurs L avec le même type de fil OC2 est montrée sur la figure 10.

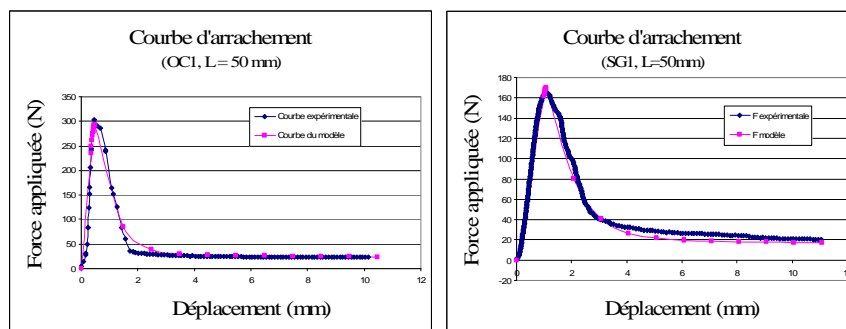


Figure 9. Comparaison des résultats analytiques et expérimentaux pour les éprouvettes de même longueur enrobée.

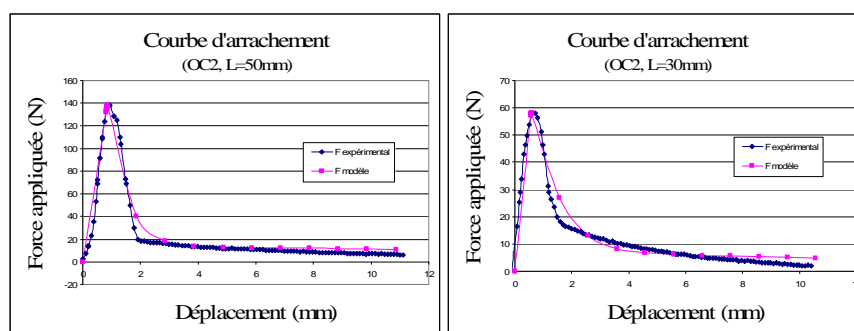


Figure 10. Comparaison des résultats analytiques et expérimentaux pour les éprouvettes de même type de fil.

Nous pouvons constater que les courbes d'arrachement selon le modèle développé et celles obtenues par des essais expérimentaux sont très proches quelque soit le type de fil et la longueur enrobée.

5. Conclusions

Dans ce travail, nous avons développé un modèle analytique permettant d'analyser le comportement à l'arrachement des matériaux cimentaires renforcés par des fibres synthétiques. Ce modèle est basé sur le concept de la mécanique de la rupture. La rupture par glissement de l'interface entre la fibre et la matrice est considérée comme la création d'une fissure circonférentielle à l'interface. Le modèle développé est vérifié par la modélisation numérique et par les essais expérimentaux.

Ce modèle est simple à utiliser et il permet d'obtenir des résultats très proches de ceux obtenus par des essais expérimentaux. Avec le modèle développé, on peut prévoir la charge critique correspondant au début du glissement d'un fil de renforcement et la charge maximale d'un essai d'arrachement. L'interaction entre le fil et la matrice est caractérisée par les paramètres k , τ_0 et G_c qui jouent un rôle important au comportement à l'arrachement. L'étude des influences de ces paramètres sur le comportement à l'arrachement fera l'objectif de notre futur travail.

6. Bibliographie

- [ALJ 10] ALJEWIFI, H., FIORIO B., GALLIAS J.L., « Pull-out behaviour of a glass multi-filaments yarn embedded in a cementitious matrix », *EURO-C 2010*, 15-18 March 2010, Austria.
- [CEA 08] http://www-tamaris.cea.fr/html/fr/calculs/presentation_cast3m.php
- [GRI 20] GRIFFITH A.A., «The phenomena of rupture and flow in solids», *Phil. Trans. Roy. Soc. Of London*, A221, 1920, 163-197
- [KAB 06] KABELLE P., NOVAK L., NEMECEK J., KOPECKY L., «Effects of chemical exposure on bond between synthetic fiber and cementitious matrix. ICTRC» - 1st International RILEM Conference on Textile Reinforced Concrete 10: 91-99 (2006).
- [KEL 64] KELL A., TYSON W.R., «*Fiber strengthened materials, High materials*», V.F. Zackay ED., J. Wiley & Sons, London, 1964, p. 578-602
- [LAN 04] LANGLOIS V., «Etude du comportement mécanique de matériaux cimentaires à renforts synthétiques longs ou continus», *Thèse de l'Université de Cergy-Pontoise*, 2004
- [LAW 82] LAWS V., « Micromechanical aspects of the fiber-cement bond », *Composites*, vol. 13, n°2, 1982, p.145-151
- [LI 97] LI V.C., STANG H., « Interface property characterization and strengthening mechanics in fiber reinforced cement based composites», *J. Advanced cement based*, vol. 6, n°1, 1997, p. 1-20
- [PET, 96] PETIT C., VERGNE A., ZHANG X.B., « A comparative numerical review of cracked materials », *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 54, No. 3, pp. 423 – 439, 1996
- [WAN 87] WANG Y., LI V.C. and BACKER S., «Analysis of synthetic fiber pullout from a cement matrix », *Symp. Proc., Materials Research Society*, n°114, 1987, p.159-165