

Evaluation de la durabilité des sols traités vis-à-vis de l'érosion par essais à l'Erodimètre à Jets Mobiles

Assessment of the sustainability of treated soils with regard to erosion using mobile jets erosion tests

Thibault COPPEE^{1,2*}, Lucile SAUSSAYE³, Christophe CHEVALIER⁴, Carlos MINATCHY⁴

1 SNCF Réseau, Division Patrimoine Géotechnique et Risques Naturels, Saint-Denis, France

2 Cerema, Equipe de recherche GéoCoD, Blois, France

3 Cerema, Equipe de Recherche ENDSUM, Blois, France

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

**thibault.coppee@gmail.com*

RESUME : Les techniques de réemplois des sols excavés permettent de réduire les prélèvements en matériaux nobles (200 Mt/an). Cela permet également de réduire l'empreinte carbone des projets en limitant le transport et la mise en dépôts des terres. Le traitement des sols notamment à la chaux est devenu une technique courante depuis plusieurs décennies et est bien maîtrisé pour des sols de type F1 et F2 (GTR et GTS). Toutefois, le changement climatique et les événements extrêmes qu'il génère (pluies intenses, sécheresses ...) posent la question de la durabilité de ces traitements.

La présente communication vise à présenter un sol fin F1 traité à la chaux vive et au liant hydraulique routier (LHR), mis en œuvre en digue de ceinture d'un bassin. L'ouvrage, soumis aux sollicitations de son environnement, a ensuite été suivi lors de 4 campagnes d'essais érodimètre à jets mobiles (MoJET) pour en évaluer la sensibilité à l'érosion sur plusieurs années. Cet appareil projette, avec un débit contrôlé, 6 jets d'eau rotatifs qui viennent impacter la surface à tester, l'eau étant récupérée avec le sol érodé à différents pas de temps. Ces effluents sont ensuite séchés pour déterminer les masses érodées et les taux d'érosion aux différents temps.

Les résultats montrent une sensibilité à l'érosion de surface (couche sacrificielle) supérieure à 100 g/min et un maintien en profondeur de la résistance à l'érosion essentielle pour une digue. Les campagnes d'essais d'érosion étalées sur plusieurs années permettent de confirmer le maintien de cette propriété hydromécanique du sol traité à la chaux et au LHR en profondeur et sa dégradation superficielle, qui progresse au cours du temps. Ces résultats encourageants permettent de démontrer la bonne tenue des sols traités dans le temps et de confirmer qu'ils sont une solution possible en termes de résistance à l'érosion des ouvrages en terre.

ABSTRACT: Techniques for reusing excavated soil reduce the extraction of valuable materials (200 million tons per year). This also reduces the carbon footprint of projects by limiting the transport and storage of soil. Soil treatment, particularly with lime, has been a common technique for several decades and is well established for F1 and F2 soils (GTR and GTS). However, climate change and the extreme events it generates (heavy rain, drought, etc.) raise questions about the sustainability of these treatments.

This paper presents a fine F1 soil treated with quicklime and hydraulic road binder (HRB) used for a watertight embankment of a pond. The structure, subject to environmental stresses, was then tested during four Mobile Jets Erosion Test (MoJET) campaigns to assess its sensitivity to erosion over several years. This device emits six rotating water jets at a controlled flow rate, which impact the surface to be tested. The water is collected along with the eroded soil at different time intervals. These effluents are then dried to determine the eroded masses and erosion rates at different times.

The results show a sensitivity to surface erosion (sacrificial layer) greater than 100 g/min and a maintenance of the erodibility properties essential for a watertight embankment. Erosion testing campaigns over several years confirm that this hydromechanical property of soil treated with quicklime and HRB is maintained at depth and its surface degradation. These encouraging results demonstrate the good performance of treated soils over time and confirm that they are a possible solution in terms of erosion resistance for earthworks.

Mots-clés : digue, traitement de sol, chaux vive, liant hydraulique routier, érosion.

1 INTRODUCTION

Dans le cadre du projet du Canal Seine-Nord Europe, la Société du Canal Seine-Nord Europe (SCSNE) a souhaité compléter les données d'entrée sur les dispositifs d'étanchéité qui pourrait être mis en œuvre au droit des différentes sections du canal. La conception des dispositifs d'étanchéité prend en compte des enjeux tels que, par exemple :

- la maîtrise des pertes par infiltrations, lesquelles doivent rester en deçà d'une valeur de $0,62 \text{ m}^3/\text{s}$ pour tout l'ouvrage,
- un mouvement des terres de 75 millions de m^3 de déblais et de 45 millions de m^3 de remblais,
- la durée de vie attendue, qui doit être supérieure à 75 ans.

Des détails sur le projet sont disponibles sur le site internet du projet (<https://www.canal-seine-nord-europe.fr>).

Ainsi, elle a lancé un marché de prestation intellectuelle et de mise en œuvre de planches d'essais pour étudier la pertinence de travailler avec des couches d'étanchéités et de protection en matériaux naturels (in situ), au regard de la disponibilité de ces matériaux sur la trace du canal.

Le marché a été remporté par le groupement d'entreprises Bouygues Travaux Publics, ISL Ingénierie, Razel-Bec en collaboration avec Ramery Travaux Publics et Unisol, dont Bouygues Travaux Publics était le mandataire.

Dans le cadre de ce marché, afin de vérifier les objectifs de conductivité hydraulique, d'érodabilité et de durabilité des matériaux constitutifs des planches d'essais de dispositifs d'étanchéités complet, les planches d'essais ont été immergés pendant 1 an sous 1 m d'eau, entre fin 2020 et fin 2021.

Pour réaliser cette immersion, les planches d'essais compactées horizontalement ont été ceinturées d'un remblai pour former un bassin. La digue de ceinture du bassin a été réalisée en limon traité à la chaux vive et au liant hydraulique routier.

Afin d'évaluer la résistance à l'érosion du matériau de cette digue au cours du temps, par ailleurs utilisé en couche de protection de dispositif d'étanchéité complet, l'Université Gustave Eiffel est intervenu sur site pour réaliser des essais de type Mobile Jets Erosion Tests (MoJET) (Pham, 2008, Haghghi, I., 2012, Reiffsteck et al, 2012).

L'article présente les résultats de ces essais réalisés entre 2020 et 2025.

2 MATERIEL ET METHODE

2.1 Matériau

Les essais de sensibilité à l'érosion sont réalisés sur le talus extérieur du bassin démonstrateur réalisé par la Société du Canal Seine-Nord Europe (SCSNE). Ce démonstrateur a été construit en 2020 sur la commune de Cizancourt (80). La digue est construite en limon de classe GTR F1 traité avec 1% de chaux vive (CaO) et 5% de liant hydraulique routier (LHR).

En effet, les travaux de terrassement liés au canal et à ses ouvrages connexes s'inscrivent dans le contexte géologique des limons loessiques des plateaux (LP) et des craies du Campanien. Les limons sont présents sur une profondeur variable, avec une moyenne de 5 à 8 m. Ces matériaux limoneux sont rencontrés soit sous un faciès légèrement argileux sur 1 à 2 m en surface (classe GTR A₂/F₂) ou sous un faciès limoneux en profondeur (classe GTR A₁/F₁) et de façon plus abondante.

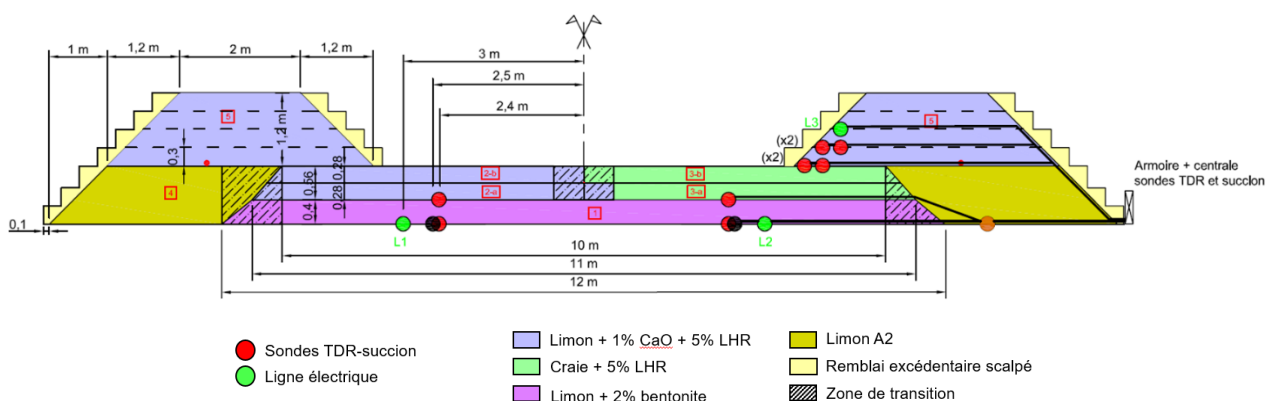


Figure 1. Coupe du bassin et schéma d'instrumentation des planches d'essais.

Les caractéristiques physiques du limon F1, utilisé pour la construction de la digue de ceinture du bassin, sont récapitulées dans le Tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques physiques du limon

Dmax (mm)	0/80 µm (%)	VBS (g/100 g de sol sec)	WOPN (%)	ρ _{dOPN} (t/m ³)
2-19	96	1,6	14,8	1,76

Pour la mise en œuvre du limon F1 traité à 1% CaO (CL 90 Q) et à 5% LHR (ROC AS), les caractéristiques de compactage sont récapitulées dans le Tableau 2.

Les dosages en chaux et en liant hydraulique ont été définis au travers d'une étude de traitement du limon en laboratoire.

Tableau 2. Caractéristiques de compactage du limon traité

WOPN (%)	ρ _{dOPN} (t/m ³)	w visée (%)	ρ _d visée (% ρ _{dOPN})

17,0	1,70	18,0	≥ 95
------	------	------	------

La digue de ceinture du bassin a été mise en œuvre en 4 couches de 30 cm d'épaisseur, en octobre 2020.

Chaque couche a été mise en œuvre avec 3 à 4 passes de compacteur VP5 et 1 passe de compacteur V5.

La bonne exécution des couches de limon traité à 1% CaO + 5% LHR a été contrôlée notamment par des mesures de masses volumiques in situ (5 à 8 mesures par couche), indiquant un taux de compactage moyen de l'ordre de 98% ρ_{dOPN}.

2.2 Protocole expérimental

2.2.1 Erodimètre à jets mobiles

La sensibilité à l'érosion du matériau traité constituant la digue de ceinture du bassin a été suivie de 2020 à 2025 au travers de 4 campagnes de mesures en novembre 2020, juin 2021, avril 2022 et avril 2025 (Figure 2).



Figure 2. Localisation des campagnes d'essais

Pour chaque campagne d'essais, la position de réalisation des essais précédente n'a pu être conservée du fait de coactivité sur le bassin, de déblais recouvrant le talus entre deux campagnes, etc. Le talus de la digue ayant été réalisé en une seule phase de travaux, en octobre 2020, l'effet de la localisation des essais sur les résultats apparaît limité.

La sensibilité à l'érosion du limon traité à la chaux et au LHR a été caractérisée via des essais in situ à l'Erodimètre à Jets Mobiles (Mobile Jets Erosion Test, MoJET), le développement de l'érodeur ayant été réalisé par Henensal et Duchatel (1990).

Le principe de l'essai consiste à soumettre le sol testé à 6 jets d'eau à pression constante (

Figure 3). Les six buses (ou gicleurs) ont un diamètre de 0,5 mm. L'essai est réalisé dans une

enceinte close de 15,2 cm de diamètre appelée chambre d'érosion.

La première étape consiste à préparer le sol en le rendant le plus plan possible et à supprimer les agrégats éventuels. La mise en place du dispositif nécessite l'insertion d'une trousse coupante au niveau du sol afin de maintenir étanche la surface d'essai (

Figure 3c) et ne pas perdre d'effluent. L'érodeur est ensuite déposé sur la trousse coupante pour pouvoir ensuite initier l'essai (

Figure 3d).

Les paramètres de l'environnement pouvant impacter l'essai sont :

- La pente du terrain,
- La température de l'air,
- La température de l'eau.

Ces deux derniers paramètres peuvent influencer les propriétés de viscosité de l'eau. Ces paramètres sont systématiquement mesurés avant la réalisation d'un essai.

Lors de l'essai, les six jets sont envoyés perpendiculairement au sol (Figure 3a, Figure 4a), avec un débit constant. Ce débit est régulé par une pompe péristaltique.

Un moteur permet de créer un mouvement de rotation des jets à une vitesse de rotation constante au-

dessus du sol. L'essai est peu invasif sur la surface testée (Figure 4b).

L'essai vise ensuite à récupérer les effluents à des pas de temps définis. Ces effluents se composent de l'eau envoyée sous pression et du sol érodé emporté par l'eau. La récupération des effluents est réalisée via un système d'aspiration par une pompe à vide. Les effluents sont stockés dans des flacons individuels pour chaque temps.



Figure 3. Présentation et mise en place de l'essai MoJET.

2.2.2 Protocole d'essai

La zone d'essai est le talus extérieur de la digue du bassin. Les essais sont réalisés à mi-hauteur du talus, à trois profondeurs distinctes pour chaque point de mesure. Ainsi, pour chaque point de mesure, les essais sont réalisés en surface (0 cm), à 3 et 6 cm de profondeur. Les essais sont systématiquement doublés afin de valider les résultats obtenus. Un second point de mesure est donc localisé auprès du premier, à mi-hauteur du talus.

Les conditions d'essais retenues pour chaque campagne d'essais sont :

- Débit d'eau constant d'environ 1 200 ml/min,
- Durée de l'essai de 5 minutes avec recueils intermédiaires des effluents chargés toutes les 30 à 60 secondes.

2.2.3 Traitement des échantillons

Une fois les essais réalisés in situ, les effluents récupérés lors des essais sont amenés au laboratoire. Chaque prélèvement est ensuite séché dans une étuve à 105°C. Ainsi, la masse de sol érodée et la masse d'eau correspondante évaporée lors du passage à l'étuve sont mesurées. Cette dernière permet de quantifier les éventuelles fuites ou perte d'eau du dispositif lors des essais.

3 RESULTATS DES ESSAIS

3.1 Essais d'érosion

Les masses de sols obtenues pour chaque pas de temps sont ensuite exploitées via (Figure 5 à 8) :

- La masse érodée cumulée en fonction du temps,

- Le taux d'érosion en fonction du temps.

Lors de chaque essai, il est observé une phase initiale d'érosion plus forte qui tend au fur et à mesure de l'essai à diminuer jusqu'à devenir très faible, voire presque nulle (de moins de 10 g/min).

La mise en place de la trousse coupante (creusement, lissage du sol...) peut favoriser la fragilisation de la surface, donc expliquer pour partie la plus forte altération initiale.

La mise en place des jets à fort débit perturbe également le matériau. La surface tend à évoluer rapidement vers un nouvel équilibre avec des taux d'érosion très faibles après 3 min d'essai.

Lors des campagnes de 2020, 2021 et 2022, le creusement aux différentes profondeurs d'essais s'avérait être une tâche pénible du fait de la rigidité et de la dureté du limon traité à la chaux et au LHR.

Ces propriétés mécaniques rendaient la mise en place de la trousse coupante difficile et plusieurs fuites pouvaient survenir en cours d'essai. La jonction du matériau avec la trousse coupante était alors enduite de vaseline pour maintenir une étanchéification et limiter les pertes d'eau.

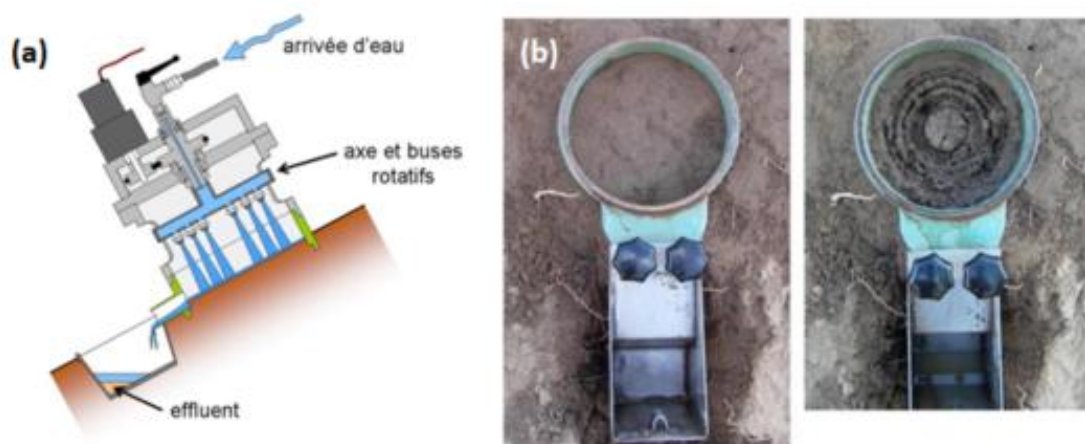


Figure 4 (a) Schéma de l'érodeur, (b) photos du sol testé avant et après essai (sol non traité).

Lors de la campagne de 2025, ce phénomène n'a pas été retrouvé avec un matériau traité toujours cohérent et rigide mais plus facile à creuser et avec un meilleur enfoncement de la trousse coupante. Cela a permis une absence de perte d'eau en cours d'essai. Ce phénomène pourrait traduire une évolution des propriétés mécaniques du limon traité à la chaux et/ou aux liants hydrauliques qui n'est pas cependant pas mesurée par l'essai MoJET.

Il est constaté un accroissement de la sensibilité à l'érosion sur les premiers centimètres de sols depuis la campagne initiale. Cette évolution apparaît d'intensité variant du simple au double entre la deuxième (Figure 7) et troisième campagne (Figure 6) (90 à 385 g). La surface du talus semble ainsi avoir perdu en rigidité par un effet d'écaillage observé. En revanche, la sensibilité à l'érosion du matériau semble avoir peu évoluée entre avril 2022 (Figure 6) et avril 2025 (Figure 5).

En profondeur, le sol apparaît plus rigide et moins érodable. Les valeurs obtenues en profondeur sont similaires pour les 4 campagnes. La sensibilité à l'érosion est principalement marquée en surface, en début d'essai. Les 30 premières secondes sont celles où l'érosion est la plus importante.

En résumé, les résultats des essais d'érosion sont similaires pour les campagnes de mesures de 2021 (Figure 7), 2022 (Figure 6) et 2025 (Figure 5). Le matériau semble donc avoir subi une altération limitée au cours du temps et maintenir ses propriétés à long terme.

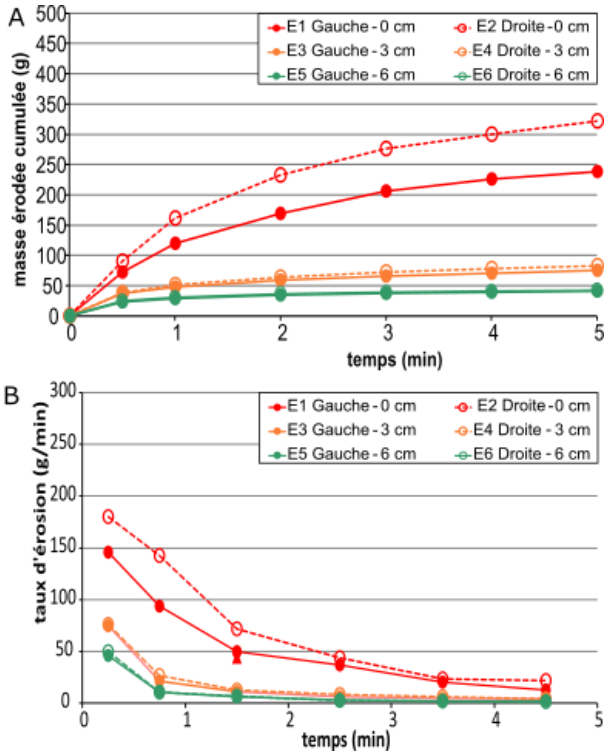


Figure 5. Résultats des essais MoJeT d'avril 2025 : A) masse de sol érodée cumulée, B) taux d'érosion en fonction du temps

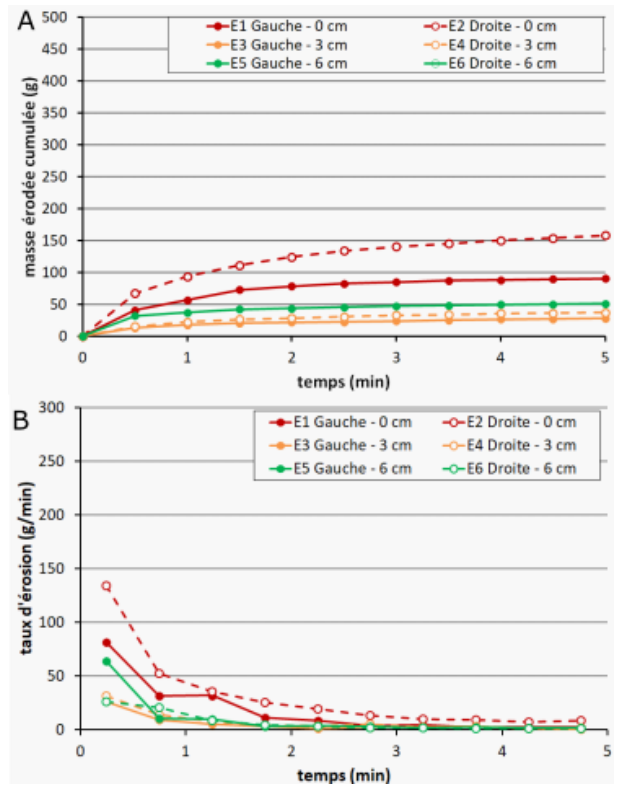


Figure 6. Résultats des essais MoJeT d'avril 2022 : A) masse de sol érodée cumulée, B) taux d'érosion en fonction du temps

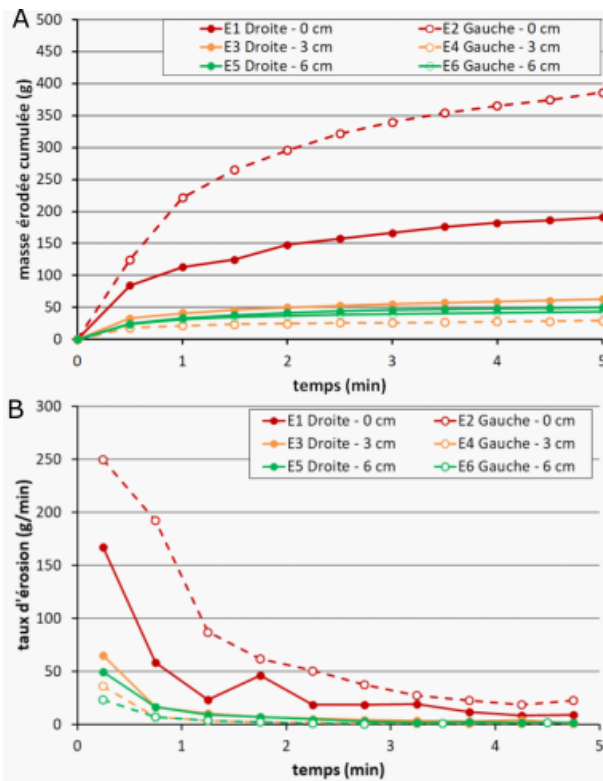


Figure 7. Résultats des essais MoJeT de juin 2021 : A) masse de sol érodée cumulée, B) taux d'érosion en fonction du temps

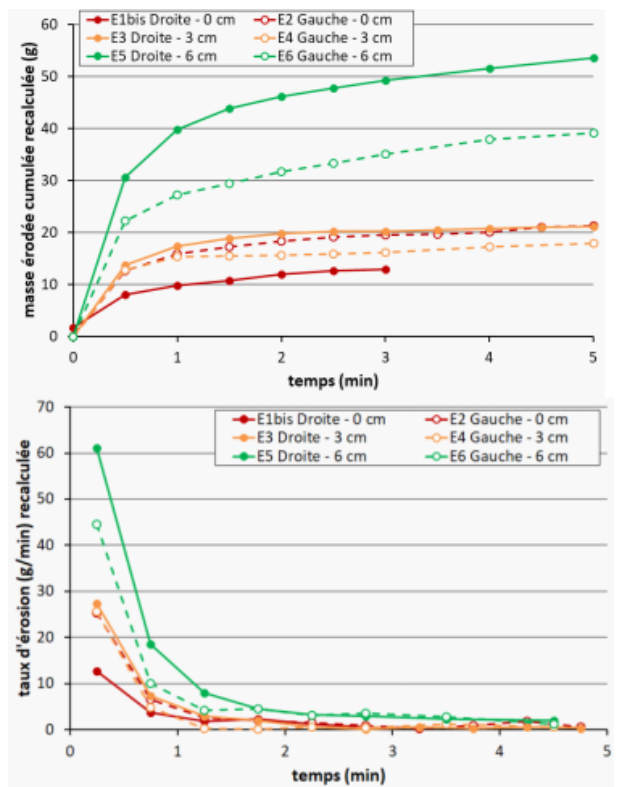


Figure 8. Résultats des essais MoJeT de novembre 2020 : A) masse de sol érodée cumulée, B) taux d'érosion en fonction du temps

3.2 Dégradation en profondeur

Les graphiques de la Figure 9 présentent les masses totales érodées durant les essais pour l'ensemble des campagnes d'essais.

Les 3 premiers centimètres du sol présentent une sensibilité à l'érosion qui augmente avec le temps par rapport à la campagne de novembre 2020. Les valeurs en profondeur présentent quant à elles des valeurs similaires.

Le matériau semble perdre sa rigidité en surface (0 à 3 cm) avec un maintien en profondeur de ses propriétés par rapport à l'érosion. Lors de la campagne d'essais de 2025 et pour la sensibilité à l'érosion, le matériau présente une réponse similaire à celle des campagnes de 2021 et 2022. Le matériau semble donc stable et n'avoir que peu évolué depuis avril 2022. A souligner cependant qu'en profondeur (3 à 6 cm) le matériau traité est toujours cohérent et rigide mais plus facile à creuser.

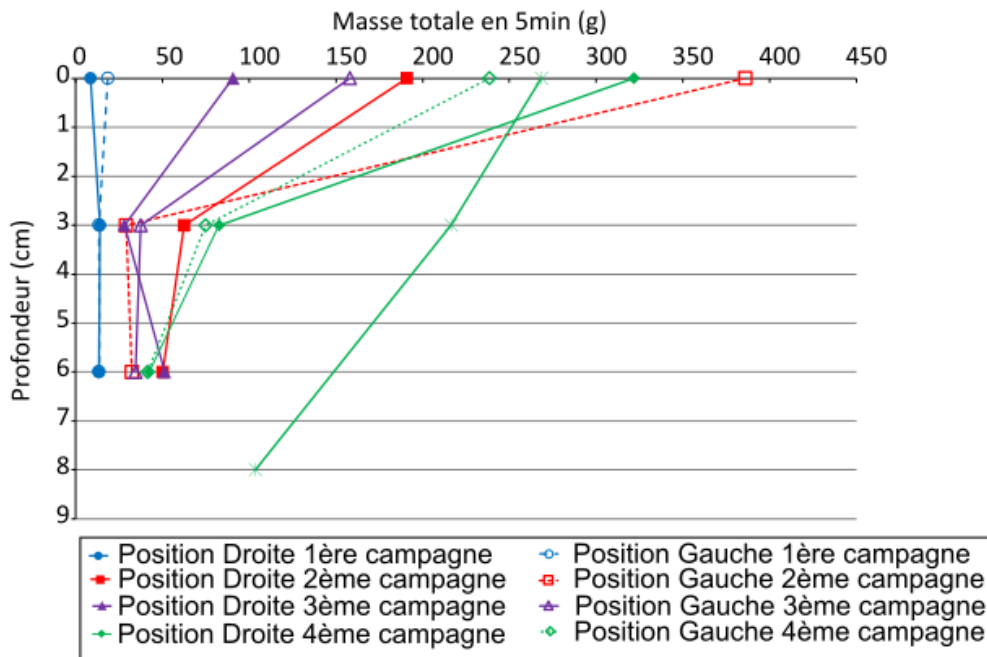


Figure 9. Evolution en fonction de la profondeur de la masse totale érodée

Ainsi, l'essai d'érodimètre à jets mobiles (MoJeT) apparaît capable de déterminer de manière indirecte la sensibilité à l'érosion d'une surface de sol et d'en suivre la dégradation dans le temps. La multiplication des essais en profondeur, permet quant à elle de retrouver le matériau sain au fur et à mesure de la vie d'un ouvrage.

Il s'agit d'une méthode simple, peu coûteuse et facilement déployable pour appréhender la stabilité d'un talus et sa sensibilité à l'altération hydraulique, notamment les corps de digue.

4 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'étude de la sensibilité à l'érosion du bassin d'essai de Cizancourt a été menée par des essais à l'Érodimètre à Jets Mobiles (MoJET).

Les essais ont été effectués à différentes profondeurs dans le but de mesurer l'évolution de la sensibilité à l'érosion selon la profondeur dans le talus.

Il a été mis en évidence que le matériau devient légèrement plus sensible à l'érosion en surface qu'en profondeur sur le côté externe.

En 2025, un premier essai a été réalisé sur la face interne du bassin en un seul point. Il a établi une sensibilité à l'érosion plus importante sur cette face. Des divergences d'environnement (végétation...) et de sollicitations différentes pourraient expliquer cette évolution. Des mesures complémentaires sont à prévoir pour confirmer et expliquer cette hétérogénéité.

Les conditions météorologiques sur le site de la planche d'essai ont également été enregistrées. Leurs analyses pourraient également ajouter des éléments d'analyses quant à l'effet des conditions environnementales sur la durabilité du matériau et l'évolution de sa sensibilité à l'érosion.

5 REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'ensemble des personnes ayant permis la réalisation de ces essais, SCSNE, groupement d'entreprises ayant réalisés les planches d'essais, Université Gustave Eiffel et Cerema.

Par ailleurs, les résultats de ces essais sont 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

- Henensal, P., Duchatel. F., 1990. « L'érodimètre à jets mobiles » *Bull. Lab. Ponts et Chaussées*, 167: 47-53.
<https://hal.science/hal-05307411v1/file/AEP000002056.pdf>
- Haghighi, I., 2012. De la suffusion à l'afouillement des ouvrages géotechniques: développement des phénomènes d'érosion et de dispersion dans les sols. Thèse de doctorat, Univ Paris Est, 2012.
- Reiffsteck, P., Haghighi, I., Chevalier, Ch., 2012. Erodibility diagnostic of existing hydraulic earthworks by mobile jets erosion test. 6th International Conference on Scour and Erosion (ICSE-6), Aug. 2012, Paris, France.
- Pham, T. L., 2008. Erosion et dispersion des sols argileux par un fluide. Thèse de doctorat, ENPC
Site internet du canal Seine Nord Europe.
<https://www.canal-seine-nord-europe.fr>