

ETUDE DE L'ARRACHEMENT DES FIBRES METALLIQUES ET CARACTERISATION DE LA LIAISON FIBRE MATRICE

Reçu le 20/01/2002 – Accepté le 18/12/2002

Résumé

Cette étude compare trois modes de caractérisation mécanique des propriétés de la liaison fibre matrice dans un composite d'argile ciment fibre d'acier.

Des essais ont été effectués avec différents diamètres de fibres afin de mesurer une contrainte d'adhérence.

Les différents résultats montrent la nature complexe de la liaison avec chacune des trois méthodes.

Une explication du mécanisme et de la divergence des résultats est proposée, qui conduit à préférer l'un des trois tests vis-à-vis de son utilisation pour prévoir les qualités du composite.

Mots clés: Adhérence - argile-ciment - fibre - matrice - arrachement.

Abstract

The work presented in this paper is based on the comparison of three modes of the mechanical properties under the link fibre matrix in composite clay cement with steel fibre. Experimental investigations have been carried-out with different diameter of fibres in order to measure the bond stress. The different results show the complex nature of the link with each of the three methods. An explication of the mechanism as well as the divergence of the results has been proposed to give which one of the three tests is the best against its use to anticipate the qualities of the composite.

Key words: clay – cement – fibre – link - matrix – pull-out.

F. Z. MIMOUNE

M. MIMOUNE

Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Département Génie Civil
Université Mentouri
Constantine, Algérie

Plusieurs études ont supposé que la contrainte d'adhérence entre les fibres et la matrice, est l'un des facteurs principaux qui interviennent dans la détermination des propriétés mécaniques d'un matériau composite.

Cependant, la rupture à la traction des matériaux renforcés de fibres (généralement plus résistantes que la matrice), se produit plutôt par extraction des fibres que par rupture de celles-ci.

Les facteurs qui influent sur l'adhérence sont caractéristiques de la fibre et/ou de la matrice. Parmi ces facteurs, il y a l'état de la surface de la fibre, son diamètre, sa forme, son module d'élasticité et la composition de la matrice. Le mode de détermination du type de liaison entre les fibres et la matrice est important [1].

Théoriquement, pour le choix du modèle d'essai, on suggère en particulier de veiller à ce que [2] :

- Le modèle ait une géométrie similaire à celle de la fibre et de la matrice qui l'enveloppe dans le matériau composite.
- Les contraintes résiduelles produites dans l'échantillon, dues à la contraction de la matrice, soient du même ordre de grandeur que celles produites dans le composite.
- Que la naissance et la progression de la fissuration à l'interface dans l'échantillon et dans le composite soient similaires.

Il n'existe pas, par conséquent, d'essai standard pour déterminer la contrainte d'adhérence à l'interface fibre/matrice. Plusieurs méthodes, qui correspondent aux principes énoncés ci-dessus, sont utilisées [2], [3].

Ces méthodes peuvent être classées en deux groupes :

- Les méthodes directes qui consistent à étudier des éprouvettes avec une fibre ou un groupe de fibres enveloppées dans un bloc de matrice [2]. La contrainte d'adhérence est obtenue directement à partir de la charge de rupture des échantillons.

ملخص

تتعرض هذه الدراسة لمقارنة ثلاثة طرق لتميز الخواص الميكانيكية لارتباط الألياف الحديدية مع القالب المكون من خليط من الإسمنت والصلصال. أجريت التجارب على ألياف ذات أقطار مختلفة لقياس إجهاد الالتصاق، بينت التجارب الطبيعة المعقدة لنوعية الالتصاق لكل منها. نقترح شروحا لتفسير آلية الالتصاق و اختيار الطريقة الملائمة لتصنيف هذا النوع من المزيج.

الكلمات المفتاحية: التصاق – إسمنت – ألياف – قالب – صلصال – اقتلاع

- Pour les méthodes indirectes, les valeurs des contraintes d'adhérence sont estimées à partir de mesures des propriétés mécaniques du composite.

Dans le cadre de cette étude, il est proposé de comparer deux méthodes directes d'essai d'adhérence entre une matrice argile-ciment et des fibres d'acier droites de différents diamètres. Ces deux méthodes sont le PULL-OUT test dans deux versions, et l'éprouvette de MICHAELIS [3].

MATERIAUX ETUDIÉS

La matrice est composée d'une argile monominérale [4], [5] (KAOLIN), commercialisée sous forme de poudre, mélangée à un ciment de classe CPA 500 avec les proportions suivantes :

Ciment/eau = 0,59 et Argile/ciment = 4,0.

Les fibres utilisées sont des fibres d'acier droites lisses de diamètre : 0,1 ; 0,2 ; 0,3 mm.

CONFECTION DES ECHANTILLONS

Le mélange d'argile ciment se présente sous forme d'une pâte plastique épaisse, contrairement aux matériaux tel que le mortier ou le béton qui sont beaucoup plus fluides. Il présente par conséquent des difficultés au niveau du malaxage et de la confection des échantillons.

Des mélanges homogènes ont pu être obtenus en modifiant les palettes d'un malaxeur classique pour mortier.

Faute de pouvoir reprendre les moyens utilisés pour le mortier et le béton, les échantillons ont été confectionnés en garnissant les moules par pression à la main. Toutefois, la plus grande attention a été apportée pour avoir des échantillons homogènes, bien placer la fibre et garder les mêmes conditions de fabrication, afin de diminuer la dispersion des résultats.

Les éprouvettes ont été gardés en milieu humide (H.R = 100%), démoulées et conservées en milieu sec (H.R = 50%) pendant au moins 28 jours.

APPAREILLAGE UTILISE

Les essais ont été réalisés à l'aide d'un appareil de traction mis au point spécialement pour des efforts relativement faibles [6]. Cet appareil a deux systèmes d'alimentation :

- Système permettant d'avoir des essais à vitesse constante,
- Système permettant d'appliquer des forces constantes.

Un dispositif propre à chaque type d'essai (PULL-OUT et éprouvette de MICHAELIS), et monté sur l'appareil de traction, permet de réaliser les essais.

MODELES ETUDIÉS

Dans chacun des modèles étudiés, la contrainte d'adhérence est calculée par la formule suivante :

$$\tau_{adh.moy} = \frac{F_p}{\pi \Phi_f l_f}$$

Modèle du PULL-OUT test

Avec plaque d'appui (montage A)

Le corps d'épreuve est formé d'une fibre cylindrique d'acier enveloppée dans un bloc d'argile ciment (Fig. 1).

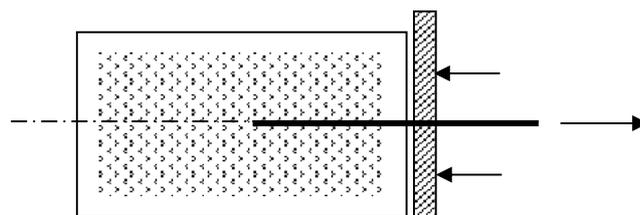


Figure 1 : Eprouvette choisie pour la première version de l'essai d'arrachement de dimension 4x4x8cm; longueur de la fibre $l_f=30$ mm.

L'essai consiste à arracher la fibre du bloc de matrice et mesurer la force d'arrachement.

Le dispositif de l'essai d'arrachement (Fig.2) et l'appareil de traction permettent, au moyen du vérin (1), d'appliquer l'effort d'arrachement.

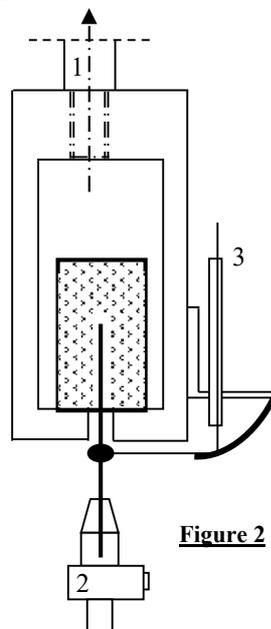


Figure 2 : Dispositif d'essai d'arrachement

Le capteur de force (2), monté entre le point d'attache de la fibre et le socle du bâti, a une gamme (0 – 30 daN) et permet de mesurer les efforts même relativement faibles rencontrés dans le cas de l'arrachement des fibres de faibles diamètres.

Le capteur de déplacement à induction (3) permet de mesurer le glissement de la fibre à l'extérieur de la matrice.

Dans le but d'un enregistrement automatique de la variation de l'effort d'arrachement en fonction du glissement de la fibre, une vitesse d'arrachement suffisamment faible a été utilisée pour que le système puisse être considéré en régime quasi-statique.

Avec plaques latérales (montage B)

Le corps d'épreuve est le même que pour le premier modèle, avec cette fois-ci deux plaques collées sur deux

cotés de l'éprouvettes parallèlement à l'effort appliqué (Fig. 3).

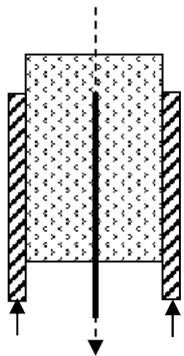


Figure 3 : Epreuve choisie pour la deuxième version de l'essai d'arrachement de dimension 4x4x8cm; longueur de la fibre $l_f = 30\text{mm}$.

Pour la réalisation des essais, on a utilisé le même dispositif que précédemment (Fig. 2).

Les courbes des figures 4 et 5 représentent la variation de l'effort d'arrachement en fonction du glissement de la fibre pour différents diamètres.

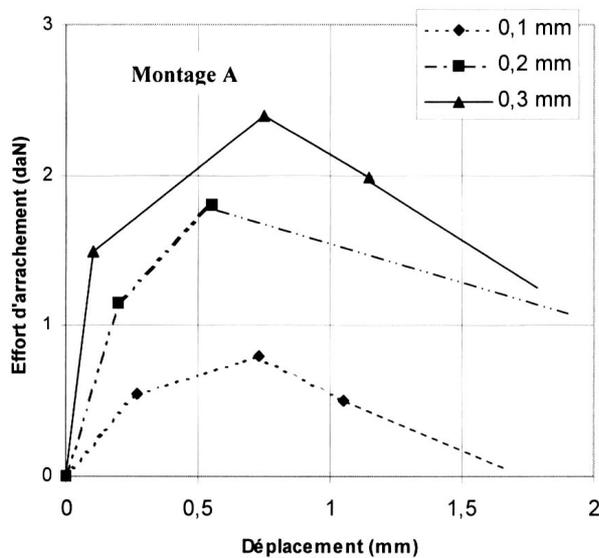


Figure 4 : Courbe Effort d'arrachement- Déplacement (Montage A).

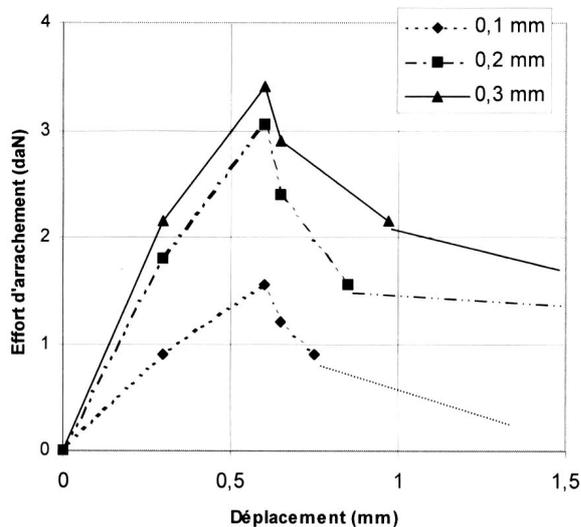


Figure 5 : Courbe Effort d'arrachement- Déplacement (Montage B).

Epreuve De Michaelis (Montage C)

L'éprouvette de MICHAELIS est couramment employée dans les essais de pâte pure de ciment [7].

Cette éprouvette présente une zone centrale non adhérente (Fig. 6).

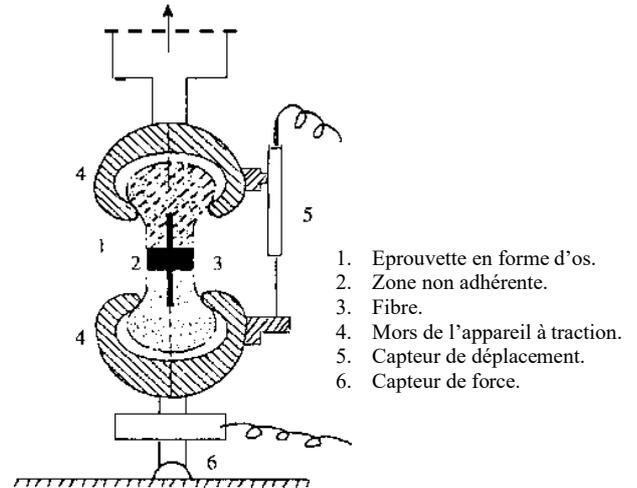


Figure 6 : Epreuve de MICHAELIS choisie pour le troisième modèle d'essai.

L'essai consiste, comme précédemment, à mesurer l'effort de traction, appliqué par l'intermédiaire des mors, et le déplacement correspondant de la fibre.

La figure 7 illustre le montage employé. L'effort de traction est mesuré de la même façon que pour l'essai Pull-out. Le capteur de déplacement (5) permet de mesurer le déplacement des mors qui correspond au glissement de la fibre.

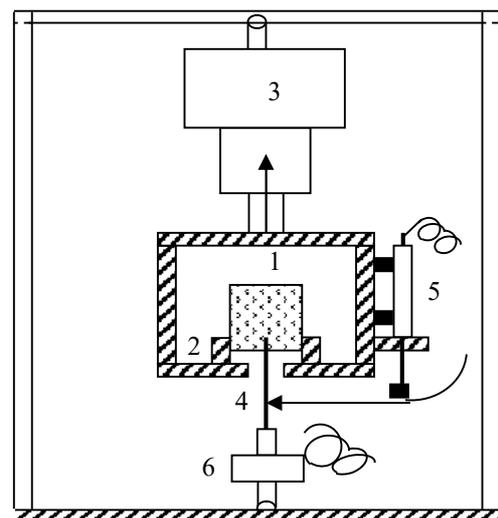


Figure 7 : Dispositif pour essai d'arrachement direct PULL-OUT test.

- 1- Epreuve prismatique.
- 2- Plaques métalliques.
- 3- Vérin à membrane.
- 4- Point d'attache de la fibre.
- 5- Capteur de déplacement.
- 6- Capteur de force.

La figure 8 montre les courbes effort d'arrachement-déplacement pour différents diamètres.

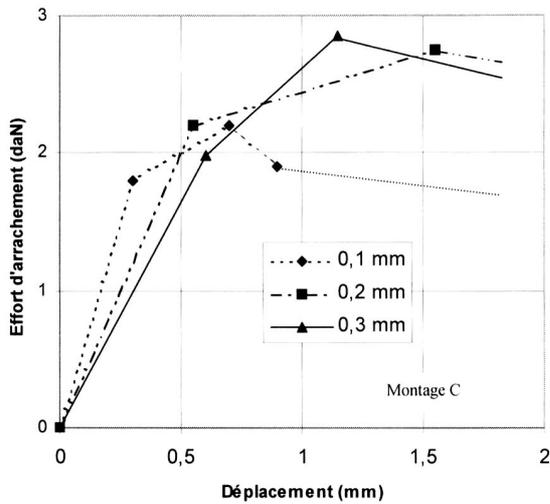


Figure 8 : Courbe Effort d'arrachement-Déplacement (Montage C)

DISCUSSIONS DES RESULTATS

Les courbes des figures 4, 5 et 8 décrivent uniquement la toute première partie du glissement, en considérant qu'après des glissements élevés de la fibre, les mesures n'auront plus d'intérêt car la liaison serait déjà endommagée.

Il est possible de proposer une explication d'origine physique pour justifier les résultats d'essais obtenus et d'éclairer le phénomène.

Le premier segment correspond à ce qu'on appelle l'adhérence élastique due en fait au glissement de la matrice, fracturée au cours du processus de durcissement par effet de retrait, qui enveloppe la fibre par rapport à la matrice qui reste intacte.

Ce glissement continue jusqu'au moment où les zones I et II de la matrice se trouvent bloquées entre elles. Ceci est traduit sur les figures par la fin de la branche ascendante de la courbe. Le pic enregistré correspond au commencement du glissement réel, fibre-matrice, traduit également par la branche descendante de la courbe jusqu'à l'arrachement total de la fibre.

Si par exemple, on suppose, qu'après durcissement complet, la fibre et les différentes zones de la matrice, allant de la plus microfissurée à la moins microfissurée, se trouvent en position (1) (Fig. 9.a), on peut envisager que pour chaque glissement matrice-matrice, zone I et II (Fig. 9.b), un blocage est provoqué favorisant ainsi le glissement à la liaison fibre-matrice (Fig. 9.c).

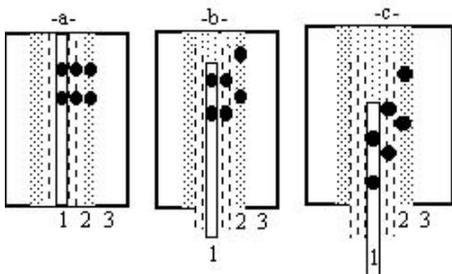


Figure 9 : Schéma d'explication physique du phénomène de fracturation de la matrice pendant la phase de retrait.

COMPARAISON DES RESULTATS

Les modes d'essais sont *a priori* différents au moins par l'état de contrainte auquel la fibre est soumise.

En effet, dans le cas du montage A, une partie de la matrice au voisinage de la fibre se trouve comprimée par la plaque qui sert d'appui pour l'échantillon. Par contre, dans le cas des deux autres montages B et C, la matrice autour de la fibre se trouve presque dans des conditions similaires à la réalité après rupture de la matrice, surtout dans le cas du montage C.

La fibre n'est préalablement sollicitée que par les contraintes résiduelles dues à la contraction de la matrice au cours de son durcissement.

Il faut signaler, au passage, que pendant la phase de retrait du matériau, il se produit un certain glissement à la liaison fibre-matrice. Celle-ci reste difficile à estimer et a des conséquences dangereuses qui peuvent affecter totalement l'adhérence des deux phases.

Pour cela, à notre avis, le montage A constitue un test préliminaire intéressant et facile à réaliser, qui peut donner des valeurs approchées de la contrainte d'adhérence dans un composite.

Les montages B et C, quant à eux, permettent à la fibre d'avoir des conditions se rapprochant de celles qu'elle aurait dans un composite après apparition des premières fissures.

Les essais de flexion que nous avons effectués confirment dans une certaine mesure les résultats obtenus avec les essais directs.

En effet, on observe sur la figure 10 que, après rupture de la matrice (point 1 sur la figure), la branche descendante 1-2 correspond, en quelque sorte, à un positionnement des fibres qui s'effectue par un glissement partiel, et de là commence le glissement de la fibre avec la matrice qui l'entoure jusqu'au point 3 où s'effectue l'arrachement total. La partie 2-3-4 de la figure 10 présente une allure semblable à celle des essais d'adhérence directs.

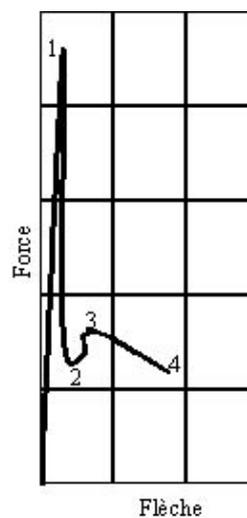


Figure 10: Courbe Force-Flèche obtenue lors d'un essai de flexion.

En ce qui concerne les valeurs expérimentales obtenues, on constate que la pente de la courbe effort-déplacement est proportionnelle au diamètre de la fibre dans le cas des deux premiers montages A et B. Inversement, cette pente

diminue quand le diamètre de la fibre augmente dans le cas du montage C.

Ceci peut être attribué vraisemblablement aux conditions de manipulation, la mise en tension de la fibre au début de l'essai étant difficile à contrôler.

La figure 11 montre que la contrainte d'adhérence correspondant au premier glissement varie très peu avec le diamètre de la fibre pour les montages A et B, alors qu'elle varie sensiblement avec le montage C. Il en est de même, pour la contrainte d'adhérence maximale (Fig. 12), avec toutefois une variation plus sensible dans le cas du montage B.

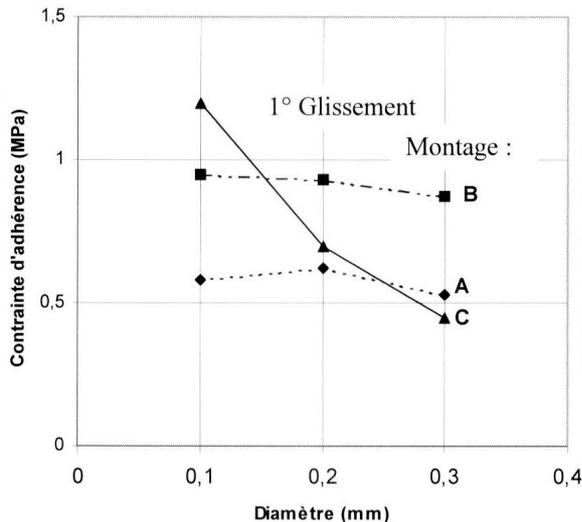


Figure 11 : Influence du diamètre de la fibre sur la contrainte d'adhérence correspondant au premier glissement dans le cas des trois modèles.

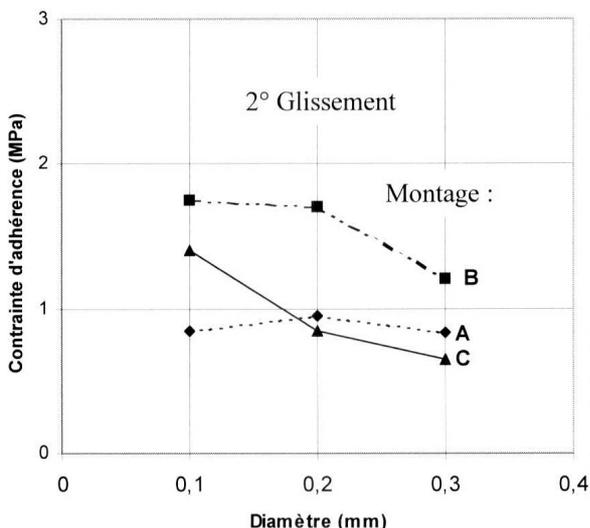


Figure 12 : Influence du diamètre de la fibre sur la contrainte d'adhérence correspondant au deuxième glissement dans le cas des trois modèles.

Il est toutefois intéressant de remarquer le point de rencontre observé sur la figure 13, sur laquelle est représenté le module d'arrachement en fonction du diamètre de la fibre. On enregistre une inversion totale, entre les montages A et C, qui se situe aux environs du diamètre de 0,15 mm.

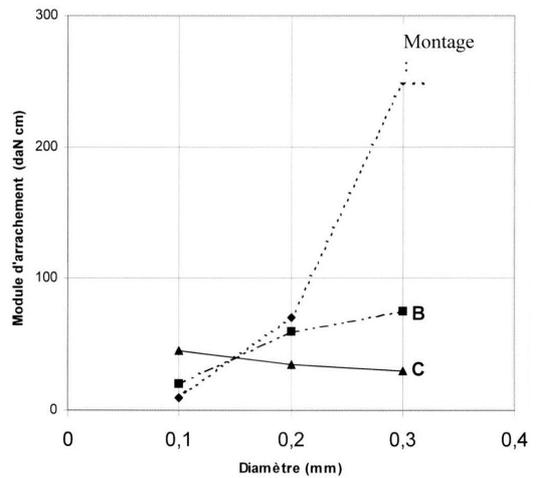


Figure 13 : Influence du diamètre de la fibre sur le module d'arrachement déplacement dans le cas du diamètre de 0,1 mm.

En ce qui concerne la conception des montages, la différence est nette, surtout lorsqu'on veut savoir comment s'effectue l'application de la sollicitation extérieure à la fibre (Fig. 14, 15 et 16).

Dans le cas des montages A et B, l'effort est appliqué directement en un point de la fibre. C'est là où ce type d'essai ne reproduit pas, à notre avis, les conditions réelles de la fibre dans un composite et, par conséquent, les valeurs de la contrainte d'adhérence ne sont en aucun cas comparables à celles que peut développer réellement la fibre.

Contrairement aux deux montages précédents, le montage C permet la transmission de l'effort extérieur par l'intermédiaire de la matrice, le corps d'épreuve étant monté entre deux rotules. Ce montage simule bien, avec sa partie non adhérente, l'instant où la matrice est rompue.

CONCLUSION

Les caractéristiques de la liaison dans les matériaux renforcés par des fibres restent relativement mal connus.

Le choix d'un modèle d'essai pour l'étude de ces caractéristiques est complexe. Il est, en effet, difficile de juger quantitativement si un tel modèle approche le comportement réel de la fibre dans le composite.

Il est donc souhaitable de réaliser parallèlement des essais directs d'arrachement et des essais indirects sur le matériau composite et de comparer le comportement de la fibre dans les deux cas. Ceci est difficile à réaliser mais doit mener à la standardisation nécessaire des types d'essais d'adhérence.

Pour notre cas, le montage C paraît le mieux adapté par l'état de contrainte qu'il engendre autour de la fibre. Il est à noter, toutefois, la difficulté de confection des échantillons pour les essais d'arrachement, notamment dans le cas des pâtes épaisses telles que l'argile ciment.

Au terme de cette étude comparative, on peut déjà dire que les valeurs obtenues avec les trois montages d'essais ne peuvent pas servir comme données de calcul pour la prévision des caractéristiques du matériau avant la rupture de celui-ci. Une étude antérieure [5] a montré que les fibres n'apportent pratiquement rien en ce qui concerne les résistances dans le cas d'une matrice de type argile ciment.

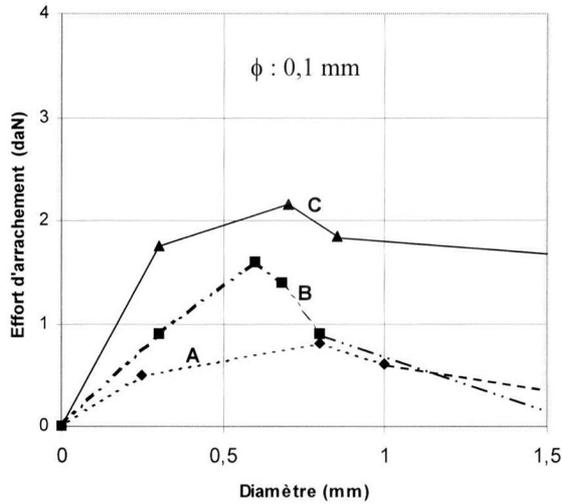


Figure 14 : Influence du mode d'essai sur l'allure de la courbe effort d'arrachement-déplacement dans le cas du diamètre 0,1 mm.

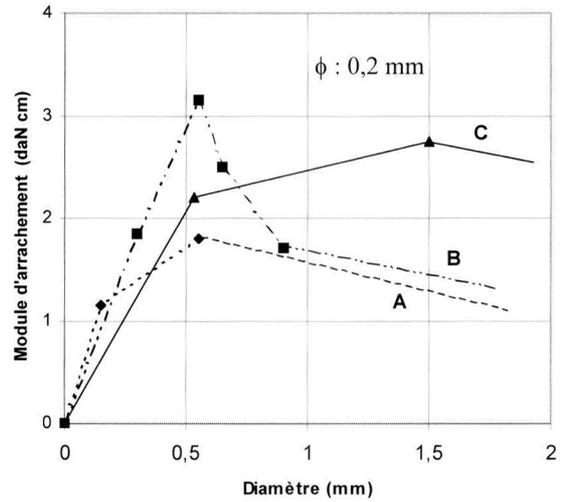


Figure 15 : Influence du mode d'essai sur l'allure de la courbe effort d'arrachement-déplacement dans le cas du diamètre 0,2 mm.

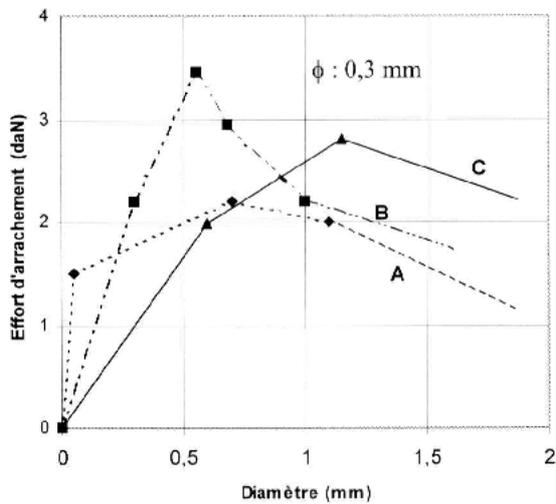


Figure 16 : Influence du mode d'essai sur l'allure de la courbe effort d'arrachement-déplacement dans le cas du diamètre 0,3 mm.

Tableau récapitulatif

Valeur de	Montage	Diamètre (mm)		
		0,1	0,2	0,3
Contrainte d'adhérence au premier glissement $\bar{\tau}$ (MPa)	A	0.55	0.59	0.53
	B	0.96	0.96	0.81
	C	1.1	0.7	0.41
Contrainte d'adhérence maximale $\bar{\tau}_{max}$ (MPa)	A	0.85	0.92	0.82
	B	1.74	1.66	1.22
	C	1.4	0.84	0.58
Pente (daN/cm ²)	A	20	75	247
	B	31	63	75
	C	53	40	32.5
Contrainte de traction $\bar{\sigma}_t$ (MPa)	A	1 006	554	325
	B	2 088	1 003	495
	C	2 801	840	389

$$\tau_{adh moy} = F_p / (\pi \Phi_f l_f)$$

$$\sigma = 4F_p / (\pi \Phi_f^2)$$

REFERENCES

- [1]-Bartos P., "Review paper : Bond in fibre reinforced cements and concretes", *Int. J. of Cem. Comp.*, vol. 3, N°3, august (1981).
- [2]-*Int. J. Adhesion and Adhesives*, vol. 3, N°3, october (1983).
- [3]-Bickley J.A., "The variability of pull-out tests and in-place concrete strength", *Con. Int.*, april (1982).
- [4]-Mimoun M., Aouadja F.Z, Doustens A., Laquerbe M., "Etude de la faisabilité de mise en forme par extrusion du composite argile-ciment-fibres", *Annales de l'ITBTP, série Matériaux*, N°531, février (1995), pp.25-40
- [5]-Mimoun M., Doustens A., Gharbi H., "Etude expérimentale de matériaux armés de fibres de verre mis en forme par extrusion" C.S.T.B Paris, mars (1987).
- [6]-Gharbi H., Doustens A., Mimoun M., "Comportement local d'un matériau à fort retrait de constitution armé de fibres", C.S.T.B Paris, mars (1987).
- [7]-Aouadja F.Z, Mimoun M., Doustens A., Laquerbe M., "Contribution à l'étude de simulation du procédé d'extrusion-Mise au point d'un nouvel appareil", *Materials and structures* 30 (1997), pp.561-565.
- [8]-Dehouse N.M., "Méthodes d'essais et caractéristiques mécaniques des bétons de fibres métalliques", RILEM, London (1975). □