



Co-valorisation de matériaux fins équivalents à des sédiments

Daniel LEVACHER¹, Fei WANG¹, Yingjie LIANG¹

1. Université de Caen, Faculté des Sciences, UMR 6143 CNRS - M2C,
Esplanade de la Paix, 14032 Caen, France.
daniel.levacher@unicaen.fr ; yingjie.liang@unicaen.fr

Résumé :

Renforcer des matériaux fins à l'aide de fibres souples permet d'améliorer les performances mécaniques : résistance à la compression et à la traction. Et si ces fibres souples sont des déchets, elles participent non seulement à l'amélioration mécanique mais à la valorisation de déchets. Ces fibres peuvent être incorporées à des argiles fines compactées (travaux de LÊ, 2009) destinées à des couches de couvertures de centres de stockage de déchets dont quelques résultats sont rappelés. D'autres fibres souples végétales peuvent être co-valorisées dans la stabilisation de matériaux fins considérés eux aussi comme déchets : fillers de carrière et sédiments marins. Cette co-valorisation constitue une nouvelle approche innovante dans les traitements des sédiments marins avec ajout de liants hydrauliques. Les premiers résultats concernent les performances de fibres végétales dans des mélanges à base de fines de carrière. Deux types de fibres ont été utilisés dans cette application. Les propriétés mécaniques des mélanges sont fonction du choix de la nature des fibres mais aussi de leurs propriétés. L'utilisation des fibres dans des fines de carrière de Bayeux a été associée aux liants hydrauliques usuels. Les essais de compression simple pour le procédé de stabilisation ou solidification ont été effectués sur des éprouvettes. Un ajout de fibres modifie le comportement mécanique et améliore la résistance à la flexion.

Mots-clés :

Sédiments – Fibres souples – Co-valorisation – Sols fins – Stabilisation/solidification – Développement durable – SEDIFIBRES – SEDIGATE

1. Introduction

La gestion durable des sédiments pose problème aux gestionnaires de ports et voies d'eau mais nécessite la recherche de voies nouvelles de valorisation. Si la stabilisation des sédiments à base de liants hydrauliques est largement étudiée (COLIN, 2003 ; SILITONGA *et al.*, 2009), il est urgent d'envisager d'autres solutions pour recycler ceux-ci.

La co-valorisation de sédiments ou matériaux fins équivalents repose sur deux points : la réduction et l'élimination de déchets et l'abaissement du coût de la valorisation des sédiments (SANNIER *et al.*, 2009). Ceci passe par une recherche de déchets recyclables dans une fraction fine de sédiments traitée en stabilisation/solidification mais ces

déchets doivent être exempts de contamination. Il y a une approche déchets (LEVACHER, 2010), dans la valorisation des sédiments : SEDIFIBRES (additifs fibreux souples) et SEDIDECHETS (fines, fillers, sables, déchets du BTP). Les fibres *a priori* concernées sont des fibres végétales (lin, fruits, coton, géosynthétiques), les déchets eux se présentent sous forme de granulés (pneus, coquilles pilées, fines, sables) mais parfois les fibres peuvent être combinées (granules de pneus et armatures métalliques).

L'idée de renforcer les matériaux à matrice cimentaire, au comportement de type fragile par des fibres n'est pas nouvelle mais l'application concernait les bétons et mortiers. Aussi un ajout de fibres végétales peut, en plus de la possibilité de jouer un rôle de renfort, constituer un atout économique par rapport aux fibres métalliques ou synthétiques. En effet elles permettent souvent d'aboutir à un gain de masse mais si ces fibres sont des déchets, leur élimination est possible. Cependant, l'utilisation de tels matériaux n'est pas sans poser un certain nombre de problèmes : retard de prise du ciment dû au passage en solution des extractibles du bois, sensibilité des fibres végétales à l'hygrométrie, ouvrabilité,

Ce sont les résultats relatifs à des mélanges opérés sur un matériau fin considéré comme déchet mais, équivalent à un sédiment (fine de carrière) associé à des fibres végétales (fibres de chanvre et de banane) stabilisés aux liants hydrauliques qui font l'objet de cet article.

2. Renforcement d'un sol fin par fibres

2.1 Idée de renforcement de sol par ajout de fibres

Un sédiment fin stabilisé par un faible taux de liants hydrauliques est sensible à la fissuration par flexion. Ce type d'endommagement peut être constaté dans le cas de valorisation d'un sédiment en sous couches routières. Un ajout de fibres au moment de la stabilisation d'un sédiment fin tend à améliorer les caractéristiques du matériau composite (sédiment-liant-fibres) et contribue à limiter l'endommagement. Le concept de renforcer un matériau fin à l'aide de fibres est très connu : torchis normand, nappes géosynthétiques et géogrilles, filaments et sol comme le Texsol, terre armée, et plus récemment composite argiles-fibres souples (LÊ, 2009).

2.2 Amélioration des caractéristiques mécaniques

Dans le cas de matériaux argileux renforcés par des fibres, la résistance au cisaillement est améliorée et ce, en fonction du pourcentage de fibres ajouté, le matériau composite devient plus résistant vis-à-vis de la flexion. Le pourcentage massique de fibres varie entre 0 et 5%, il dépend de la nature, de la longueur des fibres. Selon les travaux de LÊ (2009), pour une argile renforcée par fibres souples végétales (sisal), synthétiques

(polypropylène) et granulés de pneus (fibres métalliques et caoutchouc), il a été retenu des pourcentages massiques de 3‰ et 6‰.

2.3 Paramètres d'étude

La nature et la géométrie (rapport de forme $\lambda=Lf/df$, Lf , longueur de la fibre et df son diamètre) des fibres jouent un rôle important dans le renforcement mécanique : fibre courte ou longue, fibre souple ou rigide, L'ajout de fibres peut être caractérisé par le pourcentage en masse qui s'exprime par le rapport ω entre la masse des fibres et la masse de sol fin, $\omega=Wf/Ws$. Du point de vue mécanique, la résistance à la traction R_t , le module d'élasticité E , la résistance à la compression non confinée R_c sont les indicateurs de performance le plus souvent retenus. Pour la mise en évidence de l'influence des fibres sur le comportement mécanique, des auteurs proposent l'utilisation d'un indice de ductilité ou de fragilité I_B (CONSOLI *et al.*, 2002). Il s'exprime par la relation suivante :

$$I_B = 1 - [\sigma \text{ résiduelle après endommagement du matériau} / \sigma \text{ maximale, valeur pic}]$$

2.4 Confection d'éprouvettes

Les sols fins et les fibres sont d'abord mélangés, puis compactés dans un moule (moule cylindrique de petite taille mono éprouvette, moule Proctor ou CBR). L'utilisation de moules Proctor et CBR permet de reproduire les conditions de mise en œuvre mais aussi d'assurer une meilleure répétitivité des éprouvettes. Selon les travaux de LÊ (2009) pour des éprouvettes d'argile renforcée avec des fibres souples de 30 mm de longueur et un pourcentage massique ω de 6‰, le carottage s'est avéré difficile et l'éprouvette cylindrique de hauteur 70 mm et de diamètre 35 mm, trop petite devant la taille des fibres.

2.5 Cas d'une argile renforcée par des fibres

Des essais de caractérisation en compression simple et résistance au cisaillement, ont été effectués (LÊ, 2009) sur une argile non saturée renforcée avec un ajout de fibres souples (sisal, polypropylène) et rigide (granules de pneus). La rigidité de l'argile renforcée augmente avec le pourcentage massique de fibres, l'angle de frottement ϕ est fonction de la taille des fibres.

Tableau 1. Propriétés mécaniques d'une argile naturelle et renforcée (selon LÊ, 2009).

	Teneur en eau (%)	Résistance en compression simple R_c (kPa)	Résistance à la traction R_t (kPa)	Module d'élasticité apparent E (MPa)
Argile naturelle	18	220	13,4	5
Argile renforcée	18	330	26,8	10

Notons que l'indice de fragilité est un bon indicateur pour optimiser le pourcentage massique de fibres dans le mélange composite. On rappelle au tableau 1, les caractéristiques obtenues sur une argile naturelle (argile de l'Aptien) renforcée par des fibres végétales de sisal avec un dosage massique de 3%.

3. Renforcement d'un matériau fin par fibres

Une première étude de renforcement de matériau fin a concerné une fine de carrière présentant des caractéristiques physiques similaires à un sédiment fin, (WANG, 2008 ; LEVACHER & LIANG, 2009). Les fibres retenues pour le renforcement sont des fibres végétales souples. L'étude a porté précisément sur les performances mécaniques dues à l'apport de fibres végétales (déchets fibreux de banane et de chanvre) dans des mélanges composites à base de fines de carrière de Bayeux, ciment et chaux. Les propriétés mécaniques des mélanges composites résultant d'un renforcement sont fonction de la nature des fibres mais aussi de leur géométrie, de leur dosage, de leurs propriétés intrinsèques. Les fibres choisies sont disponibles en grande quantité. L'utilisation de fibres dans le recyclage des fines de carrière de Bayeux a été associée aux liants hydrauliques usuels.

3.1 Caractérisation physique du matériau fin

La figure 1 donne à titre comparatif les évolutions dimensionnelles de la fine carrière (Bayeux, carrière de Vaubadon, Calvados) et d'un sédiment marin (Vieux-Port de Marseille VPM-DD, dessablé, 0/2 mm). Il s'agit de matériaux fins. La fine de carrière contient plus de 90% d'éléments inférieurs à 63 μm , ce qui rend difficile sa stabilisation par des liants hydrauliques. Elle possède, une limite de liquidité de 34% et un indice de plasticité de 6%. Elle est indemne de matières organiques.

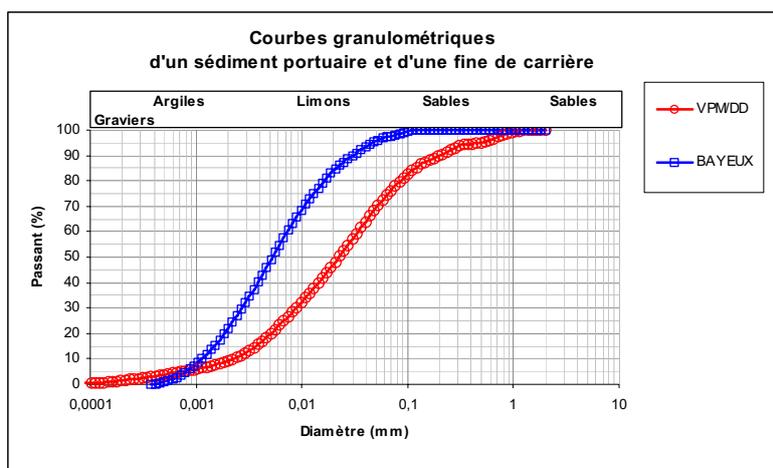


Figure 1. Distribution comparée d'un sédiment naturel (Bayeux) et d'une fine de carrière (VPM/DD).

3.2 Confection des éprouvettes et fibres retenues

Les liants hydrauliques

Les liants du mélange composite sont la fine de carrière, un ciment de classe de résistance 32.5 type CEM II/B-M 32.5 R, une chaux de marque Dugay et de la chaux vive en poudre 0/2 mm, teneur en CaO > 93%. La teneur en eau des mélanges est de 35%, proche de celle des teneurs en eau des sédiments stabilisés aux liants. Le compactage est réalisé manuellement par piquetage. Les dosages en ciment et en chaux sont faibles (dosages économiques, voir tableau 2).

Les fibres végétales

La figure 2 montre les fibres végétales utilisées, elles sont de longueur variable. Les longueurs retenues sont 17 mm (D/2), 11.33 mm (D/3) et 8.5 mm (D/4).



Fibres de bananes



Fibres de chanvre

Figure 2. Les fibres végétales souples.

La confection des éprouvettes

Les éprouvettes ont été moulées dans des étuis cylindriques en PVC de diamètre intérieur 34 mm et de 68 mm de hauteur. Un protocole a été établi pour permettre de répéter les opérations suivantes : séchage, malaxage, confection et conservations des échantillons. Une série complète de 9 éprouvettes est réalisée à partir d'une seule et unique gâchée.

L'indicateur mécanique retenu est la valeur seuil de 1 MPa en résistance à la compression simple, noté R_{c_j} . Les dates retenues sont conventionnelles pour les matériaux à matrice cimentaire soit : 14, 28, 70 ou 90 jours. Le plan expérimental retenu est donné au tableau 2 dans lequel les dosages sont exprimés en fonction de la matière sèche. A titre d'exemple, un dosage en ciment de 7% et en chaux de 2% se décline ainsi : pour 100 g de matériau fin, on a 7 g de ciment, et 2 g de chaux. Il en va de même pour l'eau.

Tableau 2. Dosages des mélanges fine de carrière et fibres.

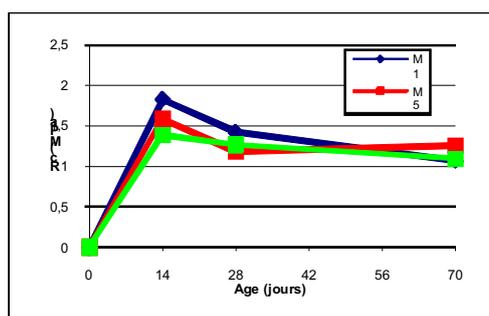
Référence	Fibre	Teneur en eau (%)	Teneur en ciment (%)	Teneur en chaux (%)	Teneur en fibres (%)
M5	Banane D/2	35	7	0	0.5
M6	Banane D/3	35	7	0	0.5
M7	Banane D/4	35	7	0	0.5
M8	Cordes D/2	35	7	0	0.5
M9	Cordes D/3	35	7	0	0.5
M10	Cordes D/4	35	7	0	0.5
M11	Cordes D/2	35	7	2	0.25
M12	Cordes D/2	35	7	2	0.5
M13	Cordes D/2	35	7	2	1
M14	Cordes D/2	35	7	2	2

3.3 Etude de l'influence des fibres végétales

Pour la fine de carrière de Bayeux, nous avons procédé à 10 mélanges pour étudier l'influence de la nature, de la longueur et du dosage des fibres sur R_c (voir tableau 2). Les teneurs en eau et en ciment sont respectivement de 35% et de 7%. Longueur des fibres correspond à D/2, D/3, D/4, D est le diamètre de l'éprouvette (34 mm).

Le rôle des fibres

Les fibres renforcent le matériau stabilisé et modifient son comportement mécanique. Ceci a été parfaitement observé au moment de la rupture des éprouvettes. La figure 3 montre un échantillon renforcé et non renforcé après un essai de compression simple.



Echantillon sans fibre

$$R_c = f(\text{temps})$$

Echantillon avec fibres

Figure 3. Ruptures comparées et évolution des R_c pour une fine de carrière de Bayeux, traitées avec/sans fibres.

Les deux échantillons ont été préparés avec le même matériau fin et dans les mêmes conditions. L'échantillon renforcé présente un état de fissuration diffus et non connecté

(matériau ductile) alors que le matériau fin non renforcé rompt nettement et sa rupture est locale (matériau fragile).

On observe aussi que les valeurs de Rc évoluent peu que ce soit pour les échantillons renforcés ou non (cas de M1, même dosage en liant que M5 et M8). Le renforcement influe essentiellement sur la résistance à la traction.

Rôle de la longueur des fibres

Sur la figure 4, quelle que soit la longueur, la valeur à 14 jours est maximale, puis elle décroît à 28 jours et puis jusqu'à 70 jours elle reste constante. La valeur optimale est obtenue pour la longueur de D/2. Le comportement observé avec les fibres de banane est presque le même que celui des fibres à base de chanvre.

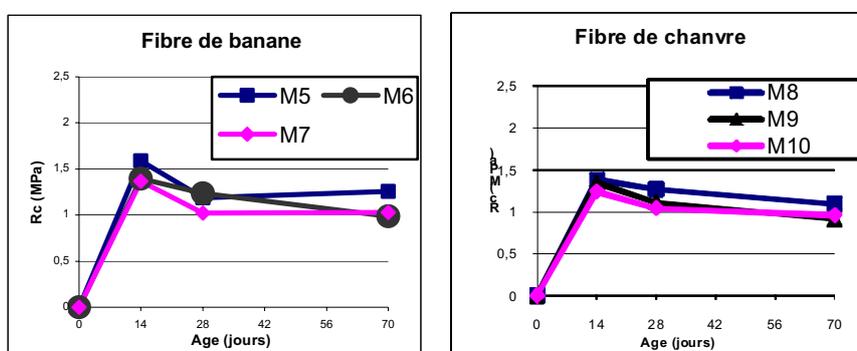


Figure 4. Evolution de Rc en fonction de la longueur des fibres.

Rôle de la quantité de fibres

On a comparé les différents dosages en fibres de chanvre de longueur D/2 soit : 0.25%, 0.5%, 1%, 2%. La valeur de 0.5% donne le meilleur résultat alors qu'un dosage massique de 2% donnerait la valeur la plus faible, voir figure 5. Cette valeur de 0.5% serait à rapprocher des dosages utilisés dans le cas de renforcement de sols argileux (de 3 à 6‰, selon LÊ (2009)).

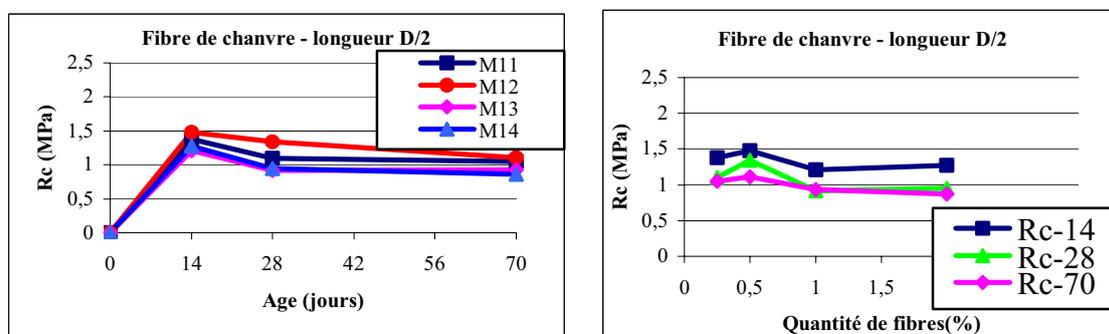


Figure 5. Evolution de Rc en fonction de la quantité de fibres (cas des fibres de chanvre de longueur D/2).

4. Conclusions

Plusieurs conclusions intéressantes peuvent être extraites de cette étude. Concernant le comportement mécanique des mélanges matériau fin, on observe une amélioration des propriétés mécaniques à la rupture pour une quantité optimale de fibres de 0.5%. On remarque que pour cette valeur, la résistance à la compression à la rupture est optimale et d'environ 1.5 MPa, supérieure au seuil de 1 MPa requis dans le cas de stabilisation de matériaux fins en sous couche routière.

On observe également un changement de comportement mécanique avec une addition de fibres. Ces mélanges fibrés possèdent une plus grande souplesse en flexion. L'apport de fibres constitue un enjeu important dans la stabilisation de matériaux fins et sédiments. La teneur en fibres ajoutée aux fines de carrière de Bayeux influence peu la résistance à la compression mais elle participe à la résistance en flexion. Les développements actuels portent sur des fibres de lin et la stabilisation de sédiments.

5. Références

- COLIN D. (2003). *Valorisation de sédiments fins de dragage en technique routière*. Thèse de Doctorat, Université de Caen, 180 p.
- CONSOLI N.C., MONTARDO J.P., PRIETTO P.D.M., PASA G.S. (2002). *Engineering behaviour of a sand reinforced with plastic waste*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, volume 128, n° 6, pp 462-472. doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:6(462)
- LÊ T.N.H. (2009). *Comportement des sols fins utilisés en couverture étanche des installations de stockage de déchets. Approche expérimentale et numérique*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble I, 164 p.
- LEVACHER D. (2010). *Some aspects on the sediment valorisation – Characterization, treatment, coast, recent developments*. IInd International Symposium on Sediment management, I2SM, Casablanca, 11-13 May, JMCE.
- LEVACHER D., LIANG Y. (2009). *Comparaison de l'efficacité de différentes additions dans des procédés de stabilisation/solidification pour sédiments marins*. 2èmes Journées d'Etudes sur la Recherche en Environnement et Développement Durable, JEREDD, 3-4 juin 2009, Oran, Algérie, version CD, 8 p.
- SANNIER L., LEVACHER D., JOURDAN M. (2009). *Approche économique et validation de méthodes de traitements aux liants hydrauliques de sédiments marins contaminés*. Revue Paralia, n° 2, pp s2.1–s2.15. doi:10.5150/revue-paralia.2009.s02
- SILITONGA E., LEVACHER D., MEZAZIGH S. (2009). *Effects of the use of fly ash as a binder on the mechanical behaviour of treated dredged sediments*. Environmental Technology, Volume 30, Issue 8, Ed. Thomas Telford, pp 799-807.
- WANG F. (2008). *Caractérisation de fines de carrière et de sédiments marins. Amélioration de la résistance des fines de carrière par des procédés de solidification*, Mémoire de Master Recherche, Université de Caen, 43 p.