ARTICLE DE RECHERCHE / RESEARCH ARTICLE

Impact d'un traitement à la chaux, au ciment ou à base d'argile sur l'érodabilité d'un limon compacté

Olivier Cuisinier^{1,*}, Abdelwadoud Mehenni^{1,2}, Farimah Masrouri¹ et Emmanuel Lavallée²

¹ LEMTA, Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique Théorique et Appliquée, (UMR 7563), CNRS – Université de Lorraine, 54505 Vandoeuvre-lès-Nancy, France

² Bouygues Travaux Publics, Guyancourt, France

Résumé – L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'impact des traitements au ciment, à la chaux ou avec des argiles, des sols compactés sur leurs caractéristiques d'érosion interne. Un nouveau dispositif d'étude de l'érosion interne modifié et amélioré a été conçu pour quantifier les effets de différents traitements sur l'évolution de la résistance à l'érosion interne du limon de Saint-Quentin compacté. Les résultats montrent que l'impact des différents traitements sur les caractéristiques d'érosion de ce limon se traduit principalement par une augmentation de la contrainte critique. Cette augmentation est plus grande avec l'augmentation du dosage, et dans le cas du traitement au ciment. De plus, pour les traitements avec la chaux et le ciment, la contrainte critique tend à augmenter avec le temps de cure. Par ailleurs, le coefficient d'érosion est affecté uniquement par le traitement à la bentonite dans le cas d'utilisation d'un grand dosage de traitement.

Mots clés : érosion interne / traitement des sols / chaux / ciment / argiles

Abstract – **Influence of lime, cement, and clay treatments on the internal erosion characteristics of a compacted soil.** This study aims to describe the effects of clay, lime and cement soil treatments on the internal erosion, specifically with regard to the amount of treatment used and the curing time. A new enhanced hole erosion test was developed to apply a high inlet pressure up to 650 kPa and thus generate a hydraulic shear stress up to 10 000 Pa. The results demonstrated that clay treatment could reduce the coefficient of soil erosion depending on the nature and percentage of clay added to the soil. The results also showed that lime and cement treatment primarily increased the critical shear stress of the tested silt. This increase was higher with cement treatment and was dependent on the amount of the added product. The impact of the curing time (up to 30 days) on the evolution of the erosion characteristics was not relevant for the lime-treated silt, whereas that of the cement-treated silt was dependent on the amount of cement added to the soil.

Keywords: internal erosion / soil treatment / lime / cement / clays

1 Introduction

Les sols constituant les ouvrages en terre peuvent être sujets à divers phénomènes d'érosion qui peuvent provoquer des dégâts importants sur la structure de l'ouvrage, allant même jusqu'à sa ruine. Un moyen pour prévenir le risque d'érosion est d'utiliser des matériaux présentant une érodabilité qui répond aux critères d'érosion requis, et aussi aux autres critères portant sur le comportement hydrique et mécanique des sols. Lorsque les sols disponibles pour la construction ne permettent pas de satisfaire aux critères nécessaires, le traitement constitue une alternative intéressante. Il existe ainsi plusieurs techniques de traitement qui permettent d'améliorer les sols. Plusieurs auteurs ont montré que le traitement à la chaux améliore principalement la

maniabilité du sol ainsi que les performances mécaniques du sol (Eades et Grim, 1960 ; Brandl, 1981 ; Little, 1995 ; Bell, 1996 ; Le Runigo *et al.*, 2011 ; Stoltz *et al.*, 2012, 2014 ; Robin *et al.*, 2014). Les effets de la chaux sur la conductivité hydraulique des sols dépendent en revanche des conditions de compactage (McCallister et Petry, 1991 ; Le Runigo *et al.*, 2009 ; Cuisinier *et al.*, 2011 ; Herrier *et al.*, 2012b). Plusieurs études ont montré l'amélioration des caractéristiques mécaniques des sols après traitement au ciment (par exemple Al-Amoudi, 2002 ; Sariosseiri et Muhunthan, 2009). Selon Bellezza et Fratolocchi (2006), l'évolution de la conductivité hydraulique est principalement liée à la nature du sol et peut augmenter ou diminuer après le traitement au ciment. Les sols argileux sont souvent utilisés comme produit de traitement spécifiquement pour réduire la conductivité hydraulique des sols afin d'atteindre une valeur cible. L'ampleur de la réduction de la conductivité hydraulique dépend du dosage et de la nature du matériau argileux utilisé (par exemple Sivapullaiah *et al.*, 2000 ; Chapuis, 2002).

* Auteur de correspondance :
olivier.cuisinier@univ-lorraine.fr

L'objectif principal de l'article est de présenter les résultats d'une campagne d'études concernant l'impact de différents traitements sur l'érodabilité d'un limon compacté. Dans ce qui suit, après la description du processus d'érosion et sa caractérisation expérimentale, une revue des données disponibles sur les effets des traitements sur les caractéristiques de l'érosion interne est présentée. Les phénomènes d'érosion qui se produisent sur les structures hydrauliques en terre peuvent être classés en deux catégories : l'érosion externe et l'érosion interne. L'érosion externe concerne les surfaces extérieures des structures, alors que l'érosion interne se produit à l'intérieur du corps de la structure. Cette étude est axée sur l'érosion de conduit, qui est un mécanisme d'érosion interne. Selon [Fell *et al.* \(2003\)](#), ce processus d'érosion interne peut être divisé en quatre phases : l'initiation de l'érosion par une concentration de la circulation d'eau au sein de la structure, la poursuite de l'érosion, la progression de l'érosion qui aboutit à former une conduite, et la formation d'une brèche conduisant à la destruction de la structure. Pour étudier l'érosion interne, le « hole erosion test » (HET) a été développé ([Wan et Fell, 2004a, b](#)). Cet essai dérive d'autres dispositifs expérimentaux d'érosion interne ([Sherard *et al.*, 1976](#) ; [Lefebvre *et al.*, 1985](#) ; [Rohan *et al.*, 1986](#) ; [ASTM-D4647, 1998](#) ; [Reddi *et al.*, 2000](#)). Le HET ne caractérise le comportement des sols qu'une fois qu'un conduit est complètement formé. L'essai ne permet pas d'étudier la phase initiale du processus d'érosion interne (c'est-à-dire la formation de la conduite dans le sol). En fait, dans le HET, un conduit préformé dans une éprouvette de sol est créé pour simuler ce conduit. L'érodabilité des parois du conduit est ensuite étudiée en le soumettant à un écoulement d'eau. La croissance du diamètre du conduit est surveillée par la mesure des paramètres hydrauliques. Les résultats permettent de déterminer la loi empirique d'érosion du matériau, qui peut être exprimée comme suit :

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon} &= 0 & \text{si } \tau < \tau_c, \\ \dot{\varepsilon} &= k_{er}(\tau - \tau_c) & \text{si } \tau > \tau_c, \end{aligned} \quad (1)$$

où :

$\dot{\varepsilon}$: taux d'érosion par unité de surface par unité de temps [kg/s/m²];

τ : contrainte de cisaillement hydraulique [Pa];

τ_c : contrainte critique [Pa];

k_{er} : coefficient d'érosion [s/m].

La contrainte τ_c exprime le seuil de déclenchement d'érosion du sol. Plusieurs modifications ont été apportées sur les dispositifs HET pour permettre un meilleur contrôle des paramètres hydrauliques, comme la chute de pression hydraulique dans l'échantillon ou le débit d'eau ([Pham, 2008](#) ; [Indraratna *et al.*, 2009](#) ; [Benahmed et Bonelli, 2012](#) ; [Lüthi *et al.*, 2012](#) ; [Haghighi *et al.*, 2013](#))

Le HET a été utilisé pour évaluer l'impact des paramètres de compactage, c'est-à-dire la teneur initiale en eau, la densité sèche et l'énergie de compactage sur l'érodabilité des sols compactés. Certains auteurs ([Wan et Fell, 2004a](#) ; [Lim, 2006](#) ; [Attom, 2012](#)) ont montré que pour une même densité sèche, les sols présentent une érodabilité plus faible s'ils sont compactés à une teneur en eau plus élevée que la teneur en eau de l'optimum (côté humide de la courbe de compactage). L'augmentation de la densité sèche du sol induit une diminution de l'érodabilité et une contrainte critique plus élevée. Pour les sols compactés, les effets de la densité sèche,

sur la baisse de l'érodabilité, sont également liés à la teneur en eau initiale de compactage. Le long de la courbe de compactage, l'érodabilité la plus faible est atteinte pour les valeurs couplées de la teneur en eau initiale optimale et de la densité sèche maximale ([Wahl, 2010](#) ; [Attom, 2012](#)).

Quelques études se sont attachées à évaluer l'amélioration des caractéristiques d'érosion interne d'un sol apportée par un traitement. Pour étudier l'érosion interne après traitement, il est nécessaire d'utiliser un dispositif capable d'appliquer la pression d'entrée nécessaire et donc d'assurer la chute de pression à travers l'éprouvette de sol indispensable pour initier l'érosion du sol étudié. Les dispositifs existants ne permettent pas de caractériser pleinement l'impact de ces traitements sur l'érodabilité en raison de limitations techniques. Cependant, [Chevalier *et al.* \(2012\)](#) ont montré qu'un traitement à la chaux de 2 % d'un limon peut augmenter la contrainte de cisaillement critique d'un facteur d'au moins quatre. [Herrier *et al.* \(2012a\)](#) ont étudié un sol traité à la chaux de 2 % avec un temps de séchage de 14 jours et ont observé que la contrainte de cisaillement critique a augmenté d'un facteur de 20, alors que le coefficient d'érosion a été réduit d'un facteur de 10. [Indraratna *et al.* \(2009\)](#) ont travaillé sur du sable silteux traité avec du ciment avec une contrainte de cisaillement critique proche de zéro avant traitement. Ils ont montré que le traitement avec 3 % de ciment augmentait la contrainte de cisaillement hydraulique jusqu'à 50 Pa, et diminuait le coefficient d'érosion de deux ordres de grandeur. De plus, ils ont constaté que la diminution de l'érosion par le traitement du ciment est directement liée au pourcentage de ciment ajouté au sol. Le pourcentage de particules d'argile présentes dans le sol peut modifier la résistance à l'érosion interne des sols. Plusieurs auteurs ont montré que l'augmentation du pourcentage d'argile induit une hausse de la contrainte critique et une baisse de coefficient d'érosion ([Benahmed et Bonelli, 2012](#) ; [Bennabi *et al.*, 2012](#) ; [Haghighi *et al.*, 2013](#)).

Il apparaît ainsi que le traitement à la chaux ou au ciment ou avec une argile, pourrait réduire l'érodabilité d'un sol compacté. La plupart des résultats disponibles restent cependant qualitatifs. L'objectif principal de cette étude est d'étudier l'impact des traitements du sol sur les caractéristiques de l'érosion. Un nouveau dispositif HET amélioré a été mis en place pour quantifier les effets de différents traitements. Dans les sections suivantes, les procédures d'essais et d'interprétation sont présentées, et les modifications produites par les traitements sont discutées.

2 Matériaux et méthodes

2.1 Matériaux

Le sol support de cette étude est un limon fin ($w_L = 28,5\%$; $w_P = 20,5\%$; $V_{BS} = 1,56$; pourcentage < 80 $\mu\text{m} = 99,2\%$). Quatre produits de traitement ont été utilisés avec différents dosages : une chaux vive (1 et 3 %), un ciment CEM II (3 et 6 %), une bentonite calcique activée (2, 5 et 9 %), et une kaolinite (2, 5 et 9 %). Les éprouvettes du limon traité à la chaux/ciment ont subi différents temps de cure (0, 7, 30, 90 jours) avant les essais.

Il est bien établi que le compactage du côté humide de l'optimum de la courbe de compactage permet d'atteindre la perméabilité la plus faible (par exemple [Mitchell *et al.*, 1965](#)).

Tableau 1. Caractéristiques de compactage.
Table 1. Compaction characteristics.

Traitement	Notation	Caractéristiques de compactage à l'optimum Proctor normal		Caractéristiques de compactage des éprouvettes HET	
		ρ_{dmax} (Mg/m ³)	w_{OMC} (%)	ρ_d (Mg/m ³)	w (%)
Silt	S	1,82	15,0	1,73	17,5
+ 2 % kaolinite	SK 2 %	1,80	15,5	1,73	18,0
+ 9 % kaolinite	SK 9 %	1,79	15,8	1,74	18,3
+ 2 % bentonite	SB 2 %	1,78	15,3	1,74	17,8
+ 1 % chaux	SL 1 %	1,75	17,5	1,70	20,0
+ 3 % chaux	SL 3 %	1,73	17,5	1,68	20,0
+ 3 % ciment	SC 3 %	1,81	15,0	1,75	17,5
+ 6 % ciment	SC 6 %	1,82	15,0	1,75	17,5

Les valeurs de w_{OPN} et de γ_{dmax} ont été déterminées pour chaque traitement (Tab. 1). Pour l'ensemble des modalités, les éprouvettes ont été compactées du côté humide de l'optimum ($w = w_{OPN} + 3\%$ et $\gamma_d = 0,96 \gamma_{dmax}$), avec des valeurs de w variant entre 17,5 et 20,0 % et des valeurs de γ_d variant entre 1,68 et 1,75 Mg/m³, selon la modalité de traitement.

Pour la préparation des éprouvettes, la teneur en eau du sol a été ajustée à la teneur en eau souhaitée pour le compactage. Après une période de stockage de 24 h, le sol et le produit de traitement ont été soigneusement mélangés dans un malaxeur à couteaux. Le mélange sol + chaux a été laissé au repos pendant 1 h dans un récipient hermétique avant de passer au compactage. Lors de l'utilisation du traitement au ciment, le compactage a été effectué quelques minutes (maximum 30 minutes) après le traitement pour tenir compte du temps de prise du ciment. Lorsque des traitements à l'argile ont été utilisés, aucun temps spécifique n'a été nécessaire entre le mélange et le compactage; le mélange a été compacté statiquement jusqu'à la densité sèche cible. Le compactage a été réalisé en plusieurs couches de l'ordre de 2 cm afin limiter l'hétérogénéité des éprouvettes. Lorsqu'une période de cure avant l'essai était nécessaire, les éprouvettes compactées étaient enveloppées dans des feuilles de plastique et maintenues à $20,0 \pm 1,5^\circ\text{C}$ afin d'éviter toute perte d'eau.

2.2 Protocole expérimental de l'essai HET

Un dispositif HET amélioré a été mis au point pour mesurer l'érosion interne des sols compactés et traités (Fig. 1). Ce dispositif comprend plusieurs optimisations qui permettent l'application d'une pression d'entrée élevée, permettant une grande chute de pression à travers l'éprouvette et donc une forte contrainte de cisaillement hydraulique le long du conduit. Des améliorations majeures ont été apportées au système de pression : la pression de l'eau à l'entrée de l'échantillon a été appliquée grâce à un réservoir spécial alimenté en air comprimé. Une électrovanne permet d'ajuster la pression d'air dans le réservoir air-eau pendant l'expérience. La pression d'eau appliquée sur la partie amont de l'éprouvette a été régulée en utilisant un capteur situé à proximité de l'entrée de l'éprouvette. La pression d'eau était également mesurée à la sortie de l'éprouvette. La pression d'entrée maximale dépassait 650 kPa, produisant la chute de pression nécessaire de 650 kPa entre les débits en amont et en aval des éprouvettes de sol.

D'autres optimisations ont été apportées à la configuration de la cellule d'essai (Fig. 1). Les éprouvettes de sol étaient maintenues à l'intérieur du dispositif d'essai des deux côtés, ceci afin d'éviter toute perte de pression et toute fuite d'eau, notamment lors d'essais sous fortes pressions. Le débit d'eau a été mesuré à l'aide d'un débitmètre à ultrasons. La plage de mesure de vitesse est de 0,1 à 20 m/s, sur une canalisation de 19 mm cela se traduit par une gamme de débit de 1,7 à 340 L/min avec une précision de l'ordre de 3 %. Un turbidimètre a été raccordé à la sortie de la cellule d'essai pour mesurer la turbidité de l'effluent, et ainsi évaluer la quantité de matière érodée en cours d'essai.

Pour éviter un endommagement de la paroi du conduit lors de sa réalisation, celui-ci a été percé juste après le compactage, avant la prise. (Mehenni *et al.*, 2016). L'éprouvette était ensuite placée dans la cellule d'essai. L'essai d'érosion était effectué en contrôlant et en surveillant les paramètres hydrauliques, la pression appliquée à l'éprouvette, la chute de pression entre l'amont et l'aval de l'éprouvette et le débit à travers le conduit.

Des essais préliminaires ont été réalisés pour chaque traitement afin de définir la plage de pression nécessaire pour amorcer l'érosion en détachant les particules du sol (Mehenni, 2015). Cette pression est liée à la nature du sol et au produit de traitement utilisé. L'initiation du processus d'érosion a été déterminée par le signal de turbidité. L'essai d'érosion est réalisé par application d'une pression constante à l'entrée de la cellule. Le but étant de maintenir cette pression constante pendant l'essai et de mesurer pour chaque pas de temps le débit d'eau traversant le conduit, le différentiel de pression entre l'amont et l'aval et aussi la turbidité des effluents. À la fin de l'essai, le conduit érodé est rempli avec de la paraffine liquide, ce qui permet de déterminer sa géométrie et son diamètre moyen.

Pour l'ensemble des essais présentés dans l'article, l'observation de la forme finale du conduit montre que la section transversale finale peut, dans certains cas, présenter un écart par rapport à la forme circulaire. Cet écart pourrait être lié aux hétérogénéités dans l'éprouvette de sol, au départ non uniforme de matériau, ou encore à des réparations de pression non uniforme le long du conduit. Des investigations ont donc été menées pour vérifier la sensibilité des paramètres d'érosion calculés ($\dot{\epsilon}$ et τ et par conséquent k_{er} et τ_c) vis-à-vis des petites variations de la forme de la section transversale entre la forme réelle et la forme théorique. Il a été alors nécessaire de modifier les équations d'analyse, afin d'intégrer la forme réelle dans le

Fig. 1. Détail de la nouvelle cellule HET développée.
Fig. 1. Details of the enhanced HET testing cell.

calcul des paramètres d'érosion. La géométrie du conduit a été intégrée au modèle de calcul. Avec comme objectif de quantifier la sensibilité des paramètres d'érosion en fonction de la forme réelle de la section du conduit. Le modèle proposé se base sur une section ellipsoïdale (grand rayon : a ; petit rayon b ; rapport entre les rayons : $\alpha = a/b$). Ce modèle a l'avantage de pouvoir se ramener à une section circulaire si $a = b$. Le taux d'érosion et la contrainte de cisaillement hydraulique sont alors définis comme suit :

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\rho_d}{2} \sqrt{\frac{2}{a(t)^2 + b(t)^2}} [a(t)db + b(t)da] \frac{1}{dt}, \quad (2)$$

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\Delta P(t)}{L} \cdot \frac{a(t) \cdot b(t)}{\sqrt{a(t)^2 + b(t)^2}}, \quad (3)$$

où : ρ_d est la densité sèche, db et da sont les variations du petit et du grand rayon de l'ellipse, L est la hauteur de l'éprouvette du sol, $\Delta P(t)$ est le différentiel de pression entre l'amont et l'aval de l'éprouvette à l'instant t .

Afin de déterminer les paramètres d'érosion, il est nécessaire de mesurer la variation des rayons du conduit durant l'érosion du sol. La perte de sol est utilisée pour mesurer l'évolution des rayons du conduit, a et b , durant l'essai. Dans un premier temps, la perte de masse $dm(t)$ est mesurée par rapport à la concentration du sol dans les effluents :

$$dm(t) = c(t) \cdot q(t) \cdot dt, \quad (4)$$

où : $c(t)$ est la concentration du sol dans les effluents, $q(t)$ est le débit d'eau à l'instant t .

Dans un deuxième temps, la perte de masse est reliée à la géométrie du conduit érodé. Deux hypothèses sont alors supposées : i) l'érosion est uniforme le long du conduit ; ii) la relation entre les rayons de l'ellipse est unique [$a(t) = \alpha \cdot b(t)$], le coefficient α est mesuré à la fin de l'essai. Ainsi, la perte de masse est donnée par :

$$dm(t) = 2 \cdot \alpha \cdot \pi \cdot \rho_d \cdot L \cdot b_i \cdot db. \quad (5)$$

L'évolution du rayon peut être déduite en égalisant les deux équations (Éq. (4) et (5)) de la perte de masse :

$$db = \frac{c(t) \cdot q(t)}{2 \cdot \pi \cdot \rho_d \cdot L} \cdot \frac{dt}{b_i}. \quad (6)$$

La quantité de sol érodée est calculée à partir des mesures du signal de turbidité (Reddi *et al.*, 2000). Des essais d'étalonnage préliminaires ont permis de déterminer la relation entre la concentration et la turbidité pour chaque traitement et chaque dosage. Cette relation est définie sur deux domaines de concentrations : faibles [0 à $\sim 1,5 \text{ kg/m}^3$] et élevées [$\sim 1,5$ à 16 kg/m^3]. L'utilisation du domaine de faibles concentrations permet d'apporter plus de précision sur la mesure de concentration à partir du signal de turbidité. De plus amples détails sur la conduite des essais d'étalonnage sont disponibles dans Mehenni (2015) ainsi que dans Mehenni *et al.* (2016).

3 Impact des traitements sur l'érodabilité des sols

3.1 Sol non traité

La répétabilité des paramètres d'érosion obtenus avec le nouveau dispositif HET a été vérifiée avec le sol non traité (Fig. 2). Les résultats montrent que k_{er} varie entre $1,13 \times 10^{-04}$ et $3,04 \times 10^{-04} \text{ s/m}$, et τ_c varie entre 291 et 615 Pa (Tab. 2). Cette dispersion est du même ordre de grandeur que dans les études disponibles (par exemple Wan et Fell, 2004a ; Haghighi *et al.*, 2013). Les valeurs moyennes pour le limon non traité sont $k_{er} = 2,07 \times 10^{-04} \text{ s/m}$ et $\tau_c = 429 \text{ Pa}$.

Le limon étudié présente une contrainte de cisaillement critique élevée par rapport aux valeurs généralement observées dans les sols non traités (Wan et Fell, 2004a). Ceci peut être lié au pourcentage élevé de la fraction de particules fines

Fig. 2. Exemples de résultats d'érosion du limon sans traitement (essais réalisés dans les mêmes conditions).

Fig. 2. Two examples of erosion law for the untreated silt.

(< 80 μm), 99,2 %, et aux conditions de compactage. En fait, le compactage du côté humide de l'optimum permet un meilleur réarrangement des particules du sol que le côté sec et réduit la porosité (par ex. [Benson et Daniel, 1990](#)). Le compactage du côté humide ($w=17,5\%$) combiné à la densité sèche élevée ($\rho_d=1,73 \text{ Mg/m}^3$) induit une microstructure particulière qui limite le détachement des particules du sol et nécessite un plus grand niveau de contrainte de cisaillement hydraulique pour initier l'érosion. Cependant, une fois que cette valeur de contrainte de cisaillement hydraulique est atteinte, le taux d'érosion progresse rapidement, comme le montre la valeur du coefficient d'érosion du sol ($k_{er}=2,07 \times 10^{-04} \text{ s/m}$).

3.2 Impact du traitement à la chaux

Pour un traitement à 1 % de chaux, k_{er} varie entre $1,09 \times 10^{-04}$ et $2,87 \times 10^{-04} \text{ s/m}$ quel que soit le temps de cure ([Tab. 3](#) et [Fig. 3](#)). Pour un traitement à 3 % de chaux, k_{er} se situe entre $1,54 \times 10^{-04}$ et $4,52 \times 10^{-04} \text{ s/m}$. Le traitement à la chaux augmente également la contrainte de cisaillement critique du sol non traité, qui peut atteindre des valeurs allant jusqu'à 1770 Pa pour 1 % de chaux et 1889 Pa pour 3 % de chaux.

Le taux d'érosion au cours de l'essai était plus élevé pour les éprouvettes traitées avec 3 % de chaux que pour le limon non traité. Cette observation pourrait s'expliquer par la taille maximale des agrégats dans le sol traité, qui est supérieure à celle du sol non traité. Il a également été observé au cours des essais que l'érosion des particules de sol traitées à la chaux se produit souvent par le détachement d'agrégats de sol, et pas seulement de particules de sol individuelles.

L'amélioration des caractéristiques d'érosion interne du limon induite par le traitement à la chaux est donc caractérisée principalement par l'augmentation de la contrainte de cisaillement critique.

Tableau 2. Caractéristiques d'érosion du limon sans traitement.
Table 2. Erosion characteristics for the untreated silt.

Essai	K_{er} (s/m)	τ_c (Pa)	Valeurs moyenne	
			$\bar{K}_{er}$ (s/m)	$\bar{\tau}_c$ (Pa)
1	$2,58 \times 10^{-04}$	391	$2,07 \times 10^{-04}$	429
2	$2,16 \times 10^{-04}$	389		
3	$2,22 \times 10^{-04}$	398		
4	$1,13 \times 10^{-04}$	491		
5	$3,04 \times 10^{-04}$	615		
6	$1,30 \times 10^{-04}$	291		

3.3 Apport d'un traitement au ciment

Dans le cas du ciment à 3 %, il a été nécessaire d'appliquer une pression d'entrée allant jusqu'à 450 kPa pour amorcer l'érosion du sol ([Fig. 4](#) et [Tab. 4](#)). Ceci se traduit par la forte contrainte de cisaillement hydraulique appliquée relativement aux autres traitements. Pour la plupart des éprouvettes testées, l'érosion a commencé à une contrainte de cisaillement hydraulique de 2000 Pa.

Dans le cas d'un traitement avec 6 % de ciment, la pression d'entrée appliquée était supérieure à 500 kPa, et la longueur des éprouvettes a été réduite à 70 mm pour appliquer une contrainte de cisaillement hydraulique plus élevée. Le détachement des particules de sol a commencé après 4000 Pa pour la plupart des éprouvettes. Cependant, la loi sur l'érosion présentait des caractéristiques non linéaires pour la plupart des spécimens, surtout au-delà de 7 jours de cure. Ainsi, il était difficile de déterminer la valeur de k_{er} pour certaines éprouvettes. Dans de tels cas, la contrainte de cisaillement critique correspond à la valeur de la contrainte de cisaillement hydraulique à la fin du processus d'érosion ([Tab. 4](#)).

Le traitement au ciment apporte une augmentation de la contrainte de cisaillement critique, associée à une diminution du coefficient d'érosion du sol.

3.4 Impact de l'addition d'argile

L'utilisation de 2 % de kaolinite n'a pas changé de façon significative k_{er} , avec, cependant, une légère tendance à l'augmentation de τ_c ([Tab. 5](#) et [Fig. 5](#)). L'addition de 9 % de kaolinite a diminué k_{er} d'un ordre de grandeur et a induit une faible augmentation de τ_c avec une valeur moyenne de 513 Pa. Pour le traitement avec 2 % de bentonite, k_{er} reste du même ordre de grandeur pour toutes les éprouvettes et est d'environ $5,00 \times 10^{-05} \text{ s/m}$ ([Fig. 6](#) et [Tab. 5](#)) ce qui est inférieur d'un ordre de grandeur à celui du sol non traité. τ_c varie entre 0,123 et 0,483 kPa, ces valeurs sont en accord avec l'intervalle de variation de τ_c pour les limons non traités.

Le traitement de l'argile induit principalement une réduction du coefficient d'érosion du sol en fonction de la nature et du pourcentage du produit ajouté.

4 Discussion

Les deux paramètres qui caractérisent la résistance à l'érosion des sols, le coefficient d'érosion k_{er} et la contrainte

Tableau 3. Impact du traitement à la chaux sur les caractéristiques d'érosion du limon.**Table 3.** Impact of lime treatment on the erosion characteristics of the silt.

Test	Dosage en chaux et temps de cure	Caractéristiques		Valeurs moyennes	
		K_{er} (s/m)	τ_c (Pa)	K_{er} (s/m)	τ_c (Pa)
1	+ 1 % chaux (1 jour)	$1,25 \times 10^{-04}$	780	$1,25 \times 10^{-04}$	745
2		$1,20 \times 10^{-04}$	618		
3		$2,62 \times 10^{-04}$	836		
1	+ 1 % chaux (7 jours)	$2,87 \times 10^{-04}$	1725	$2,63 \times 10^{-04}$	1660
2		$2,35 \times 10^{-04}$	1770		
3		$2,65 \times 10^{-04}$	1487		
1	+ 1 % chaux (30 jours)	$2,71 \times 10^{-04}$	1336	$2,11 \times 10^{-04}$	1279
2		$2,53 \times 10^{-04}$	1538		
3		$1,09 \times 10^{-04}$	963		
1	+ 3 % chaux (1 jour)	$2,01 \times 10^{-04}$	990	$2,24 \times 10^{-04}$	1200
2		$2,47 \times 10^{-04}$	1409		
1	+ 3 % chaux (7 jours)	$1,54 \times 10^{-04}$	1857	$2,46 \times 10^{-04}$	1707
2		$1,75 \times 10^{-04}$	1863		
3		$4,52 \times 10^{-04}$	1889		
4		$2,15 \times 10^{-04}$	1567		
5		$2,28 \times 10^{-04}$	1522		
6		$3,07 \times 10^{-04}$	1648		
7		$1,81 \times 10^{-04}$	1608		
1	+ 3 % chaux (30 jours)	$2,16 \times 10^{-04}$	1329	$1,71 \times 10^{-04}$	1362
2		$2,27 \times 10^{-04}$	1035		
3		$1,78 \times 10^{-04}$	1197		
4		$1,68 \times 10^{-04}$	1845		
5		$2,42 \times 10^{-04}$	1365		
6		$1,67 \times 10^{-04}$	1405

Fig. 3. Impact du traitement à la chaux sur l'érodabilité du limon.**Fig. 3.** Impact of lime treatment on the erodability of the tested silt.

Fig. 4. Impact du traitement au ciment sur l'érodabilité du limon.

Fig. 4. Impact of cement treatment on the erodability of the tested silt.

Tableau 4. Apport du traitement au ciment sur les caractéristiques d'érosion du limon.

Table 4. Erosion characteristics for cement-treated silt.

Test	Dosage et temps de cure	Érodabilité		Valeurs moyennes	
		K_{er} (s/m)	τ_c (Pa)	K_{er} (s/m)	(Pa)
1	+ 3 % ciment (1 jour)	$1,13 \times 10^{-04}$	2850	$1,13 \times 10^{-04}$	2850
2		NE*	2850		
3		NE*	2850		
1	+ 3 % ciment (7 jours)	$1,22 \times 10^{-04}$	2520	$1,31 \times 10^{-04}$	2985
2		$1,47 \times 10^{-04}$	3619		
3		$1,26 \times 10^{-04}$	2817		
1	+ 3 % ciment (30 jours)	$1,31 \times 10^{-04}$	2977	$1,47 \times 10^{-04}$	2886
2		$1,43 \times 10^{-04}$	2531		
3		$1,67 \times 10^{-04}$	3150		
1	+ 6 % ciment (1 jour)	$5,48 \times 10^{-05}$	4398	$4,83 \times 10^{-05}$	5891
2		$8,00 \times 10^{-05}$	6475		
3		$1,00 \times 10^{-05}$	6800		
1	+ 6 % ciment (7 jours)	NE	9734	NE	9814
2		NE	9893		

NE : non évalué.

critique τ_c , peuvent être modifiés, de manière indépendante, par l'ajout d'un produit de traitement.

La Figure 7 illustre l'évolution du coefficient d'érosion du limon étudié (valeurs moyennes) en fonction de l'augmentation du dosage pour les différents produits de traitement et les différents temps de cure utilisés. Pour des dosages inférieurs à 3 %, les différents traitements ne modifient pas le coefficient

d'érosion de manière significative. Seul le traitement à la bentonite (2 %) permet de réduire le coefficient d'érosion d'un ordre de grandeur. Pour cette gamme de dosage aussi, le temps de cure ne semble pas avoir un impact significatif sur le coefficient d'érosion. Pour des dosages supérieurs à 6 %, l'ajout de différents produits de traitement (la chaux qui n'a pas été testée) réduit le coefficient d'érosion. Dans cette gamme de

Fig. 5. Résultats d'érosion du limon traité à la kaolinite.

Fig. 5. Impact of kaolinite treatment on the erodability of the silt.

Tableau 5. Caractéristiques d'érosion du limon traité à la kaolinite ou à la bentonite.

Table 5. Impact of kaolinite treatment on the erosion characteristics of the studied silt.

Essai	Traitement	K_{er} (s/m)	(Pa)	Valeur moyenne	
				K_{er} (s/m)	(Pa)
1	+ 2 % kaolinite	$1,54 \times 10^{-04}$	586	$1,99 \times 10^{-04}$	607
2		$1,75 \times 10^{-04}$	483		
3		$2,68 \times 10^{-04}$	754		
1	+ 9 % kaolinite	$9,83 \times 10^{-05}$	543	$6,92 \times 10^{-05}$	530
2		$4,62 \times 10^{-05}$	668		
3		$8,10 \times 10^{-05}$	391		
4		$5,05 \times 10^{-05}$	519		
1	+ 2 % bentonite	$5,98 \times 10^{-05}$	273	$5,62 \times 10^{-05}$	316
2		$5,66 \times 10^{-05}$	357		
3		$5,71 \times 10^{-05}$	511		
4		$5,13 \times 10^{-05}$	123		

dosage, le temps de cure semble avoir un effet favorable pour diminuer le coefficient d'érosion du limon traité au ciment.

L'évolution de la contrainte critique (valeurs moyennes) en fonction du dosage utilisé pour différents produits de traitement et différents temps de cure montre que les produits argileux n'apportent pas de modifications significatives sur la contrainte critique (Fig. 8). Le traitement par des liants induit une augmentation de la contrainte critique. L'ampleur de l'augmentation de la contrainte critique est par ailleurs liée aux trois paramètres suivants : nature de traitement, dosage utilisé et temps de cure. Les effets de ces trois paramètres sont interdépendants. Ainsi, l'augmentation de la contrainte

critique est plus marquée dans le cas du traitement au ciment. L'augmentation du dosage utilisé favorise l'augmentation de la contrainte critique mais avec un effet plus marqué dans le cas du ciment que dans le cas de la chaux. Le temps de cure semble favoriser l'augmentation de la contrainte critique, mais avec un effet plus ou moins important selon le dosage et la nature du produit de traitement.

L'impact des traitements sur les caractéristiques d'érosion du limon (τ_c , k_{er}) est aussi illustré par la figure 9. Ce mode de présentation permet de s'affranchir de la barrière de classification qui se limite à un seul paramètre (k_{er}). Les effets de chaque produit de traitement peuvent donc être

Fig. 6. Résultats d'érosion du limon traité à la bentonite.

Fig. 6. Impact of bentonite treatment on the erodability of the silt.

Fig. 7. Impact des traitements sur le coefficient d'érosion du limon (valeur moyenne).

Fig. 7. Impact of the different treatments on the coefficient of soil erosion.

visualisés avec la prise en compte de la dispersion des résultats. Ainsi, l'influence est notable uniquement pour un dosage de 9% de kaolinite, et elle est marquée par la diminution du coefficient d'érosion, d'un ordre de grandeur, sans grande modification de la contrainte critique.

L'action principale de la bentonite est la diminution du coefficient d'érosion, d'un ordre de grandeur, sans modification significative de la contrainte critique. Ces effets sont obtenus même avec un faible dosage de bentonite. L'ajout de la chaux ne modifie pas de manière significative le coefficient d'érosion du sol. L'effet principal est l'augmentation de la contrainte critique. Par ailleurs, l'augmentation de la contrainte critique semble être plus importante avec l'augmentation du temps de cure. L'impact de l'ajout du ciment est

Fig. 8. Impact du dosage et du temps de cure sur l'évolution de la contrainte critique du limon traité (valeur moyenne de la contrainte critique).

Fig. 8. Impact of the different treatments on the critical shear stress.

lié au dosage utilisé. Avec un dosage moyen (3%) le coefficient d'érosion n'est pas significativement modifié et la contrainte critique est augmentée. Un temps de cure variant entre 1 et 30 jours ne semble pas affecter les caractéristiques d'érosion du traitement avec 3% de ciment. Avec un dosage de 6% de ciment, le coefficient d'érosion est diminué d'un ordre de grandeur et la contrainte critique est augmentée. Avec ce dosage élevé, le temps de cure semble favoriser les modifications des caractéristiques d'érosion.

5 Conclusion

Cet article présente les résultats d'une étude de l'impact à court terme du traitement sur la résistance à l'érosion interne

Fig. 9. Impact des différents traitements sur les caractéristiques d'érosion du limon de Saint-Quentin.

Fig. 9. Effect of treatment on the erosion characteristics of the studied silt.

du limon de Saint-Quentin compacté. Le dispositif d'érosion *hole erosion test* optimisé mis en place dans le cadre de cette étude constitue un outil fiable qui permet de quantifier l'apport de différents traitements sur l'évolution de la résistance à l'érosion interne des sols traités. Ce dispositif se distingue des autres appareillages actuellement disponibles par sa large gamme d'application de pression, permettant ainsi d'évaluer quantitativement l'impact de traitement à la chaux et au ciment sur les caractéristiques d'érosion d'un limon compacté.

L'impact des différents traitements sur les caractéristiques d'érosion du limon étudié se traduit principalement par une augmentation de la contrainte critique. Les résultats montrent que cette augmentation est plus grande avec l'augmentation du dosage, et aussi plus grande dans le cas du traitement au ciment. De plus, pour les traitements avec la chaux et le ciment, la contrainte critique tend à augmenter avec le temps de cure. Par ailleurs, le coefficient d'érosion est affecté uniquement par le traitement à la bentonite ou dans le cas d'utilisation d'un grand dosage de traitement (6 % de ciment et 9 % de kaolinite).

L'ensemble des résultats permet donc de déterminer l'optimisation globale apportée par chaque produit de traitement. Ces résultats constituent donc un premier outil de choix et de sélection de produit de traitement, du dosage, et aussi des conditions de comptage nécessaires pour satisfaire, à la fois, des critères hydriques/mécaniques/érodabilité lors de la conception d'ouvrages hydrauliques.

Toutefois, ces améliorations initiales sont susceptibles d'évoluer au cours du temps lorsque le sol traité est soumis à des sollicitations hydriques de séchage-humidification. L'enjeu majeur est de suivre cette évolution et de déterminer donc la durabilité des effets de traitements.

Remerciements. Les résultats et conclusions présentés dans cet article ont été, pour partie, obtenus durant la thèse de M. Abdelwadoud Mehenni financée dans le cadre d'une convention CIFRE avec Bouygues Travaux Publics. Les auteurs tiennent à remercier MM. Simon Bonne et Tangi Le Borgne de Bouygues Travaux Publics.

Références

- Al-Amoudi OSB. 2002. Characterization and chemical stabilization of Al-Qurayyah sabkha soil. *J Mater Civil Eng* 14: 478–484.
- ASTM-D4647. 1998. Standard test method for identification and classification of dispersive clay soils by the pinhole test.
- Attom M. 2012. The effect of compaction and initial water content on soil erosion. In: ICSE6 Paris–August 27–31, 2012, pp. 49–56.
- Bell FG. 1996. Lime stabilization of clay minerals and soils. *Eng Geol* 42: 223–237. doi: [10.1016/0013-7952\(96\)00028-2](https://doi.org/10.1016/0013-7952(96)00028-2).
- Bellezza I, Fratolocchi E. 2006. Effectiveness of cement on hydraulic conductivity of compacted soil-cement mixtures. *Ground Improv* 10: 77–90.
- Benahmed N, Bonelli S. 2012. Investigating concentrated leak erosion behaviour of cohesive soils by performing Hole Erosion Test. *Eur J Env Civil Eng* 16: 43–58.
- Bennabi A, Karoui T, Benamar A, Wang H-Q. 2012. Some elements of comparison between two laboratory devices for soil erosion testing. In: ICSE6 Paris–August 27–31, 2012, pp. 1089–1096.
- Benson GH, Daniel DE. 1990. Influence of clods on hydraulic conductivity of compacted clay. *J Geotech Eng* 116: 1231–1248.
- Brandl H. 1981. Alteration of soil parameters by stabilization with lime. In: 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering–June 15–19, 1981, pp. 587–594.
- Chapuis RP. 2002. The 2000 R.M. Hardy Lecture: Full-scale hydraulic performance of soil-bentonite and compacted clay liners. *Can Geotech J* 39: 417–439. doi: [10.1139/t01-092](https://doi.org/10.1139/t01-092).
- Chevalier C, Haghighi I, Herrier G. 2012. Resistance to erosion of lime treated soils: a complete parametric study in laboratory. In: ICSE6 Paris–August 27–31, 2012, pp. 1065–1072.
- Cuisinier O, Auriol J-CC, Le Borgne T, Deneee D. 2011. Microstructure and hydraulic conductivity of a compacted lime-treated soil. *Eng Geol* 123: 187–193. doi: [10.1016/j.enggeo.2011.07.010](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.07.010).
- Eades JL, Grim RE. 1960. Reaction of hydrated lime with pure clay minerals in soil stabilization. *Highw Res Board Bull* 262: 51–63.
- Fell R, Wan CF, Cyganiewicz J, Foster M. 2003. Time for development of internal erosion and piping in embankment dams. *J Geotech Geoenviron Eng* 129: 307–314.

- Haghighi I, Chevalier C, Duc M, Guédon S, Reiffsteck P. 2013. Improvement of hole erosion test and results on reference soils. *J Geotech Geoenviron Eng* 139: 330–339.
- Herrier G, Chevalier C, Froumentin M, Cuisinier O, Bonelli S, Fry J-J. 2012a. Lime treated soil as an erosion-resistant material for hydraulic earthen structures. In: ICSE6 Paris–August 27–31, 2012, pp. 585–592.
- Herrier G, Lesueur D, Puiatti D, *et al.*, 2012b. Lime treated materials for embankment and hardfill dam. In: ICOLD 2012 – International Symposium On Dams For A Changing World Kyoto–June 5–8, 2012, pp. 1–6.
- Indraratna B, Muttuvel T, Khabbaz H. 2009. Modelling the erosion rate of chemically stabilized soil incorporating tensile force-deformation characteristics. *Can Geotech J* 46: 57–68.
- Le Runigo B, Cuisinier O, Cui Y-J, Ferber V, Deneele D. 2009. Impact of initial state on the fabric and permeability of a lime-treated silt under long-term leaching. *Can Geotech J* 46: 1243–1257. doi: [10.1139/T09-061](https://doi.org/10.1139/T09-061).
- Le Runigo B, Ferber V, Cui YJ, Cuisinier O, Deneele D. 2011. Performance of lime-treated silty soil under long-term hydraulic conditions. *Eng Geol* 118: 20–28. doi: [10.1016/j.enggeo.2010.12.002](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.12.002).
- Lefebvre G, Rohan K, Douville S. 1985. Erosivity of natural intact structured clay: evaluation. *Can Geotech J* 22: 508–517.
- Lim SS. 2006. Experimental investigation of erosion in variably saturated clay soils.
- Little DN. 1995. Handbook for stabilization of pavement subgrades and base courses with lime. National Lime Association, 219 p. Dubuque, IA (United States): Kendal/Hunt Publishing Company.
- Lüthi M, Fannin RJ, Millar RG. 2012. A Modified Hole Erosion Test (HET-P) Device. *Geotech Test J* 35: 104336. doi: [10.1520/GTJ104336](https://doi.org/10.1520/GTJ104336).
- McCallister LD, Petry TM. 1991. Physical property changes in a lime-treated expansive clay caused by leaching. *Transp Res Rec* 1295: 37–44.
- Mehenni A. 2015. Comportement hydromécanique et érosion des sols fins traités. Université de Lorraine, Nancy.
- Mehenni A, Cuisinier O, Masrouri F. 2016. Impact of lime, cement, and clay treatments on the internal erosion of compacted soils. *J Mater Civil Eng* 28: 04016071. doi: [10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001573](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001573).
- Mitchell JK, Hooper DR, Campanella RG. 1965. Permeability of compacted clays. *J Soil Mech Found Div* 91: 41–65.
- Pham TL. 2008. Érosion et dispersion des sols argileux par un fluide. Thèse de doctorat. École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- Reddi LN, Lee IM, Bonala MVS. 2000. Comparison of internal and surface erosion using flow pump tests on a sand-kaolinite mixture. *Geotech Test J* 23: 116–122.
- Robin V, Cuisinier O, Masrouri F, Javadi AA. 2014. Chemo-mechanical modelling of lime treated soils. *Appl Clay Sci* 95: 211–219. doi: [10.1016/j.clay.2014.04.015](https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.04.015).
- Rohan K, Lefebvre G, Douville S, Milette JP. 1986. A new technique to evaluate erosivity of cohesive material. *Geotech Test J* 9: 87–92.
- Sariosseiri F, Muhunthan B. 2009. Effect of cement treatment on geotechnical properties of some Washington State soils. *Eng Geol* 104: 119–125. doi: [10.1016/j.enggeo.2008.09.003](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.09.003).
- Sherard JL, Dunnigan LP, Decker RS, Steele EF. 1976. Pinhole test for identifying dispersive soils. *J Geotech Eng Div* 102: 69–85.
- Sivapullaiah PV, Sridharan A, Stalin VK. 2000. Hydraulic conductivity of bentonite-sand mixtures. *Can Geotech J* 37: 406–413.
- Stoltz G, Cuisinier O, Masrouri F. 2012. Multi-scale analysis of the swelling and shrinkage of a lime-treated expansive clayey soil. *Appl Clay Sci* 61: 44–51. doi: [10.1016/j.clay.2012.04.001](https://doi.org/10.1016/j.clay.2012.04.001).
- Stoltz G, Cuisinier O, Masrouri F. 2014. Weathering of a lime-treated clayey soil by drying and wetting cycles. *Eng Geol* 181: 281–289. doi: [10.1016/j.enggeo.2014.08.013](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.08.013).
- Wahl TL. 2010. A comparison of the hole erosion test and jet erosion test. In: Joint Federal Interagency Conference on Sedimentation and Hydrologic Modeling Las Vega–June 27 July 1, 2010, pp. 1–12.
- Wan CF, Fell R. 2004a. Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams. *J Geotech Geoenviron Eng* 130: 373–380.
- Wan CF, Fell R. 2004b. Laboratory tests on the rate of piping erosion of soils in embankment dams. *Geotech Test J* 27: 295–303.

Citation de l'article : Olivier Cuisinier, Abdelwadoud Mehenni, Farimah Masrouri, Emmanuel Lavallée. Impact d'un traitement à la chaux, au ciment ou à base d'argile sur l'érodabilité d'un limon compacté. Rev. Fr. Geotech. 2018, 156, 2.