

Renfort du béton par des fibres naturelles traitées au (NaOH) puis (Ca(OH)₂)

Lazar Velichkov

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

Toma Pehlivanov

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

Ivelina Ivanova

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

Jules Assih

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

Cheikhna Diagana

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

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—Le béton est le matériau de construction le plus utilisé au monde, reconnu pour sa résistance élevée à la compression et sa durabilité. Le béton est sujet à la fragilité et aux fissures précoces, ce qui réduit sa durabilité et nécessite un entretien coûteux. Le renforcement par fibres naturelles offre une alternative renouvelable aux armatures synthétiques ou en acier, mais les fibres non traitées se dégradent dans la matrice alcaline du ciment. Ce travail étudie des traitements alcalins séquentiels – hydroxyde de sodium (NaOH) suivi d'hydroxyde de calcium (Ca(OH)₂) – pour améliorer les performances des fibres.

Mots-clés—fibres naturelles, chanvre, traitement à la NaOH, traitement au Ca(OH)₂, renforcement du béton

I. INTRODUCTION

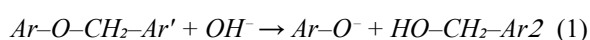
L'amélioration de la tolérance aux fissures et de la durée de vie des systèmes cimentaires dépend de plus en plus de la manière dont la matrice gère l'apparition, la propagation et la dissipation d'énergie après fissuration des microfissures. Dans ce contexte, les fibres naturelles (chanvre, lin, sisal, jute) sont apparues comme des micro-renforts durables qui arrêtent les microfissures et augmentent l'absorption d'énergie après fissuration grâce à des mécanismes de pontage et d'arrachement des fibres [1]. Le principal obstacle à la performance à long terme est l'hydrophilie et l'instabilité alcaline des fibres végétales non traitées : elles absorbent l'eau, gonflent et subissent une hydrolyse alcaline dans la solution interstitielle, ce qui affaiblit l'interface fibre-matrice et précipite une perte précoce de l'efficacité du renforcement [1]. Par conséquent, la modification de la surface est essentielle pour obtenir un renforcement durable et respectueux de l'environnement qui retarde la fissuration et améliore la résistance. Parmi les procédés chimiques, le traitement au NaOH (alcalisation) élimine les constituants amorphes (lignine, hémicellulose, cires), défibrille les faisceaux, augmente la rugosité de surface et expose la cellulose, des changements qui améliorent l'imbrication mécanique avec la matrice de ciment. Il entraîne également la transition allomorphe cellulose I → II, produisant une structure plus stable et résistante aux enzymes [1], [3], [4]. Le traitement à l'hydroxyde de calcium, en revanche, expose les fibres à un environnement alcalin similaire à l'eau interstitielle du ciment, mais plus doux que le NaOH ; l'immersion dépose du Ca²⁺ dans la fibre, permettant une réticulation ionique avec les hydroxydes de la cellulose et la précipitation subséquente de CaCO₃ lors de la carbonatation. La minéralisation qui en

résulte rend la surface rugueuse, obstrue partiellement les pores et fournit des sites de nucléation pour le C-S-H, améliorant ainsi la compatibilité, la stabilité dimensionnelle et la résistance à la dégradation alcaline par rapport aux fibres non traitées [2-3]. Les traitements physiques tels que le plasma/corona augmentent également l'énergie de surface et introduisent des fonctionnalités oxygénées et une microrugosité sans chimie humide. Cependant, les méthodes chimiques fournissent généralement des interfaces plus solides et plus durables dans les environnements cimentaires [1]. Sur le plan mécanique, à faibles doses et avec une dispersion adéquate, les fibres de chanvre conservent généralement une résistance à la compression comprise entre ±0 et 10 % par rapport aux mélanges témoins simples. Les prétraitements chimiques atténuent les vides et le décollement associés aux fibres hydrophiles non traitées, évitant ainsi les pertes de résistance. Des rapports montrent que le prétraitement au Ca(OH)₂ peut donner une résistance à la compression égale ou supérieure à celle du même mélange avec des fibres non traitées, grâce à une meilleure adhérence et à la formation locale de C-S-H près des fibres minéralisées [2]. Dans certains systèmes, les fibres traitées au NaOH maintiennent ou augmentent légèrement la résistance à la compression et présentent une meilleure rétention sous conditionnement [3], [4]. En tension et en flexion, les fibres traitées augmentent systématiquement la résistance à la traction par fendage. Ils améliorent considérablement la réponse à la flexion, ce qui se traduit par une résistance à l'arrachement plus élevée et un pontage des fissures plus efficace. Pour les bétons à base de fibres de chanvre, des gains notables en termes de comportement après fissuration et de charge maximale sont rapportés par rapport aux fibres non traitées, ce qui correspond à une amélioration de la liaison interfaciale [1]. Sous une charge dynamique/d'impact, la modification des fibres augmente l'absorption d'énergie et le nombre de coups jusqu'à la rupture par rapport au béton ordinaire [6]. Les considérations relatives à la durabilité renforcent la nécessité d'une modification. Les cycles d'humidité et de gel-dégel ramollissent et gonflent les fibres non traitées, ce qui dégrade leur rigidité et favorise le décollement interfacial ; les cycles humide-sec et gel-dégel accélèrent la microfissuration et le transport. Les fibres traitées, souvent associées à des matrices pouzzolaniques qui consomment le Ca(OH)₂ libre, atténuent ces effets, et les mortiers modifiés par des fibres présentent une meilleure tolérance au gel-dégel par rapport aux témoins [5].

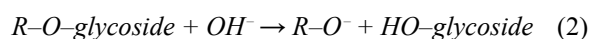
La sensibilité microbienne est initialement supprimée par une alcalinité élevée, mais une humidité prolongée et une carbonatation de surface peuvent favoriser la croissance ; en éliminant l'hémicellulose/pectine et en réduisant l'absorption d'humidité, les traitements chimiques diminuent la réceptivité biologique et l'attaque enzymatique, de sorte que les mortiers de réparation contenant des fibres traitées conservent mieux leurs performances dans des conditions aqueuses que les mélanges contenant des fibres non traitées [3]. En ce qui concerne le vieillissement thermique et les UV, la lignine est le composant le plus sensible aux UV ; les fibres incorporées sont largement protégées par la matrice, tandis que l'exposition en surface peut affaiblir les fibres non traitées. Les cycles thermiques typiques agissent principalement par le transport de l'humidité, et les traitements chimiques aident à préserver l'intégrité interfaciale dans de telles conditions d'exposition [1].

A. Réactions chimiques et équations

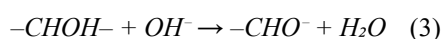
- Mécanismes de la mercerisation à la soude (NaOH)
Clivage des liaisons éther de la lignine (β -O-4) :



- Hydrolyse alcaline des hémicelluloses

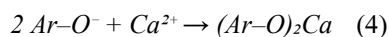


- Déprotonation de la cellulose (formation d'alkoxydes) :

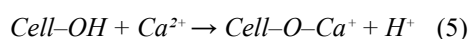


Ces réactions (1), (2) et (3) éliminent les fractions amorphes et permettent le gonflement puis la recristallisation de la cellulose I en cellulose II lors du rinçage/neutralisation, aboutissant à un allomorphe plus stable et à une surface plus rugueuse et moins hydrophile.

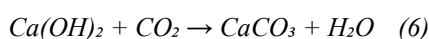
- Minéralisation et compatibilité du $Ca(OH)_2$
Complexation phénolate-calcium :



- Liaisons ioniques avec la cellulose :



- Carbonatation (dépôt minéral) :



Le dépôt de $CaCO_3$ et les « ponts » Ca^{2+} créent des sites de nucléation (4), (5) et (6) pour le C-S-H et améliorent l'affinité chimique avec les hydrates du ciment [2], [3].

II. MATÉRIAUX ET MÉTHODES

A. Béton

Du béton ordinaire a été utilisé pour toutes les épreuves prismatiques en béton. La composition du béton utilisé est 1 : 1,86 : 2,36 (ciment : sable : gravier, en masse) et un rapport eau/ciment de 0,55. Les éprouvettes prismatiques en béton avec dimensions 10 × 10 × 40 cm ont été testées en flexion.

B. Fibre de chanvre

Les tissus en fibre de chanvre ont été utilisés dans cette étude. En effet, les fibres de chanvre présentent des performances mécaniques spécifiques élevées pour un renfort biosourcé. Les propriétés d'une fibre élémentaire sont typiquement $\sigma_u = 3$ MPa, $E \approx 30-70$ GPa avec une variabilité liée au cultivar, au rouissage et au diamètre. Leur raideur spécifique dépasse celle de nombreux polymères d'ingénierie

(tout en restant inférieure à celle du verre E), ce qui rend le chanvre attractif lorsque la masse et la durabilité environnementale sont déterminantes.

C. Traitement des fibres

Trois types de traitement ont été effectués sur les tissus en fibre de chanvre. Traitement avec solution de NaOH à 5 % (m/v), traitement avec de chaux $Ca(OH)_2$ à 5 % (m/v) et un traitement séquentiel avec NaOH à 5 % (m/v) et ensuite avec de chaux $Ca(OH)_2$ à 5 % (m/v) .

Les fibres de chanvre ont été traitées en milieu alcalin selon trois méthodes avant d'être placées dans le coffrage et avant le coulage du béton. Le traitement avec NaOH, les fibres ont été immergées dans une solution de NaOH à 5 % (m/v) pendant 1 h à température ambiante dans le laboratoire avec agitation occasionnelle, puis séchées à l'air pendant 24 h (sans rinçage). Cette étape induit la mercerisation (élimination des constituants amorphes et réorganisation cellulose I $\rightarrow$ II), augmente la rugosité de surface et réduit l'hydrophilie.

Le traitement avec $Ca(OH)_2$: les fibres ont été immergées pendant 3 h dans une suspension de chaux $Ca(OH)_2$ à 5 % (m/v) préparée en dispersant 20,0 g de $Ca(OH)_2$ (96 %) dans 400 ml d'eau déionisée, avec des solides en excès pour maintenir la saturation (voir Fig. 1).

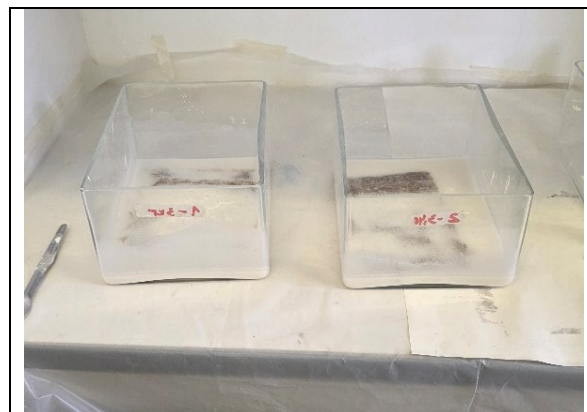


Fig. 1. L'immersion des fibres dans solution $Ca(OH)_2$

L'alcalinité du bain a été mesurée une seule fois immédiatement avant l'immersion des fibres à l'aide d'un papier indicateur universel (plage 0-14) ; la lecture pH 12-13 (voir Fig.2) était cohérente avec une suspension de chaux fortement alcaline, proche de la saturation.



Fig. 2. Fibres traitées : a) avec NaOH+ $Ca(OH)_2$ et b) avec $Ca(OH)_2$

Pendant l'immersion, la suspension a été agitée toutes les 15 min pour maintenir une dispersion homogène des solides et assurer un transfert de matière fibre-bain régulier ; entre les agitations, le récipient a été légèrement couvert pour limiter la carbonatation prématurée par le CO_2 ambiant. Après retrait, les fibres ont été séchées sans rinçage afin de conserver intentionnellement un fin résidu de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, permettant la carbonatation in situ et le dépôt de CaCO_3 durant la cure ; Fig.3b montre cet effet.

Pour la condition séquentielle $\text{NaOH} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$, les fibres ont d'abord subi le traitement NaOH décrit ci-dessus (5 % (m/v), 1 h ; 24 h de séchage à l'air), puis ont été immergées dans la suspension de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ à 5 % (m/v) pendant 3 h selon le même protocole (agitation toutes les 15 min / récipient légèrement couvert) ; pour les étapes $\text{Ca}(\text{OH})_2$, le pH a été vérifié une fois avant l'immersion comme indiqué ci-dessus. Les fibres ont de nouveau été séchées sans rinçage après l'étape $\text{Ca}(\text{OH})_2$ afin de conserver le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de surface pour une carbonatation ultérieure, voir la Fig. 1a. Ce dispositif à trois branches isole les effets de la minéralisation seule ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), de la mercerisation seule (NaOH) et de leur combinaison ($\text{NaOH} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$) sur la compatibilité interfaciale avec les hydrates du ciment.

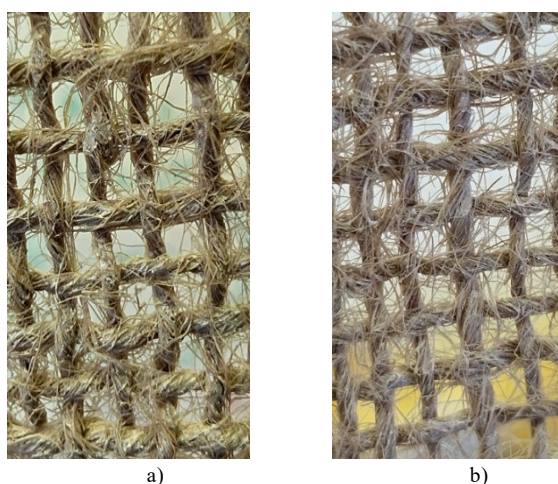


Fig. 3. Fibres traitées : a) avec $\text{NaOH}+\text{Ca}(\text{OH})_2$ et b) avec $\text{Ca}(\text{OH})_2$

La condition des fibres constituait l'unique variable expérimentale : trois éprouvettes témoin en béton non armé (sans fibres) ; des fibres non traitées, moulées pré-humidifiées et sèches à l'air ; des fibres traitées séquentiellement ($\text{NaOH} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$), moulées uniquement à l'état sec ; et des fibres traitées uniquement à la soude (NaOH), moulées pré-humidifiées et sèches à l'air. Le plan d'essais est récapitulé dans le Tableau I.

D. Méthode

Pour toutes les éprouvettes renforcées, les fibres de chanvre ont été pré-positionnées le long de l'intrados du moule (zone tendue) avant le coulage du béton afin d'assurer le rôle de renfort en flexion. Quinze éprouvettes prismatiques ($10 \times 10 \times 40$ cm) ont été préparées, afin d'évaluer leurs comportements mécaniques en flexion après le traitement des fibres. Le programme comprenait quatre séries de minimum trois éprouvettes chacune : un témoin (de référence) en béton non renforcé et trois séries

avec les éprouvettes en béton renforcées avec des fibres de chanvre (traitées uniquement au NaOH, traitées uniquement au $\text{Ca}(\text{OH})_2$, et la séquence $\text{NaOH} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$). Après le coulage du béton, les éprouvettes ont été mises en cure pendant 28 jours puis éprouvées en flexion à 28 jours. Le tableau 1 présente les résultats obtenus et les abréviations de différents spécimens.

III. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Dans cette étude préliminaire, les résultats ont montré que le renforcement a un effet sur la charge ultime.

A. Influence du renforcement sur la charge ultime

Le tableau 1 présente les résultats après les essais de flexion à quatre points.

TABLEAU 1. INFLUENCE DU RENFORCEMENT SUR LA CHARGE ULTIME

Eprouvette	Abréviation	Charge de rupture $F_{\max}$ [kN]	$F_{\max}/F_0$ [%]
Non renforcée	NR	10,50	0
Renforcée avec tissu en fibre de chanvre traitées avec (NaOH)	T(NaOH)	12,63	20,3
Renforcée avec tissu en fibre de chanvre traitées avec ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)	T ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)	11,87	13,05
Renforcée avec tissu en fibre de chanvre traitées avec (NaOH)+($\text{Ca}(\text{OH})_2$)	T(NaOH) +($\text{Ca}(\text{OH})_2$)	14,05	33,8

B. Influence du type de traitement

Les résultats de la fig. 4 montrent que l'effet du traitement au $\text{NaOH}+\text{Ca}(\text{OH})_2$ est remarquable : la structure en béton est plus ductile avec une augmentation de la charge ultime du tiers.

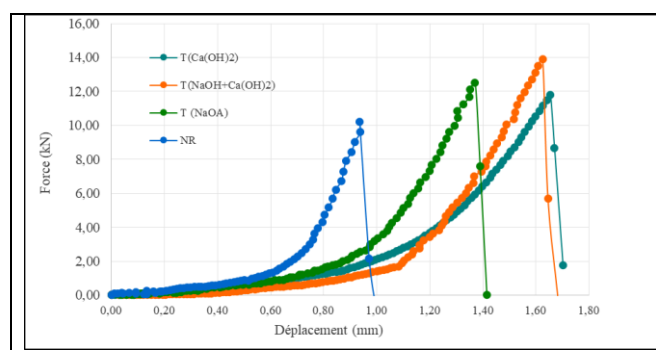


Fig. 4. Evolution de la charge ultime

C. Modes de rupture

Le tableau 2 présente les différents résultats après le test de flexion à quatre points. Les résultats montrent un seul type de mode de ruptures, les ruptures de flexion pour les quatre séries réalisées.

TABLEAU 2. MODES DE RUPTURE

Eprouvettes	Modes de rupture	
Non renforcée		Rupture de flexion
Renforcée avec tissu en fibre de chanvre traitées avec (NaOH)		Rupture de flexion
Renforcée avec tissu en fibre de chanvre traitées avec (Ca(OH) ₂)		Rupture de flexion
Renforcée avec tissu en fibre de chanvre traitées avec (NaOH)+(Ca(OH) ₂)		Rupture de flexion

IV. CONCLUSION

Cette étude préliminaire sur le traitement alcalin séquentiel a montré une meilleure compatibilité entre les fibres et le béton (la matrice cimentaire). Les fibres de chanvre ont subi un protocole alcalin en deux étapes comprenant une immersion dans une solution de NaOH à 5 % (m/v) pendant 1 h, un séchage à l'air de 24 h, puis une immersion de 3 h dans une suspension de Ca(OH)₂ à 5 % (m/v) avec agitation intermittente. Cette séquence favorise la purification de surface et une minéralisation contrôlée, produisant une surface cellulosique plus rugueuse et moins hydrophile, avec des résidus de Ca(OH)₂ conservés pour une carbonatation in situ, ce qui renforce la compatibilité chimique et le potentiel

d'adhérence avec les matrices cimentaires. Les conditions de bain fortement alcalines et des intervalles de séchage définis préservent l'intégrité des fibres tout en optimisant la chimie de surface pour une meilleure adhésion interfaciale, et réduisent la biodégradation en éliminant l'hémicellulose/la pectine, en diminuant l'absorption d'humidité et en établissant une surface minéralisée à pH élevé moins bioréceptive aux attaques microbiennes et enzymatiques.

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-06-H57/13-926, 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/0000-0002-3027-7540>), qui sont respectivement technicien et ingénieur chez ITheMM.

RÉFÉRENCES

- [1] X. Zhou, H. S. Saini, G. Kastiukas, "Engineering properties of treated natural hemp fiber-reinforced concrete", vol. 3, 2017. Frontiers+1
- [2] S. Candamano, F. Crea, L. Coppola, P. De Luca, D. Coffetti "Influence of acrylic latex and pre-treated hemp fibers on cement-based mortar properties", vol. 273, 2021. ScienceDirect+1
- [3] B. Poletanović, I. Janotka, M. Janek, M. Bačuvčík, I. Merta "Influence of the NaOH-treated hemp fibres on the properties of fly-ash based alkali-activated mortars prior and after wet/dry cycles", vol. 309, 2021. ScienceDirect+1
- [4] G. Kaplan, O. Y. Bayraktar "The effect of hemp fiber usage on the mechanical and physical properties of cement-based mortars", vol. 7, 2021. JRESM+1
- [5] B. Poletanović, J. Dragaš, I. S. Ignjatović, M. Komljenović, I. Merta, "Physical and mechanical properties of hemp fibre reinforced alkali-activated fly ash and fly ash/slag mortars", vol. 259, 2020. ScienceDirect+1
- [6] D.-Y. Yoo, N. Banthia "Impact resistance of fiber-reinforced concrete: A review", vol. 104, 2019. ScienceDirect