

Durabilité des ouvrages en sols traités : enseignements tirés des recherches et des retours d'expérience de chantier.

Durability of treated soils works : lessons learned from research and construction site feedback.

Valéry FERBER^{1,2*}, Simon BONNE²

1 TALNIA, Meylan, France

2 Syndicat des Professionnels du Terrassement de France, Paris, France

**valery.ferber@talnia.fr*

RESUME : L'utilisation massive et croissante des techniques de traitement des sols dans les ouvrages en terre a fait émerger la nécessité d'en maîtriser la durabilité. Comme le montre cet article, les applications routières classiques sont très bien encadrées par le guide de traitement des sols, mais certaines utilisations moins courantes nécessitent de préciser les principes fondamentaux de la méthodologie de formulation du traitement des sols. Il en ressort que, comme pour tous les matériaux de construction, la maîtrise de la durabilité des sols traités repose sur une conception globale de l'ouvrage, conduisant à définir des exigences de performance précises qui fixent le cadre des études de formulation. Les retours d'expérience documentés sur des ouvrages variés et anciens, aussi bien routiers que ferroviaires ou hydrauliques, depuis les années 1960 montrent que cette méthode permet d'envisager le traitement des sols sous des sollicitations variées, y compris agressives.

ABSTRACT: The widespread and growing use of soil treatment techniques in earthworks has highlighted the need to ensure and control their durability. As this paper shows, conventional road applications are well covered by the soil treatment guidelines, but certain less common uses require a renewed clarification of the fundamental principles underlying the mix design methodology for treated soils. It follows that, as with all construction materials, ensuring the durability of treated soils relies on an overall, integrated design of the structure, leading to the definition of clear performance requirements that provide the framework for mix design studies. Documented feedback from a range of diverse and long-standing structures—road, rail, and hydraulic—spanning from the 1960s shows that this approach makes it possible to consider soil treatment under all kinds of loading conditions, including aggressive ones.

Mots-clés: Traitement des sols, Durabilité, Ouvrages en terre, Formulation, Retours d'expérience.

1 INTRODUCTION, CONTEXTE

Dans le cadre de sa contribution à la révision du guide de traitement des sols (GTS, SETRA-LCPC, 2000), le Syndicat des Professionnels du Terrassement de France (SPTF) a fait réaliser une revue bibliographique scientifique et une revue des retours d'expérience portant sur la durabilité des ouvrages en sols traités, au-delà des seules applications en remblai et en couche de forme.

Ce sujet a en effet été abordé dans plusieurs articles scientifiques durant ces dernières années et est parfois apparu comme une source de confusion au sein de la communauté scientifique et technique, dont les professionnels de la construction des ouvrages en terre. La synthèse de cette large revue a notamment fait apparaître que la notion de formulation est souvent mal prise en compte dans les raisonnements.

Cet article vise à analyser de manière factuelle et objective la relation entre formulation du traitement des sols et durabilité, en repartant de quelques cas de recherches ou d'études représentatifs. Au préalable une réflexion générale sur les spécificités du concept de durabilité dans le traitement des sols est présentée. L'objectif général de l'article est de proposer un cadre permettant d'aborder la durabilité des ouvrages en sols traités comme pour les autres matériaux et domaines de la construction des infrastructures.

2 DURABILITÉ ET OBJECTIFS DU TRAITEMENT DES SOLS

Deux types d'objectifs de traitement des sols se distinguent :

- les traitements visant uniquement une amélioration des conditions de réemploi des sols, sans objectif de performance à long terme autre

que celle attendue d'un matériau de remblai courant. On parle alors d'« amélioration » ;

- les traitements visant une performance particulière exigible à moyen et long terme, que l'on associe alors au terme de « stabilisation ».

C'est à la stabilisation que la question de la durabilité s'applique.

Cette durabilité se traduit par la capacité du sol traité à conserver les performances requises, dans les conditions d'usage, d'entretien courant et d'environnement de l'ouvrage et pour une durée déterminée. Elle repose non seulement sur le choix des formules de traitement les plus adaptées au sol et aux performances attendues, mais aussi à une conception prenant en compte la place du sol traité dans l'ensemble de l'ouvrage, au vu des sollicitations auxquelles il sera confronté.

3 EXEMPLES

Les exemples d'applications du traitement des sols à des fins de stabilisation sont très nombreux, tant ces techniques se sont appliquées largement dans le monde entier depuis des décennies (Ferber *et al*, 2025). Quatre exemples ont été choisis pour illustrer les enjeux de la maîtrise de la durabilité.

3.1 Couches de forme

Les études de traitement et les exigences de réalisation des couches de forme routières sont très précisément encadrées par le GTS (SETRA-LCPC, 2000). La démarche des études de formulation qui y sont préconisées prend en compte les diverses sollicitations auxquelles peuvent être soumises ces parties d'ouvrage (remise en circulation, comportement à long terme, résistance à l'immersion, résistance à la cryosuccion) pour en garantir la durée de vie. L'exemple présenté ici est représentatif des nombreux cas de couches de forme dont la formulation a suivi ces règles et qui se sont avérés fructueux.

En 1986, lors de la construction de la ligne à grande vitesse Atlantique, la SNCF a ouvert la possibilité de réaliser une partie des couches de forme en sols traités avec des matériaux du site (sable de Bouër, traitement à 5,5 % de CPJ45, Lot 33 -PK 150.880 à 182.934 - Section Conneré Melleray, Hervé *et al.*, 2011).

En 2006, après 17 ans d'exploitation de la ligne sous une circulation à 300 km/h et une exposition directe aux cycles de gel-dégel, une campagne de carottages (Figure 1) a été réalisée pour mesurer la résistance en compression du matériau de la couche de forme.



Figure 1. Etat des carottes prélevées en 2006 dans la couche de forme de la LGV Atlantique à Conneré (Hervé *et al.*, 2011).

Les résultats obtenus montrent une évolution très importante des performances sur les 19 ans séparant les travaux du diagnostic (1987-2006) : la résistance mécanique moyenne sur 4 carottages répartis sur 10 kilomètres de tracés atteint 8 MPa (fourchette de 7,5 à 9,1 MPa), soit le double des valeurs mesurées en étude à 90 jours. (Figure 2). De plus, l'exploitant n'a constaté aucune différence dans les coûts d'entretien de la structure en ballast entre les structures sur couche de forme en sols traités et les structures sur couche de forme granulaire.

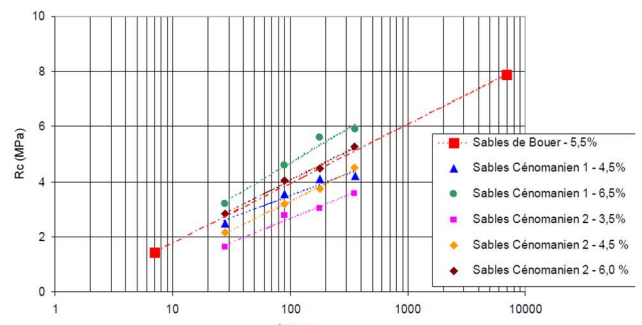


Figure 2. Evolution de la résistance à la compression de matériaux de couche de forme traitée de la LGV Atlantique en fonction du temps (Hervé *et al.*, 2011).

Cet exemple illustre la progression des performances des couches de forme routières en sols traités à long terme dans la très grande majorité des cas, c'est-à-dire lorsque :

- l'étude de formulation est correctement réalisée ;
- la formulation étudiée est strictement appliquée en phase de réalisation ;
- la méthodologie de mise en œuvre est scrupuleusement respectée.

En ce sens, les couches de forme font la démonstration que les objectifs de performance prescrits dans le guide du traitement des sols permettent d'en maîtriser la durabilité.

3.2 Partie superficielle des talus de remblais courants

3.2.1 Sollicitations concernées

Certaines parties des ouvrages en terre sont directement exposées aux cycles météoriques, dus notamment aux alternances de périodes chaudes et sèches et de périodes humides. C'est en particulier le cas des talus des remblais, même s'ils sont parfois revêtus d'une couche de terre végétale.

De nombreuses recherches et études ont décrit le comportement des sols traités soumis à des cycles de séchage-humidification, par le biais d'essais réalisés en laboratoire ou in situ (Al Mukhtar et Bouasker, 2013), (An, 2017), (Aziz et al., 2021), (Berche et al., 2009), (Berche et al., 2013), (Das et al., 2023 ; Rosone et al., 2018), (Chabrat, 2024), (Cuisinier et Masrouri, 2011), (Cuisinier et al., 2012), (Cuisinier et Masrouri, 2020), (Dong et al., 2013), (Chabrat, et al., 2022), (Boutonnier et al., 2022), (Rosone et al., 2018), (Stoltz et al., 2013), (Wassermann, 2023).

Il est ainsi admis qu'une épaisseur variable du sol traité exposé à ces sollicitations météoriques peut perdre une partie plus ou moins importante de ses propriétés mécaniques. Cette épaisseur dépend de la nature du sol, du ou des types de liant utilisé pour le traitement, de leur dosage et bien entendu de l'ampleur de l'intensité des cycles.

3.2.2 Conception et formulation d'un corps de remblai de zone inondable expérimental

Le projet de recherche français TerDOUEST a été l'occasion de réaliser en 2010 un remblai expérimental ayant vocation à être précisément documenté, aussi bien dans sa conception et sa réalisation que dans son suivi.

Ce remblai, constitué notamment d'une argile très plastique (IP de 45, classification GTR A₄/F₄), a été conçu dans sa partie inférieure pour répondre aux exigences classiques des remblais de zone inondable (Figure 3). Ceci a conduit à tester deux formulations de traitement dans le remblai :

- 4 % de chaux vive (CaO) seule ;
- 2 % de chaux vive et 3 % de ciment CEM II/A-LL 42,5 N.
- Des essais mécaniques sur ces deux formulations ont été réalisés à différentes échéances (Tableaux 1 à 3).

On notera que seule la formule à 5 % de chaux seule, correspondant à la Partie Supérieure des Terrassements (PST), a fait l'objet d'essais de laboratoire. On ne dispose donc pas de résultats d'essai sur l'argile traitée à 4 % de chaux lors de l'étude de formulation.

argile A3/A4		
limon traité à 1% CaO + 5% ciment		
2% CaO + 3% ciment		5% CaO
2% CaO + 3% ciment		5% CaO
2% CaO + 3% ciment	4% CaO	sans traitement ou ajustement en CaO si nécessaire

Figure 3. Formules de traitement de l'argile dans les différentes zones du remblai expérimental TerDOUEST à Héricourt. De bas en haut : remblai ZI, PST, couche de forme, couche d'assise (Froumentin, 2012).

Tableau 1. Résultats des essais IPI (Indice Portant Immédiat) et CBRi (Indice CBR après immersion) sur l'argile très plastique traitée.

Formule	IPI	CBR	CBRi/IPI
5% CaO	14	18	1,3
2% CaO + 3 % CEM II	15	51	3,4

Tableau 2. Résultats des essais de résistance à la compression simple après 14 jours de cure normale et 14 jours en immersion.

Formule	Rc 14jrs air +14 jrs immersion
5% CaO	0,31 MPa
2% CaO + 3 % CEM II	0,8 MPa

Tableau 3. Résultats des essais de résistance en compression simple Rc à 120 jours et de résistance en traction indirecte Rit à 360 jours.

Formule	Rc 120 jrs	Rit 360 jrs
5% CaO	Non connu	Non connu
2% CaO + 3 % CEM II	1,36 MPa	0,19 MPa

La confrontation de ces résultats avec les exigences du GTS montre que :

- les deux formules présentent un rapport CBRi/IPI supérieur à 1, seuil d'insensibilité à l'eau utilisé pour le traitement des sols en PST et repris par les recommandations finales du projet TerDOUEST pour les remblais en zone inondable (IDRRIM, 2015) ;
- seule la formule chaux-ciment conduit à une valeur de résistance Rc après immersion supérieure à 0,5 MPa, seuil exigé pour les remblaiements de zones difficiles d'accès ;
- la formule chaux-ciment ne présente pas une résistance Rit supérieure à 0,25 MPa, seuil de

résistance au gel des sols traités, même à 360 jours ;

- les résistances R_c et R_{it} de l'argile traitée à la chaux seule ne sont pas connues.

Enfin, la formule de traitement à la chaux seule testée en laboratoire (5 %) porte sur un dosage supérieur au dosage mis en œuvre dans la partie basse du remblai (4%). On peut donc s'attendre à des performances plus faibles que celles de l'étude.

En résumé, les formulations retenues pour la base du remblai TerDOUEST atteignent uniquement les seuils exigés pour démontrer une insensibilité à l'eau mais présentent des performances très éloignées de ce qui serait attendu d'un sol exposé aux intempéries (cycles séchage-humidification et gel-dégel).

3.2.3 Résultats des auscultations menées à long terme.

En 2021, soit une dizaine d'années après la construction du remblai expérimental TerDOUEST, une campagne de sondages et d'essais a été menée dans la partie argileuse du remblai (Chabrat, 2024).

Des essais au pénétromètre statique ont été réalisés depuis la plate-forme dans l'argile traitée, de la couche d'assise jusqu'à la base du remblai (Figure 4), sauf dans l'argile traitée à 4 % où le pénétromètre a essuyé un refus à 3 m de profondeur.

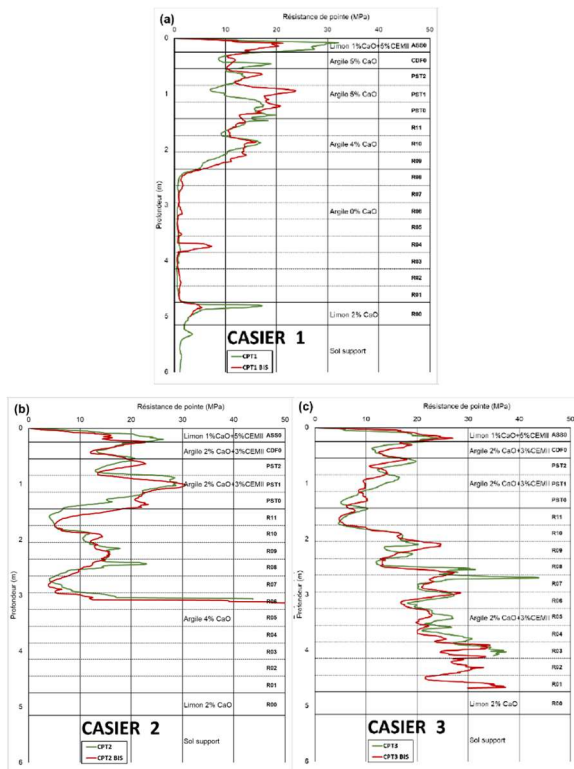


Figure 4. Résultats des essais au pénétromètre statique CPT-U dans les talus du remblai TerDOUEST (Chabrat, 2024).

Les résistances de pointe q_c sont très faibles dans l'argile non traitée (Casier 1) alors qu'elles dépassent respectivement 10 à 20 MPa dans l'argile traitée à la chaux seule (Casier 2) et en traitement mixte chaux-ciment (Casier 3).

En complément, des essais au PANDA (pénétromètre dynamique) ont été réalisés dans les talus du remblai pour observer l'évolution des caractéristiques mécaniques de l'argile traitée avec la profondeur (Figure 5). Une augmentation progressive de la résistance de pointe dynamique q_d est observée avec la profondeur, une valeur de q_d de 10 MPa étant atteinte à partir d'une horizontale moyenne depuis la surface du talus de 55 centimètres dans les zones en argile traitée. Une amélioration notable de la résistance au PANDA est apportée par le traitement en comparant les zones traitées (Casiers 2 et 3) de la zone non traitée (Casier 1) à plus de 3 mètres de profondeur.

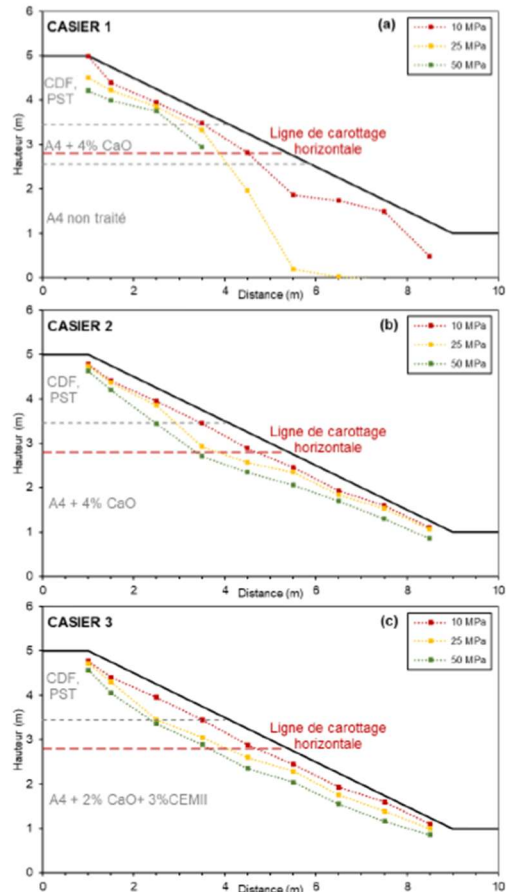


Figure 5. Résultats des essais au pénétromètre dynamique dans les talus du remblai TerDOUEST (Chabrat, 2024).

Enfin, des essais œdométriques ont été réalisés sur des échantillons prélevés par carottage horizontal à 1,8 m de hauteur dans le remblai, c'est-à-dire dans la base du remblai de zone inondable. Des échantillons intacts ont pu être récupérés à différentes distances par

rapport à la surface du talus et soumis à un cycle de chargement/déchargement à l'œdomètre (Figure 6).

Ces résultats montrent que le comportement à l'œdomètre à 30 cm de distance latérale de la surface est très similaire au comportement de l'argile non traitée. A 90 cm et 6,5 m, on trouve un comportement progressivement plus raide, cette raideur augmentant avec la profondeur de l'échantillon dans le remblai. Ce comportement est attribué par l'auteur à une disparition des performances mécaniques du sol traité dans la zone superficielle.

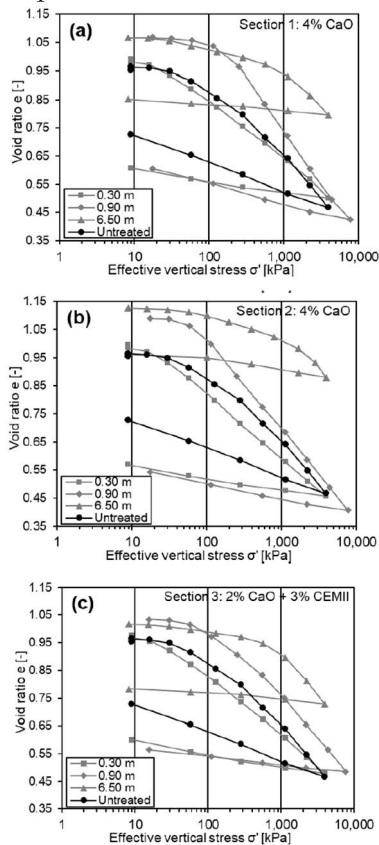


Figure 6. Résultats des essais œdométriques réalisés sur les échantillons prélevés par carottage à différentes profondeurs dans les talus du remblai TerDOUEST (Chabrat, 2024).

3.2.4 Interprétation : objectifs de performance et durabilité.

Les essais réalisés *in situ* ou en laboratoire sur l'argile traitée et non traitée de la base du remblai TerDOUEST font ressortir que les performances apportées par le traitement sont très satisfaisantes à long terme dans les zones où le sol traité est protégé des agents météoriques. Ceci s'est d'ailleurs avéré efficace puisque, bien que la base du remblai ait été soumise à inondation, le remblai n'a subi aucune dégradation.

Les résultats des essais œdométriques font état d'une altération de la partie superficielle du talus de remblai (30 cm), ce qui est cohérent avec les résultats

de l'étude de formulation initiale. En effet, elle montre que les performances du sol traité n'atteignaient pas les seuils exigibles pour ce type d'exposition (par exemple la résistance au gel).

Si l'objectif du traitement avait été d'assurer un maintien des performances du sol traité exposé directement aux agents météoriques, il aurait fallu que l'étude de formulation soit conduite avec d'autres objectifs de performance, beaucoup plus exigeants.

Cette analyse des essais sur le remblai TerDOUEST rappelle qu'une appréciation sur la durabilité du traitement doit être replacée dans son contexte, c'est-à-dire une sollicitation de l'ouvrage et un objectif de performance lui correspondant.

3.3 Exposition des sols traités aux cycles de gel-dégel

L'exposition des sols traités aux cycles de gel-dégel est une problématique opérationnelle rencontrée régulièrement dans des parties d'ouvrages telles que les talus de remblais non revêtus ou lorsque les PST ou couches de forme sont susceptibles de subir un hiver avant d'être recouvertes.

Un cas exemplaire de cette problématique a été rencontré sur un projet de reconstitution de talus raidis en craie traitée dans l'Est de la France (Figure 7). L'intérêt économique du traitement s'est en effet imposé rapidement et a conduit à réaliser une étude de traitement de la craie du site en vue d'assurer la résistance à long terme du talus.

Un dosage de 7 % de liant hydraulique de la craie de classe GTR R₁₂ s'est avéré nécessaire pour atteindre une pente de gonflement inférieure à 0,05 mm/(°C.h)^{1/2}, seuil du critère de non gélivité au sens du GTS (SETRA-LCPC, 2000).



Figure 7. Atelier de traitement de la craie au liant hydraulique routier et de reconstitution du talus.

Malgré cette étude de formulation, le premier hiver, marqué par plusieurs cycles de températures négatives allant jusqu'à -10 °C, a généré des dégradations

superficielles (Figure 8), conduisant à des mesures de réparation provisoire puis finalement à la mise en œuvre d'une protection de la craie traitée par béton projeté.



Figure 8. Illustration de la dégradation du talus soumis à un hiver rigoureux (érosion du talus et chutes de petits débris sur la berme).

Bien que la craie soit connue pour sa sensibilité particulière au gel, cette expérience rejoint d'autres désordres observés sur des couches de forme en sols traités (limons, sables limoneux, ...), laissées non revêtues pendant un hiver et qui présentent au printemps des dégradations superficielles (frange exposée aux intempéries).

La conclusion à tirer de ce retour d'expérience est que l'objectif de non gélivité au sens de la cryosuccion ($R_{it} \geq 0,25$ MPa) ne constitue pas nécessairement un objectif suffisant pour assurer une résistance de long terme à l'exposition directe aux cycles gel-dégel. Des essais complémentaires de gélifraction (application directe de cycles gel-dégel) et des mesures conservatoires de conception peuvent s'avérer nécessaires.

Pour autant, dans certains projets, des mesures conservatoires retenues à la conception de talus raidis en craies traitées ont permis d'assurer des conditions d'exploitation satisfaisantes pour les gestionnaires d'autres projets (par exemple dans la descente du viaduc de Rogerville sur l'A29).

3.4 Exposition des sols traités à l'érosion hydraulique : retours d'expérience sur les barrages américains en matériaux "sol-ciment" des années 1960.

L'expérience américaine en matière de traitement des sols dans les ouvrages hydrauliques est ancienne et apporte des éléments robustes à la question de la durabilité. Elle est décrite de manière très précise dans

le bulletin du Comité Internationale des Grands Barrages n°54 (CIGB, 1986).

La méthode de formulation des matériaux « sol-ciment » dans les barrages américains s'est développée initialement sur la base d'une expérience en vraie grandeur de l'*US Bureau of Reclamation* en 1951 sur la rive Sud du réservoir Bonny dans le Colorado (Figure 9).

Cette digue, construite avec des sols sablonneux traités à 10-12 % en volume (*sic*), fut soumise à « des conditions sévères d'érosion provoquée par les vagues et la glace, avec une moyenne de 140 cycles de gel-dégel par année ».

Les résistances en compression à 28 jours de ces matériaux traités atteignaient 6 à 8 MPa. Des essais sur carottages réalisés 10 ans après la construction ont conduit à des valeurs de 14 à 15 MPa, soit près du double des valeurs à 28 jours.

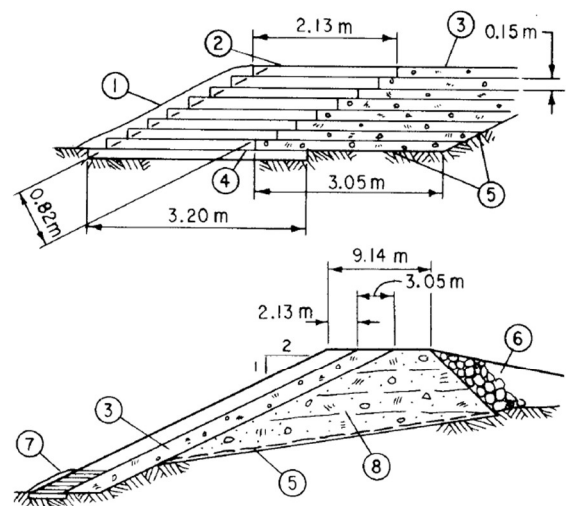


Fig. 1

Coupes types du revêtement de sol-ciment au réservoir Bonny dans la section d'essai
Typical sections of compacted soil-cement facing for Bonny Reservoir test section.

- | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|
| (1) Couverture de terre humide. | (1) Moist earth cover. |
| (2) Couches de sol-ciment terminées. | (2) Completed soil-cement layers. |
| (3) Remblai roulé imperméable. | (3) Rolled impervious embankment. |
| (4) Première couche de sol-ciment. | (4) First soil-cement layer. |
| (5) Terrain naturel. | (5) Original ground surface. |
| (6) Enrochements déversés. | (6) Dumped rock. |
| (7) Voir détail ci-dessus. | (7) See detail above. |
| (8) Remblai compacté. | (8) Compacted fill. |

Figure 9. Coupes types du revêtement de sol-ciment au réservoir Bonny dans la section d'essai (CIGB, 1986).

En 1980, soit près de 29 ans après la construction, « l'érosion en surface était mineure, limitée aux bordures mal compactées des couches et au bas des couches où le processus de mélange produisit une teneur en ciment plus basse que celle spécifiée » (Figure 10).

Ces résultats ont conduit à l'époque le *Bureau of Reclamation* à préconiser des résistances R_c de 4 MPa à 7 jours et 6 MPa à 28 jours comme objectif de performances pour garantir la résistance à long terme des sols-ciment dans leurs barrages. De plus, un

minimum de 10 % de fines a fini par être considéré comme une condition complémentaire nécessaire à cette résistance à long terme.

Outre des préconisations très concrètes pour la conception des barrages en sol-ciment, le bulletin conclut son évaluation globale des ouvrages en sol ciment de la manière suivante, à propos d'un barrage endommagé par de « violentes tempêtes » : « Moins de 100 000 \$ ont été dépensés pour l'entretien des 13 620 m² de protection des talus en sol-ciment de ce barrage vieux de 17 ans. Cela se compare avec l'économie initiale de 700 000 \$ lors des appels d'offres comprenant une protection de sol-ciment à la place d'une protection en perré d'enrochement ».



Fig. 2

Section d'essai du réservoir Bonny, après 29 ans de service, 1980.

Figure 10. Aperçu du talus du barrage après 29 ans de service (CIGB, 1986).

4 CONCLUSIONS

La revue de ces quelques exemples particuliers confirme les plus de 500 retours d'expériences recensés et analysés (Ferber et al., 2025), qui attestent de la pertinence des méthodologies d'études de traitement des sols et de la qualité de centaines des millions de mètres cube d'ouvrages en sols traités réalisés ces dernières décennies. Elle montre que la maturité de ces techniques a fait naître des attentes nouvelles en matière de durabilité, ce qui est de nature à en renforcer encore la maîtrise.

Les discussions sur les cas analysés dans cet article montrent que le choix d'objectifs de performance adaptés et des formules de traitement associées est déterminant pour garantir une maîtrise de la durabilité. L'exemple américain dans les barrages nous rappelle que cette approche n'est pas nouvelle et qu'elle est efficace pour rationaliser la conception. C'est d'ailleurs le principe de l'approche performantielle utilisée dans la formulation des bétons, dont les exigences reposent notamment sur les classes d'exposition.

Ainsi, comme pour tous les matériaux de construction, cette gestion de la durabilité des sols traités repose donc *a minima* sur trois dimensions :

- l'objectif de durée de vie, qui reflète le choix du maître d'ouvrage dans son arbitrage entre montant investi, stratégie d'entretien et échéance pour une éventuelle reconstruction ou maintenance lourde ;
- les sollicitations auxquelles sera soumise la partie d'ouvrage concernée par le traitement de sols, qui ressortent du travail de la conception ;
- l'objectif de performance permettant de résister aux sollicitations envisagées, qui est déterminé soit, de préférence, par les référentiels techniques en vigueur, soit, à défaut, par des retours d'expérience. Cet objectif de performance ciblée doit servir de référence pour les études de formulation.

La question de la durabilité des sols traités n'a donc de sens que si elle est analysée dans cette démarche. Une matrice détaillée a été proposée par le SPTF pour associer à un usage ciblé, les performances à obtenir, les essais à mener et les contrôles à mettre en œuvre (Figure 11).

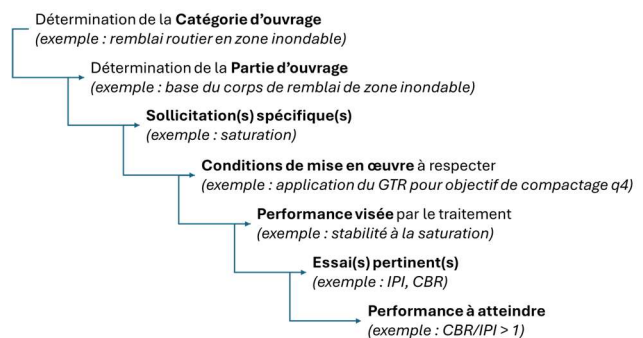


Figure 11. Principe de la matrice Usages/Performance.

Ainsi, la formulation d'un traitement de sols, c'est-à-dire le choix d'une formule de traitement, doit intégrer *a minima* :

- un objectif explicite de performance en lien avec l'usage, l'entretien et les sollicitations visées (résistance mécanique, insensibilité à l'eau, perméabilité,...) ;
- la prise en compte des contraintes de chantier en termes d'hétérogénéité des matériaux et de période de réalisation ;
- une série d'essais appropriés, sur différents mélanges, permettant de faire ressortir les formules répondant aux exigences identifiées.

En conclusion, la durabilité des sols traités peut être maîtrisée en respectant une approche basée sur des objectifs de performances fixés par la conception.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Al Mukhtar, M. and Bouasker, M. (2013). La durabilité des sols argileux traités à la chaux à

- l'épreuve du temps ! *Actes du Séminaire TerDOUEST – Traitement des sols*, 18–19 juin 2013, Marne-la-Vallée, France.
- An, N. (2017). *Numerical investigation of soil-atmosphere interaction : application to embankments of treated soils*, Thèse de l'université Paris-Est, 263 p.
- Berche, V., Jeanjean, P., Rossigny, P., Ferber, V. and Quibel, A. (2009) Réutilisation d'argiles très plastiques en corps de remblais routiers : Expérimentations sur le chantier de l'Autoroute A34 (Charleville-Réthel). *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n°274, pp. 31-46.
- Berche, V., Robert, N., Boussafir, Y. and Ferber, V. (2013). Réutilisation d'argiles très plastiques (A4) en remblai : suivi du comportement après trois ans de réalisation. *Actes du Séminaire TerDOUEST – Traitement des sols*, 18–19 juin 2013, Marne-la-Vallée, France.
- Boutonnier, L., Boussafir, Y., Tourment, R. and Courivaud, J.-R. (2022). Effet du changement climatique sur les mécanismes de retrait-gonflement et la stabilité des digues et barrages. Marseille, *Vingt-septième Congrès des Grands Barrages*, Marseille, France, mai 2022.
- CIGB-ICOLD (1986). *Sol-ciment pour les barrages en remblai*, Commission Internationale des Grands Barrages, Bulletin n°54, avril 1986.
- Chabrat, N., Cuisinier, O., Khatib, M. & Masrouri, F. (2022). Impact des conditions environnementales sur le comportement hydromécanique à long terme de sols traités. *11^e Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur (JNGG 2022)*, INSA Lyon, juin 2022.
- Chabrat, N. (2024). *Impact des conditions environnementales sur le comportement à long terme de sols traités*, thèse Université de Lorraine, 229 p.
- Cuisinier, O., Masrouri, F. and Stoltz, G. (2012). Evaluation de la durabilité des effets du traitement des sols - Influence de sollicitations externes sur le comportement d'un sol traité. Cas des bordures de remblais. *Projet TerDouest - Module B - Rapport final*, 34 p.
- Cuisinier, O. and Masrouri, F. (2020). Impact of wetting/drying cycles on the hydromechanical behaviour of a treated soil. *E-UNSAT 2020: 4th European Conference on Unsaturated Soils, E3SWeb of Conferences*, Vol. 195, Article 06008. Lisbonne, Portugal, 7–9 octobre 2020. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019506008>
- Das, G., Razakamanantsoa, A., Herrier, G. and Deneele, D. (2023). Physicochemical and Microstructural Evaluation in Lime-Treated Silty Soil Exposed to Successive Wetting-Drying Cycles Submitted to Different Testing Conditions. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Issue 35(3). DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004636](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004636)
- DigueELITE (2017). Rapport technique final. Projet de recherche FUI n° 15 – DigueELITE, ISL Ingénierie & partenaires (Irstea, EDF CIH, Lhoist France, Arcor Technologies), 2017.
- Dong, J.-C., Cui, Y.-J. and Tang, A.-M. (2013). Effects of curing time and climate on the stiffness of lime and cement treated soils in the embankment of Hericourt. *Actes du Séminaire TerDOUEST – Traitement des sols*, 18–19 juin 2013, Marne-la-Vallée, France.
- Ferber, V., Boussafir, Y., Hervé, S., Saussaye, L. and Bonne, S. (2025) Traitement des sols dans les ouvrages en terre. La durabilité ne se subit pas, elle se décide. *Revue Générale des Routes et de l'Aménagement*, n°1013, Nov-Dec 2025, pp 46-54.
- Froumentin, M., (2012) Réalisation d'un ouvrage expérimental de référence. Rapport de synthèse des travaux de construction. *Projet TerDouest - Module C - Rapport final*, 134 p.
- Hervé, S., Fraquet, P. and Auriol, J.C. (2011) Retour d'expérience d'une couche de forme traitée sur la LGV Atlantique après 20 ans d'exploitation. *GEORAIL 2011 : Symposium international Géotechnique ferroviaire*, Paris, 19–20 mai 2011, Volume 1. Marne-la-Vallée : IFSTTAR. pp. 431–440.
- IDRRIM (2015) Enseignements de TerDOUEST. Propositions de compléments au Guide Traitement des Sols. Décembre 2015. <https://www.idrrim.com>.
- SETRA-LCPC (2000) *Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Application à la réalisation des remblais et des couches de forme*. (GTS, Réf. Sétra : D9924). Janvier 2000, 240 p.
- Stoltz, G., Cuisinier, O. and Masrouri, F. (2013) Impact de cycles hydriques sur le comportement hydromécanique d'un sol gonflant traité à la chaux. *Actes du Séminaire TerDOUEST – Traitement des sols*, 18–19 juin 2013, Nantes, France.
- Rosone, M., Ferrari, A. and Celauro, C. (2018). On the hydro-mechanical behaviour of a lime-treated embankment during wetting and drying cycles. *Geomechanics for Energy and the Environment*, Volume 14, pp. 48-60. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gete.2017.11.001>
- Wassermann, A. (2023). *Quantification multi-échelles de la dégradation d'un sable traité soumis à des cycles hydriques*, thèse de l'université de Lorraine, 212 p.