

PROJET RUFEX – RECOMMANDATIONS POUR L'ETUDE DE LA FORMULATION DU MATERIAU DEEP MIXING

RUFEX PROJECT – RECOMMENDATIONS FOR THE STUDY OF THE DEEP MIXING MATERIAL FORMULATION

Antoine Guimond-Barrett¹, Fabien Szymkiewicz², Alain Le Kouby², Philippe Reiffsteck², Jean-François Mosser³, Fabrice Matthieu³

¹ SNCF, Paris, France

² IFSTTAR, 14-20 boulevard Newton, 77447 Champs-sur-Marne - Marne-la-Vallée cedex

³ Solétanche-Bachy, 280 avenue Napoléon Bonaparte, 92506 Rueil Malmaison

RÉSUMÉ – Cette communication donne des recommandations, établies dans le cadre du projet de recherche RUFEX, pour la réalisation d'études de formulation du matériau Deep Mixing, en complément de la norme NF EN 14 679. Son objectif n'est pas d'interpréter les réglementations et recommandations existantes, mais de préciser certains points concernant l'estimation et la vérification des performances d'un sol traité.

ABSTRACT – This communication provides guidelines, established under the RUFEX research project, for the elaboration of the Deep Mixing material formulation studies, in addition to the standard NF EN 14 679. Its aim is not to interpret existing regulations and recommendations, but to clarify certain points regarding the estimation and verification of performance of a treated soil.

1. Objectifs

Le Deep Soil Mixing est une technique permettant d'améliorer les caractéristiques mécaniques ou hydrauliques d'un sol en le malaxant avec un liant hydraulique. Cette opération de malaxage s'effectue in situ. Cette technique est applicable de manière courante pour une large gamme de sols, allant des sables et graviers denses jusqu'aux argiles molles et ce quel que soit leur degré de saturation mais doit faire l'objet d'études spécifiques détaillées.

La technique du Deep Soil Mixing peut être subdivisée en deux méthodes : sèche et humide.

La technique du Deep Soil Mixing peut être utilisée pour plusieurs types d'applications :

- Amélioration des caractéristiques mécaniques du sol, par la construction de colonnes ou de panneaux permettant d'assurer des fonctions de reprise de charges verticales, de reprise d'efforts de cisaillement ou encore de limitation de tassements. Des fonctions de soutènement peuvent également être assurées, dans certains cas ;
- Amélioration des caractéristiques hydrauliques des sols ou des ouvrages géotechniques, par exemple par construction d'écrans de faible perméabilité constitués de sol traité en place ;
- Traitement in situ des zones contaminées ou polluées.

Cette communication, issue des travaux entrepris au sein du Projet RUFEX, traite spécifiquement des techniques de traitement visant à améliorer les caractéristiques mécaniques ou hydrauliques des sols en place, qu'ils soient pollués ou non. Le sujet du traitement des sols en vue d'une décontamination ou d'un confinement de la pollution n'est pas abordé.

Pour évaluer la faisabilité du traitement, il est systématiquement nécessaire de procéder à des essais préliminaires en laboratoire. Ce document résume les recommandations pour la réalisation de ces études de formulation des mélanges sol-liant, telle que décrite dans RUFEX (2014).

2. Données géotechniques nécessaires

2.1. Caractéristiques géotechniques à considérer

L'utilisation des sols en tant que matériaux constitutifs des ouvrages exécutés par la technique du Soil Mixing implique une bonne connaissance des conditions géologiques et géotechniques des sites. Cette connaissance est obtenue à l'aide d'investigations géotechniques préliminaires adaptées au procédé.

Les investigations géotechniques doivent permettre entre autres :

- de caractériser géométriquement et physiquement les différentes couches des sols en place,
- d'identifier le(s) niveau(x) des eaux souterraines,
- d'obtenir des échantillons de sols de chacune des couches traitées pour la réalisation d'une étude de formulation en laboratoire.

Le rapport de sols doit contenir les informations permettant la classification des sols suivant la norme NF P 11-300 (1992) :

- la teneur en eau massique des différentes couches de terrain (ISO/TS 17892-1),
- la répartition granulométrique (ISO/TS 17892-4),
- les limites d'Atterberg (ISO/TS 17892-12) (et plus particulièrement la limite de liquidité (Szymkiewicz et al., 2013)) ou les valeurs au bleu VBS (NF P94-068),
- les informations sur la compacité (par exemple la masse volumique suivant la norme ISO/TS 17892-2).

La connaissance de ces informations est importante pour la détermination des quantités d'eau et de liant à incorporer notamment.

La réalisation d'essais de formulation en laboratoire nécessite d'avoir des échantillons représentatifs des sols en place. En particulier, les prélèvements doivent concerner séparément toutes les couches impactées par le traitement. Ces échantillons peuvent être intacts ou remaniés.

Les échantillons de terrain doivent être :

- extraits dans l'emprise du projet (et identifiés par emplacement de prélèvement) ;
- représentatifs des couches de terrain à traiter ou à défaut de la couche définie pour l'étude ;
- conditionnés après prélèvement dans des sacs ou récipients étanches et conservés de manière à garder intactes les conditions hydriques du sol.

2.2. Présence de polluants

Les sols de nombreux sites ayant accueilli par le passé des activités industrielles sont potentiellement contaminés par une grande variété de polluants (hydrocarbures, composés organiques volatils, métaux lourds ...). L'influence sur les caractéristiques des sols après traitement est différente si les polluants sont intégrés directement aux mélanges ou si la pollution affecte les sols traités après la mise en œuvre.

Compte tenu du nombre considérable de polluants, une reconnaissance de sols poussée avec des analyses chimiques des sols et des eaux souterraines est nécessaire lorsque le contexte suggère la présence d'une pollution sur un site.

Une étude spécifique du traitement en laboratoire s'impose pour chaque cas particulier.

L'agressivité des sols et des eaux souterraines peut être évaluée par rapport aux valeurs limites définies dans la norme NF EN 206-1 (2004) pour les classes d'exposition correspondant aux attaques chimiques sur les bétons.

3. Etudes de formulation en laboratoire

La réalisation d'une étude de formulation est impérative dès lors qu'il existe un doute soit sur le déroulement de la prise du mélange sol-liant, soit sur sa durabilité. Cette recommandation s'applique notamment dès que l'on est amené à traiter des sols :

- partiellement ou totalement contaminés (hydrocarbures, sulfates, chlorures, nitrates, COV...),
- contenant de la matière organique (limon ou argile organique, tourbes),
- en présence de conditions salines (eau de mer..).

Une étude de formulation est également nécessaire si le degré d'exigence en termes de caractéristiques du matériau sol-ciment est très élevé. Par exemple, si on recherche une résistance à la compression spécifique à un âge donné ou encore une perméabilité très basse ($k < 10^{-8}$ m/s).

L'étude de formulation peut être facultative si l'entreprise peut justifier de suffisamment d'expérience dans le même type de sols avec la même méthode de traitement, avec le même liant.

Il est impossible de reproduire en laboratoire une technique de malaxage in situ (Terashi 1997 ; Larsson 2005). La cinématique de malaxage et les conditions de cure sont en effet très difficiles à simuler, et reproduire les deux en même temps en laboratoire serait trop coûteux, surtout qu'il existe de nombreuses techniques et outils différents.

La réalisation de l'étude de formulation permet d'appréhender les effets et la compatibilité de différents liants avec le sol à traiter et d'estimer les indices d'incorporation pour atteindre le niveau de performance requis pour le projet.

Une étude de formulation consiste à :

- déterminer un dosage préliminaire correspondant à une formule choisie a priori d'après l'expérience, sans étude de laboratoire spécifique ;
- ou à étudier en laboratoire les variations des performances mécaniques et/ou hydrauliques du sol traité en fonction du dosage en liant hydraulique. Ce type d'étude est réalisé en l'absence d'expériences dans des conditions géotechniques et géologiques similaires. Pour ce faire, il y a lieu de retenir au minimum deux valeurs de dosage encadrant un dosage préliminaire jugé le plus pertinent a priori ;
- dans certain cas, une étude de l'incidence des dispersions d'exécution sur les performances mécaniques du sol traité est nécessaire. Dans ce cas, des éprouvettes spécifiques sont confectionnées suivant les modalités supposées reproduire les dispersions d'exécution généralement observées sur les chantiers. Ces éprouvettes sont ensuite soumises aux essais de caractérisation utilisés pour déterminer leurs performances mécanique et/ou hydraulique.

Les résultats de ces études permettent de retenir un dosage minimal et le cas échéant de déterminer le surdosage permettant de compenser les dispersions d'exécution.

Il existe de nombreuses méthodes plus ou moins similaires pour la préparation d'éprouvettes de sol traité en laboratoire. Ces différentes méthodes ont été recensées par Terashi et Kitazume (2009).

Le protocole proposé ci-dessous s'inspire de ces protocoles et résulte des travaux menés par Szymkiewicz (2011) et Guimond-Barrett (2013) dans le cadre du projet RUFEX (2010-2014).

3.1. Matériaux

3.1.1. Sols

Les essais de laboratoire sont réalisés avec un ou plusieurs échantillons de sol prélevés sur le site du projet. Une fois arrivé au laboratoire, l'échantillon de terrain doit être analysé.

Puis il doit être préparé : on sélectionne les échantillons adéquats pour l'essai en visant à obtenir le sol le plus représentatif possible. Souvent, il s'agit soit de la couche de sol pouvant poser le plus de problèmes potentiels ou soit de la couche de sol la plus dimensionnante pour le projet.

Le matériau est homogénéisé et éventuellement écrêté de manière à être compatible avec les moyens de malaxage utilisés et la dimension des éprouvettes choisies.

3.1.2. Liants

Le choix du liant dépend de la nature des terrains à traiter et des caractéristiques visées. Généralement, la méthode du Deep Mixing est compatible avec de nombreux liants comme les ciments, la chaux, le laitier, les cendres volantes ou les pouzzolanes.

Pour choisir le type de liant, on peut s'appuyer par exemple sur le tableau du SETRA / LCPC (2000) qui donne l'adéquation des ciments courants avec différents sols désignés conformément à la classification de la norme NF P 11-300 (1992).

Le guide EuroSoilStab (2002) donne également quelques indications sur le choix du liant en fonction de la teneur en matière organique présente dans le sol.

Lors des essais laboratoire, le type de liant utilisé ainsi que sa provenance (usine de fabrication) doivent être identiques à ceux qui seront utilisés pendant l'exécution.

Le dosage en liant (indice d'incorporation) est à définir en fonction de l'objectif visé, des conditions hydriques et de la nature du sol à traiter.

3.1.3. Eau

L'eau utilisée pour les mélanges en laboratoire doit être similaire à celle disponible sur chantier. Il peut s'agir d'eau du réseau ou d'une autre provenance, comme par exemple de l'eau pompée dans une rivière, un étang ou un lac. Dans ce cas, il faut réaliser une analyse chimique préliminaire avant utilisation sur site. Sur chantier, des précautions doivent être prises pour maintenir l'eau de gâchage à une température correcte (ni trop froide en hiver, ni trop chaude en été).

3.2. Matériels

3.2.1 Malaxeurs

Les mélanges sont réalisés à l'aide d'un malaxeur à mortier d'une capacité suffisante pour mélanger un lot de sol avec le ou les liants considérés (5 litres minimum).

3.2.2 Moules

En général, les éprouvettes sont confectionnées dans des moules cylindriques, d'élanement égal à 2 de préférence. Si ce n'est pas le cas, il faut respecter les règles de correction indiquées dans la norme ASTM C 42-90 (1992).

Le diamètre minimal des moules est fonction du D_{\max} du sol à traiter. On admet en général que le diamètre intérieur des moules doit être au moins 6 fois plus grand que la taille du plus gros grain.

3.3. Protocoles de préparation et de conservation du mélange

Les quantités de sol, de liant et d'eau nécessaires sont préalablement calculées à partir de la masse volumique sèche du sol à traiter et de l'indice d'incorporation visé. Les masses requises pour chaque constituant sont pesées.

3.3.1. Préparation du liant

Le protocole de préparation du mélange sol-liant en laboratoire doit, si possible, se rapprocher au mieux de la méthode d'incorporation utilisée sur chantier.

Pour reproduire un traitement en voie sèche, le liant sec (sous forme de poudre) est directement ajouté au sol.

Pour un traitement en voie sèche modifiée, on pourra incorporer séparément le liant et l'eau ; tandis que pour un traitement en voie humide, on incorporera plutôt un coulis.

Lorsqu'un mélange de différents liants est utilisé, ceux-ci sont mélangés dans les proportions requises avant d'être ajoutés au sol.

Pour une simulation de traitement par voie humide, le coulis est préparé indépendamment puis mélangé avec le sol. On utilise un malaxeur à turbine haute turbulence, avec un temps de malaxage suffisant. Le coulis est caractérisé par le rapport C/E : la masse de ciment sec divisé par la masse d'eau.

La densité du coulis doit être mesurée à la balance Baroïd. La viscosité Marsh du coulis est mesurée à l'aide d'un cône normalisé.

3.3.2. Procédure de réalisation du mélange

Le sol puis le liant (sous forme sèche ou humide) sont placés dans le malaxeur et mélangés jusqu'à l'obtention d'un matériau visuellement homogène afin de limiter la dispersion des résultats finaux. En général, un temps de malaxage de 10 minutes est suffisant.

3.3.3. Confection et conservations des éprouvettes

Le mélange sol-liant fluide est ensuite coulé dans des moules en 3 couches successives à l'aide d'une main écope.

Après la mise en place de chaque couche, le matériau est piqué avec une tige en acier ainsi que vibré manuellement en tapant légèrement le moule contre une surface horizontale. La combinaison de ces 2 méthodes assure en effet les meilleurs résultats ((Kitazume et Nishimura, 2009) et (Marzano et al., 2009)). La réalisation du mélange et des éprouvettes doit être complétée en moins de 30 minutes. Les éprouvettes sont remplies jusqu'en haut, puis refermées, identifiées et stockées au laboratoire dans des conditions thermiques et hydriques constantes.

4. Etude / Validation de la formulation en place

Il est nécessaire en phase préliminaire d'exécution d'étudier convenablement le comportement du matériau en place afin de valider et/ou d'ajuster le dosage retenu suite à l'étude de formulation.

4.1. Réalisation

Lors de la réalisation d'ouvrages en sols traités par Deep Mixing, il est indispensable de mesurer et contrôler les paramètres opératoires sur la machine : en effet, les paramètres

d'exécution permettent d'obtenir une estimation des quantités de ciment et d'eau réellement incorporées.

Des essais de laboratoire sont réalisés pour contrôler les caractéristiques des sols traités in situ. Sur chantier, les résultats obtenus sur éprouvettes dépendent fortement des caractéristiques du sol en place à l'endroit où est effectuée la mesure. Suivant la nature du sol (plus ou moins sableux, limoneux ou argileux), sa teneur en eau naturelle, son degré de saturation et sa courbe granulométrique, la résistance à la compression du matériau peut varier de manière significative, en atteignant un certain degré de dispersion.

4.2. Prélèvements

Les essais de laboratoire sont effectués sur des éprouvettes prélevées sur chantier dans le matériau à l'état frais ou par carottage à l'état durci.

Les échantillons sont prélevés à l'état frais (« wet-grab ») immédiatement après l'exécution du traitement. Un dispositif d'échantillonnage est utilisé pour extraire le mélange sol-liant à la profondeur visée. Le matériau frais est généralement versé dans des moules cylindriques suivant une procédure identique à celle décrite au paragraphe 3.3.3. Les éprouvettes sont conservées à température constante (généralement 20°C) dans l'eau ou dans une chambre humide à l'abri de la lumière.

Le prélèvement des rejets remontés en surface (spoil) lors du malaxage ne permet pas d'obtenir d'échantillons représentatifs du matériau constituant le massif de sol traité. De même, le prélèvement d'échantillons à l'état frais à faible profondeur n'est pas conseillé.

5. Détermination des caractéristiques mécaniques et hydrauliques du matériau

5.1. Résistances à la compression simple et à la traction par fendage

La résistance à la compression simple q_u est déterminée conformément à la norme EN 13286-41 (AFNOR 2003). Les essais de résistance à la traction par fendage q_{ut} doivent être réalisés suivant la norme EN 13286-42 (AFNOR, 2003).

5.2. Module de déformation statique

Le dispositif expérimental requis pour déterminer le module de déformation statique est décrit dans la norme EN 13286-43 (2003). Les déformations longitudinales de la partie centrale des éprouvettes sont mesurées localement à l'aide de capteurs ou jauges de déformation. Le module utilisé pour le dimensionnement d'ouvrages en Soil Mixing est le module sécant E_{50} .

5.3. Caractéristiques mesurables avec un appareil triaxial et avec un appareil triaxial cyclique

Pour les sols, il existe trois principaux types d'essais (NF P94-070) :

- non consolidé non drainé (UU),
- consolidé non drainé avec mesures de la pression interstitielle u (CU+u),
- consolidé drainé (CD).

Les essais UU permettent de mesurer des caractéristiques qui décrivent le comportement mécanique à court terme des sols traités ($C_u - \varphi_u - E_u$) tandis que les essais CD permettent de déterminer des paramètres liés au comportement à long terme ($c' - \varphi' - E'$). L'interprétation des essais CU+u en contraintes totales et effectives permet d'obtenir les deux types de caractéristiques (court et long terme).

Deux types d'essais peuvent être effectués à l'aide d'un appareil triaxial cyclique (NF EN 13286-7) :

- essai CCP : la contrainte axiale est cyclique sous une pression de confinement constante,
- essai VCP : la contrainte axiale et la pression de confinement sont cycliques.

Les études de matériaux sous charges cycliques portent sur le comportement réversible et sur les déformations permanentes.

5.4. Perméabilité et porosité

La perméabilité k en m/s des échantillons est déterminée en se basant sur la loi de Darcy.

La porosité accessible n à l'eau est obtenue par pesage hydrostatique après saturation sous vide pendant 24 heures et par la mesure de la perte d'eau après séchage de l'échantillon dans une étuve à 105°C.

5.5. Mesures de vitesses de propagation d'onde

Les modules dynamiques de compression E_0 et de cisaillement G_0 sont obtenus à partir de mesures des vitesses de propagation des ondes de compression V_p et de cisaillement V_s au travers des échantillons.

6. Discussion et perspectives

Ces recommandations non contraignantes doivent être vues comme un guide de bonne conduite à suivre lors de tout chantier de Soil-Mixing, afin d'approfondir la connaissance du matériau et de la méthode, notamment en matière de pollution et de durabilité. Les perspectives du projet RUFEX sont l'élaboration de formulations de mélanges pour un grand nombre de type de matériaux naturels et la rédaction de guides techniques sur le renforcement par mélanges en place.

7. Références bibliographiques

- AFNOR. (1992). NF P 11-300. Exécution des terrassements Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.
- AFNOR. (1994). NF P94-070 Sols: reconnaissance et essais - Essais à l'appareil triaxial de révolution Généralités – Définitions.
- AFNOR. (1998). NF P94-068 Soils: investigation and testing. Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux. Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tâche.
- AFNOR. (1999). NF P94-100 Sols : reconnaissance et essais - Matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Essai d'évaluation de l'aptitude d'un sol au traitement.
- AFNOR. (2001). NF EN 197-1 - Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.
- AFNOR. (2003). NF EN 13286-41: Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 41 : méthode d'essai pour la détermination de la résistance à la compression des mélanges traités aux liants hydrauliques.
- AFNOR. (2003). NF EN 13286-42: Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 42 : méthode d'essai pour la détermination de la résistance à traction indirecte des mélanges traités aux liants hydrauliques.

- AFNOR. (2003). EN 13286-43: Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 43 : méthode d'essai pour la détermination du module d'élasticité des mélanges traités aux liants hydrauliques.
- AFNOR. (2004). NF EN 13286-7. Mélanges avec ou sans liant hydraulique - Partie 7 : essai triaxial sous charge cyclique pour mélanges sans liant hydraulique.
- AFNOR. (2004). NF EN 206-1 Béton - Partie 1 : spécification, performances, production et conformité.
- AFNOR. (2005). NF EN 14679 :2005-09 Exécution de travaux géotechniques spéciaux – Colonnes de sol traité.
- ASTM. (1992). C 42-90. Standard test method for obtaining and testing drilled cores and sawed beams of concrete, ASTM, U.S.A.
- European-Standard 2005. Execution of special geotechnical works - Deep Mixing. European Committee for Standardization (CEN) Brussels. Standard. NF EN 14679
- EuroSoilStab. (2002). Development of Design and Construction Methods to Stabilise Soft Organic Soils. Design Guide Soft Soil Stabilisation. European Commission, 95 pages.
- 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.
- ISO/TS 17892-2 (2004). Reconnaissance et essais géotechniques -- Essais de laboratoire sur les sols -- Partie 2: Détermination de la masse volumique d'un sol fin.
- ISO/TS 17892-1 (2005). Reconnaissance et essais géotechniques -- Essais de laboratoire sur les sols -- Partie 1: Détermination de la teneur en eau.
- ISO/TS 17892-4 (2005). Reconnaissance et essais géotechniques -- Essais de laboratoire sur les sols -- Partie 4: Détermination de la granulométrie.
- ISO/TS 17892-12 (2005). Reconnaissance et essais géotechniques -- Essais de laboratoire sur les sols -- Partie 12: Détermination des limites d'Atterberg.
- Kitazume, M. and S. Nishimura (2009). Influence of specimen preparation and curing conditions on unconfined compression behaviour of cement-treated clay. Deep Mixing'09, Okinawa.
- Larsson, S. (2005). State of Practice Report – Execution, monitoring and quality control. Deep Mixing '05, Stockholm, Sweden, 732-786.
- Marzano, I. P., A. Al-Tabbaa and M. Grisolia (2009). Influence of sample preparation on the strength of cement-stabilised clays. Deep Mixing'09, Okinawa.
- RUFEX (2014). Deep Soil Mixing : Recommandations pour l'étude de formulation du mélange, 17 pages (non encore publié)
- SETRA / LCPC. (2000). Guide Technique Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Application en remblais et couches de forme.
- Szymkiewicz, F. (2011). Evaluation des propriétés mécaniques du matériau Soil-Mixing. Thèse de doctorat Université Paris-Est.
- Szymkiewicz, F., Tamga, F-S., Le Kouby, A. & Reiffsteck, P. (2013), Optimization of the strength and homogeneity of the deep mixing material by mean of the determination of the workability limit and optimum water content, Canadian Geotechnical Journal 50, 1034-1043.
- Terashi, M. (1997). Theme lecture: Deep mixing method - Brief state of the art. 14th ICSMFE, Hamburg, 2475-2478.
- Terashi, M., & Kitazume, M. (2009). Keynote lecture : Current Practice and future perspective of QA/QC for Deep-Mixed ground. Proceedings of the International Symposium on Deep Mixing and Admixture Stabilisation, May 19-21, Okinawa.