

Résilience climatique des infrastructures et intérêt des liants hydrauliques. L'exemple particulier de l'érosion des sols

Climatic resilience of infrastructures and the benefits of hydraulic binders. The specific example of soil erosion

Lucile SAUSSAYE^{1*}, Yasmina BOUSSAFIR², Christophe CHEVALIER², Cédric LE GOUIL³

1 Cerema, Equipe de recherche ENDSUM, Blois, France

2 Univ. Gustave Eiffel, GERS/SRO, Marne-la-Vallée, France

3 Cimbéton, France Ciment, Clichy, France

**lucile.saussaye@cerema.fr*

RESUME : Les ouvrages en terre sont soumis, comme l'ensemble des ouvrages, au changement climatique. Ce changement se traduit entre autres par une augmentation des précipitations, qui se traduit par une modification des ruissellements, des crues, des inondations, etc. Afin d'améliorer la résilience climatique des infrastructures, l'un des axes de réflexion porte donc sur la résistance des ouvrages en terre, notamment les remblais en zone inondable ou les digues, aux sollicitations hydrauliques diverses auxquels ils seront confrontés à l'avenir. Les essais de laboratoire de type Hole Erosion Test (XP P94-065), Mobile Jets Erosion Test et émiettement ont été développés pour évaluer la vulnérabilité du matériau à ces phénomènes, qualifiée d'érodabilité à l'eau. Les matériaux sableux ou limoneux sont particulièrement érodables car ils présentent une faible cohésion. Plusieurs démonstrateurs ont précédemment permis de montrer une amélioration de la résistance de limon traité à la chaux vis-à-vis de sollicitations hydrauliques. L'apport de liant hydraulique à durcissement normal ou rapide, à des dosages de 2 et 4%, permet également d'améliorer grandement cette résistance et diminue l'érodabilité à court terme.

ABSTRACT: Like all structures, earthworks are subject to climate change. One of the consequences of this change is an increase in precipitation, leading to changes in run-off, floods, etc. In order to improve the climatic resilience of infrastructure, one of the main areas of focus is the resistance of earth structures, particularly embankments in flood-prone areas and dikes, to the various hydraulic stresses they will face in the future. Laboratory tests such as the Hole Erosion Test (XP P94-065), Mobile Jets Erosion Test and crumb test have been developed to assess the material's vulnerability to these phenomena, known as its erodibility to water. Sandy or silty materials are particularly erodible because they have low cohesion. Several demonstrators have previously shown an improvement in the resistance of lime-treated silty soil to hydraulic stresses. The addition of normal- or rapid-hardening hydraulic binder, at contents of 2 and 4%, also greatly improves this resistance and reduces erodibility in the short term.

Mots-clés : traitement de sol ; liant hydraulique ; ouvrages hydrauliques ; érodabilité.

1 INTRODUCTION

1.1 Evolution de la conception des infrastructures vis-à-vis des sollicitations hydrauliques

Le changement climatique se traduit entre autres par une modification des précipitations (intensité, saisonnalité, etc.), qui induit une modification des ruissellements, des crues, des inondations, etc. Dans le cadre des réflexions engagées pour améliorer la résilience climatique des infrastructures, il est constaté que les matériaux naturels qui constituent les remblais en zone inondable ou les digues, sollicités par l'eau et sa vitesse d'écoulement, le seront plus fortement encore à l'avenir. Pour les infrastructures linéaires

(routes, systèmes d'endiguement ...), la résilience climatique vise à réduire leur vulnérabilité aux conséquences environnementales du changement climatique.

Les digues de protection contre les inondations ou les submersions sont constituées de différentes parties d'ouvrages, composants, remplissant des fonctions, telle que la stabilité de l'ouvrage ou sa résistance à l'érosion externe et interne (Figure 1).

Sur ces infrastructures, les modifications des sollicitations hydrauliques liées au changement climatique impacteront entre autres le déroulement de mécanismes d'érosion externe et interne. Les parties d'ouvrage les plus vulnérables à l'érosion externe (arrachement de matériaux sur une surface extérieure

à la digue) (Figure 2a) sont les talus, côté eau et côté terre, et la crête de digue (de la même manière que pour un remblai). Le corps de digue est vulnérable à l'érosion interne (entraînement de particules sous l'effet d'un écoulement d'eau dans l'ouvrage), dont l'un des mécanismes est l'érosion de conduit (Figure 2b).

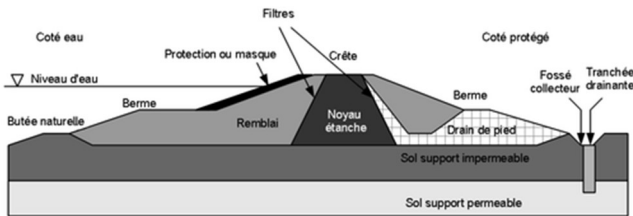


Figure 1. Schéma type d'une digue de protection contre les inondations et de ces différents composants (Cerema, 2019)

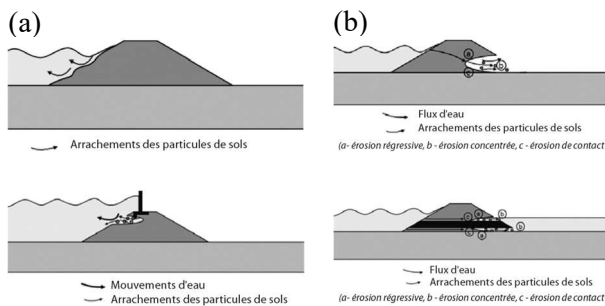


Figure 2. Schémas des mécanismes (a) d'érosion externe et (b) d'érosion de conduit (Cerema, 2019)

La réflexion sur l'évolution des infrastructures sous l'effet de modifications de sollicitations hydrauliques s'applique aussi aux remblais d'infrastructures routières, lorsque les sollicitations sont de type ruissellement ou inondation.

Tous les matériaux ne sont pas susceptibles de développer ces mécanismes de dégradations. L'arrangement des grains, leur taille, la présence d'argile, etc. sont autant de facteurs qui contribuent à ces variabilités de comportement. Les matériaux sableux ou limoneux sont particulièrement érodables car ils présentent une faible cohésion.

Le traitement des sols aux liants hydrauliques est une technique qui permet de stabiliser les matériaux naturels en liaisonnant les particules entre elles grâce au développement d'hydrates cimentaires. Cette stabilisation est donc très intéressante pour améliorer les performances des matériaux naturels.

Pour s'en assurer, le pôle Routes et Terrassements de Cimbéton - France Ciment a engagé une étude pour évaluer le bénéfice apporté par un traitement aux liants hydrauliques routiers (LHR) de matériaux naturels rencontrés dans des ouvrages hydrauliques. Si l'étude s'intéresse aux performances des matériaux vis-à-vis de l'ensemble des mécanismes de défaillance de digues de protection contre les inondations, le présent

article se focalise sur la résistance à l'érosion de ces matériaux.

1.2 Connaissances sur le traitement de sol à la chaux et/ou aux liants hydrauliques et sa durabilité

Le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (LH) est actuellement couvert, entre autres, par le GTS (LCPC-SETRA, 2000a), qui s'applique aux remblais et aux couches de forme. La révision du GTS est en cours et intègre de nouvelles applications, tels que les ouvrages hydrauliques.

Lorsque le traitement de sol vise une performance particulière exigible à moyen et long terme, l'objectif est la « stabilisation » du sol. C'est à la stabilisation que la question de la durabilité s'applique.

Ferber *et al.* (2025a, 2025b) indiquent que cette durabilité se traduit par la capacité du sol traité à conserver les performances requises, définie dans le cadre de la conception de l'ouvrage, dans les conditions d'usage, d'entretien courant et d'environnement de l'ouvrage, pour une durée déterminée.

Elle repose sur le choix des formules de traitement les plus adaptées au sol et aux performances attendues, mais aussi sur une conception prenant en compte la place du sol traité dans l'ouvrage, au vu des sollicitations auxquelles il sera confronté.

Si de nombreux retours d'expérience sur la durabilité du traitement de sol à la chaux et/ou aux LH existent pour les couches de forme ou les remblais, du strict point de vue des barrages, un certain nombre de retours d'expérience :

- proviennent des Etats-Unis sur des barrages et ont été rassemblés dans le bulletin n°54 du Comité International des Grands Barrages (CIGB, 1986). La question de la fissuration de retrait liée aux réactions d'hydratation cimentaire était prise en compte dans la conception des ouvrages, avec des dosages en ciment pouvant dépasser 10% à l'époque, ce qui montre que ce phénomène ne constitue pas nécessairement un obstacle au traitement de sols dans les ouvrages hydrauliques.
- sont capitalisés dans le bulletin n°195 du CIGB (2024) sur les barrages en sol cimenté (dont les digues de canaux telle que la digue du Canal de Friant-Kern, connue pour le traitement de l'argile plastique qui la compose à la chaux dans les années 70).

Par ailleurs, concernant les digues de protection contre les inondations ou les submersions marines, plusieurs démonstrateurs ont été construits dans les années 2010, jusqu'en 2024, et ont permis de montrer

l'intérêt de traitement à la chaux pour améliorer les performances mécaniques et hydrauliques de sols fins dont leur résistance à l'érosion interne et externe (Bertola *et al.*, 2025, DigueELITE, 2025).

Le traitement au liant hydraulique de sols fins a également montré l'amélioration de ce type de performances (Mehenni, 2015 ; Saussaye *et al.*, 2024 ; Coppée *et al.*, 2025).

Comme indiqué précédemment, la présente étude s'intéresse plus spécifiquement au traitement des sols aux liants hydrauliques pour la conception de ces digues de protection.

2 MATERIELS ET METHODES

2.1 Sols naturels

Deux sols sont étudiés (Tableau 1) :

- un limon, prélevé à Cizancourt (80), sur la trace du Canal Seine-Nord Europe,
- un sable limoneux, prélevé et à Sandillon (45), au cours de travaux sur le système d'endiguement du val d'Orléans.

Tableau 1. Caractéristiques physiques des sols

Sol	Limon de Cizancourt	Sable limoneux de Sandillon
wn (%)	16,4	5,7
Dmax (mm)	0,063	1
0/63 µm (%)	97	15
VBS (g/100g de sol sec)	1,92	0,47
Classe GTR (LCPC-SETRA, 2000b ; IDRRIM, 2024)	A1/F1	B5/I1
IPI à wn (-)	17	Non mesuré
w _{OPN} (%)	15,9	9,3
ρ _{dOPN} (t/m ³)	1,75	1,79
wn/w _{OPN} (-)	1,0	0,6
IPI à w _{OPN} (-)	21	40
Etat hydrique	m	s

2.2 Liants hydrauliques routiers

2.2.1 Types de liants

Les liants hydrauliques testés sont des LHR de classes N4, à durcissement normal (selon la norme NF EN 13282-2), composé majoritairement de laitier activé au clinker, et E4, à durcissement rapide (selon la norme NF EN 13282-1), composé majoritairement de clinker et de filler calcaire. Les LHR peuvent présenter

l'avantage d'une empreinte carbone plus ou moins réduite, qui s'étale entre 169 et 826 kg CO_{2eq}/tonne de liant en 2025 (<https://www.infociments.fr/liants-hydrauliques-routiers>).

2.2.2 Dosages en LHR

L'un des freins à l'utilisation du traitement de sol au liant hydraulique est qu'il est perçu comme pouvant induire un changement de comportement du matériau, qui se traduirait par une augmentation de sa fragilité et un risque accru de fissuration. Dans le cas de la réalisation de digues de protection contre les inondations ou les submersions ou de remblais, les objectifs de performances ne nécessitent pas d'obtenir des résistances mécaniques importantes, du niveau des couches de forme ou d'assise. Ainsi, les dosages choisis ont été volontairement fixés à des dosages faibles par rapport à celui qui serait utilisé pour le réemploi de sol en couche de forme, classiquement de l'ordre de 4 à 6%. Les deux dosages retenus sont de 2 et 4%, afin de tester l'amélioration du comportement vis-à-vis de l'érosion sans pour autant augmenter la raideur, qui pourrait être préjudiciable dans une digue.

L'ensemble des formulations testées pour les essais d'érosion est récapitulé dans le Tableau 2.

Tableau 2. Formulations étudiées pour les essais d'érosion

Sol	LHR	Dosage en LHR (%)	Notation
Limon de Cizancourt (C)	N4	2	C2N4
		4	C4N4
	E4	2	C2E4
		4	C4E4
Sable limoneux de Sandillon (S)	N4	2	S2N4
		4	S4N4
	E4	2	S2E4
		4	S4E4

Par ailleurs, un dosage en LH de 3% a été utilisé pour définir les caractéristiques de compactage (w_{OPN} ; ρ_{dOPN}) et de portance immédiate (IPI) des sols traités au LH. Il est supposé qu'une variation de dosage en LH de 1% ne modifie pas de manière significative ces caractéristiques.

2.3 Sols traités aux liants hydrauliques

Le Tableau 3 rassemble les caractéristiques de compactage et de portance des sols traités au liant hydraulique, déterminées selon les normes NF EN 13286-2 et NF EN 13286-47. Les caractéristiques de portance immédiate et après immersion permettent d'envisager la mise en œuvre des deux sols en remblai, y compris à faible dosage en LHR.

D'autres sujets de mise en œuvre, tels que le délai de maniabilité ou le collage des couches, devront être regardés.

Tableau 3. Caractéristiques de compactage et de portance des sols traités au liant hydraulique

Sol	Limon de Cizancourt (C)			Sable limoneux de Sandillon (S)		
Liant hydraulique	N4					
Dosage en liant hydraulique	2	3	4	2	3	4
w_{OPN} (%)	-	15,5	-	-	12,3	-
ρ_{dOPN} (t/m ³)	-	1,74	-	-	1,82	-
IPI à w_{OPN} (-)	-	26	-	-	40	-
CBRi (-)	44	-	85	77	-	173
Liant hydraulique	E4					
Dosage en liant hydraulique	2	3	4	2	3	4
w_{OPN} (%)	-	15,6	-	-	12,6	-
ρ_{dOPN} (t/m ³)	-	1,74	-	-	1,82	-
IPI à w_{OPN} (-)	-	30	-	-	41	-
CBRi (-)	48	-	103	105	-	158

2.4 Evaluation de l'érodabilité des sols traités aux liants hydrauliques

Les essais de laboratoire de type Hole Erosion Test (XP P94-065), Mobile Jets Erosion Test et essai d'émiettement (crumb test) ont été développés pour évaluer la vulnérabilité du matériau à ces mécanismes et qualifier l'érodabilité à l'eau des matériaux qui constituent les ouvrages. Il convient de garder à l'esprit que les sollicitations hydrauliques appliquées lors de ces essais sont souvent extrêmes en termes d'intensité par rapport aux sollicitations hydrauliques réelles. En revanche, elles restent de courte durée.

2.4.1 Caractéristiques de compactage des éprouvettes

Les essais sont réalisés sur des éprouvettes confectionnées avec les caractéristiques de compactage suivantes :

- $w_{OPN} + 1\%$
- $98,5\% \rho_{dOPN}$

2.4.2 Essai d'émiettement

Cet essai permet de déterminer le comportement à l'immersion d'un matériau, son potentiel de dispersion (Figure 3). Il est adapté de la norme ASTM D6572.

L'essai est réalisé sur une éprouvette cylindrique de 3 cm de diamètre et de 4 cm de hauteur, compactée en

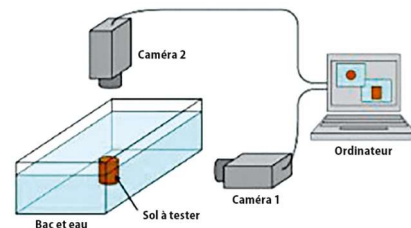
3 couches, avec 10 coups appliqués par couche pour le compactage (cela est considéré comme équivalent à un compactage à l'énergie Proctor normal, l'objectif $\rho_d \geq 98,5\% \rho_{dOPN}$ étant atteint).

L'éprouvette est immergée dans l'eau après 7, 28 et 90 j de conservation en cure normale (à $20 \pm 2^\circ\text{C}$, en évitant tout contact de l'éprouvette avec l'air ambiant, pour limiter l'évaporation de l'eau et favoriser les réactions cimentaires entre le liant hydraulique et le sol).

La forme de l'éprouvette est suivie par imagerie pendant une durée de 1h, avec une prise d'image toutes les secondes (soit 3 600 images enregistrées au cours de l'essai).

Pour une même formulation de traitement et une même échéance de cure, chaque essai a été répété 3 fois.

(a)



(b)

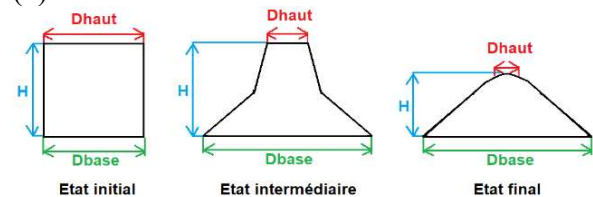


Figure 3. Principe de l'essai d'émiettement : (a) appareillage et (b) suivi des dimensions de l'éprouvette

2.4.3 Mobile Jets Erosion Test

L'essai MoJET consiste à appliquer, à la surface d'un échantillon de matériau, la pression et l'impact de 6 jets en rotation, avec un débit contrôlé (Figure 4).

L'essai est réalisé sur une éprouvette cylindrique de 15 cm de diamètre et de 5 cm de hauteur, compactée en 3 couches, avec 56 coups appliqués par couche (équivalent à un compactage à l'énergie Proctor normal, avec $\rho_d \geq 98,5\% \rho_{dOPN}$), conservée 28 et 90 j en cure normale.

Les essais sont d'abord réalisés avec un débit de 600 ml/min, suffisant pour éroder un sol naturel. Il s'est avéré que ce débit était insuffisant pour éroder les sols traités au liant hydraulique.

Le débit a alors été augmenté à 1 200 ml/min pour déterminer la résistance à l'érosion de surface de ces sols traités.

La sollicitation est maintenue pendant 6 à 12 min, selon que le débit soit fort ou faible, temps au cours

duquel le sol érodé est recueilli à la sortie de l'érodimètre.

En laboratoire, l'éprouvette a été placée sur un plan incliné à 15°, l'érodeur étant lui-même placé au-dessus de l'éprouvette pour que les jets impactent sa surface avec un angle de 90°. Cette inclinaison facilite la récupération de l'effluent. Cela permet de déterminer la masse de sol érodée en fonction du temps au cours de l'essai et, par calcul, le taux d'érosion du matériau.

Pour une même formulation de traitement, 3 éprouvettes ont été confectionnées. 2 sont testées à 28 j et une à 90 j.

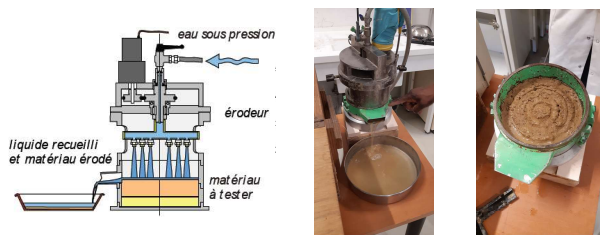


Figure 4. Principe de l'essai MoJET

2.4.4 Hole Erosion Test

L'essai HET (qui est normalisé, XP P94-065, contrairement aux essais précédents) consiste à appliquer, à travers un conduit (trou) réalisé au niveau de l'axe longitudinal d'une éprouvette, un écoulement à débit contrôlé, afin d'initier une érosion de conduit, qui se développera au cours de l'essai (Figure 5). La mesure de la turbidité de l'écoulement sortant de l'éprouvette permet d'évaluer la masse de sol érodée. La forme du conduit à la fin de l'essai est moulée avec de la cire avant d'ouvrir l'éprouvette pour observer le développement de l'érosion de conduit au sein du matériau.

L'essai est réalisé sur une éprouvette cylindrique de 7 cm de diamètre et de 15 cm de hauteur, compactée en 8 couches, avec 10 coups appliqués par couche (équivalent à un compactage à l'énergie Proctor normal, avec $\rho_d \geq 98,5\% \rho_{dOPN}$), conservée 28 j en cure normale.

Pour une même formulation de traitement, 2 éprouvettes sont testées.

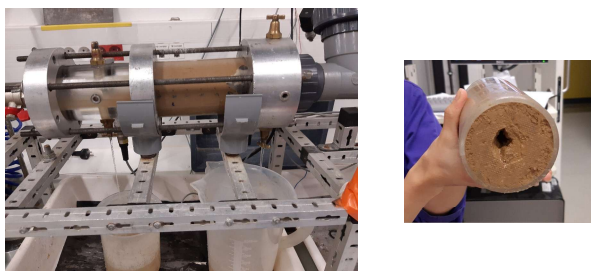


Figure 5. Principe de l'essai HET

3 RESISTANCE A L'EROSION DES SOLS TRAITES AUX LHR

3.1 Résistance à l'immersion

La résistance à l'immersion du limon de Cizancourt et du sable limoneux de Sandillon est présentée respectivement sur la Figure 6 et la Figure 7, via des images prises à différents temps au cours de l'immersion.

Les 2 sols naturels, non traités au LHR, se dispersent très rapidement après moins d'une minute d'immersion dans l'eau (1^{ère} ligne des figures).

La résistance à l'immersion des sols traités après 7 j de cure est nettement améliorée avec l'ajout de 2% LHR, à durcissement normal (N4) ou rapide (E4) (2^{ème} et 4^{ème} lignes des figures), les sols traités à 4% LHR ne montrant pas de dispersion après 1h d'immersion (3^{ème} et 5^{ème} lignes des figures).

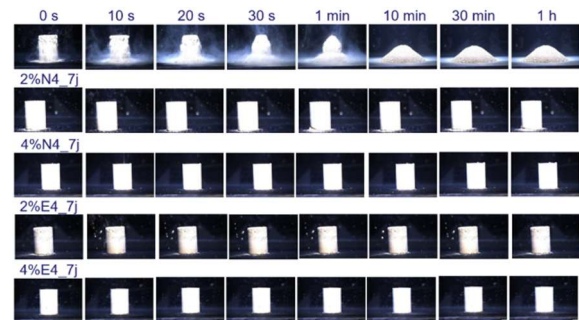


Figure 6. Résistance à l'immersion du limon de Cizancourt naturel (1^{ère} ligne) ou traité au liant hydraulique à 7 j

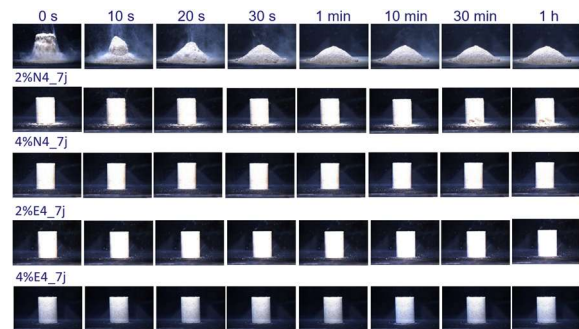


Figure 7. Résistance à l'immersion sable limoneux de Sandillon naturel (1^{ère} ligne) ou traité au liant hydraulique à 7 j

Le léger effritement des parois des éprouvettes observé à 7 j pour les sols traités à 2% N4 s'observe également à 28 et 90 j, mais tend à diminuer lorsque le temps de cure augmente.

Il n'est plus observé pour les sols traités à 4% N4 à 28 et 90 j.

L'effritement des parois des éprouvettes n'est quasiment pas ou peu observé à 28 et 90 j avec un traitement à 2 et 4% E4.

3.2 Résistance à l'érosion de surface

La Figure 8 présente les résultats des essais après 28 j de cure. Par simplification, une comparaison visuelle entre les échantillons est effectuée : les sillons, induits par l'impact des jets mobiles, visibles à la surface de l'échantillon en fin d'essai, permettent d'évaluer si le sol traité au liant hydraulique est plus ou moins résistant à l'érosion de surface.

Les sillons sont marqués pour les 2 sols traités avec 2% N4. Ils le sont moins sur le sable limoneux traité à 2% E4 et ne sont quasiment pas visibles sur le limon traité à 2% E4.

Les sillons ne sont que peu voire pas présents sur les sols traités avec 4% LHR.

Ces résultats concordent avec les résultats des essais d'émiettage (résistance à l'immersion).

Cette augmentation de la résistance à l'érosion externe permet d'envisager un réemploi de ce type de sols traités au LHR en protection externe en talus.

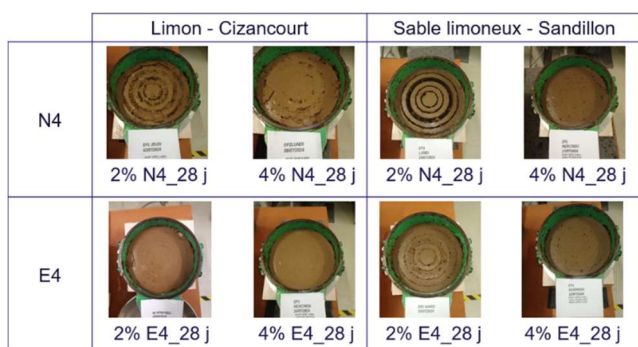


Figure 8. Résistance à l'érosion de surface des sols traités au liant hydraulique à 28 j

Après 90 j de cure, l'érodabilité de surface des sols traités n'évolue pas ou peu pour le limon de Cizancourt et le sable limoneux de Sandillon traité à 2 et 4% E4. La résistance est améliorée pour le sable limoneux traité à 2 et 4% N4.

3.3 Résistance à l'érosion de conduit

La Figure 9 présente les résultats des essais après 28 j de cure. Par simplification, une comparaison visuelle entre les échantillons est effectuée : la forme du conduit au centre de l'éprouvette en fin d'essai permet d'évaluer si le sol traité au liant hydraulique est plus ou moins résistant à l'érosion de conduit.

Les conduits sont larges et non rectilignes pour les 2 sols traités avec 2% N4. Le conduit est élargi par rapport à sa dimension initiale et rectiligne pour le sable limoneux traité à 2% N4 ; il est plus étroit pour le limon traité à 2% E4.

Les conduits sont proches de leur forme initiale pour les sols traités avec 4% LHR.

Ces résultats sont cohérents avec les résultats des essais précédents, démontrant l'amélioration des caractéristiques d'érodabilité des sols limoneux et sablo-limoneux traités au LHR.

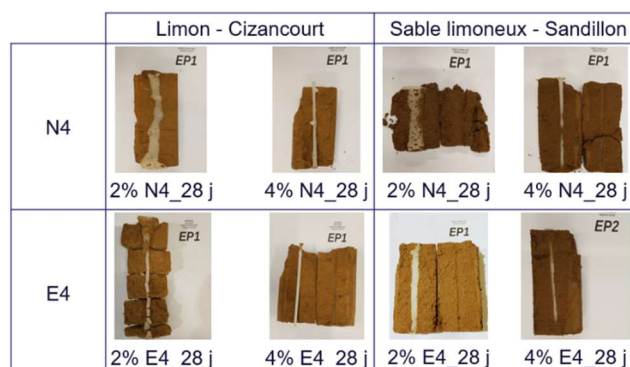


Figure 9. Résistance à l'érosion de conduit des sols traités au liant hydraulique à 28 j

3.4 Synthèse

Le Tableau 4 récapitule l'ensemble de résultats d'essais, les signes « + » et « ++ » indiquant une bonne voire très bonne résistance à l'érosion, tandis qu'un signe « - » indique une sensibilité à l'érosion avérée du sol traité au LHR.

Tableau 4. Sensibilité à l'érosion des sols traités aux LHR

Sol	Limon de Cizancourt (C)		Sable limoneux de Sandillon (S)	
	2	4	2	4
Liant hydraulique	N4			
Dosage en liant hydraulique	2	4	2	4
Immersion	+	++	+	++
Erosion de surface	-	+	-	++
Erosion de conduit	-	++	-	++
Liant hydraulique	E4			
Dosage en liant hydraulique	2	4	2	4
Immersion	+	++	+	++
Erosion de surface	++	++	+	++
Erosion de conduit	+	++	+	++

4 CONCLUSIONS

Les sols limoneux et sablo-limoneux sont particulièrement érodables en raison de leur cohésion faible. Le programme d'essais a consisté à évaluer l'effet d'un traitement des sols avec deux LHR, N4 et

E4, à durcissement normal et rapide, sur leur résistance à l'érosion.

L'apport de LHR, même à faible dosage, permet d'obtenir les portances requises pour une mise en œuvre des sols en remblai (IPI) et de garantir leur insensibilité à l'eau (CBR_i).

La résistance à l'immersion des sols est nettement renforcée avec un traitement à 2% LHR à court terme (7 j). Les caractéristiques d'érodabilité des deux sols sont améliorées avec 2% LHR, mais les sollicitations appliquées lors des essais MoJET et HET, sévères, affectent tout de même les matériaux après 28 et 90 j de cure. Si de bons résultats sont constatés, à ce faible dosage, des protections de type couvert végétal herbacé des talus pourront être envisagées en fonction des sollicitations spécifiques à l'ouvrage.

Les sols traités à 4% LHR ne sont que peu (N4) voire pas (E4) affectés après 7, 28 et 90 j de cure, ce qui permet d'envisager favorablement l'utilisation de matériaux traités aux liants hydrauliques dans des parties d'ouvrages sensibles aux mécanismes d'érosion, que ce soit les digues de protection contre les inondations ou les submersions ou les remblais.

L'analyse des résultats se base actuellement sur des observations visuelles. Un travail d'analyse approfondie des résultats, permettant de définir précisément les masses érodées, les taux d'érosion et l'indice d'érosion, issus de ces essais est en cours, afin de permettre une comparaison avec de précédents essais réalisés sur des sols naturels et traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques.

Par ailleurs, l'étude globale des sols traités aux liants hydrauliques pour la conception d'ouvrages hydrauliques s'intéresse au comportement de ces matériaux en termes de déformabilité, de ductilité (et de risque de fissuration), de résistance mécanique et de perméabilité, entre 7 et 90 j, soumis ou non à un vieillissement accéléré. Les résultats complets de l'étude globale seront communiqués ultérieurement.

5 REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'ensemble des personnes ayant permis la réalisation de ces essais, France Ciment, SigmaBéton et Université Gustave Eiffel.

Par ailleurs, sous réserve de l'accord des partenaires de la présente étude, les résultats de ces essais seront partagés avec les différents partenaires du projet Interreg NW Europe BONSAI, au sein du WP2 qui s'intéresse à l'érosion des sols naturels et des sols traités à la chaux et/ou aux LH.

6 REFERENCES

AFNOR (2023). *XP P94-065*. Sols : reconnaissance et essais - Hole Erosion Test - Principe et méthode d'essai en laboratoire pour la détermination des caractéristiques de résistance à l'érosion de conduit.

AFNOR (2015). NF EN 13282-2. Liants hydrauliques routiers - Partie 2 : liants hydrauliques routiers à durcissement normal - Composition, spécifications et critères de conformité.

AFNOR (2014). NF EN 13282-1. Liants hydrauliques routiers - Partie 1 : liants hydrauliques routiers à durcissement rapide - Composition, spécifications et critères de conformité.

AFNOR (2010). NF EN 13286-2. Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 2 : méthodes d'essai de détermination en laboratoire de la masse volumique de référence et de la teneur en eau - Compactage Proctor.

AFNOR (2021). NF EN 13286-47 Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 47 : méthodes d'essai pour la détermination de l'indice portant californien (CBR), de l'indice portant immédiat (IPI) et du gonflement linéaire.

ASTM (2021). ASTM D6572-21 Standard Test Methods for Determining Dispersive Characteristics of Clayey Soils by the Crumb Test.

Cerema (2019). Guide international sur les digues, The International Levee Handbook, CIRIA (2013), version française, Edition Cerema, Bron, France, 1485 p.

Bertola, F., Nicaise, S., Saussaye, L., Verelst, K., Van Hemert, H. (2025). Lime treatment for hydraulic structures: benefits, challenges, and long term performance, 5th Dam World Conference, 13-17 avril 2025, Lisbonne, Portugal, 1102-1116.

CIGB-ICOLD (1986). *Sol-ciment pour les barrages en remblai*, CIGB, Bulletin n°54, avril 1986.

CIGB-ICOLD (2024). *Barrages en sol cimenté : conception et réalisation*, CIGB, Bulletin n°195, mars 2024.

DigueELITE (Consortium) (2025). Le traitement des sols à la chaux pour la construction d'ouvrages hydrauliques de faible hauteur – Etat de l'art et de la pratique. Livret 2, 136 p.

Coppée, T., Saussaye, L., Chevalier, C., Minatchy C. (2026). Evaluation de la durabilité des sols traités vis-à-vis de l'érosion par essais à l'Erodimètre à Jets Mobiles. JNGG 2026, 7-10 avril 2025, Grenoble, France.

Ferber, V., Bonne, S. (2026). Durabilité des ouvrages en sols traités : enseignements tirés des recherches et des retours d'expérience de chantier. JNGG 2026, 7-10 avril 2025, Grenoble, France.

Ferber, V., Boussafir, Y., Saussaye, L., Hervé S., Bonne S. (2025). Traitement des sols dans les ouvrages en terre : la durabilité des sols traités ne se subit pas, elle se décide. Revue Général de l'Aménagement et des Routes, RGRA, 1013 : 46-54, novembre-décembre 2025.

IDRRIM (2024). Guide des terrassements des remblais et des couches de forme, Fascicules 1 et 2.

LCPC-STERA (2000). Guide technique pour le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Application aux remblais et aux couches de forme.

LCPC-SETRA (2000). Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme, Fascicules I et II.

Mehenni, A. (2015). Comportement hydromécanique et érosion des sols fins traités. Thèse de doctorat, Université de Lorraine

Saussaye, L., Potié, G., Berche, V., Mercadier, D., Benot R., Mehenni, A., Alleon, C. (2024). Réalisation de dispositif d'étanchéité complet par traitement in situ de limon et de craie, JNGG 2024, 25-28 juin 2024, Poitiers, France.

<https://www.infociments.fr/liants-hydrauliques-routiers>