

Traitement des fibres de chanvre au NaOH dans le renforcement des structures en béton

Toma Pehlivanov

Département de Mécanique Appliquée
Université de Technologie Chimique et
de Métallurgie (UTCM)
Sofia, Bulgarie
fpehlivanov@gmail.com

Jules Assih

Laboratoire ITheMM
Université de Reims ChampagneArdenne
(URCA)
Reims, France
jules.assih@univ-reims.fr
<http://orcid.org/0000-0001-6157-6273>

Lazar Velichkov

Département de Mécanique Appliquée
Université de Technologie Chimique et de
Métallurgie (UTCM)
Sofia, Bulgarie
lvelichkov80@gmail.com

Cheikhna Diagana

Laboratoire ITheMM
Université de Reims ChampagneArdenne
(URCA)
Reims, France
cheikhna.diagana@univ-reims.fr
<http://orcid.org/0009-0003-8528-5593>

Ivelina Ivanova

Laboratoire ITheMM
Université de Reims
ChampagneArdenne (URCA)
Reims, France
ivelina.ivanova@univ-reims.fr
<https://orcid.org/0000-0001-9332-5848>

Dimitar Dontchev

Département de Mécanique Appliquée
Université de Technologie Chimique et
de Métallurgie (UTCM)
Sofia, Bulgarie
dontchev@uctm.edu
<http://orcid.org/0000-0002-9319-9471>

Résumé — Les préoccupations environnementales croissantes et la recherche de matériaux durables ont considérablement accru l'intérêt pour les fibres naturelles utilisées comme renforts dans les matériaux composites. Parmi celles-ci, la fibre de chanvre se distingue par ses excellentes propriétés mécaniques, sa biodégradabilité et son faible impact environnemental. La fabrication d'un matériau composite à partir de fibre de chanvre constituera une bonne alternative écologique aux autres matériaux épuisables. Cet article présente une étude sur les effets du traitement au NaOH sur les fibres de chanvre, qui sont utilisées pour renforcer les structures en béton. Des éprouvettes prismatiques 10×10×40 cm en béton ont été renforcées avec 1 à 5 couches de fibres de chanvre traitées au NaOH collées à la surface tendue. Les résultats obtenus montrent une augmentation de la charge de la rupture de plus de 35%, par rapport aux spécimens de références.

Mots-clés — fibre de chanvre, bio-époxy, traitement NaOH (alcalin), renforcement, béton

I. INTRODUCTION

La faible capacité du béton en traction, justifie principalement l'utilisation de la technique de renforcement par collage extérieur de plaques en fibres composite [1,2]. Cet article présente une étude sur les effets du traitement au NaOH sur les fibres de chanvre, qui sont utilisées pour renforcer les structures en béton. Les fibres naturelles telles que le chanvre offrent des avantages en matière de durabilité (renouvelables, faible densité, faible énergie grise) tout en offrant une résistance/rigidité spécifique adéquate. Cependant, l'hydrophilie et les constituants non cellulodiques peuvent entraver l'adhésion fibre-matrice [1]. Cette recherche étudie les traitements d'interface (NaOH), compare les performances avec une époxy structurelle conventionnelle (Sikadur 330) et une époxy biosourcée (GreenPox 56). Les composites à fibres naturelles (chanvre, lin, jute, sisal) ont fait l'objet de nombreuses études pour leur capacité en traction et en flexion, leur durabilité et leur impact environnemental. Les traitements comprenant l'alcalinisation, la benzylation, le blanchiment, l'acétylation, le couplage au silane et l'activation plasma, améliorent la liaison interfaciale en éliminant l'hémicellulose/lignine, en rendant rugueuses les surfaces et en introduisant des groupes réactifs [3–10]. Dans les systèmes cimentaires et les applications liées à l'extérieur, ces traitements peuvent augmenter la résistance et l'absorption d'énergie tout en améliorant la résistance à l'humidité [3-7]. En effet, les bio-époxydes offrent une

empreinte environnementale plus faible et peuvent approcher les performances des systèmes à base de pétrole [2].

II. MATÉRIEL ET MÉTHODES

A. Matériaux

1) Béton

Le béton est composé de sable, de gravier, d'eau et de ciment Portland de type II comme liant dans les proportions suivantes : 1:1,7:2,9. La taille maximale de l'agrégat est de 12.5 mm. Le béton a atteint une résistance moyenne à la compression de 35 ± 2 MPa et un module d'élasticité de 30 ± 3 GPa à 28 jours, avec un coefficient de Poisson de $0,25 \pm 0,05$. Le même mélange de béton est également utilisé pour cette étude. Les moules prismatiques de dimensions 10x10x40 cm ont servi à élaborer les éprouvettes béton. Les prismes en béton mesuraient 10×10×40 cm et étaient représentatifs d'un mélange de résistance normale (35 MPa à 28 jours, module d'élasticité 30±3 GPa).

2) Fibres de chanvres

Les résultats des essais sur les fibres de chanvre en traction montrent qu'elles présentent une résistance et une rigidité sensiblement élevées. Par exemple, les auteurs [11] donnent les caractéristiques mécaniques des fibres de chanvre non traitées, en traction de 565Mpa et un module d'Young de 92 GPa.

3) Colles adhésives

Les adhésifs utilisés dans cette étude sont tous composés de résines époxydes et d'un durcisseur. Ils contiennent des charges minérales dont la géométrie et la nature chimique varient en fonction de l'adhésif. Ce sont les colles Sikadur330. On dispose également de la résine GreenPox 56 qui est une colle biosourcée. C'est une bicomposante composée d'une résine et d'un durcisseur, dont la prise est plus longue. Pour élaborer les plaques composites, deux types de tissu en fibres de chanvre ont été utilisés, dont les mailles 2x2 mm et 3x3 mm comme indiqué dans le tableau 1, de tailles différentes entre les fibres.

B. Traitements de surface des fibres

Alcalinisation : les tissus en fibres de chanvre ont été immergés dans 5 % de NaOH pendant une heure ou deux

selon les séries, puis rincés et neutralisés à l'acide chlorhydrique (HCl dilué), et enfin séchés à l'air durant 48 heures. Le processus élimine les cires, l'hémicellulose et la lignine, réduit l'hydrophilie et augmente la rugosité des surfaces.

C. Préparation de l'échantillon

Nous avons réalisé deux types de tests : en traction sur les tissus de mailles 2x2 mm et 3x3 mm et en flexion sur des éprouvettes en béton renforcées par des tissus de fibres de chanvre. Les colles utilisées pour l'application des tissus sur la surface tendue de la poutre fléchie, sont Sikadur 330 et GreenPoxy 56. Nous comparons utilement l'influence de l'épaisseur des plaques composites variant de 1 à 5 couches de tissus de fibres traitées pendant une heure ou deux et celles non traitées. Le tissu de fibres est collé sur une surface de 28 cm de long par 6 cm de large. La préparation de la surface est réalisée par meulage/nettoyage standard pour assurer le fonctionnement correct de transfert des charges.

D. Méthodes d'essai

Lors des essais de traction, la force maximale de rupture est déterminée et sert de paramètre d'évaluation, tandis que pour les essais de flexion, c'est la charge ultime qui sert de référence. Le dispositif expérimental est composé d'une chaîne d'acquisition automatique de 24 voies et d'un bâti de traction et flexion d'une capacité de 250kN. Nous disposons des jauges de contraintes pour mesurer les déformations de la plaque composite.

III. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les résultats issus des essais de traction sont présentés dans le tableau I et ceux de la flexion pour dimensionner l'épaisseur de la plaque dans le tableau II. Les résultats montrent que l'effet du traitement par le NaOH a peu d'influence sur la charge ultime de rupture. Cependant, en ce qui concerne l'épaisseur (voir tableau II) de la plaque composite en tissus de fibres de chanvre, une variable notable est faite à partir de la quatrième couche.

TABLEAU 1. FORCE MOYENNE À LA RUPTURE POUR LES COUPONS DE CHANVRE/ÉPOXY

Résine	Layup	Traitement des fibres	Force moyenne à la rupture (N)
Sikadur 330	2×2	Non traité	861.25
Sikadur 330	2×2	NaOH 1 h	755.00
Sikadur 330	2×2	NaOH 2 h	758.75
Sikadur 330	3×3	Non traité	1340.00
Sikadur 330	3×3	NaOH 1 h	1476.67
Sikadur 330	3×3	NaOH 2 h	578.33
GreenPoxy 56	2×2	Non traité	553.33
GreenPoxy 56	2×2	NaOH 1 h	676.67
GreenPoxy 56	2×2	NaOH 2 h	688.33
GreenPoxy 56	3×3	Non traité	326.67
GreenPoxy 56	3×3	NaOH 1 h	234.33
GreenPoxy 56	3×3	NaOH 2 h	319.33



Fig. 1 Traction sur tissu de fibres de chanvre

Les prismes en béton ont donné des résultats variables. L'amélioration maximale obtenue en termes de résistance à la flexion a été atteinte avec quatre couches. Cinq couches ont présenté une rupture non pas au niveau du composite, mais au niveau du béton lui-même. Le tableau 2 illustre clairement cette tendance. La figure 2 illustre la nature de l'essai de flexion.

TABLEAU 2. PRISMES EN FLEXION — GREENPOXY 56 AVEC DU CHANVRE TRAITÉ AU NAOH

Nombre de couches	F_{max}/F_0	F_{max} (N)
-	-	12.09
1	55%	18.72
2	35%	16.38
3	46%	17.70
4	99.9%	24.17
5	86%	22.54



Fig. 2 : Essai de flexion sur l'éprouvette prismatique en béton

La durée de traitement joue un rôle essentiel dans les performances d'adhérence, car un traitement NaOH d'une heure améliore l'adhérence, tandis que l'extension du traitement à deux heures provoque une surgravure et une réduction de la résistance de l'échantillon. Dans les échantillons avec une distance interfibre de 3 mm sur 3 mm, la qualité de la couche et l'infiltration de résine sont particulièrement importantes, en particulier lorsque des bio-

époxydes à viscosité plus élevée sont utilisés. Pour les rénovations en flexion, la stratification progressive d'une à cinq couches doit être conçue en tenant compte de la longueur de la liaison, de l'ancrage d'extrémité et du décollement potentiel pour assurer la fiabilité structurelle. Les résultats expérimentaux permettent d'abord de comparer l'efficacité mécanique des adhésifs employés. La Fig. 4 met en évidence l'effet du collage externe de tissus de chanvre traités avec NaOH sur des échantillons de béton. Selon le nombre de couches appliquées, les courbes force-déplacement montrent une amélioration notable de la rigidité et de la charge ultime par rapport à l'échantillon non renforcé (NR). L'association entre l'adhésif choisi et le nombre de plis de renfort s'avère donc déterminante pour optimiser le comportement mécanique global du béton renforcé.

A. Influence des différents adhésifs

La Fig. 3 illustre le comportement tractionnel de deux colles : l'adhésif commercial Sika et une résine biosourcée. On observe que la résine biosourcée présente une capacité de déformation plus importante et maintient la résistance sur une plage de déplacement plus large, tandis que l'adhésif Sika atteint plus rapidement sa charge maximale mais rompt brutalement. Ces différences influencent directement la performance des systèmes renforcés

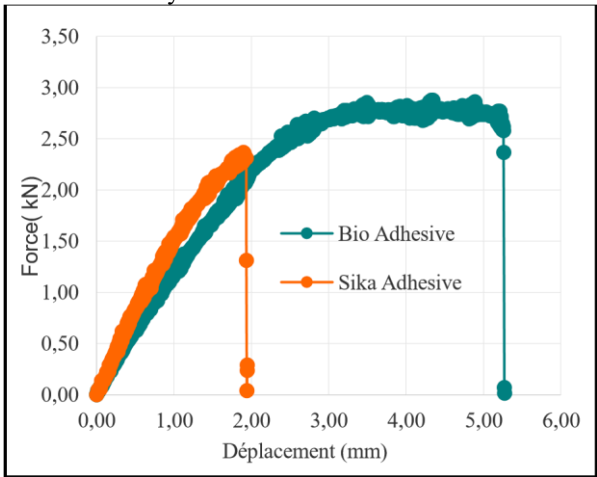


Fig. 3 Comportement mécanique des adhésifs Sika et résine biosourcée lors d'essais de traction.

B. Influence du nombre de couches dans la plaque composite

Le tableau 2 présente le renforcement par différentes couches de tissu de chanvre. Les résultats montrent que le nombre de couches a une influence sur la charge ultime. Fig.3 illustre l'influence d'un traitement à base de NaOH sur le comportement mécanique des épreuves renforcées par différentes épaisseurs de composite. Les résultats montrent une augmentation de la charge ultime à partir de 4 couches d'épaisseur de composite. Cependant, un phénomène de fluage entre les différentes couches de tissus en fibres de chanvre est observé dans le cas de renforcement avec 5 couches au cours de cette étude. Fig. 3 présente le comportement mécanique sous essais de flexion des éprouvettes renforcées. L'éprouvette renforcée par 5 couches de tissu en fibre de chanvre montre une perturbation après 15 kN suivie d'un changement de pente plus prononcé avant la rupture.

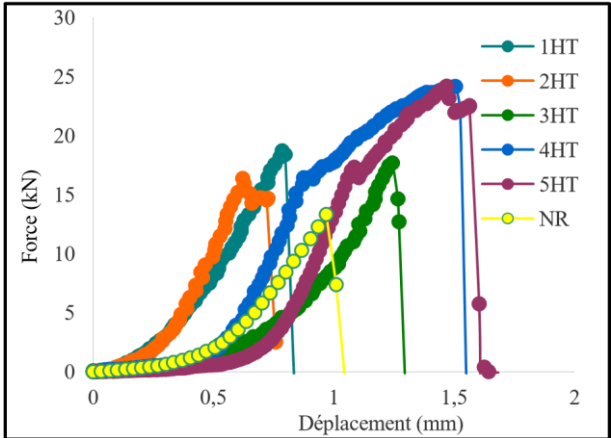


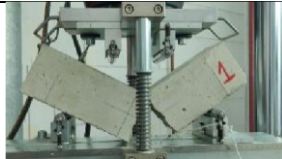
Fig. 4 Effet du renforcement du béton par collage externe de tissus de chanvre traités avec NaOH.

L'arrachement du béton a été observé principalement sur l'éprouvette à 5 couches. Ceci est clairement visible sur les courbes fournies par le capteur de déplacement. Néanmoins, l'influence du nombre de couches de tissu de fibres sur le comportement des poutres en béton armé montre que les tissus en fibres naturelles présentent une élasticité linéaire jusqu'à la charge ultime.

C. Modes de rupture

Le tableau 2 présente les différents résultats après le test de flexion à quatre points. Les résultats montrent deux types de modes de ruptures : une fissure de flexion dans le béton avec et la rupture de la plaque composite pour les éprouvettes renforcées de 1 à 4 couches et à partir de 5 couches, un arrachement du béton a été observé.

TABLEAU 3. MODES DE RUPTURE

Eprouvettes	Modes de rupture	
Non renforcée		Rupture de flexion
Renforcé avec 1 couche de plaque composite de chanvre		Rupture de la plaque
Renforcé avec 2 couches de plaque composite de chanvre		Rupture de la plaque
Renforcé avec 3 couches de plaque composite de chanvre		Rupture de la plaque

Renforcé avec 4 couches de plaque composite de chanvre		Rupture de la plaque
Renforcé avec 5 couches de plaque composite de chanvre		Arrachement du béton

IV. CONCLUSIONS

Les tissus en fibres de chanvre peuvent fournir un renforcement efficace lorsqu'ils sont correctement traités et traités. Une légère alcalinisation (une heure dans 5 % de NaOH) a amélioré la capacité de la structure renforcée. Au-delà de 2h de traitement des tissus de fibres de chanvre, on note une diminution des performances mécaniques. La bio-époxy, associée aux fibres de chanvre traitées apparaît comme une nouvelle perspective à développer. En revanche, les contrôles d'imprégnation/traitement restent essentiels. Les résultats montrent principalement deux modes de rupture avec un changement à partir des plaques composites de 4 couches de fibres de chanvre traitées.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à exprimer leur sincère gratitude à la Fondation Bulgare de la Recherche Scientifique pour son soutien financier dans le cadre du contrat KII-06H57/13-926, 2021 – Mechanical study of strengthened reinforced concrete structures by natural fiber fabrics under dynamic load. Nous tenons également à remercier l'UCTM et l'URCA-ITheMM pour leur soutien. Les auteurs tiennent à remercier sincèrement M. Patrick JUPILLAT et M. Philippe DONY (<https://orcid.org/0000-0002-30277540>), qui sont respectivement technicien et ingénieur chez ITheMM.

RÉFÉRENCES

- [1] D. B. Dittenber et H. V. S. GangaRao, « Revue critique des publications récentes sur l'utilisation des composites naturels dans les infrastructures », *Compos. Partie A : Appl. Sci. Manuf.*, 2012, vol. 43, n° 8, pp. 1419–1429, doi : 10.1016/j.compositesa.2011.11.019.
- [2] M. Bhong, T. Khan, K. Devade, B. Krishna, S. Sura, et al., « Examen des matériaux composites et des applications », *Materials Today : Actes*, 2023. DOI : 10.1016/j.matpr.2023.10.026.
- [3] A. Oushabi, S. Sair, F. Oudrhiri Hassani, Y. Abboud, O. Tanane, et al., « L'effet du traitement alcalin sur les propriétés mécaniques, morphologiques et thermiques des fibres de palmier dattier (DPF) : étude de l'interface du composite DPF-Polyurethane », *South Afr. J. Chem. Eng.*, 2017, vol. 23, pp. 116–123, doi : 10.1016/j.sajce.2017.04.005.
- [4] M. Lassoued, F. Gouanvé, E. Espuche et M. Kaci, « Comportement thermomécanique des fibres de palmier tunisienne avant et après alcalinisation », *Constr. Build. Mater.*, 2018, vol. 170, pp. 121–128, doi : 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.064.
- [5] S. N. A. Safri, M. T. H. Sultan, M. Jawaid et M. S. Abdul Majid, « Analyse du comportement mécanique dynamique, d'impact à basse vitesse et de compression après impact des composites de palme à sucre/verre/époxy traités au benzoyl », *Compos. Struct.*, 2019, vol. 226, 111308, doi : 10.1016/j.compstruct.2019.111308.
- [6] S. M. Izwan, S. M. Sapuan, M. Y. M. Zuhri et A. R. Mohamed, « Effets du traitement au benzoyl sur la fibre de palmier à sucre traitée au NaOH : propriétés de traction, thermiques et morphologiques », *J. Mater. Res. Technol.*, 2020, vol. 9, n° 3, p. 5805-5814, doi : 10.1016/j.jmrt.2020.03.105.
- [7] P. Madhu, M. R. Sanjay, M. Jawaid, S. Siengchin, A. Khan, et al., « Une nouvelle étude sur l'effet de divers traitements chimiques sur la fibre d'Agave Americana pour le renforcement composite : propriétés physico-chimiques, thermiques, mécaniques et morphologiques », *Polym. Test.*, 2020, vol. 85, 106437, doi : 10.1016/j.polymertesting.2020.106437.
- [8] Q. Zhang, Y. Jiang, L. Yao, Q. Jiang et Y. Qiu, « Modification de surface hydrophobe des fibres de ramie par polymérisation par addition de propylène induite par le plasma », *J. Adhes. Sci. Technol.*, 2015, vol. 29, n° 8, pp. 691-704.
- [9] M. J. P. Macedo, A. L. A. Mattos, T. H. C. Costa, M. C. Feitor, E. N. Ito et al., « Effet du traitement au plasma froid sur l'adhérence de l'interface des composites polyéthylène/kapok recyclé », *Compos. Interfaces*, 2019, vol. 26, n° 10, p. 871-886.
- [10] R. Senthilraja, R. Sarala, A. G. Antony et Seshadhri, « Effet de la technique d'acétylation sur le comportement mécanique et la durabilité des composites de fibre de palme et d'ester vinylique », *Materials Today : Proceedings*, 2020, vol. 21, pp. 634-637, doi : 10.1016/j.matpr.2019.06.729.
- [11] Ribeiro, J., Bueno, G., Martín, M. R., & Rocha, J. Experimental Study on Mechanical Properties of Hemp Fibers Influenced by Various Parameters. *Sustainability*, 2023, 15(12), 9610. <https://doi.org/10.3390/su15129610>

CHAPITRE 3

CHIMIE