



HAL
open science

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

Olivier Cuisinier, Abdelwadoud Mehenni, Farimah Masrouri, Emmanuel Lavallée

► To cite this version:

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. *Revue française de Géotechnique*, 2018, 156, pp.2. 10.1051/geotech/2019002 . hal-02020381

HAL Id: hal-02020381

<https://hal.science/hal-02020381>

Submitted on 5 Jul 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

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

3

4

5

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

7

8 1 : Université de Lorraine, CNRS, LEMTA – UMR 7563 Vandœuvre-lès-Nancy. France

9 2 : Bouygues Travaux Publics, Guyancourt. France

10

11

12

13

14

15 * Corresponding author

16 LEMTA, UMR 7563 Université de Lorraine-CNRS

17 2 rue du Doyen Marcel Roubault, BP 10162

18 F-54505 Vandœuvre-lès-Nancy Cedex, France

19 E-mail address: Olivier.Cuisinier@univ-lorraine.fr

20 **Résumé**

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

32 **Mots clés** : Érosion interne ; traitement des sols ; chaux ; ciment ; argiles.

33 **Abstract**

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

45 **Keywords:** internal erosion; soil treatment; lime; cement; clays.

46 1. INTRODUCTION

47 Les sols constituant les ouvrages en terre peuvent être sujets à divers phénomènes d'érosion qui
48 peuvent provoquer des dégâts importants sur la structure de l'ouvrage, allant même jusqu'à sa
49 ruine. Un moyen pour prévenir le risque d'érosion est d'utiliser des matériaux présentant une
50 érodabilité qui répond aux critères d'érosion requis, et aussi aux autres critères portant sur le
51 comportement hydrique et mécanique des sols. Lorsque les sols disponibles pour la construction
52 ne permettent pas de satisfaire aux critères nécessaires, le traitement constitue une alternative
53 intéressante. Il existe ainsi plusieurs techniques de traitement qui permettent d'améliorer les
54 sols. Plusieurs auteurs ont montré que le traitement à la chaux améliore principalement la
55 maniabilité du sol ainsi que les performances mécaniques du sol (Bell, 1996; Brandl, 1981;
56 Eades and Grim, 1960; Le Runigo et al., 2011; Little, 1995; Robin et al., 2014; Stoltz et al.,
57 2014, 2012). Les effets de la chaux sur la conductivité hydraulique des sols dépendent en
58 revanche des conditions de compactage (Cuisinier et al., 2011; Herrier et al., 2012b; Le Runigo
59 et al., 2009; McCallister and Petry, 1991). Plusieurs études ont montré l'amélioration des
60 caractéristiques mécaniques des sols après traitement au ciment (par exemple Al-Amoudi,
61 2002; Sariosseiri and Muhunthan, 2009). Selon Bellezza & Fratolocchi (2006) l'évolution de
62 la conductivité hydraulique est principalement liée à la nature du sol et peut augmenter ou
63 diminuer après le traitement au ciment. Les sols argileux sont souvent utilisés comme produit
64 de traitement spécifiquement pour réduire la conductivité hydraulique des sols afin d'atteindre
65 une valeur cible. L'ampleur de la réduction de la conductivité hydraulique dépend du dosage et
66 de la nature du matériau argileux utilisé (par exemple Chapuis, 2002; Sivapullaiah et al., 2000).

67
68 L'objectif principal de l'article est de présenter les résultats d'une campagne d'études
69 concernant l'impact de différents traitements sur l'érodabilité d'un limon compacté. Dans ce
70 qui suit, après la description du processus d'érosion et sa caractérisation expérimentale, une

71 revue des données disponibles sur les effets des traitements sur les caractéristiques de l'érosion
72 interne est présentée. Les phénomènes d'érosion qui se produisent sur les structures
73 hydrauliques en terre peuvent être classés en deux catégories : l'érosion externe et l'érosion
74 interne. L'érosion externe concerne les surfaces extérieures des structures, alors que l'érosion
75 interne se produit à l'intérieur du corps de la structure. Cette étude est axée sur l'érosion de
76 conduit, qui est un mécanisme d'érosion interne. Selon Fell et al. (2003), ce processus d'érosion
77 interne peut être divisé en quatre phases : l'initiation de l'érosion par une concentration de la
78 circulation d'eau au sein de la structure, la poursuite de l'érosion, la progression de l'érosion qui
79 aboutit à former une conduite, et la formation d'une brèche conduisant à la destruction de la
80 structure. Pour étudier l'érosion interne, le « hole erosion test » (HET) a été développé (Wan
81 and Fell, 2004a, 2004b). Cet essai dérive d'autres dispositifs expérimentaux d'érosion interne
82 (ASTM-D4647, 1998; Lefebvre et al., 1985; Reddi et al., 2000; Rohan et al., 1986; Sherard et
83 al., 1976). Le HET ne caractérise le comportement des sols qu'une fois qu'un conduit est
84 complètement formé. L'essai ne permet pas d'étudier la phase initiale du processus d'érosion
85 interne (c'est-à-dire la formation de la conduite dans le sol). En fait, dans le HET, un conduit
86 préformé dans une éprouvette de sol est créé pour simuler ce conduit. L'érodabilité des parois
87 du conduit est ensuite étudiée en le soumettant à un écoulement d'eau. La croissance du diamètre
88 du conduit est surveillée par la mesure des paramètres hydrauliques. Les résultats permettent
89 de déterminer la loi empirique d'érosion du matériau, qui peut être exprimée comme suit :

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

90 où :

91 $\dot{\varepsilon}$: taux d'érosion par unité de surface par unité de temps [kg/s/m²] ;

92 τ : contrainte de cisaillement hydraulique [Pa] ;

93 τ_c : contrainte critique [Pa] ;

94 k_{er} : coefficient d'érosion [s/m].

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

100 Le HET a été utilisé pour évaluer l'impact des paramètres de compactage, c'est-à-dire la teneur
101 initiale en eau, la densité sèche et l'énergie de compactage sur l'érodabilité des sols compactés.
102 Certains auteurs (Attom, 2012; Lim, 2006; Wan and Fell, 2004a) ont montré que pour une
103 même densité sèche, les sols présentent une érodabilité plus faible s'ils sont compactés à une
104 teneur en eau plus élevée que la teneur en eau de de l'optimum (côté humide de la courbe de
105 compactage). L'augmentation de la densité sèche du sol induit une diminution de l'érodabilité
106 et une contrainte critique plus élevée. Pour les sols compactés, les effets de la densité sèche, sur
107 la baisse de l'érodabilité, sont également liés à la teneur en eau initiale de compactage. Le long
108 de la courbe de compactage, l'érodabilité la plus faible est atteinte pour les valeurs couplées de
109 la teneur en eau initiale optimale et de la densité sèche maximale (Attom, 2012; Wahl, 2010).

110 Quelques études se sont attachées à évaluer l'amélioration des caractéristiques d'érosion interne
111 d'un sol apportée par un traitement. Pour étudier l'érosion interne après traitement, il est
112 nécessaire d'utiliser un dispositif capable d'appliquer la pression d'entrée nécessaire et donc
113 d'assurer la chute de pression à travers l'éprouvette de sol indispensable pour initier l'érosion
114 du sol étudié. Les dispositifs existants ne permettent pas de caractériser pleinement l'impact de
115 ces traitements sur l'érodabilité en raison de limitations techniques. Cependant, Chevalier et al.
116 (2012) ont montré qu'un traitement à la chaux de 2% d'un limon peut augmenter la contrainte
117 de cisaillement critique d'un facteur d'au moins quatre. Herrier et al. (2012a) ont étudié un sol
118 traité à la chaux de 2% avec un temps de séchage de 14 jours et ont observé que la contrainte

119 de cisaillement critique a augmenté d'un facteur de 20, alors que le coefficient d'érosion a été
120 réduit d'un facteur de 10. Indraratna et al. (2009) ont travaillé sur du sable silteux traité avec du
121 ciment avec une contrainte de cisaillement critique proche de zéro avant traitement. Ils ont
122 montré que le traitement avec 3% de ciment augmentait la contrainte de cisaillement
123 hydraulique jusqu'à 50 Pa, et diminuait le coefficient d'érosion de deux ordres de grandeur. De
124 plus, ils ont constaté que la diminution de l'érosion par le traitement du ciment est directement
125 liée au pourcentage de ciment ajouté au sol. Le pourcentage de particules d'argile présentes dans
126 le sol peut modifier la résistance à l'érosion interne des sols. Plusieurs auteurs ont montré que
127 l'augmentation du pourcentage d'argile induit une hausse de la contrainte critique et une baisse
128 de coefficient d'érosion (Benahmed & Bonelli, 2012; Bennabi et al., 2012; Haghghi et al.,
129 2013).

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

137 **2. MATÉRIAUX ET MÉTHODES**

138 **2.1. Matériaux**

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

144 Il est bien établi que le compactage du côté humide de l'optimum de la courbe de compactage
145 permet d'atteindre la perméabilité la plus faible (par exemple Mitchell et al., 1965). Les valeurs
146 de w_{OPN} et de γ_{dmax} ont été déterminées pour chaque traitement (**Table 1**). Pour l'ensemble des
147 modalités, les éprouvettes ont été compactées du côté humide de l'optimum ($w = w_{OPN+3\%}$ et γ_d
148 $= 0,96 \gamma_{dmax}$), avec des valeurs de w variant entre 17,5 et 20,0 % et des valeurs de γ_d variant
149 entre 1,68 et 1,75 Mg/m³, selon la modalité de traitement.

150 Pour la préparation des éprouvettes, la teneur en eau du sol a été ajustée à la teneur en eau
151 souhaitée pour le compactage. Après une période de stockage de 24 h, le sol et le produit de
152 traitement ont été soigneusement mélangés dans un malaxeur à couteaux. Le mélange sol +
153 chaux a été laissé au repos pendant 1 h dans un récipient hermétique avant de passer au
154 compactage. Lors de l'utilisation du traitement au ciment, le compactage a été effectué quelques
155 minutes (maximum 30 minutes) après le traitement pour tenir compte du temps de prise du
156 ciment. Lorsque des traitements à l'argile ont été utilisés, aucun temps spécifique n'a été
157 nécessaire entre le mélange et le compactage ; le mélange a été compacté statiquement jusqu'à
158 la densité sèche cible. Le compactage a été réalisé en plusieurs couches de l'ordre de 2 cm afin
159 limiter l'hétérogénéité des éprouvettes. Lorsqu'une période de cure avant l'essai était nécessaire,
160 les éprouvettes compactées étaient enveloppées dans des feuilles de plastique et maintenues à
161 $20,0 \pm 1,5$ °C afin d'éviter toute perte d'eau.

162 **2.2. Protocole expérimental de l'essai HET**

163 Un dispositif HET amélioré a été mis au point pour mesurer l'érosion interne des sols compactés
164 et traités (Figure 1). Ce dispositif comprend plusieurs optimisations qui permettent l'application
165 d'une pression d'entrée élevée, permettant une grande chute de pression à travers l'éprouvette et
166 donc une forte contrainte de cisaillement hydraulique le long du conduit. Des améliorations
167 majeures ont été apportées au système de pression : la pression de l'eau à l'entrée de l'échantillon
168 a été appliquée grâce à un réservoir spécial alimenté en air comprimé. Une électrovanne permet

169 d'ajuster la pression d'air dans le réservoir air-eau pendant l'expérience. La pression d'eau
170 appliquée sur la partie amont de l'éprouvette a été réglée en utilisant un capteur situé à
171 proximité de l'entrée de l'éprouvette. La pression d'eau était également mesurée à la sortie de
172 l'éprouvette. La pression d'entrée maximale dépassait 650 kPa, produisant la chute de pression
173 nécessaire de 650 kPa entre les débits en amont et en aval des éprouvettes de sol. D'autres
174 optimisations ont été apportées à la configuration de la cellule d'essai (Figure 1). Les
175 éprouvettes de sol étaient maintenues à l'intérieur du dispositif d'essai des deux côtés, ceci afin
176 d'éviter toute perte de pression et toute fuite d'eau, notamment lors d'essais sous fortes
177 pressions. Le débit d'eau a été mesuré à l'aide d'un débitmètre à ultrasons. La plage de mesure
178 de vitesse est de 0,1 à 20 m/s, sur une canalisation de 19 mm cela se traduit par une gamme de débit
179 de 1,7 à 340 L/min avec une précision de l'ordre de 3 %. Un turbidimètre a été raccordé à la sortie
180 de la cellule d'essai pour mesurer la turbidité de l'effluent, et ainsi évaluer la quantité de matière
181 érodée en cours d'essai.

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

187 Des essais préliminaires ont été réalisés pour chaque traitement afin de définir la plage de
188 pression nécessaire pour amorcer l'érosion en détachant les particules du sol (Mehenni, 2015).
189 Cette pression est liée à la nature du sol et au produit de traitement utilisé. L'initiation du
190 processus d'érosion a été déterminée par le signal de turbidité. L'essai d'érosion est réalisé par
191 application d'une pression constante à l'entrée de la cellule. Le but étant de maintenir cette
192 pression constante pendant l'essai et de mesurer pour chaque pas de temps le débit d'eau
193 traversant le conduit, le différentiel de pression entre l'amont et l'aval et aussi la turbidité des

194 effluents. À la fin de l'essai, le conduit érodé est rempli avec de la paraffine liquide, ce qui
 195 permet de déterminer sa géométrie et son diamètre moyen.

196 Pour l'ensemble des essais présentés dans l'article, l'observation de la forme finale du conduit
 197 montre que la section transversale finale peut, dans certains cas, présenter un écart par rapport à la
 198 forme circulaire. Cet écart pourrait être lié aux hétérogénéités dans l'éprouvette de sol, au départ
 199 non uniforme de matériau, ou encore à des réparations de pression non uniforme le long du conduit.

200 Des investigations ont donc été menées pour vérifier la sensibilité des paramètres d'érosion calculés
 201 ($\dot{\varepsilon}$ et τ et par conséquent k_{er} et τ_c) vis-à-vis des petites variations de la forme de la section transversale
 202 entre la forme réelle et la forme théorique. Il a été alors nécessaire de modifier les équations
 203 d'analyse, afin d'intégrer la forme réelle dans le calcul des paramètres d'érosion. La géométrie
 204 du conduit a été intégrée au modèle de calcul. Avec comme objectif de quantifier la sensibilité des
 205 paramètres d'érosion en fonction de la forme réelle de la section du conduit. Le modèle proposé se
 206 base sur une section ellipsoïdale (grand rayon : a ; petit rayon b ; rapport entre les rayons : $\alpha =$
 207 a/b). Ce modèle a l'avantage de pouvoir se ramener à une section circulaire si $a=b$. Le taux
 208 d'érosion et la contrainte de cisaillement hydraulique sont alors définis comme suit :

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

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

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

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

$$dm(t) = c(t).q(t).dt \quad \text{Eq. 4}$$

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

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

$$dm(t) = 2. \alpha. \pi. \rho_d. L. b_t. db \quad \text{Eq. 5}$$

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

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

223

224 La quantité de sol érodée est calculée à partir des mesures du signal de turbidité (Reddi et al.,
 225 2000). Des essais d'étalonnage préliminaires ont permis de déterminer la relation entre la
 226 concentration et la turbidité pour chaque traitement et chaque dosage. Cette relation est définie
 227 sur deux domaines de concentrations : faibles [0 à ~1,5 kg/m³] et élevées [~1,5 à 16 kg/m³].
 228 L'utilisation du domaine de faibles concentrations permet d'apporter plus de précision sur la
 229 mesure de concentration à partir du signal de turbidité. De plus amples détails sur la conduite
 230 des essais d'étalonnage sont disponibles dans Mehenni (2015) ainsi que dans Mehenni et al.
 231 (2016).

232 3. IMPACT DES TRAITEMENTS SUR L'ÉRODABILITÉ DES SOLS

233 3.1. Sol non traité

234 La répétabilité des paramètres d'érosion obtenus avec le nouveau dispositif HET a été vérifiée
 235 avec le sol non traité (Figure 2). Les résultats montrent que k_{er} varie entre $1,13 \times 10^{-04}$ et $3,04$
 236 $\times 10^{-04}$ s/m, et τ_c varie entre 291 et 615 Pa (**Table 2**). Cette dispersion est du même ordre de

237 grandeur que dans les études disponibles (par exemple Haghghi et al., 2013; Wan and Fell,
238 2004a). Les valeurs moyennes pour le limon non traité sont $k_{er} = 2,07 \times 10^{-04}$ s/m et $\tau_c = 429$ Pa.
239 Le limon étudié présente une contrainte de cisaillement critique élevée par rapport aux valeurs
240 généralement observées dans les sols non traités (Wan and Fell, 2004a). Ceci peut être lié au
241 pourcentage élevé de la fraction de particules fines ($< 80 \mu\text{m}$), 99,2%, et aux conditions de
242 compactage. En fait, le compactage du côté humide de l'optimum permet un meilleur
243 réarrangement des particules du sol que le côté sec et réduit la porosité (par ex. Benson and
244 Daniel, 1990). Le compactage du côté humide ($w = 17,5\%$) combiné à la densité sèche élevée
245 ($\rho_d = 1,73 \text{ Mg/m}^3$) induit une microstructure particulière qui limite le détachement des
246 particules du sol et nécessite un plus grand niveau de contrainte de cisaillement hydraulique
247 pour initier l'érosion. Cependant, une fois que cette valeur de contrainte de cisaillement
248 hydraulique est atteinte, le taux d'érosion progresse rapidement, comme le montre la valeur du
249 coefficient d'érosion du sol ($k_{er} = 2,07 \times 10^{-04}$ s/m).

250 **3.2. Impact du traitement à la chaux**

251 Pour un traitement à 1% de chaux, k_{er} varie entre $1,09 \times 10^{-04}$ et $2,87 \times 10^{-04}$ s/m quel que soit
252 le temps de cure (**Table 3** et Figure 5). Pour un traitement à 3% de chaux, k_{er} se situe entre $1,54$
253 $\times 10^{-04}$ et $4,52 \times 10^{-04}$ s/m. Le traitement à la chaux augmente également la contrainte de
254 cisaillement critique du sol non traité, qui peut atteindre des valeurs allant jusqu'à 1 770 Pa pour
255 1 % de chaux et 1 889 Pa pour 3 % de chaux.

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

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

264 **3.3. Apport d'un traitement au ciment**

265 Dans le cas du ciment à 3 %, il a été nécessaire d'appliquer une pression d'entrée allant jusqu'à
266 450 kPa pour amorcer l'érosion du sol (Figure 6 et **Table 4**). Ceci se traduit par la forte
267 contrainte de cisaillement hydraulique appliquée relativement aux autres traitements. Pour la
268 plupart des éprouvettes testées, l'érosion a commencé à une contrainte de cisaillement
269 hydraulique de 2 000 Pa.

270 Dans le cas d'un traitement avec 6 % de ciment, la pression d'entrée appliquée était supérieure
271 à 500 kPa, et la longueur des éprouvettes a été réduite à 70 mm pour appliquer une contrainte
272 de cisaillement hydraulique plus élevée. Le détachement des particules de sol a commencé après
273 4 000 Pa pour la plupart des éprouvettes. Cependant, la loi sur l'érosion présentait des
274 caractéristiques non linéaires pour la plupart des spécimens, surtout au-delà de 7 jours de cure.
275 Ainsi, il était difficile de déterminer la valeur de k_{er} pour certaines éprouvettes. Dans de tels
276 cas, la contrainte de cisaillement critique correspond à la valeur de la contrainte de cisaillement
277 hydraulique à la fin du processus d'érosion (**Table 4**).

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

280

281 **3.4. Impact de l'addition d'argile**

282 L'utilisation de 2 % de kaolinite n'a pas changé de façon significative k_{er} , avec cependant une
283 légère tendance à l'augmentation de τ_c (

284 **Table 5** et Figure 3). L'addition de 9% de kaolinite a diminué k_{er} d'un ordre de grandeur et a
285 induit une faible augmentation de τ_c avec une valeur moyenne de 513 Pa. Pour le traitement
286 avec 2% de bentonite, k_{er} reste du même ordre de grandeur pour toutes les éprouvettes et est
287 d'environ $5,00 \times 10^{-05}$ s/m (Figure 4 et **Table 5**) ce qui est inférieur d'un ordre de grandeur à
288 celui du sol non traité. τ_c varie entre 0.123 et 0.483 kPa, ces valeurs sont en accord avec
289 l'intervalle de variation de τ_c pour les limons non traités.
290 Le traitement de l'argile induit principalement une réduction du coefficient d'érosion du sol en
291 fonction de la nature et du pourcentage du produit ajouté.

292 **4. DISCUSSION**

293 Les deux paramètres qui caractérisent la résistance à l'érosion des sols, le coefficient d'érosion
294 k_{er} et la contrainte critique τ_c , peuvent être modifiés, de manière indépendante, par l'ajout d'un
295 produit de traitement.

296 La Figure 7 illustre l'évolution du coefficient d'érosion du limon étudié (valeurs moyennes) en
297 fonction de l'augmentation du dosage pour les différents produits de traitement et les différents
298 temps de cure utilisés. Pour des dosages inférieurs à 3 % les différents traitements ne modifient
299 pas le coefficient d'érosion de manière significative. Seul le traitement à la bentonite (2 %)
300 permet de réduire le coefficient d'érosion d'un ordre de grandeur. Pour cette gamme de dosage
301 aussi, le temps de cure ne semble pas avoir un impact significatif sur le coefficient d'érosion.
302 Pour des dosages supérieurs à 6 %, l'ajout de différents produits de traitement (la chaux qui n'a
303 pas été testée) réduit le coefficient d'érosion. Dans cette gamme de dosage, le temps de cure
304 semble avoir un effet favorable pour diminuer le coefficient d'érosion du limon traité au ciment.
305 L'évolution de la contrainte critique (valeurs moyennes) en fonction du dosage utilisé pour
306 différents produits de traitement et différents temps de cure montre que les produits argileux
307 n'apportent pas de modifications significatives sur la contrainte critique (Figure 8). Le
308 traitement par des liants induit une augmentation de la contrainte critique. L'ampleur de

309 l'augmentation de la contrainte critique est par ailleurs liée aux trois paramètres suivants :
310 nature de traitement, dosage utilisé et temps de cure. Les effets de ces trois paramètres sont
311 interdépendants. Ainsi, l'augmentation de la contrainte critique est plus marquée dans le cas du
312 traitement au ciment. L'augmentation du dosage utilisé favorise l'augmentation de la contrainte
313 critique mais avec un effet plus marqué dans le cas du ciment que dans le cas de la chaux. Le
314 temps de cure semble favoriser l'augmentation de la contrainte critique, mais avec un effet plus
315 ou moins important selon le dosage et la nature du produit de traitement.

316 L'impact des traitements sur les caractéristiques d'érosion du limon (τ_c, k_{er}) est aussi illustré
317 par la Figure 9. Ce mode de présentation permet de s'affranchir de la barrière de classification
318 qui se limite à un seul paramètre (k_{er}). Les effets de chaque produit de traitement peuvent donc
319 être visualisés avec la prise en compte de la dispersion des résultats. Ainsi, l'influence est
320 notable uniquement pour un dosage de 9 % de kaolinite, et elle est marquée par la diminution
321 du coefficient d'érosion, d'un ordre de grandeur, sans grande modification de la contrainte
322 critique.

323 L'action principale de la bentonite est la diminution du coefficient d'érosion, d'un ordre de
324 grandeur, sans modification significative de la contrainte critique. Ces effets sont obtenus même
325 avec un faible dosage de bentonite. L'ajout de la chaux ne modifie pas de manière significative
326 le coefficient d'érosion du sol. L'effet principal est l'augmentation de la contrainte critique. Par
327 ailleurs, l'augmentation de la contrainte critique semble être plus importante avec
328 l'augmentation du temps de cure. L'impact de l'ajout du ciment est lié au dosage utilisé. Avec
329 un dosage moyen (3 %) le coefficient d'érosion n'est pas significativement modifié et la
330 contrainte critique est augmentée. Un temps de cure variant entre 1 et 30 jours ne semble pas
331 affecter les caractéristiques d'érosion du traitement avec 3 % de ciment. Avec un dosage de
332 6 % de ciment, le coefficient d'érosion est diminué d'un ordre de grandeur et la contrainte

333 crique est augmentée. Avec ce dosage élevé, le temps de cure semble favoriser les modifications
334 des caractéristiques d'érosion.

335 **5. CONCLUSION**

336 Cet article présente les résultats d'une étude de l'impact à court terme du traitement sur la
337 résistance à l'érosion interne du limon de Saint-Quentin compacté. Le dispositif d'érosion *Hole*
338 *Erosion Test* optimisé mis en place dans le cadre de cette étude constitue un outil fiable qui
339 permet de quantifier l'apport de différents traitements sur l'évolution de la résistance à l'érosion
340 interne des sols traités. Ce dispositif se distingue des autres appareillages actuellement
341 disponibles par sa large gamme d'application de pression, permettant ainsi d'évaluer
342 quantitativement l'impact de traitement à la chaux et au ciment sur les caractéristiques d'érosion
343 d'un limon compacté.

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

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

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

359 **6. REMERCIEMENTS**

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

364 **7. RÉFÉRENCES**

365 Al-Amoudi, O.S.B., 2002. Characterization and chemical stabilization of Al-Qurayyah sabkha
366 soil. *Journal of Materials in Civil Engineering* 14, 478–484.

367 ASTM-D4647, 1998. Standard test method for identification and classification of dispersive
368 clay Soils by the pinhole test.

369 Attom, M., 2012. The effect of compaction and initial water content on soil erosion, in: ICSE6
370 Paris - August 27-31, 2012. pp. 49–56.

371 Bell, F.G., 1996. Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology* 42, 223–
372 237. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(96\)00028-2](https://doi.org/10.1016/0013-7952(96)00028-2)

373 Bellezza, I., Fratolocchi, E., 2006. Effectiveness of cement on hydraulic conductivity of
374 compacted soil-cement mixtures. *Ground Improvement* 10, 77–90.

375 Benahmed, N., Bonelli, S., 2012. Investigating conc entrated leak erosion behaviour of cohesive
376 soils by performing Hole Erosion Test. *European Journal of Environmental and Civil*
377 *Engineering* 16, 43–58.

378 Bennabi, A., Karoui, T., Benamar, A., Wang, H.-Q., 2012. Some elements of comparison
379 between two laboratory devices for soil erosion testing, in: ICSE6 Paris - August 27-31,
380 2012. pp. 1089–1096.

381 Benson, G.H., Daniel, D.E., 1990. Influence of clods on hydraulic conductivity of compacted
382 clay. *Journal of Geotechnical Engineering* 116, 1231–1248.

383 Brandl, H., 1981. Alteration of soil parameters by stabilization with lime, in: 10th International
384 Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering - June 15-19, 1981. pp. 587-
385 594.

386 Chapuis, R.P., 2002. The 2000 R.M. Hardy Lecture: Full-scale hydraulic performance of
387 soil□bentonite and compacted clay liners. *Canadian Geotechnical Journal* 39, 417–439.
388 <https://doi.org/10.1139/t01-092>

389 Chevalier, C., Haghghi, I., Herrier, G., 2012. Resistance to erosion of lime treated soils: a
390 complete parametric study in laboratory, in: ICSE6 Paris - August 27-31, 2012. pp. 1065–
391 1072.

392 Cuisinier, O., Auriol, J.-C.C., Le Borgne, T., Deneele, D., 2011. Microstructure and hydraulic
393 conductivity of a compacted lime-treated soil. *Engineering Geology* 123, 187–193.
394 <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.07.010>

395 Eades, J.L., Grim, R.E., 1960. Reaction of hydrated lime with pure clay minerals in soil
396 stabilization. *Highway Research Board Bulletin* 262, 51–63.

397 Fell, R., Wan, C.F., Cyganiewicz, J., Foster, M., 2003. Time for development of internal erosion
398 and piping in embankment dams. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental*
399 *Engineering* 129, 307–314.

400 Haghghi, I., Chevalier, C., Duc, M., Guédon, S., Reiffsteck, P., 2013. Improvement of hole
401 erosion test and results on reference soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental*
402 *Engineering* 139, 330–339.

403 Herrier, G., Chevalier, C., Froumentin, M., Cuisinier, O., Bonelli, S., Fry, J.-J., 2012a. Lime
404 treated soil as an erosion-resistant material for hydraulic earthen structures, in: ICSE6
405 Paris - August 27-31, 2012. pp. 585–592.

406 Herrier, G., Lesueur, D., Puiatti, D., Auriol, J.-C., Chevalier, C., Haghghi, I., Cuisinier, O.,
407 Bonelli, S., Fry, J.-J., 2012b. Lime treated materials for embankment and hardfill dam,

408 in: ICOLD 2012–International Symposium On Dams For A Changing World Kyoto -
409 June 5-8, 2012. pp. 1–6.

410 Indraratna, B., Muttuvel, T., Khabbaz, H., 2009. Modelling the erosion rate of chemically
411 stabilized soil incorporating tensile force-deformation characteristics. Canadian
412 Geotechnical Journal 46, 57–68.

413 Le Runigo, B., Cuisinier, O., Cui, Y.-J., Ferber, V., Deneele, D., 2009. Impact of initial state
414 on the fabric and permeability of a lime-treated silt under long-term leaching. Canadian
415 Geotechnical Journal 46, 1243–1257. <https://doi.org/10.1139/T09-061>

416 Le Runigo, B., Ferber, V., Cui, Y.J., Cuisinier, O., Deneele, D., 2011. Performance of lime-
417 treated silty soil under long-term hydraulic conditions. Engineering Geology 118, 20–28.
418 <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.12.002>

419 Lefebvre, G., Rohan, K., Douville, S., 1985. Erosivity of natural intact structured clay:
420 evaluation. Canadian Geotechnical Journal 22, 508–517.

421 Lim, S.S., 2006. Experimental investigation of erosion in variably saturated clay soils.

422 Little, D.N., 1995. Handbook for stabilization of pavement subgrades and base courses with
423 lime. National Lime Association 219 p.

424 Lüthi, M., Fannin, R.J., Millar, R.G., 2012. A Modified Hole Erosion Test (HET-P) Device.
425 Geotechnical Testing Journal 35, 104336. <https://doi.org/10.1520/GTJ104336>

426 McCallister, L.D., Petry, T.M., 1991. Physical property changes in a lime-treated expansive
427 clay caused by leaching. Transportation Research Record 1295, 37–44.

428 Mehenni, A., 2015. Comportement hydromécanique et érosion des sols fins traités. Université
429 de Lorraine.

430 Mehenni, A., Cuisinier, O., Masrouri, F., 2016. Impact of Lime, Cement, and Clay Treatments
431 on the Internal Erosion of Compacted Soils. Journal of Materials in Civil Engineering 28,
432 04016071. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001573](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001573)

433 Mitchell, J.K., Hooper, D.R., Campanella, R.G., 1965. Permeability of compacted clays.
434 Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division 91, 41–65.

435 Pham, T.L., 2008. Erosion et dispersion des sols argileux par un fluide.

436 Reddi, L.N., Lee, I.M., Bonala, M.V.S., 2000. Comparison of internal and surface erosion using
437 flow pump tests on a sand-kaolinite mixture. *Geotechnical Testing Journal* 23, 116–122.

438 Robin, V., Cuisinier, O., Masrouri, F., Javadi, A.A., 2014. Chemo-mechanical modelling of
439 lime treated soils. *Applied Clay Science* 95, 211–219.
440 <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.04.015>

441 Rohan, K., Lefebvre, G., Douville, S., Milette, J.P., 1986. A new technique to evaluate erosivity
442 of cohesive material. *Geotechnical Testing Journal* 9, 87–92.

443 Sariosseiri, F., Muhunthan, B., 2009. Effect of cement treatment on geotechnical properties of
444 some Washington State soils. *Engineering Geology* 104, 119–125.
445 <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.09.003>

446 Sherard, J.L., Dunnigan, L.P., Decker, R.S., Steele, E.F., 1976. Pinhole test for identifying
447 dispersive soils. *Journal of Geotechnical Engineering Division* 102, 69–85.

448 Sivapullaiah, P.V., Sridharan, A., Stalin, V.K., 2000. Hydraulic conductivity of bentonite-sand
449 mixtures. *Canadian Geotechnical Journal* 37, 406–413.

450 Stoltz, G., Cuisinier, O., Masrouri, F., 2014. Weathering of a lime-treated clayey soil by drying
451 and wetting cycles. *Engineering Geology* 181, 281–289.
452 <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.08.013>

453 Stoltz, G., Cuisinier, O., Masrouri, F., 2012. Multi-scale analysis of the swelling and shrinkage
454 of a lime-treated expansive clayey soil. *Applied Clay Science* 61, 44–51.
455 <https://doi.org/10.1016/j.clay.2012.04.001>

456 Wahl, T.L., 2010. A comparison of the hole erosion test and jet erosion test, in: Joint Federal
457 Interagency Conference on Sedimentation and Hydrologic Modeling Las Vega - June 27
458 July 1, 2010. pp. 1–12.

459 Wan, C.F., Fell, R., 2004a. Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams.
460 Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 130, 373–380.

461 Wan, C.F., Fell, R., 2004b. Laboratory tests on the rate of piping erosion of soils in embankment
462 dams. Geotechnical Testing Journal 27, 295–303.

463

464

465

TABLEAUX

466

467

Table 1: Caractéristiques de compactage.

Traitement	Notation	Caractéristiques de compactage		Caractéristiques de compactage des éprouvettes	
		à l'optimum Proctor normal		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

468

469

Table 2: Caractéristiques d'érosion du limon sans traitement.

470

Essai	k_{er} (s/m)	τ_c (Pa)	Valeurs moyenne	
			k_{er} (s/m)	τ_c (Pa)
1	2.58×10^{-04}	391		
2	2.16×10^{-04}	389		
3	2.22×10^{-04}	398		
4	1.13×10^{-04}	491	2.07×10^{-04}	429
5	3.04×10^{-04}	615		
6	1.30×10^{-04}	291		

471

472

Table 3: Impact du traitement à la chaux sur les caractéristiques d'érosion du limon.

Test	Dosage en chaux et temps de cure	Caractéristiques		Valeurs moyennes	
		$k_{er}(s/m)$	$\tau_c(Pa)$	$k_{er}(s/m)$	$\tau_c(Pa)$
1	+ 1% chaux (1 jour)	1.25×10^{-04}	780	1.25×10^{-04}	745
2		1.20×10^{-04}	618		
3		2.62×10^{-04}	836		
1	+ 1% chaux (7 jours)	2.87×10^{-04}	1725	2.63×10^{-04}	1660
2		2.35×10^{-04}	1770		
3		2.65×10^{-04}	1487		
1	+ 1% chaux (30 jours)	2.71×10^{-04}	1336	2.11×10^{-04}	1279
2		2.53×10^{-04}	1538		
3		1.09×10^{-04}	963		
1	+ 3% chaux (1 jour)	2.01×10^{-04}	990	2.24×10^{-04}	1200
2		2.47×10^{-04}	1409		
1	+ 3% chaux (7 jours)	1.54×10^{-04}	1857	2.46×10^{-04}	1707
2		1.75×10^{-04}	1863		
3		4.52×10^{-04}	1889		
4		2.15×10^{-04}	1567		
5		2.28×10^{-04}	1522		
6		3.07×10^{-04}	1648		
7		1.81×10^{-04}	1608		
1	+ 3% chaux (30 jours)	2.16×10^{-04}	1329	1.71×10^{-04}	1362
2		2.27×10^{-04}	1035		
3		1.78×10^{-04}	1197		
4		1.68×10^{-04}	1 845		

5	2.42×10^{-04}	1 365
6	1.67×10^{-04}	1 405

475

476

477

478 **Table 4: Apport du traitement au ciment sur les caractéristiques d'érosion du limon.**

479

Test	Dosage et temps de cure	Érodabilité		Valeurs moyennes	
		$k_{er}(s/m)$	$\tau_c(Pa)$	$k_{er}(s/m)$	$\tau_c(Pa)$
1	+ 3% ciment (1 jour)	1.13×10^{-04}	2850	1.13×10^{-04}	2850
2		NE*	2850		
1	+ 3% ciment (7 jours)	1.22×10^{-04}	2520	1.31×10^{-04}	2985
2		1.47×10^{-04}	3619		
3		1.26×10^{-04}	2817		
1	+ 3% ciment (30 jours)	1.31×10^{-04}	2977	1.47×10^{-04}	2886
2		1.43×10^{-04}	2531		
3		1.67×10^{-04}	3150		
1	+ 6% ciment (1 jour)	5.48×10^{-05}	4398	4.83×10^{-05}	5891
2		8.00×10^{-05}	6475		
3		1.00×10^{-05}	6800		
1	+ 6% ciment (7 jours)	NE	9734	NE	9814
2		NE	9893		

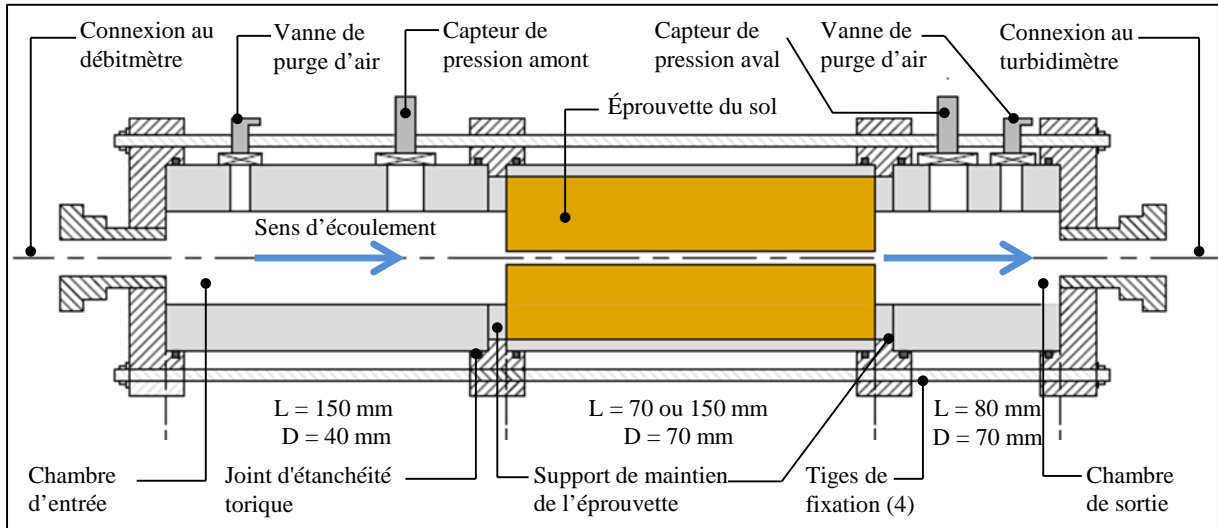
480

481 **NE : non évalué.**

482

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

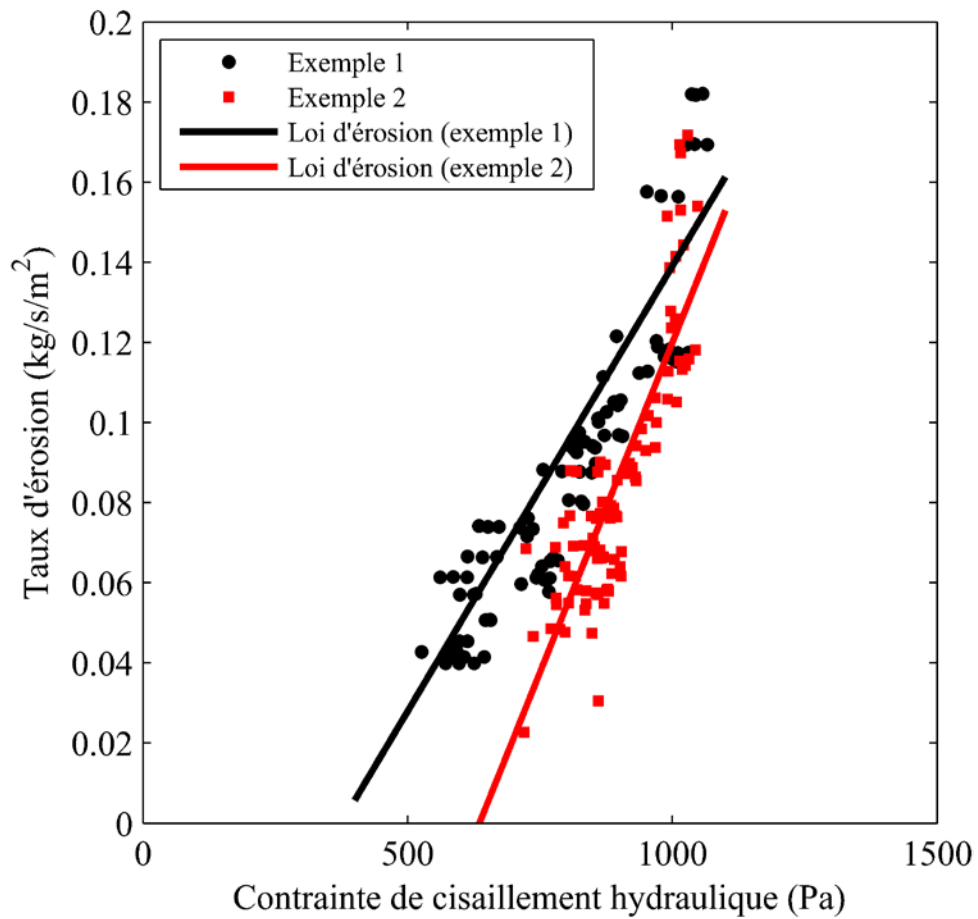
Essai	Traitement	k_{er} (s/m)	τ_c (Pa)	Valeur moyenne	
				k_{er} (s/m)	τ_c (Pa)
1		1.54×10^{-04}	586		
2	+ 2% kaolinite	1.75×10^{-04}	483	1.99×10^{-04}	607
3		2.68×10^{-04}	754		
1		9.83×10^{-05}	543		
2	+ 9% kaolinite	4.62×10^{-05}	668	6.92×10^{-05}	530
3		8.10×10^{-05}	391		
4		5.05×10^{-05}	519		
1		5.98×10^{-05}	273		
2	+ 2% bentonite	5.66×10^{-05}	357	5.62×10^{-05}	316
3		5.71×10^{-05}	511		
4		5.13×10^{-05}	123		



487

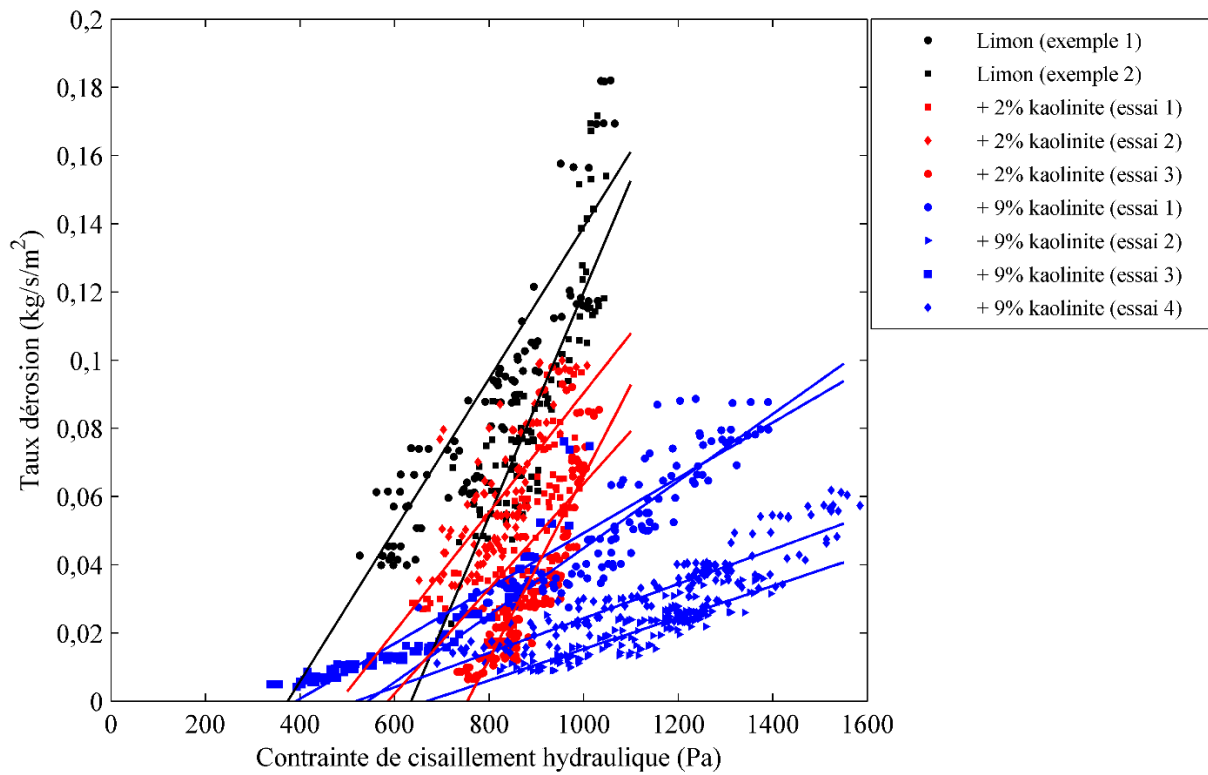
488 Figure 1. Détail de la nouvelle cellule HET développée.

489



490

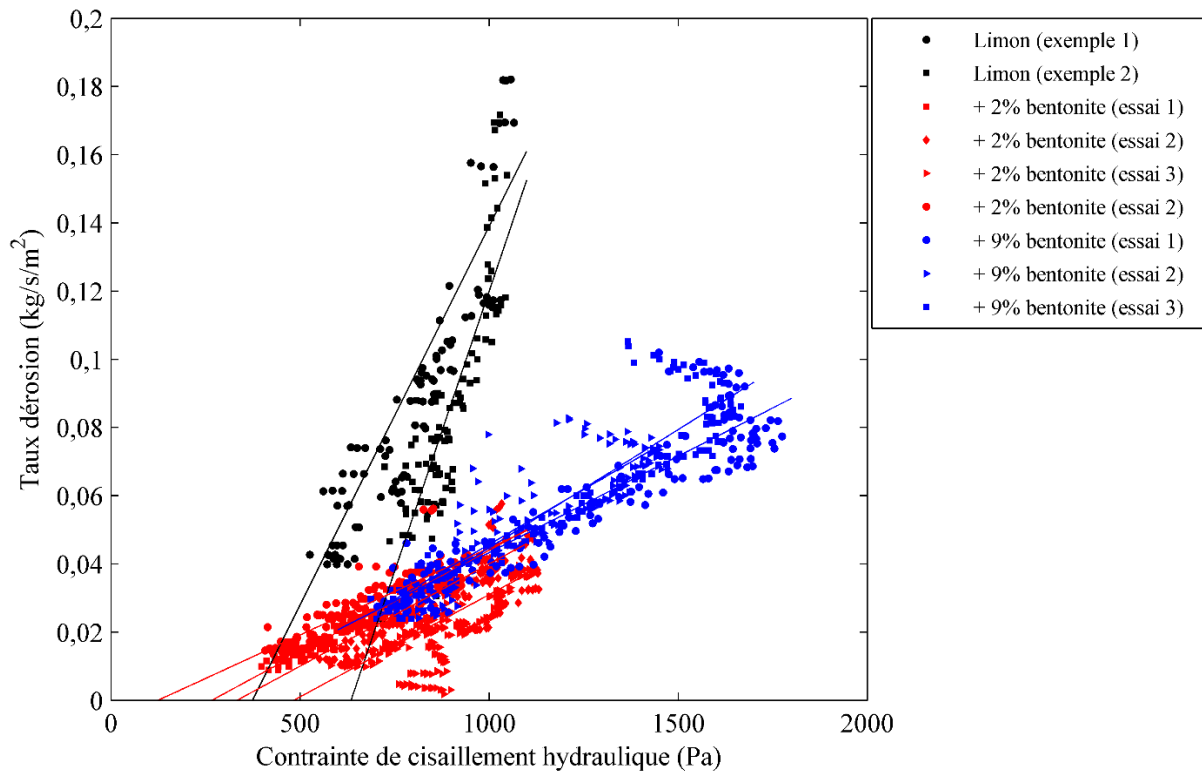
491 Figure 2. Exemples de résultats d'érosion du limon sans traitement (essais réalisés dans les
 492 mêmes conditions).



493

494 Figure 3. Résultats d'érosion du limon traité à la kaolinite.

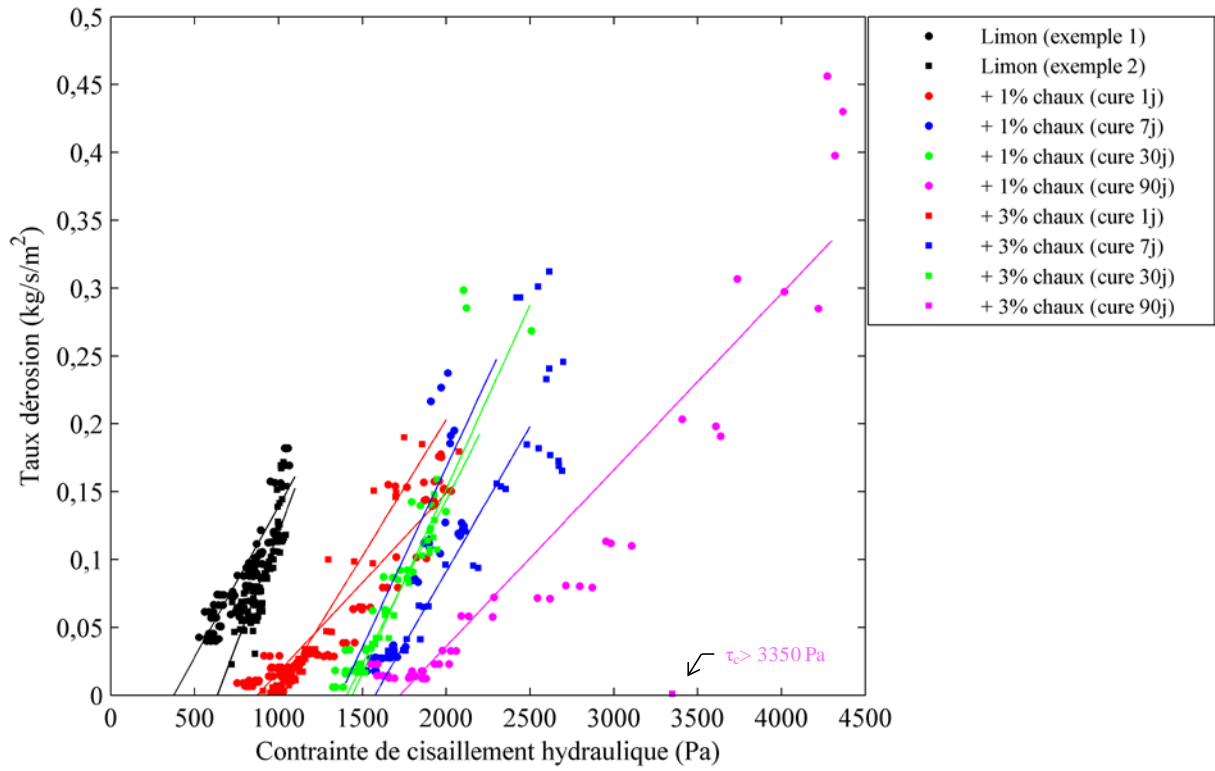
495



496

497 Figure 4. Résultats d'érosion du limon traité à la bentonite.

498

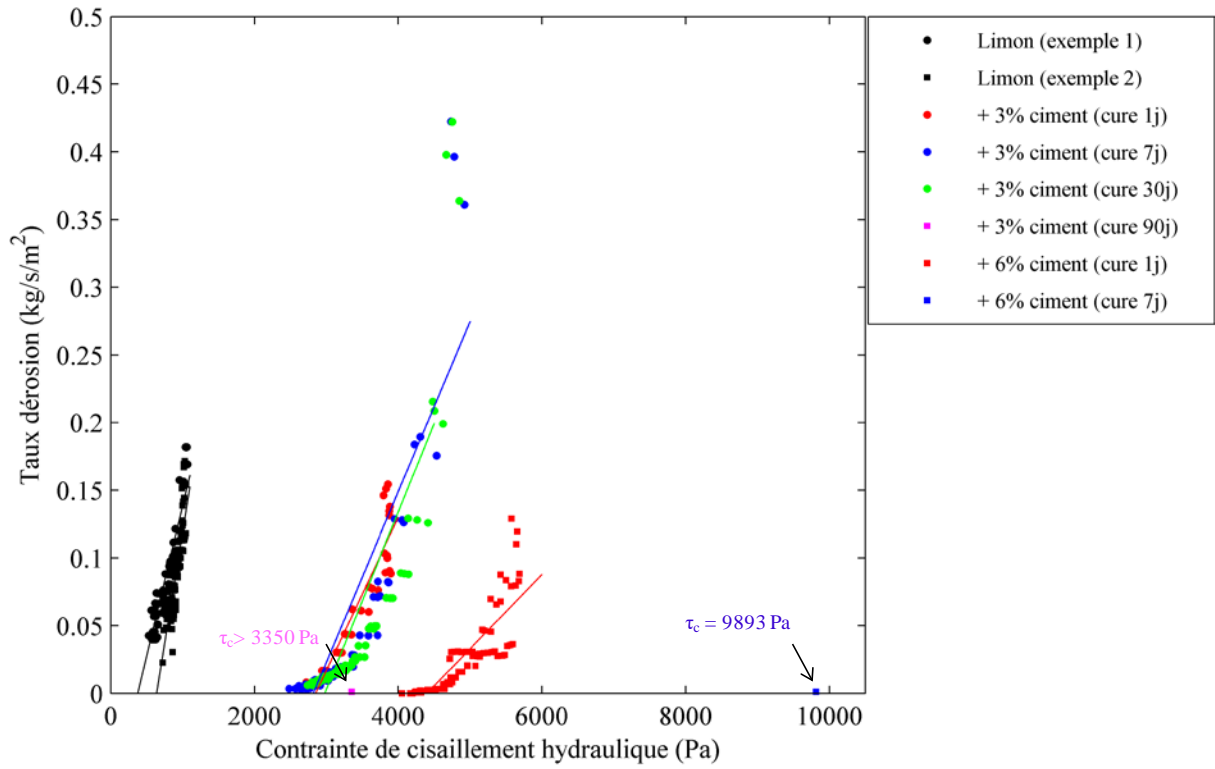


499

500 Figure 5. Impact du traitement à la chaux sur l'érodabilité du limon.

501

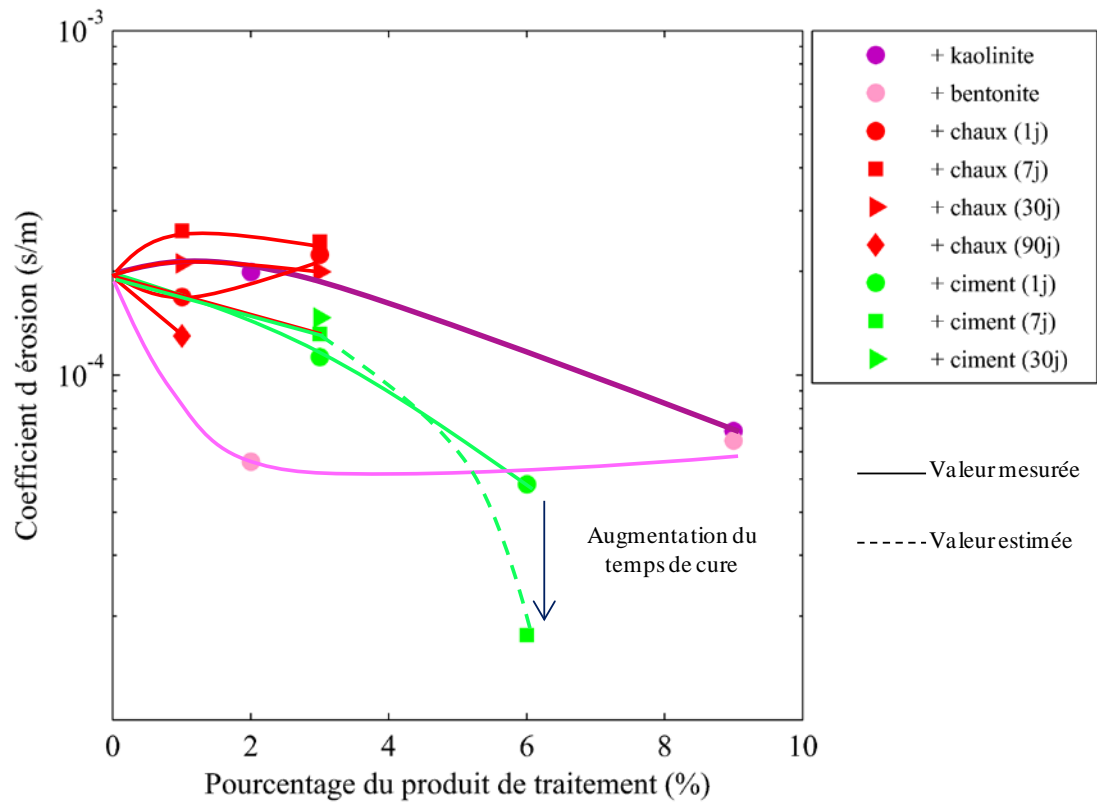
502



503

504 Figure 6. Impact du traitement au ciment sur l'érodabilité du limon.

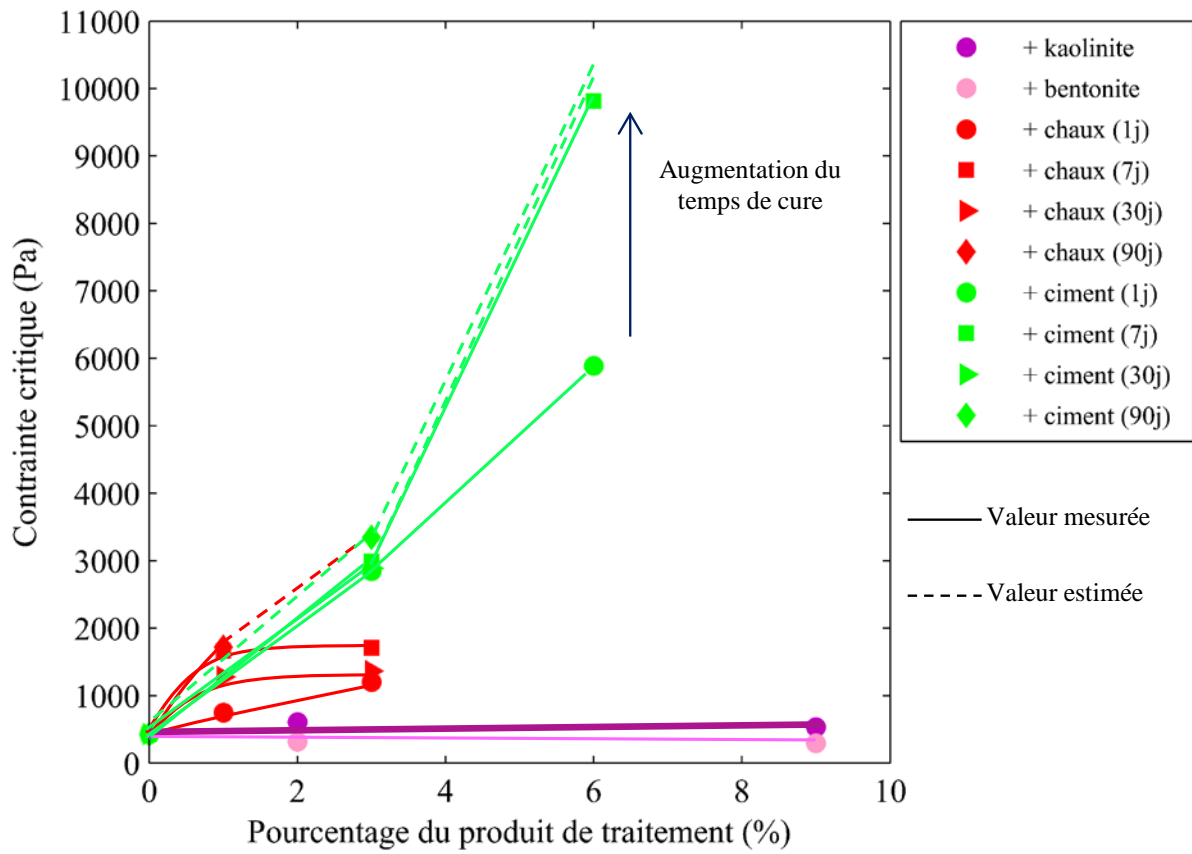
505



506

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

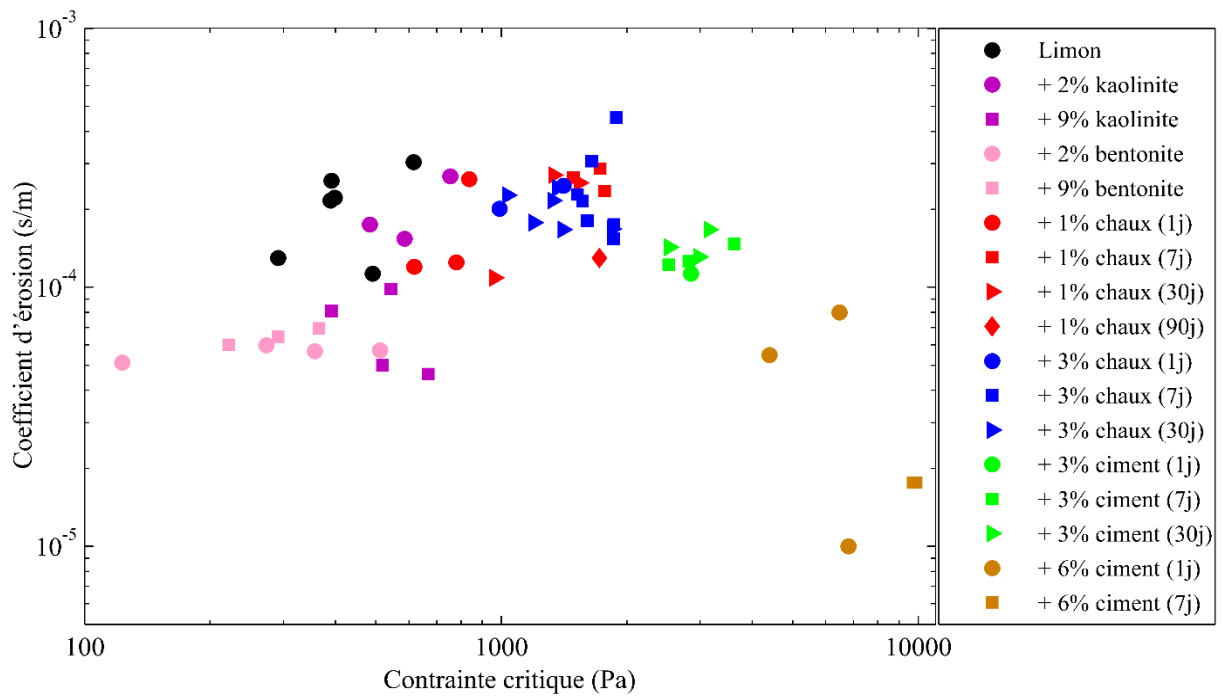
508



509

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

512



513
 514 Figure 9. Impact des différents traitements sur les caractéristiques d'érosion du limon de Saint-
 515 Quentin.