
Étude expérimentale de la liaison d'adhérence entre les fibres végétales du palmier dattier et la matrice ciment

L'effet du traitement physique et chimique

Hamid Brahmi, Abdelmadjid Hamouine

*Laboratoire d'architecture et patrimoine environnemental
Université Tahri Mohamed Béchar
BP 417, 08000 Béchar, Algérie
ahamouine@gmail.com brahmi888@hotmail.fr*

RÉSUMÉ. Dans le cadre de nos recherches sur le phénomène d'adhérence entre la fibre végétale de palmier dattier et la matrice ciment, nous avons constaté que ce phénomène se dégrade au fur et à mesure que l'âge du mortier dépasse les 28 jours. Ce fonctionnement est tributaire du phénomène de durabilité. Afin d'améliorer le comportement de la fibre végétale du palmier dattier dans la matrice ciment (mortier) vis-à-vis de la contrainte d'adhérence, nous avons procédé à deux types de traitement, le premier traite directement la fibre (traitement alcalin et par autoclave), le second se fait par le remplacement d'une partie du ciment par un matériau pouzzolanique (pouzzolane ou métakaolin). Des essais d'arrachement direct (pull-out test) ont été réalisés pour déterminer la contrainte d'adhérence fibre-matrice ciment dont la maturité du mortier varie entre 3, 7, 14, 28, et 90 jours.

ABSTRACT. As part of our research on the adhesive bond between the vegetable fibers of date palm and cement matrix, we found that this phenomenon degrades progressively with the age beyond 28 days. It is well that this operation is tributary of the durability. To improve the behavior of the date palm fiber in cement matrix (mortar) vis-à-vis the bond stress , we conducted two types of treatment , the first directly addresses the fiber (alkaline treatment and autoclave), the second is done by replacing a portion of a cement by pozzolanic material (pozzolan or metakaolin) . Direct tests of (pull -out test) were performed to find the bond stress fiber - cement matrix whose the mortar maturity being varied between 3, 7, 14, 28, and 90 days.

MOTS-CLÉS : béton de fibres, fibres de palmier dattier, liaison d'adhérence, durabilité, traitement des fibres, alcalinité, matériaux pouzzolaniques, autoclavage.

KEYWORDS: fiber concrete, date palm, adhesive bond, durability, fiber treatment, alkalinity, pozzolanic materials, autoclaving.

DOI:10.3166/RCMA.26.135-146 © Lavoisier 2016

Extended abstract

In our days, and given the environmental problem, the development of eco-materials has a major importance.

The use of vegetable fibers as reinforcement for the concrete is a part of this development.

Algeria has enormous wealth of the date palm, and consequently the availability of palm's fibers. To this end, the objective of this study is to enhance the use date palm fibers as reinforcement for concrete elements by studying the adhesion phenomenon between the fiber and the cement matrix.

At first, we characterized the date palm fibers (tensile test, bulk density), then we proceeded to study the phenomenon of adhesion between the fiber and the cement matrix (mortar). Pull out tests were carried out to determine the characteristics related to the adhesion between the two materials.

The tests show that the tensile strength of the fiber is around 100 MPa, then the values of adhesion between the fiber and the matrix is approximately 300 KPa, where this behavior of adhesion is being degradable over the time. To improve this behavior, some treatments were be done (physical and chemical treatments), for the physical treatment we used autoclave treatment however soda treatment (NaOH) is used as chemical treatment. In other side the replacement of a part of cement by a pozzolanic material is used as a kind of treatment.

All the treatments used mark a drop of the adhesion constraint, but we can consider that the autoclave treatment marks the best treatment compared to the others.

1. Introduction

De nos jours, l'utilisation des fibres en tant que renfort pour les matrices cimentaires est d'une importance majeure, que ce soit pour valoriser des matériaux locaux ou pour l'amélioration des caractéristiques physico-mécaniques de la matrice ciment, à savoir : la résistance à la traction et à la flexion de la matrice, l'augmentation de la ductilité et la résistance à la fissuration (Edgars et Brahmī, 2009). Les fibres les plus utilisées sont les fibres synthétiques (fibres de polypropylène, acrylique, aramide, nylon...). Les fibres végétales sont récemment utilisées, parmi lesquelles on trouve les fibres de bagasse, noix de coco, jute, banane, bambou et les fibres de palmier dattier. Ces fibres présentent plusieurs avantages : leur faible coût, leur caractère biodégradable, renouvelable, et leur disponibilité. Toutes ces propriétés favorisent l'utilisation de ces fibres en tant que renfort pour les matrices (Djoudi et Benmansour, 2011).

La performance des fibres végétales dans le béton dépend en premier lieu du phénomène d'adhérence entre ces dernières et la matrice. Bessell et Mutuli (1999) ont démontré que la contrainte d'adhérence entre la fibre de sisal et la matrice béton est de l'ordre de 0,6 MPa (Romildo *et al*, 1999).

Le principal inconvénient des fibres végétales c'est la faible durabilité de ce genre de fibres dans les milieux alcalins et par conséquent dans les milieux cimentaires ($\text{pH} > 12$). Cette faible durabilité apparaît par la dégradation des propriétés mécaniques de la fibre et même du composite. Nilsson (1975) a démontré que les fibres de sisal ont une contrainte acceptable à l'état initial, mais une dégradation d'environ 78 % de cette résistance a été constatée après immersion de ces fibres dans une solution alcaline. Yong *et al.* (1995) ont déduit que la fibre de palmier dattier perd environ 84 % de sa résistance à la traction après six mois d'immersion dans une solution d'hydroxyde sodium NaOH ($\text{pH} = 12,5$) (Kriker *et al.*, 2008).

Des études ont été menées, pour améliorer la durabilité de la fibre végétale dans les milieux alcalins (béton), que ce soit par un traitement de la fibre ou par modification de la matrice. Plusieurs études montrent l'influence des divers traitements de la fibre végétale sur les performances de cette dernière et même sur le composite. Parmi les traitements chimiques existants on trouve la mercerisation, l'acrylation, le permanganate, le traitement par le silane ; ces traitements ont pour but de diminuer le groupe d'hydroxyle dans la fibre. Le traitement alcalin (traitement par solution d'hydroxyde sodium NaOH) appelé aussi mercerisation des fibres végétales, améliore l'adhérence fibre-matrice par la suppression des impuretés naturelles et artificielles qui sont accumulées sur la surface de la fibre (Mishra *et al.*, 2001). De plus, les traitements physiques ont une grande part dans l'amélioration de durabilité de la fibre végétale, parmi ces traitements on trouve le traitement par autoclave. Yarimko (2012) a démontré que les fibres de lin traitées par autoclave absorbent 20 % moins d'humidité par rapport aux fibres non traitées et conservent leur propriétés mécaniques.

Par ailleurs, des littératures utilisent la modification de la matrice cimentaire. Cette modification se fait par le remplacement d'une partie du ciment par des ajouts pouzzolaniques afin de réduire l'alcalinité de la matrice. Silva *et al.* (2009) ont remplacé une partie du ciment par l'argile broyée calcinée et le métakaolin (Flavio, 2009), cette étude exprime une conservation de la ténacité du composite (fibres-matrice) après 100 cycles de séchage et humidification.

2. Méthode expérimentale

2.1. Matériaux utilisés

2.1.1. La fibre du palmier dattier

Les fibres que nous avons utilisées dans ce travail sont celles de la palme du palmier dattier (FPD), exactement dans la partie dite « foliole » (figure 1).

2.1.2. La matrice cimentaire

La matrice cimentaire utilisée de cette étude est composée d'une partie du ciment CPJ CEM II 42.5/B, et trois parties de sable. Le 'E/C' est égal à 0,55 (tableau 2).

Tableau 1. Propriétés physiques des fibres de palmier

Fibre de palmier	
Longueur en (mm)	150
Largeur en (mm)	7
Epaisseur en (mm)	0,55
Teneur en eau (%)	53,6
Masse volumique (Kg/m ³)	720
Coefficient d'absorption (%)	132

*Figure 1. Fibres de palmier dattier (foliole)*

2.2. Les traitements effectués

2.2.1. Traitement de la fibre

Nous avons effectué un traitement chimique sur la fibre (traitement alcalin), et un autre traitement physique (autoclave). Le traitement chimique se fait par l'immersion de ces fibres dans des solutions d'hydroxyde de sodium (NaOH) de diverses concentrations (0,5 %, 1 %, 1,5 %, 5 %, et 10 %) durant une heure sous une température de 100 °C. Elles sont ensuite lavées avec de l'eau pour éliminer l'excès de NaOH. Le dernier lavage se fait avec de l'eau distillée, ensuite les fibres sont séchées à l'air libre. Le traitement physique (autoclave) consiste à mettre les fibres pendant 30 minutes en présence de vapeur d'eau saturante à une température légèrement supérieure à 130 °C et pour laquelle la tension de vapeur est de 2 bars. Cette étape est suivie d'une autre de séchage à température ambiante (Sbiai, 2011).

2.2.2. Modification de la matrice

Pour la modification de la matrice, nous avons remplacé 30 % de la masse du ciment par l'un des deux matériaux pouzzolaniques, qui sont la pouzzolane naturelle

et le métakaolin. La pouzzolane naturelle utilisée provient de la carrière de Béni-Saf (ouest de l'Algérie). Elle a été broyée et tamisée au tamis de 80 μm . Le métakaolin est une pouzzolane artificielle obtenue par calcination et broyage d'une argile kaolinique – ARGICAL-M 100, (AGC). Les caractéristiques de ces deux matériaux sont regroupées dans le tableau 3.

Tableau 2. Compositions des mortiers utilisés

	Sable (g)	Ciment (g)	Pouzzolane (g)	Méta-kaolin (g)	Super-plastifiant (g)	Eau/liant
Type I	1350	450	0	0	0	0.55
Type II	1350	315	135	0	6.75	0.55
Type III	1350	315	0	135	9	0.55

Tableau 3. Composition chimique des matériaux utilisés en (%)

	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O (%)	CaO (%)	MgO (%)	CaO (libre) (%)	SO ₃ (%)
Ciment	23,7	6,58	4,0	64,95	0,32	0,33	/
Pouzzolane	46,86	16,62	9,37	9,38	2,84	/	0,36
Métakaolin	55	40	1,4	0,3		/	/

3. Comportement mécaniques des fibres après traitement

3.1. Comportement vis-à-vis de la traction directe

Afin d'étudier l'influence des différents traitements de la fibre (FPD) sur sa propre résistance à la traction et sa déformation, on a effectué des essais de traction directe sur des fibres traitées par :

- voie chimique : usage de NaOH (0,5 ; 1 ; 1,5 ; 5 et 10 % de NaOH),
- voie physique : usage de l'autoclave.

De plus, des fibres non traitées ont été testées pour garder des valeurs témoins.

La presse utilisée est une machine d'essai universelle d'une capacité maximale égale à 5 KN (précision de 0,01N), cette presse est utilisée pour la traction directe et l'arrachement des fibres.

La figure 2 illustre une courbe force-allongement obtenue à partir d'un essai de traction d'une fibre de palmier dattier. On remarque que la force et l'allongement

maximale à la rupture de cette dernière sont : 180 N et 1,85 mm respectivement, et la rupture de la fibre se fait juste après le dépassement de la force maximale, le module d'Young de la fibre est égal à ($E = 2670 \text{ MPa}$).

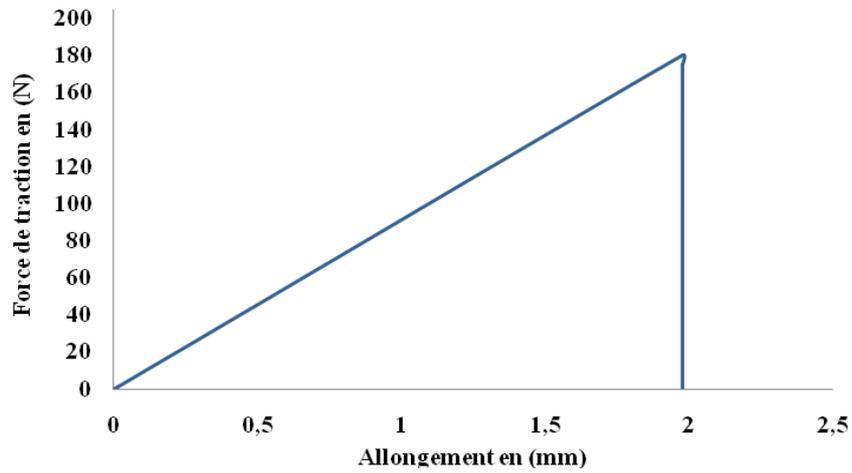


Figure 2. Courbe type force-allongement d'une fibre (FPD) non traitée soumise à la traction

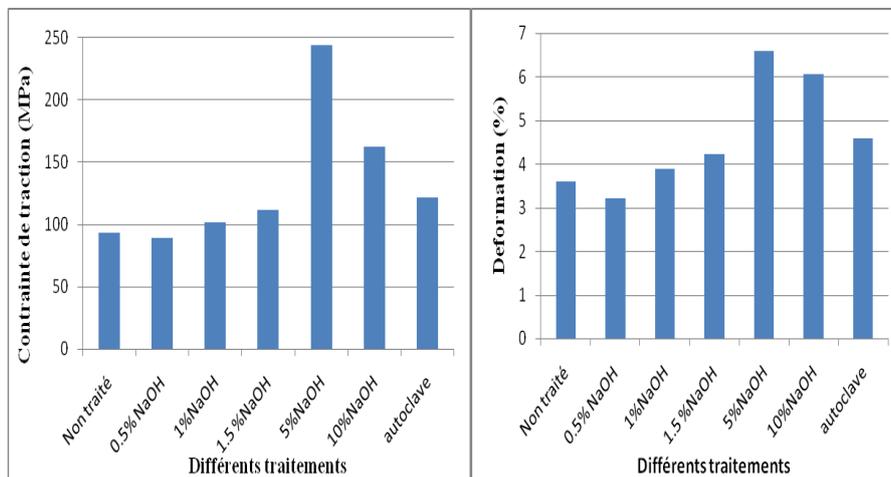


Figure 3. La Contrainte et la déformation à la rupture par traction des fibres traitées et non traitées

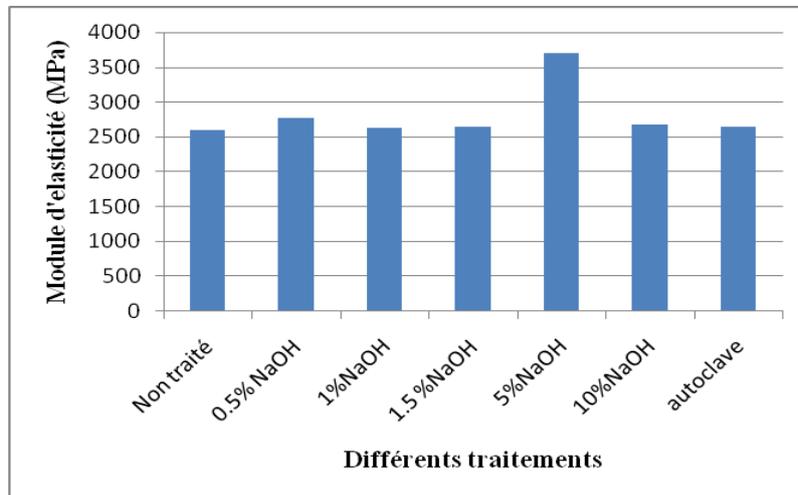


Figure 4. Le module d'élasticité à la rupture par traction des fibres traitées et non traitées

Après les traitements effectués sur les fibres, et comme illustré dans les figures 3 et 4, il apparaît que la contrainte de rupture à la traction des fibres augmente avec l'augmentation de la concentration de la solution de soude (NaOH) jusqu'à la valeur de 5 % de cette solution, car cette contrainte est égale à 93,35 MPa pour une concentration de 0 %, ensuite elle atteint une valeur de 244,02 MPa pour une concentration de 5 %. Cette amélioration de la contrainte est due en premier lieu à la solution de soude qui supprime les impuretés accumulées sur la surface de la fibre et affecte les propriétés de cette dernière. Par contre, au-delà de cette concentration, la résistance diminue à cause de la forte concentration de soude qui pénètre la fibre et infecte sa structure, et par conséquent dégrade ses caractéristiques mécaniques.

Le traitement par autoclave donne des résultats inférieurs à ceux enregistrés par traitement à la soude, mais restent toujours supérieurs à ceux des fibres non traitées d'environ 121 MPa pour l'autoclave et 93 MPa pour les fibres non traitées.

3.2. Comportement de la fibre vis-à-vis de son adhérence avec la matrice:

Pour trouver la contrainte d'adhérence entre les fibres (FPD) et la matrice ciment (le mortier), des essais d'arrachement (pull-out test) ont été effectués sur des éprouvettes où la dimension du bloc du mortier est de $(4 \times 4 \times 3 \text{ cm}^3)$, la fibre a une longueur de 15 cm avec 4 cm d'ancré. Cette dernière sera simplement soumise à une force de traction axiale, le bloc du mortier étant maintenu fixe pour permettre la mise en valeur du glissement de la fibre.

Le dispositif expérimental destiné à assurer cette manipulation est identique à celui de l'essai de traction directe (presse universelle de 5 KN à pilotage automatique). L'acquisition des données se fait simultanément par une chaîne d'acquisition intégrée à la presse, elle permet l'enregistrement du glissement de la fibre et la force d'arrachement appliquée sur la force.

La force maximale (F_{\max}) est automatiquement acquise et permet le calcul de la contrainte d'adhérence (Hamouine, 1995).

$$\tau = \frac{F}{S} \quad (1)$$

avec τ : contrainte d'adhérence et S : surface de contact entre la fibre et la matrice.

Les paramètres de ce protocole d'essai à prendre en considération sont :

1. Fibres traitées physiquement : la technique d'autoclave a été choisie pour ce type de traitement.
Fibres traitées chimiquement : la concentration de la soude étant choisie entre 5 % et 10 % (pour 0 % les fibres sont considérées non traitées)
2. Nous avons choisi l'âge du mortier suivant les normes c.-à-d. (3 ; 7 ; 14 ; 28 et 90 jours).
3. Le dosage du ciment étant variable entre 100 % et 70 % tout en sachant que le complément du dosage est assuré tantôt avec de la pouzzolane 30 %, tantôt avec du métakaolin de 30 %.

La figure 5 exprime l'allure de la courbe type contrainte-allongement d'un essai d'arrachement d'une fibre ancrée dans un bloc du mortier.

Les figures 6 et 7 représentent l'effet des différents traitements chimiques et physiques de la fibre sur la liaison d'adhérence fibre-matrice. La contrainte [τ] dans le cas des fibres non traitées a un comportement décroissant vis-à-vis du temps, car elle enregistre une perte de résistance de 80 %, dont la résistance décroît de 300 KPa à l'âge de 3 jours jusqu'à 60 KPa à l'âge de 90 jours. Ce comportement de faible durabilité de la fibre végétale dans les milieux cimentaires a déjà été observé. D'autres chercheurs l'ont mentionné dans leur rapport de recherche, notamment pour les fibres de palmier dattier (Kriker *et al.*, 2008).

Le traitement chimique par la soude donne une augmentation de la contrainte d'adhérence, car à l'âge de 28 jours, elle est égale à 210 KPa ; par contre elle va vers 140 KPa pour les fibres non traitées. Cette augmentation est due à l'effet du NaOH sur la fibre qui améliore l'état de sa surface de contact. De plus, la soude réduit le caractère hydrophile de la fibre c'est-à-dire qu'elle absorbe moins d'eau interstitielle du composite.

En outre, les contraintes d'adhérence des fibres traitées par autoclave sont nettement inférieures à celles des fibres non traitées, mais elles conservent un comportement durable vis-à-vis du mortier jusqu'à 28 jours (avec une valeur de [τ] à 210 KPa). Ceci peut être expliqué par l'effet du traitement par autoclave qui diminue

la rugosité de la surface de la fibre. En conséquence, on doit signaler que la contrainte d'adhérence perd d'environ 20 % de sa propre valeur due à l'atténuation du pourcentage des composants chimiques de la fibre (l'hémicellulose et la lignine).

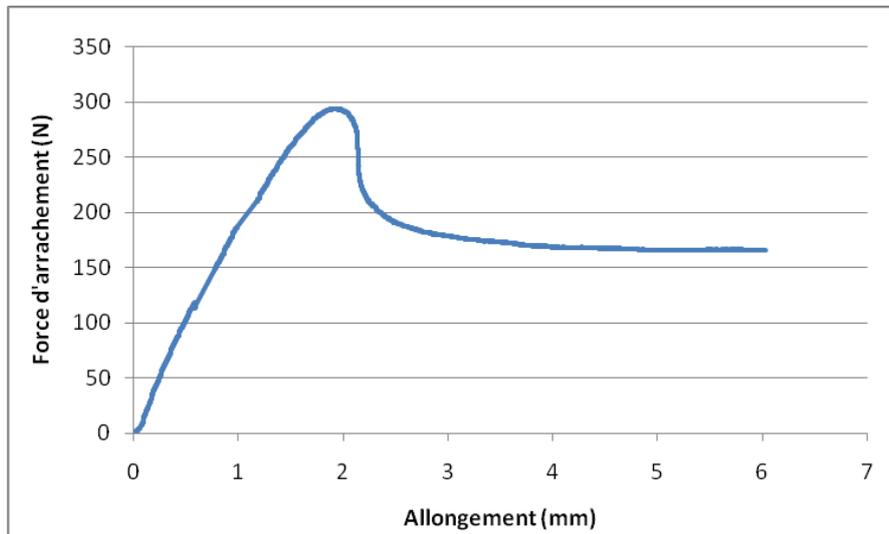


Figure 5. Courbe type d'arrachement d'une fibre (FPD) ancrée dans un cube de mortier

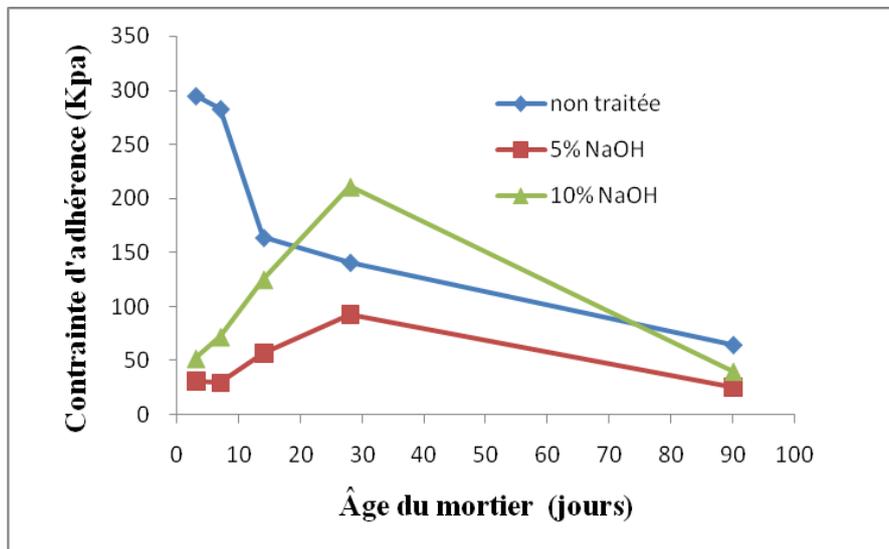


Figure 6. Contrainte d'adhérence d'une fibre traitée chimiquement

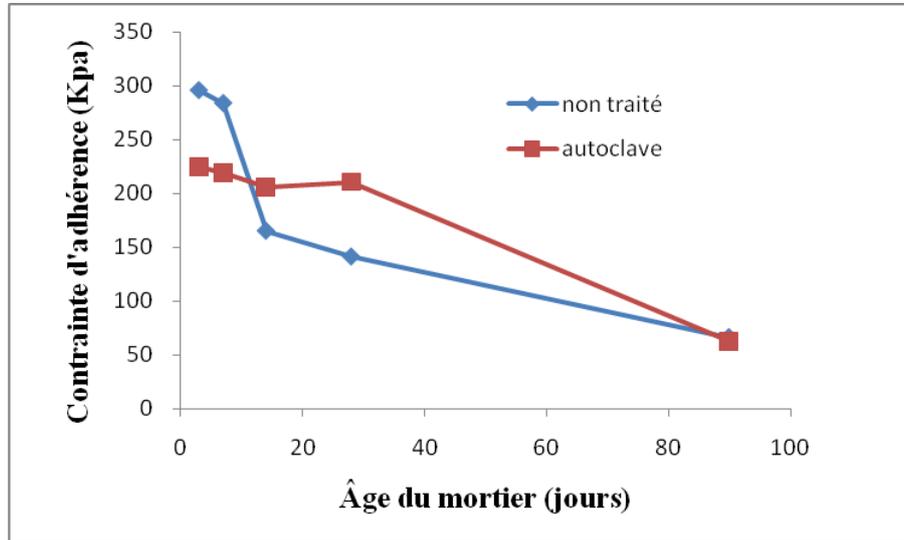


Figure 7. Contrainte d'adhérence d'une fibre traitée physiquement

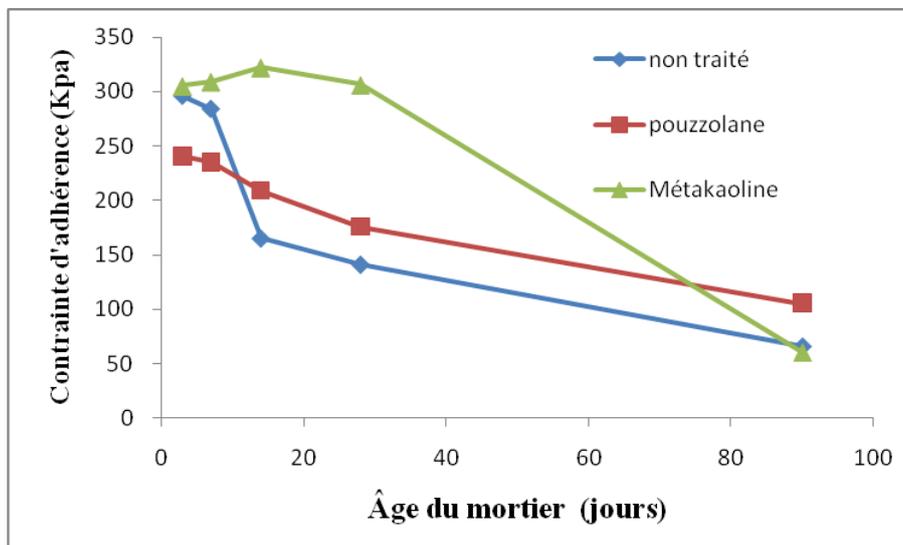


Figure 8. Contrainte d'adhérence avant et après modification de la matrice

D'après la figure 8, on remarque que les matériaux pouzzolaniques ont un effet favorable sur la durabilité du composite vis-à-vis de la contrainte d'adhérence, car

elle garde sa valeur (300 KPa) à l'âge de 3 à 28 jours pour le cas du métakaolin. Ce comportement très favorisant en durabilité est dû à ces matériaux pouzzolaniques minimisant le taux d'alcalinité de la matrice cimentaire et par conséquent l'immigration du groupe d'hydroxyle de la matrice vers la fibre, mais toujours, on a une faible durabilité à l'âge de 90 jours.

Pour la pouzzolane, la contrainte d'adhérence est inférieure à celle de la matrice non modifiée jusqu'à l'âge de 7 jours ; au-delà de cet âge, la contrainte devient supérieure même à l'âge de 90 jours. La modification de la matrice par la pouzzolane est donc le meilleur traitement pour améliorer la durabilité de la liaison fibre-matrice.

4. Conclusion

À partir des essais effectués et des résultats obtenus, on peut tirer une brève analyse du comportement des fibres végétales du palmier dattier dans la matrice ciment vis-à-vis de la traction directe et l'arrachement, en plus de l'efficacité des traitements effectués sur leur propriétés mécaniques.

Du point de vue mécanique, nous nous contentons des résultats des essais expérimentaux que nous avons effectués au laboratoire de génie civil, car la résistance à la traction propre des fibres utilisées dans ce travail (93,35 MPa) est nettement supérieure à celle du béton qui ne peut atteindre les 5 MPa (béton ordinaire). Cette performance encourage l'usage des fibres de palmier dans la composition du béton de fibre.

On peut conclure aussi que les traitements par 5 % NaOH et par autoclave améliorent la résistance à la traction des fibres d'environ 162 % et 32 % respectivement, mais du point de vue mécanique et environnemental, le traitement par autoclave donne le meilleur résultat, même pour l'adhérence fibre matrice. Ce traitement donne la stabilité chimique de la fibre dans la matrice ciment.

Concernant la modification de la matrice, les matériaux pouzzolaniques (pouzzolane, métakaolin) diminuent l'alcanité de la matrice et par conséquent la stabilité chimique de la fibre. Malgré une certaine perte de valeur de la contrainte d'adhérence à l'âge de 90 jours, cette dernière reste toujours supérieure à celle du cas de la matrice non modifiée.

Bibliographie

Adil S. (2011). *Matériaux composites à matrice époxyde chargée par des fibres de palmier dattier : effet de l'oxydation au tempo sur les fibres*. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

AGC-fiche technique du produit selon Norme NF 18-513, Révision 5 –2009/10/15.

Almaadeed M., Ramazan M. (2013). Characterization of untreated and treated male and female date palm leaves. *Matériels and Design*. Vol. 52, p. 526-531.

- Alwan M. A. Naaman E., Hansen W. (1991). Pull-Out Work of Steel Fibers from Cementitious Composites: Analytical Investigation. *Cement & Concrete Composites* vol. 13 p. 247-255.
- Andrade F., Barzin M. (2009). *Advances in Natural Fiber Cement Composites: A Material for the Sustainable Construction Industry*. 4th Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS4), 2009.
- Bei W. (2004). *Pre-treatment of flax fibers for use in rotationally molded biocomposites*. Thesis for the Degree of Master of Science engineering University of Saskatchewan Saskatoon, Saskatchewan.
- Benmansour N. (2011). *Etude des performances de produits renouvelables et locaux adaptés aux applications de l'isolation thermique dans le bâtiment*. Thèse de Magister, Université el hadj Lakhdar Batna.
- Brahmi H. (2011). *Adhérence des fibres végétales de palmier dattier au béton hydraulique*. Mémoire de Master Université de Bechar.
- Canovas M, Selva N. H. (1992). New economical solutions for improvement of durability of Portland cement mortars reinforced with sisal fibers. *Materials and Structures*, p. 417-422.
- Dias Filho R., Kuruvilla J. (1999). The use of sisal fibre as reinforcement in cement based composites, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 3, n°.2, p. 245-256.
- Djoudi A., Mouldi Khenfer M., Bali A. (2009) *Etude d'un nouveau composite en plâtre renforcé avec les fibres végétales du palmier*. 1st International Conference on sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) – October 12-14, 2009
- Hamouine A., Lorrain M. (1995). Etude de la résistance d'arrachement de barres enrobées dans du béton de hautes performances. *Materials and Structures*, vol. 28, p. 569-574.
- Khiari R., Mhenni M.F. (2010). Chemical composition and pulping of date palm rachis and *Posidonia oceanica*—A comparison with other wood and non-wood fiber sources. *Bioresource Technology*, vol. 2. p.775–780.
- Kriker A., Bali A., Debicki G. (2008). Durability of date palm fibers and their use as reinforcement in hot dry climates. *Cement & Concrete Composites* vol. 1, 639–648.
- Silva F., Mobasher B. (2009). Bond mechanisms in sisal fiber reinforced cement composites. *Proceedings of the 11th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies* (NOCMAT 2009) Bath, UK, 6-9 September 2009.
- Sparnins E. (2006). *Mechanical properties of flax fibers and their composites*. Licentiate thesis Lulea University of Technology Department of Applied Physics and Mechanical Engineering Division of Polymer Engineering.
- Yaremko C. (2012). *Durability of Flax Fiber Reinforced Concrete*, a thesis for the Degree of Master of Science in the Department of Civil Engineering University of Saskatchewan, Saskatoon.
- Yong N. (1995). *Natural fiber reinforced cement composites*. Thesis department of mechanical engineering Victoria University of technology Australia.