

PROJET RUFEX - CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA DURABILITE DU MATERIAU DEEP MIXING

RUFEX PROJECT – CONTRIBUTION TO THE STUDY OF THE DURABILITY OF SOIL MIXING MATERIAL

Alain Le Kouby¹, Antoine Guimond-Barrett², Fabien Szymkiewicz¹, Philippe Reiffsteck¹, Jean François Mosser³, Fabrice Mathieu³

¹ IFSTTAR, 14-20 boulevard Newton, 77447 Champs-sur-Marne - Marne-la-Vallée cedex

² SNCF, Paris, France, ancien docteur à l'IFSTTAR

³ Soletanche Bachy, Paris, France

RÉSUMÉ – Les principaux objectifs de ce papier, qui s'intègre dans le projet de recherche RUFEX, sont de parvenir à une meilleure connaissance des propriétés mécaniques à long terme des matériaux sol-ciment produits *in situ* par Deep Mixing. En particulier, l'objectif est d'évaluer l'impact de certains facteurs susceptibles d'influer sur la durabilité des sols traités.

ABSTRACT – Within RUFEX project, the main objectives of this paper is to reach a better understanding of the long term mechanical properties of soil cement materials made *in situ* with Deep mixing method. In particular, the objective is to evaluate the impact of some factors that can influence the durability of treated soils.

1. Introduction

Les principaux objectifs de ce papier, qui s'intègre dans le projet de recherche RUFEX, sont de parvenir à une meilleure connaissance des propriétés mécaniques à long terme des matériaux sol-ciment produits *in situ* par Deep Mixing. En particulier, l'objectif est d'évaluer l'impact de certains facteurs susceptibles d'influer sur la durabilité des sols traités. La présence de composés chimiques potentiellement perturbateurs (sulfate de calcium, chlorure de sodium et diesel) et les effets du séchage et de l'humidité relative sont les deux mécanismes de dégradation potentiels étudiés afin d'évaluer la durabilité des sols traités. Malgré une certaine dispersion, les résultats de cette étude mettent clairement en évidence les effets de différentes conditions de mélange et de cure sur les caractéristiques des sols traités. Les données accumulées dans ces travaux montrent qu'il est possible de définir, à partir de différents indicateurs, un cadre général pour l'évaluation de la durabilité des sols traités par Deep Mixing (Guimond-Barrett, 2013). La corrélation directe entre certains indicateurs potentiels et les paramètres de mise en oeuvre (tels que le dosage en ciment et la teneur en eau) suggère qu'il est possible d'optimiser les propriétés des matériaux soil-mix dans les limites imposées par les conditions géologiques du site. Des classes de durabilité potentielle basées sur la porosité accessible à l'eau sont proposées pour comparer différents mélanges sol-ciment.

Malgré le développement relativement récent de la technique, de nombreuses études sur le comportement de structures enterrées existantes montrent une augmentation de la résistance à la compression des sols traités à long terme. Une détérioration des matériaux en contact avec le sol environnant, provoquée par la diffusion des ions calcium, a également été observée sur certains ouvrages. Toutefois, cette altération semble être un

processus lent, limitée à de faibles épaisseurs de matériaux comprises entre 10 et 100 mm après 10 à 20 ans, et compensée par le gain de résistance à long terme.

Un grand nombre de facteurs internes et externes aux matériaux doivent être pris en compte pour évaluer la durabilité des sols traités. Ces facteurs sont essentiellement liés :

- aux conditions géologiques (nature et caractéristiques physico-chimiques des sols en place et de l'eau souterraine),
- aux conditions de mélange avec le liant (quantité d'eau, dosage et type de liant, conditions de malaxage et homogénéité du mélange),
- aux conditions de cure et d'exposition à l'environnement extérieur.

Dans cet article, dans un premier temps, une synthèse du guide sur le traitement des sols issu du projet RUFEX et qui traite de la durabilité du matériau Soil mixing est proposée. Notamment, les facteurs internes et externes qui influencent la durabilité sont présentés. Puis, dans un second temps, une étude de cas est présentée sur l'influence des cycles de humidification - séchage sur la réponse d'un matériau traité par Soil mixing.

2. Facteurs internes

2.1. Nature physico-chimique du sol

2.1.1. Granulométrie et plasticité du sol

La nature du sol en place influence la durabilité du matériau traité. La durabilité des sols traités sera d'autant plus élevée que le sol initial est :

- peu plastique / insensible à l'eau,
- de granulométrie continue et étalée (le malaxage permet d'optimiser l'empilement granulaire conduisant à un matériau de compacité élevée).

La porosité et la masse volumique, paramètres indicateurs de durabilité, dépendent principalement de la teneur en eau du mélange sol/liant à l'état frais et de la granulométrie du sol en place.

En général, le traitement de sols argileux plastiques nécessite :

- une quantité d'eau importante pour créer un mélange de consistance fluide à l'état frais,
- une énergie de malaxage élevée pour obtenir un matériau homogène et résistant à l'état durci.

En conséquence, la porosité des argiles traitées est souvent élevée ce qui pénalise la résistance.

Le mélange de sols sableux avec un liant par voie humide requiert un ajout d'eau moins important et une énergie de malaxage plus faible. Les matériaux formés sont généralement moins poreux, plus homogènes et possèdent des caractéristiques mécaniques supérieures à celles obtenues avec des sols fins.

La corrélation directe entre certains indicateurs de durabilité potentielle (porosité, masse volumique, résistance) et les paramètres de mise en œuvre (teneur en eau, énergie de malaxage, dosage en liant) montre qu'il est possible d'optimiser les propriétés des matériaux soil-mix dans les limites imposées par la nature des sols en place.

2.1.2. Teneurs en constituants chimiques perturbateurs

Des constituants chimiques potentiellement néfastes peuvent être présents dans certains sols. Il s'agit entre autres des phosphates, nitrates, chlorures, sulfates et matières organiques.

2.1.3. Phosphates et nitrates

Leur présence dans les sols est relativement rare et résulte principalement des épandages d'engrais dans des régions agricoles. Ils peuvent être retardateurs de prise. Dans certaines conditions, ils ont un effet délétère sur la résistance des sols traités. Cet effet dépend du type de sol, du type de liant et des conditions de cure.

2.1.4. Chlorures

La principale problématique liée à l'exposition aux chlorures est la corrosion des armatures en acier qui peuvent être contenues dans les structures en sols traités.

Il est communément admis que la présence des chlorures ne provoque pas d'expansion ou de fissuration des matériaux à base de ciment. Toutefois, les chlorures interagissent avec les produits d'hydratation. Le chlorure de calcium (CaCl_2) est utilisé en tant qu'accélérateur de prise. Dans certaines conditions, les chlorures participent à la formation de chloro-aluminates.

2.1.5. Sulfates

Les sulfates sont présents dans les sols naturels (sous forme de gypse ou de pyrites) et anthropiques (remblais contenant du plâtre).

L'effet néfaste des sulfates sur les ciments et les bétons est bien connu.

Les sulfates permettent de réguler la prise (ils sont inclus dans la composition de certains ciments). Toutefois, si l'alimentation en sulfates et en eau est suffisante, ils réagissent avec l'aluminium du sol ou du ciment ce qui conduit à la précipitation d'ettringite (espèce cristalline expansive). La formation d'ettringite peut être associée à un gonflement des sols traités et à une diminution des caractéristiques mécaniques.

Les effets des sulfates dépendent de nombreux paramètres : teneur et type de sulfates, type de sol, type de liant, dosage en ciment et conditions de cure.

L'utilisation de ciments résistants aux sulfates (notamment à base de laitier de haut-fourneau ou à faible teneurs en C3A (aluminat tricalcique) et C4AF (alumine ferrite tétracalcique)) et d'additions minérales (cendres silico-alumineuses) permet de réduire les risques de désordre.

2.1.6. Matières organiques

Les sols contenant des matières organiques peuvent être stabilisés par la technique du soil mixing. Cependant, le développement des caractéristiques mécaniques après traitement est souvent considérablement plus faible que pour les sols inorganiques. Les résistances obtenues après traitement sont habituellement de l'ordre de quelques centaines de kilopascal.

2.1.7. Nature physico-chimique de l'eau

L'eau dans les sols traités est un mélange d'eau libre retenue dans le sol et d'eau d'apport (pour un traitement par voie humide).

La présence de certains composés chimiques dans l'eau (principalement les composés cités ci-dessus) peut modifier considérablement les effets du traitement sur les sols.

L'eau d'apport utilisé pour un traitement par voie humide ne doit pas apporter d'éléments chimiques perturbateurs (celle-ci doit être conforme à la norme NF EN 1008).

2.2. Evaluation de l'aptitude au traitement

Compte tenu de l'influence importante de la composition chimique des matériaux, il est conseillé de réaliser une analyse des sols et de l'eau lorsque le contexte hydrogéologique suggère la présence de composés potentiellement délétères pour le traitement. Les teneurs en sulfates et autres éléments potentiellement perturbateurs pourront être comparées aux valeurs limites fixées dans la norme NF EN 206-1 pour les classes d'exposition correspondant aux attaques chimiques des bétons par les sols naturels et eaux souterraines.

3. Facteurs externes

Les facteurs externes aux matériaux concernent les conditions de cure et d'exposition des ouvrages à l'environnement extérieur.

3.1. Immersion

Trois phénomènes sont susceptibles de se produire pour des sols traités immergés en continu :

- le délavage du coulis et la déstabilisation / l'essorage du mélange à l'état frais (notamment dans des horizons perméables),
- la dissolution progressive (lixiviation) des composés hydratés,
- la précipitation de composés plus ou moins nocifs vis-à-vis de la durabilité.

Une perte de liant peut se produire par délavage lorsque les sols traités sont mis en œuvre sous nappe dans des sols perméables. Cette perte se traduit généralement par des caractéristiques mécaniques inférieures à celles attendues pour le dosage en liant considéré.

La lixiviation de composés hydratés peut entraîner une augmentation de la porosité du matériau.

Les conséquences de la précipitation sont différentes en fonction de la nature du composé formé. La précipitation de carbonate de calcium CaCO_3 peut par exemple contribuer à réduire la porosité du matériau et améliorer la durabilité. A l'inverse, la formation d'ettringite liée à un apport continu en sulfates dans l'eau peut générer un gonflement du matériau et une perte de résistance mécanique.

La durabilité vis-à-vis de ces phénomènes de dissolution/précipitation dépend de la compacité et de la perméabilité des sols traités. L'utilisation de ciments contenant des additions consommatrices de chaux (laitier, cendres volantes) permet de réduire les risques de dissolution car la portlandite est le composé qui est le plus soluble.

3.2. Cycles d'humidification-séchage et dessiccation par exposition à l'air

Les cycles d'humidification-séchage et la dessiccation par exposition continue à l'air ont un effet perturbateur sur les propriétés mécaniques des sols traités. La dessiccation peut se produire lors de l'excavation d'ouvrages de soutènement par exemple.

Quelle que soit la nature du sol, on observe :

- une perte de masse par évaporation de l'eau contenue dans le matériau,
- une diminution de la vitesse de développement de la résistance et du module de déformation,
- une carbonatation rapide du matériau,
- dans certains cas, l'apparition de fissuration de retrait.

D'une manière générale, les sols pulvérulents traités résistent mieux au séchage que les sols fins plastiques qui sont sensibles aux variations de la teneur en eau. Une cure prolongée en milieu endogène avant exposition à l'air augmente quelque peu la résistance à la dessiccation.

Même avec des dosages en ciment très élevés, l'évolution de la profondeur carbonatée est bien plus rapide dans les sols traités par soil mixing que dans les bétons. Il convient d'en tenir compte lorsque les travaux de deep soil mixing concernent la réalisation d'un soutènement puisque la carbonatation du matériau conduit à la corrosion des armatures.

Il est à noter que de nombreux essais classiques de durabilité appliqués pour les bétons ne sont pas transposables aux mélanges sol-ciment. Par exemple, l'essai de carbonatation accélérée ne permet pas de caractériser convenablement le comportement de sols traités exposés au dioxyde de carbone.

Dans tous les cas, une protection du matériau doit être mise en œuvre pour les ouvrages en sols traités exposés aux effets du séchage à long terme.

4. Etude de cas - Effet des conditions de cure (cycles de humidification - séchage) sur la rigidité et la résistance des matériaux traités

Dans ce paragraphe, l'influence des conditions de cure sur la réponse des matériaux traités est étudiée.

La procédure ASTM D559 (2005) n'a pas été utilisée car la procédure imposée par la norme ASTM car la température utilisée pour le séchage était de 60°C ; une température qui aurait accéléré l'hydratation du ciment et qui aurait pu modifier les effets des cycles pour les types de matériaux naturels utilisés.

Deux sols ont été testés avec un dosage de ciment défini. Les quantités de ciment et les teneurs en eau utilisées pour ces mélanges sont donnés dans le tableau 1. Le pourcentage de ciment C (%), la teneur en eau W (%) et le ratio E/C ont été calculés à partir des équations 1, 2 and 3.

C = poids de ciment sec sur le poids de sol sec (1)

E = poids de l'eau / poids de sol sec et ciment (2)

E / C = poids de l'eau / poids de ciment sec (3)

Table 1: Composition des mélanges sol-ciment testés.

Mix n°	Type sol	% ciment C (%)	Teneur en eau W (%)	Ratio E/C	Nombre d'éprouvettes
1	Sable	11,8	20	2,0	12
2	Limon	20,7	57	3,3	12

Les teneurs en ciment et en eau testées dans cette étude ont été utilisées dans des projets de Deep soil mixing en France.

Des essais en laboratoire sont utilisés pour déterminer le module de cisaillement G_0 (essai non destructive). L'essai de compression est utilisé pour évaluer la résistance de compression q_u et un module statique E_{50} .

Au total, 24 échantillons (12 par mélange) ont été préparés.

Trois groupes sont placés dans différentes conditions :

- Condition 1: immergés dans l'eau à une température de 20°C.
- Condition 2: échantillons soumis à des cycles d'humidification et de séchage par période alternatives dans une chambre climatique à 20°C et une humidité relative de 65%.
- Condition 3: échantillons placés dans une enceinte climatique à 20°C et une humidité relative de 65%.

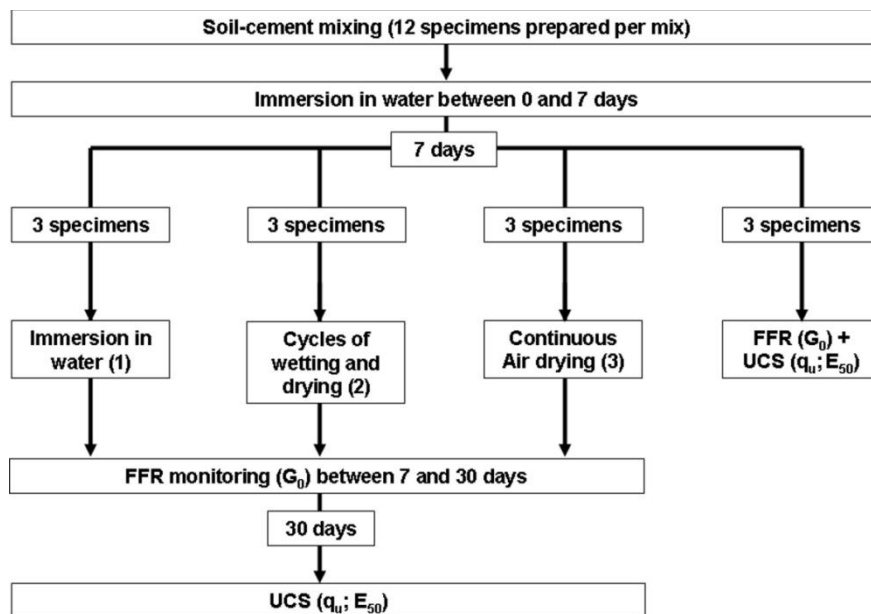


Figure 1. Détails du programme expérimental pour chaque échantillon de sol mélange.

Les résultats sont montrés dans le tableau 2. Les résistances à la compression et les modules E_{50} atteignent les valeurs les plus élevées dans le cas des échantillons immergés. Le cas le plus défavorable est celui de la conservation à l'air. Le cas des cycles de séchage – humidification est intermédiaire de ces deux cas extrêmes et qui doit probablement représenter un cas qui est plus proche de la réalité.

La figure 2 présente les courbes typiques de réponse des matériaux traités aux différentes conditions de cure pour les deux matériaux naturels traités.

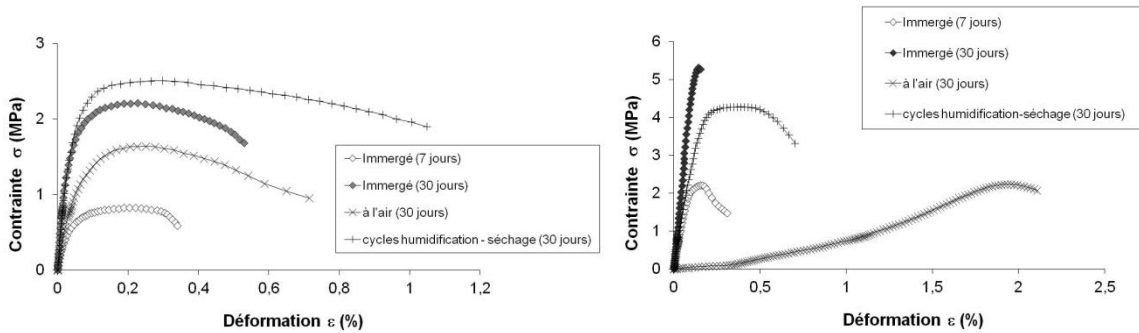


Figure 2. Courbes typiques contraintes - déformations (a) mélange n°1 Sable C=11,8%;
(b) mélange n°2 Limon C=20,7%,

Tableau 2. Valeurs moyennes obtenues pour les essais.

Mélanges sol-ciment	Conditions de cure (durée d'essai)	q_u (MPa)	E_{50} (GPa)	E_{50} / q_u	ε_f (%)
N°1 Sable (C=11,8%)	Immergés (7 jours)	0,82	2,00	2443,46	0,15
	Immergés (30 jours)	2,39	5,51	2305,03	0,24
	Cycles humidification - séchage (30 jours)	2,57	4,33	1685,43	0,34
	Conservation à l'air (30 days)	1,37	2,37	1727,62	0,11
N°2 Limon (C=20,7%)	Immergés (7 days)	2,26	2,66	1177	0,16
	Immergés (30 jours)	5,04	4,53	899,74	0,13
	Cycles humidification - séchage (30 jours)	4,49	3,34	744	0,34
	Conservation à l'air (30 jours)	2,27	0,08	35	2,02

*: valeurs mesurées 18 jours après le moulage

4, Conclusions et perspectives

Dans le cadre du projet RUFEX, une première étude sur la durabilité des matériaux traités a été effectuée dans la thèse de Guimond-Barrett (2013). Les facteurs internes et externes qui influencent le comportement des matériaux traités sur le long terme ont été définis et font l'objet des recommandations du projet RUFEX (Projet RUFEX (b) et (a)).

De plus, dans ce papier, une étude de cas a été effectuée sur la réponse des matériaux traités soumis à des cycles d'humidification – séchage. Les échantillons de limon et de sable traités en laboratoire avec du ciment ont été placés dans trois différentes conditions de cure (immersion dans l'eau, cycles de séchage – humidification, conservation à l'air) après 7 jours. Des différences qualitatives ont pu être observées sur les deux types de matériaux naturels. Le module de cisaillement G_0 a été déterminé par des essais de type Pundit. Les essais de résistance à la compression permettent de déterminer la R_c ainsi qu'un module statique E_{50} .

5, Références bibliographiques

- ASTM. American Society for Testing and Materials (2005). D559-03 Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures.
- GUIMOND-BARRETT, A, (2013), Influence of mixing and curing conditions on the characteristics and durability of soils stabilised by deep mixing, Thèse de doctorat Université Paris Est,
- Projet RUFEX. (a). (2014). Rapports projet FUI RUFEX : Deep Soil Mixing - Guide pour le traitement des sols. 19 pages.
- Projet RUFEX. (b). (2014). Rapports projet FUI RUFEX : Deep Soil Mixing - Recommandations pour l'étude de formulation du mélange. 17 pages.