

---

# Vulnérabilité et Durabilité des ouvrages de type digue renforcés par la technique des mélanges en place (Soil-Mixing).

Alain Le Kouby<sup>\*1</sup>, Myriam Duc<sup>\*†2</sup>, and Lucile Saussaye<sup>‡3,4</sup>

<sup>1</sup>University Gustave Eiffel – GERS-SRO, F-77454 Marne-la-Vallée – France

<sup>2</sup>Sols, Roches et Ouvrages Géotechniques – Université Gustave Eiffel – France

<sup>3</sup>Centre d'Études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement – CEREMA – France

<sup>4</sup>Equipe de recherche Évaluation Non Destructive des Structures et des Matériaux (ENDSUM) – Ministère de la Transition écologique et solidaire – France

## Résumé

### 1. Contexte

La DREAL Centre Val de Loire (Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement) a pour fonction d'assister la DDT (Direction Départementale des Territoires) dans ses fonctions d'aménagement du territoire et en particulier pour le suivi de l'intégrité des digues de Loire. Lorsque la décision de renforcer une digue pour des problématiques de stabilité ou d'érosion interne, plusieurs techniques de renforcement sont disponibles (voile étanche en coulis de ciment, palplanches...). En 2013, la DREAL a décidé de tester une nouvelle technique de renforcement écoresponsable : la tranchée de sol mixé. La technique, qui repose sur les méthodes de " deep soil mixing " (DSM), consiste à mélanger mécaniquement le sol en place avec de l'eau et un liant hydraulique limitant ainsi l'apport de matériaux sur le chantier ainsi que les déblais. Dans le cadre des travaux de confortement des digues pour assurer leur intégrité jusqu'au niveau de la surverse, cette technique constitue une alternative intéressante aux techniques traditionnelles de renforcement interne. C'est la méthode dite " sèche " qui a été appliquée. Cette dernière consiste à réaliser une prétranchée de 1m de profondeur, de la remplir avec du ciment en poudre et de mélanger le sol, le ciment et l'eau jusqu'à 10m de profondeur à l'aide d'une machine munie d'une longue lame telle que montré au centre de la Figure 1.

Ainsi de grands linéaires peuvent être réalisés en termes de confortement. Cependant ces linéaires sur lesquels est utilisée la technique, sont confrontés à des variations de profil géologique plus ou moins importantes et donc à des variations de sols qui doivent être prises en compte dans les performances escomptées. Selon des études en laboratoire sur une variété de sols constitutifs des digues, le matériau formé présente en effet une durée de prise et des performances variables qui dépendent fortement de la géologie et la minéralogie du sol en place initialement. Ainsi de nombreuses questions se posent encore quant à la faisabilité du procédé pour certains types de sols ainsi que sur la durabilité sur le long terme des

---

\*Intervenant

†Auteur correspondant: myriam.duc@univ-eiffel.fr

‡Auteur correspondant: lucile.saussaye@cerema.fr

caractéristiques mécaniques mais surtout hydrauliques obtenues par les mélanges sol/ciment.

## 2. Objectif

L'objectif de cette présentation est de montrer de quelle manière l'université Gustave Eiffel (IFSTTAR) en étroite collaboration avec le Cerema ont apporté leur expertise dans le domaine du renforcement des sols pour valider le procédé appliqué sur des ouvrages de type digue et pour en évaluer les performances. La méthode DSM a été testée sur les digues de Loire dans la zone d'action de la DREAL Centre-Val de Loire ce qui a conduit à mettre en place une convention pluriannuelle de collaboration, qui s'est inscrit dans la convention UGE/DGPR renouvelée annuellement. Ce travail de longue haleine débuté des 2016 a rassemblé des essais sur site, des instrumentations d'ouvrages avec leur suivi pendant plusieurs années, des essais de laboratoire multi-échelle sur les sols des sites ou des sols recomposés, étude alliant sciences appliquées et sciences fondamentales développées dans le cadre de plusieurs travaux de thèse (Figure 1)

Figure 1 Ensemble des activités de caractérisation et de mesure de la durabilité du matériau soil mixing pour le renforcement des digues

## 3. Méthodologie

La première étape du travail a consisté à effectuer une synthèse des études de cas disponibles dans la littérature scientifique dans le but d'établir une base de données ainsi qu'une méthodologie sur la fabrication des matériaux DSM et leur caractérisation physico-chimique, hydraulique et mécanique. La seconde étape avait pour but d'effectuer une étude expérimentale sur différents sols naturels dans le but d'établir des règles de formulation ainsi que des protocoles à suivre pour caractériser la durabilité du matériau. La troisième étape est la mise en œuvre des formulations et protocoles à suivre pour caractériser la durabilité du matériau pour quelques matériaux naturels ciblés. Quant à la quatrième étape, elle a pour objectif de rédiger des recommandations dont les objectifs sont les caractéristiques et conditions de mise en œuvre de la technique DSM, les procédures pour évaluer la durabilité des matériaux DSM ainsi que les modalités de suivi de chantier

Les chantiers qui ont été suivis concernent le Val d'Orléans, Veuves, Saint Pierre des Corps, et La Ville aux Dames. Grâce à la collaboration entre DREAL et unité de recherche avec le soutien financier de la DGPR, une instrumentation a été installée sur un écran de DSM dans la digue de Montlouis sur Loire dans le but de suivre sur plusieurs années l'évolution de la teneur en eau et de la température dans l'écran et dans le corps de digue. . Dans le corps de digue, des capteurs ont également été installés à 1m de l'écran et à 1m de profondeur afin de suivre l'évolution de la teneur en eau et de la température, ainsi que la succion. L'instrumentation de Montlouis sur Loire a fourni (et continue de fournir) des informations sur les sollicitations environnementales que subit l'ouvrage en service en termes de variation de teneur en eau (humidification, séchage), température. Le suivi a permis de vérifier que l'effet des saisons (entre 2017 et 2021) est resté le même jusqu'en 2021 mais que les fortes chaleurs en 2022-2023 ont accentué les variations de température et de teneur en eau ce qui a augmenté l'amplitude des phases de séchage observés.

## 4. Résultats

Les principaux résultats sont livrables fournis chaque année sont :

- 2016 – Synthèse des études de cas et établissement d'une base de données de propriétés de matériaux établies à partir de mélanges réalisés en laboratoire.
- 2017-2023 : Instrumentation d'une digue à Montlouis sur Loire suivi des mesures dans le but de valider les cycles d'humidification/séchage qui sont utilisées en laboratoire.
- 2017-2020 – Etablissement de protocoles pour caractériser la durabilité du matériau et de l'écran étanche.

- 2020-2023 - Etude en laboratoire sur l'effet des inclusions sur les propriétés des matériaux traités (dans le cadre de la thèse de Amrioui). Synthèse des essais soumis à des cycles d'humidification / séchage.
- 2021-2023 – Etablissement d'un nouveau protocole d'essai pour évaluer la durabilité d'un matériau traité par la technique du Deep soil mixing. Etude de percolation sur des matériaux et étude micro par les analyses PIM et MEB ainsi que de la nanoindentation.
- 2021-2023 – Modélisation numérique de la digue de Montlouis sur Loire sur la période de suivi (2017-2023). Application de différents climats. Prise en compte des modèles porosité/perméabilité développée dans le cadre de la thèse de J. Amrioui dans le logiciel COMSOL (Calcul COMSOL sur les échanges thermiques, suivi de la digue de Montlouis sur Loire).
- Valorisation des travaux de suivi et retours d'expérience sur 10 ans (2013-2023) sous la forme d'articles

Au final, les travaux menés contribuent à une meilleure compréhension des propriétés du matériau soil mixing et à adapter les formulations au sol à traiter. Les travaux portant sur les inclusions de sol montrent que les inclusions doivent être limitées sur chantier (amélioration du mélange en mixant plus longuement, gestion de l'eau introduite dans le mélange) et une méthode simple et rapide applicable sur chantier a été proposée au terme de ces travaux. Les études de durabilité du matériau DSM (quasiment aucune donnée jusqu'à présent) montrent que le matériau se dégrade sous la percolation de l'eau en formant une " peau dégradée " à la surface de la colonne ou de l'écran. Reste à faire le lien entre l'évolution temporelle de la dégradation observée en laboratoire et l'évolution escomptée sur site en utilisant les informations de pluviométrie locale et hydraulique du terrain.

## 5. Conclusion et perspectives

Les résultats de l'étude sur le matériau " Deep Soil Mixing " en collaboration avec le CEREMA Blois ont été transmis à la DREAL Centre ainsi qu'au Ministère de l'Ecologie (DGPR) qui soutient financièrement cette action, puis partagée avec les sociétés qui réalisent les travaux sur site comme Solétanche Bachy et VINCI. Les résultats obtenus montrent que des verrous techniques sont encore à lever afin de valider définitivement la méthode de la tranchée mixée dans le référentiel des méthodes de confortement des digues. Aussi les expérimentations se poursuivent. D'ores et déjà, l'UGE a rédigé une fiche technique relative à cette technique de renforcement dans la partie 2 du guide du CFBR (Comité Français des Barrages et Réservoirs) intitulé " Recueil de méthodes et de techniques de confortement et réparation des digues de protection en remblai " (2021). La référence de la fiche technique est " Sol mixé/mélange en place Deep mixing techniques (FT 3.4) ". La rédaction d'un guide détaillé à l'attention des professionnels à coordonner entre les différentes parties prenantes constitue l'aboutissement de ce travail de collaboration pluriannuelle sur la base de l'expertise acquise grâce aux échanges entre les acteurs agissant autour des digues qui restent des ouvrages de premier plan pour lutter contre les inondations dévastatrices.

## 6. Références

Amrioui, J. (2023). Approche multi-échelle pour l'étude du comportement à long terme des mélanges sol-ciment et effet des inclusions de sol non traité lors du processus de malaxage. Thèse de doctorat de l'Université Paris-Est, 374p.

CFBR (Comité Français des Barrages et Réservoirs) Guide " Recueil de méthodes et de techniques de confortement et réparation des digues de protection en remblai " (2021). fiche technique est " Sol mixé/mélange en place Deep mixing techniques (FT 3.4) "

Guimond-Barrett, A. (2013). Influence of mixing and curing conditions on the characteristics and durability of soils stabilised by deep mixing. Thèse de l'Université du Havre, France.

Le Kouby A., Guimond-Barrett A., Reiffsteck P., Pantet A. (2018). Influence of drying on the stiffness and strength of cement-stabilized soils. Geotechnical and Geological Engi-

neering, 36, 1463-1474.

Takahashi H., Morikawa Y., Uemura T. (2021) Trial tests to promote degradation of cement treated soil by percolation technique. In Proceedings of the Deep Mixing 2021, 15-17 juin 2021, 1041-1049 Andersland OB, Ladanyi B (2004). Frozen Ground Engineering (2 ed.). John Wiley & sons.