

## **Influence des conditions de mélange et de cure sur les caractéristiques de sols traités au ciment par soil mixing**

**Antoine Guimond-Barrett<sup>1\*,2</sup> - Anne Pantet<sup>2</sup> - Philippe Reiffsteck<sup>1</sup>  
- Fabien Szymkiewicz<sup>1,3</sup> - Jean-François Mosser<sup>3</sup> - Alain Lekouby<sup>1</sup>**

*1 IFSTTAR 58, boulevard Lefebvre 75732 Paris cedex 15*

*2 LOMC Université du Havre, 53 rue de Prony - BP 540 - 76058 Le Havre Cedex*

*3 SOLETANCHE BACHY 133, Bd National BP 90250 92504 RUEIL MALMAISON*

*[\\*antoine.guimond-barrett@ifsttar.fr](mailto:antoine.guimond-barrett@ifsttar.fr)*

### **RÉSUMÉ.**

*Cet article présente les résultats d'essais réalisés dans le cadre du projet RUFEX pour étudier l'influence des conditions de mélange et de cure sur la résistance à la compression simple de sols traités au ciment en laboratoire. Les résultats obtenus démontrent que l'utilisation de protocoles différents pour la réalisation des mélanges sol - ciment peut entraîner une dispersion importante des résistances à la compression simple. Dans certaines conditions, cette dispersion peut être supérieure aux variations liées à des teneurs en ciment différentes. Des mesures de teneurs en eau indiquent que le protocole de mélange peut influencer le processus d'hydratation du ciment. Les résistances à la compression des sols traités au ciment varient en fonction des conditions de cure. Ces variations dépendent du type de sol et du temps de cure. Les résistances caractéristiques déterminées à partir de sols traités en laboratoire doivent donc être associées à un protocole de malaxage spécifique et à des conditions de cure adaptées aux conditions réelles des ouvrages considérés.*

### **ABSTRACT.**

*This paper presents the results obtained from tests carried out as part of the RUFEX project to study the influence of different mixing methods and curing conditions on the unconfined compression strength of cement-stabilized soils in the laboratory. The results demonstrate that different mixing methods can produce significant variations in compression strength. Under certain conditions, the variations can be greater than those obtained by different cement contents. Moisture content measurements indicate that the mixing method can affect the cement hydration process. The compressive strength of cement-treated soils varies depending on the curing conditions. These variations depend on soil type and curing time. Design strengths based on soils stabilized in the laboratory must be combined with a specific mixing method and curing conditions similar to those in situ.*

*MOTS-CLÉS : soil mixing, sable, limon, ciment, résistance, cure, malaxage.*  
*KEY WORDS : soil mixing, sand, silt, cement, strength, curing, mixing.*

## **Influence des conditions de mélange et de cure**

### **1.Introduction**

Exploité au Japon et dans les pays scandinaves depuis les années 1960, le soil mixing avait pour objectif principal d'améliorer les caractéristiques mécaniques de sols compressibles et organiques à fortes teneurs en eau (Holm, 2000). Des colonnes de chaux/ciment étaient réalisées en mélangeant le sol en place avec un liant hydraulique à l'état sec (injecté à faible pression) à l'aide d'un outil de malaxage qui avait préalablement déstructuré le sol. En Europe, le développement du soil mixing est plus récent. Les techniques de soil mixing utilisées sont adaptées aux conditions géologiques locales et aux contraintes liées aux ouvrages à construire (Massarsch *et al.*, 2005 ; Ganne *et al.*, 2009). Les caractéristiques du matériau sol – ciment dépendent de l'interaction d'un grand nombre de facteurs : caractéristiques du sol et du liant, conditions de malaxage et de cure (Terashi, 1997). La stabilité interne des ouvrages en soil mixing est généralement évaluée à partir de résistances caractéristiques déterminées par des essais de compression simple réalisés sur des éprouvettes de sols traités in situ ou en laboratoire (Porbaha, 2000b).

Le projet RUFEX (Renforcement et réutilisation des plateformes ferroviaires et des fondations existantes) s'intéresse plus particulièrement à l'application du procédé soil mixing dans le cadre du renforcement des plateformes ferroviaires et de la réutilisation de fondations existantes. Les contextes géologiques associés à ce type d'ouvrages sont souvent des sols naturels (sols limono-sableux alluvionnaires, éoliens ou roches très altérées) ou des remblais hétérogènes, évolutifs et pollués. Cet article présente les résultats d'essais préliminaires réalisés dans le cadre de ce projet pour étudier l'influence des conditions de malaxage et de cure sur la résistance à la compression simple de sols traités au ciment en laboratoire.

### **2. Matériels et méthodes**

Afin d'étudier les liens qui existent entre la méthode de préparation, le dosage, les conditions de cure et les caractéristiques mécaniques des sols traités au ciment, plusieurs protocoles de mélange ont été suivis en laboratoire et les éprouvettes de sols traités ont été soumises à des conditions de cure variables. Les sols utilisés dans cette étude sont le limon de Jossigny et le sable de Fontainebleau (notés respectivement LJ et SF). Ce sont les mêmes matériaux que ceux utilisés par Le Runigo (2008) et Szymkiewicz *et al.* (2010). Le ciment utilisé est un CEMIII/C 32,5 N CE PM-ES NF HRC de Calcia.

## 2.1. Protocoles de réalisation des mélanges sol - ciment

Il existe de nombreux protocoles de préparation d'éprouvettes de sols traités en laboratoire (Terashi *et al.*, 2009). Pour étudier l'influence du dosage et de la méthode de préparation sur les caractéristiques mécaniques du limon de Jossigny traité au ciment, six protocoles de mélange limon / CEMIII ont été suivis en laboratoire avec des dosages correspondant au traitement de sols in situ par soil mixing (tableau 1). Les dosages en ciment (en kg/m<sup>3</sup>) correspondent à la masse de ciment par mètre cube de sol. Le C/E est le rapport entre la masse de ciment sec et la masse d'eau dans le mélange. Un malaxeur à pale a été utilisé pour tous les mélanges. Pour les protocoles n°1, 2 et 3 (tableau 1), les quantités de sol sec et de liant nécessaires aux dosages considérés ont été placées dans le récipient du malaxeur et homogénéisées manuellement à sec. Une fois un mélange visuellement homogène obtenu, la quantité d'eau correspondant à la teneur en eau initiale souhaitée a été ajoutée. Le malaxeur a ensuite été mis en marche à une vitesse de 62 tours / minute. Le temps de malaxage était de 10 minutes.

n°	Nom	Sol	Dosage en ciment (kg/m <sup>3</sup> )	Wn initiale (%)	C/E	Préparation du mélange	Temps de Malaxage (Minutes)	Temps et conditions de Cure (jours)
1	Joss C320 W48	LJ*	320	48	0,35	sol sec + ciment, puis eau	10	120 (A)
2	Joss C265 W40	LJ*	265	40	0,36	sol sec+ ciment, puis eau	10	28 (A)
3	Joss C210 W39.5	LJ*	210	39,5	0,29	sol sec+ ciment, puis eau	10	60 (A, B, C, D)
4	Joss C320 W48 1 min	LJ*	320	48	0,35	sol sec+ ciment, puis eau	1	60 (A)
5	Joss C320 W48 coulis	LJ*	320	48	0,35	sol sec + coulis (C/E = 0,35)	10	90 (A)
6	Joss C320 W48 coulis 4h	LJ*	320	48	0,35	sol sec+ coulis (C/E = 0,35) préparé 4h avant ajout au sol	10	28 (A)
7	Font C265 W18	SF**	265	18	0,73	sol sec+ ciment, puis eau	10	60 (A, B, C, D)

LJ\* : Limonde Jossigny ; SF\*\* : Sable de Fontainebleau

**Tableau 1.** Protocoles de préparation des mélanges sol - ciment en laboratoire.

Le mélange n°4 a été réalisé suivant un protocole identique à celui décrit pour les mélanges n°1 à 3 mais le temps de malaxage a été réduit à une minute. Pour les mélanges n°5 et 6, le ciment sec et la totalité de l'eau ont été mélangés manuellement pour former un coulis avant d'être ajoutés au sol sec. Le coulis a été mélangé au sol immédiatement après préparation dans le cas du mélange n°5. Il a été intégré au sol après 4 heures pour le mélange n°6 (temps

de début de prise du ciment). Le mélange n°7 correspond au même protocole que les mélanges n°1 à 3 mais le sol traité est le sable de Fontainebleau.

## **2.2. Conditions de cure**

Après le malaxage, les mélanges ont été coulés dans des moules cylindriques enPVC puis stockés verticalement dans des sacs étanches (conservation endogène, condition A). Dans le cadre de l'étude sur l'influence du protocole de malaxage, les éprouvettes ont été conservées dans ces conditions et démoulées seulement avant d'être testées. Pour étudier l'influence des conditions de cure sur les caractéristiques mécaniques des sols traités, des éprouvettes des mélanges n°3 et n°7 ont été démoulées après 7 jours et soumises à différentes conditions de cure : certaines ont été conservées dans l'eau (condition B), d'autres ont été laissées à l'air libre dans un laboratoire climatisé avec une température de 20°C et une humidité relative d'environ 30 % (conservation à l'air, condition C). Ces conditions de cure visent à simuler en laboratoire des sols traités hors nappe (condition A), sous nappe (condition B) et exposés à l'air libre (dans le cas d'ouvrages de soutènement par exemple, condition C). Enfin, certaines éprouvettes ont été démoulées 12 jours seulement avant la date d'essai et soumises à 6 cycles d'humidification/séchage inspirés de la norme ASTM D559 (2003) (condition D). Chaque cycle de 48 heures était composé d'une cure de 5 heures dans une étuve à 53°C suivie d'une immersion pendant 43 heures dans l'eau.

## **2.3. Essais de résistance à la compression simple**

La résistance à la compression moyenne  $R_c$  a été calculée à partir des résistances mesurées suivant la norme NF EN 1926 (AFNOR, 2007) sur deux à cinq éprouvettes de 50mm de diamètre et 100mm de hauteur (élancement de 2) par chargement vertical avec une vitesse de déplacement imposée de 0,3 mm / minute pour chaque temps de cure. Un capteur LVDT a été utilisé pour mesurer la déformation axiale entre les plateaux de la presse. Le module de déformation sécant E50 et la déformation à la rupture  $\epsilon_r$  ont été calculés à partir des courbes de chargement.

## **3. Influence du protocole de mélange sur la résistance à la compression du limon de Jossigny traité au ciment**

### **3.1. Evolution de la résistance à la compression simple**

Quel que soit le protocole de malaxage considéré (n°1 à 6), la résistance à la compression simple  $R_c$  du limon de Jossigny traité au ciment augmente de manière exponentielle avec le temps de cure (figure 1). Les résistances à la compression moyennes  $R_c$  après 7 jours des mélanges contenant 320 kg/m<sup>3</sup> de

ciment sont comprises entre 51 kPa (mélange n°6) et 107 kPa (mélange n°4). La Rc moyenne après 120 jours de cure est de 2159 kPa. Les rapports entre la résistance à la compression après 28 jours et la résistance après 7 jours ( $R_{c28} / R_{c7}$ ) pour un même protocole de malaxage sont compris entre 2 et 4,4. Ces valeurs sont supérieures à celles rapportées par Topolnicki (2004) pour des argiles et limons traités in situ.

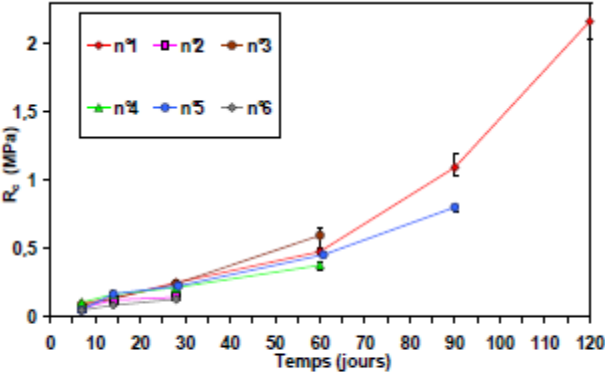


Figure 1. Evolution de la résistance à la compression moyenne du LJ traité pour différents protocoles de malaxage.

Les variations importantes des Rc mesurées à dosage en ciment constant (320 kg/m<sup>3</sup>) démontrent l'influence du protocole de mélange sur les caractéristiques des sols traités. Les résistances moyennes obtenues jusqu'à 28 jours pour les mélanges n°2 et 3 de dosages en ciment différents (et de C/E très proches) se situent dans l'intervalle des résistances mesurées pour les élanges avec 320 kg/m<sup>3</sup>. Ceci suggère qu'en laboratoire, l'utilisation de protocoles de malaxage différents peut entraîner une dispersion des résistances à la compression supérieure aux variations des Rc liées à des dosages en ciment différents (pour des temps de cure inférieurs à 28 jours et dans la gamme des dosages testés de 210 à 320 kg/m<sup>3</sup>).

3.2. Evolution de la teneur en eau et de la masse volumique

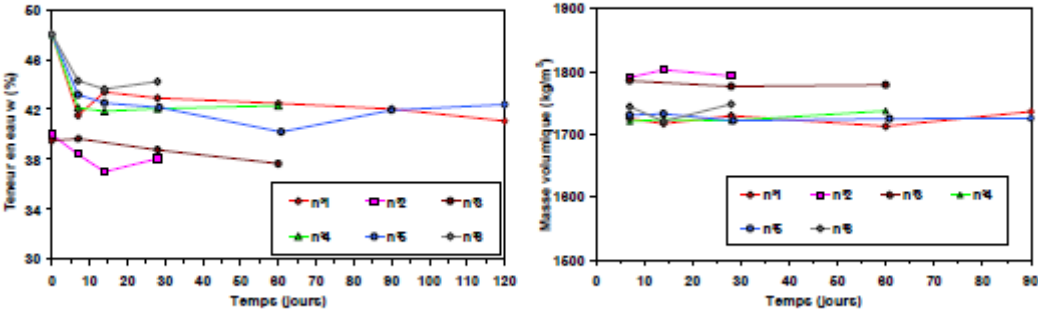


Figure 2. Evolution de la teneur en eau et de la masse volumique du LJ traité.

Une diminution importante de la teneur en eau se produit pendant les 7 à 14 premiers jours après traitement pour une conservation endogène des éprouvettes (figure 2). Cette diminution de la teneur en eau traduit la consommation d'eau liée à l'hydratation du ciment (Ahnberg, 2003). La dispersion des teneurs en eau en fonction du protocole de mélange (figure 2) associée aux variations des résistances à la compression (figure 1) indiquent que le protocole de mélange influence le processus d'hydratation du ciment. La masse volumique des éprouvettes de limon traité est globalement constante au cours du temps (figure 2).

#### **4. Influence des conditions de cure sur les caractéristiques mécaniques des sols traités**

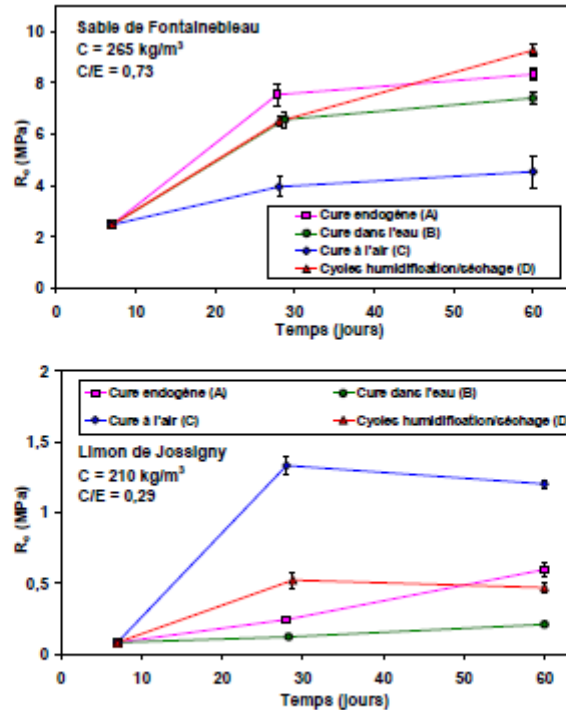
##### **4.1. Evolution de la résistance à la compression simple**

Pour toutes les conditions de cure, les résistances à la compression des éprouvettes de sable ont augmentées au cours du temps (figure 3). Les résistances moyennes les plus faibles ont été mesurées pour les éprouvettes conservées à l'air.

La résistance moyenne des éprouvettes conservées en condition endogène est supérieure à la résistance des éprouvettes de sable conservées dans l'eau. La résistance à la compression moyenne à 7 jours des éprouvettes de limon de Jossigny traité conservées en cure endogène est de 84 kPa (figure 3). Les résistances à la compression des éprouvettes immergées et conservées en condition endogène ont augmenté après 28 et 60 jours. Les résistances les plus faibles ont été mesurées sur les éprouvettes conservées dans l'eau. La résistance moyenne la plus élevée après 28 jours a été mesurée pour les éprouvettes conservées à l'air avec 1,4 MPa.

On observe ensuite une baisse de cette résistance après 60 jours ( $R_c = 1,2 \text{ MPa}$ ). Malgré des teneurs en ciment relativement proches, les résistances mesurées pour le sable traité sont très nettement supérieures aux  $R_c$  des éprouvettes de limon traité ce qui traduit l'effet du squelette granulaire. Pour les deux sols, les résistances à la compression des éprouvettes conservées dans l'eau sont inférieures aux résistances des éprouvettes conservées en condition endogène. La résistance à l'immersion peut être évaluée par les rapports entre les  $R_c$  mesurées pour ces deux conditions de cure. Ces rapports sont de 0,87 et 0,89 après 28 et 60 jours pour le sable de Fontainebleau et de 0,35 et 0,50 pour le limon de Jossigny. Les résistances produites par les cycles d'humidification/séchage sont difficiles à interpréter. Pour le sable de Fontainebleau, il semble que ces cycles aient eu un effet perturbateur de prise à 28 jours avec une résistance inférieure à celle des éprouvettes en cure endogène. Après 60 jours, les cycles ont eu un effet accélérateur sur le sable traité avec une résistance supérieure à celle des éprouvettes en conservation

endogène. En revanche, les cycles ont eu un effet accélérateur de prise à 28 jours pour le limon traité et un effet néfaste après 60 jours avec une résistance inférieure à celle des éprouvettes en cure endogène. L'effet des cycles d'humidification/séchage semble dépendre du type de sol et du temps de cure.



**Figure 3.** Evolution de la résistance à la compression simple moyenne du SF et du LJ traité au ciment pour différentes conditions de cure.

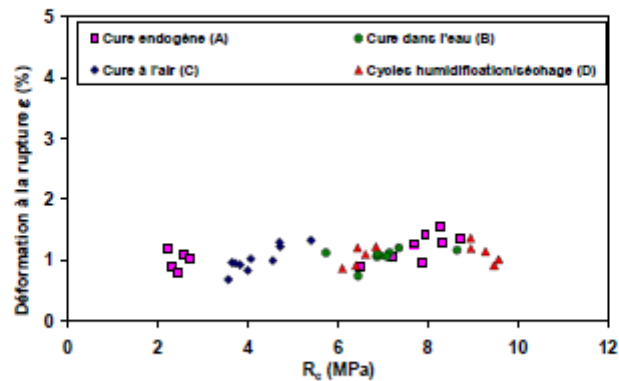
Les résistances des éprouvettes conservées à l'air se rapprochent pour les deux sols : elles sont les plus faibles dans le cas du sable tandis qu'elles sont les plus élevées dans le cas du limon. L'évolution des résistances entre 28 et 60 jours (diminution pour le limon, légère augmentation pour le sable) suggère un fort ralentissement voire un arrêt total de la prise du ciment. Les teneurs en eau mesurées à 28 et 60 jours sur les éprouvettes de sable et de limon conservées à l'air sont comprises entre 1 et 3,5 %. Ces teneurs en eau très faibles corrélées aux évolutions des résistances à la compression entre 28 et 60 jours confortent l'hypothèse d'un fort ralentissement, voire d'un arrêt total de la prise du ciment par insuffisance d'eau nécessaire à l'hydratation. La résistance à la compression élevée du limon de Jossigny est probablement liée à la dessiccation à l'air de la fraction argileuse du sol.

#### 4.2. Module de déformation E50 et déformation à la rupture

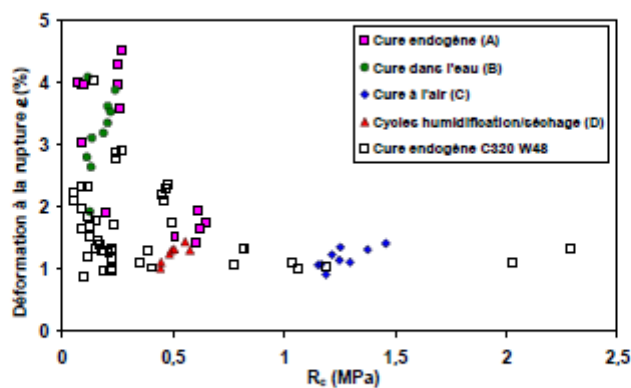
Les déformations à la rupture du sable de Fontainebleau traité au ciment sont globalement constantes en fonction de  $R_c$  et proche de 1 % malgré une certaine dispersion (figure 4). Ces données sont comparables aux résultats obtenus par Jegandan et al. (2010) sur un sable graveleux. Les déformations à

la rupture du limon de Jossigny traité varie entre 0,8 et 5 % pour les faibles valeurs de  $R_c$  (<500 kPa) puis se stabilisent progressivement vers 1 % lorsque la résistance  $R_c$  augmente (figure 5). Une tendance similaire a été observée par Ahnberg (2003) sur des sols fins organiques.

(figure 5). Une tendance similaire a été observée par Ahnberg (2003) sur des sols fins organiques.

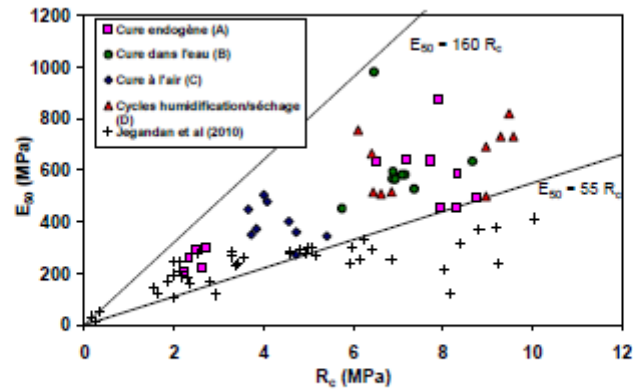


**Figure 4.** Déformation à la rupture  $\epsilon_r$  du SF traité au ciment ( $265 \text{ kg/m}^3$ ) en fonction de  $R_c$  pour différentes conditions de cure.



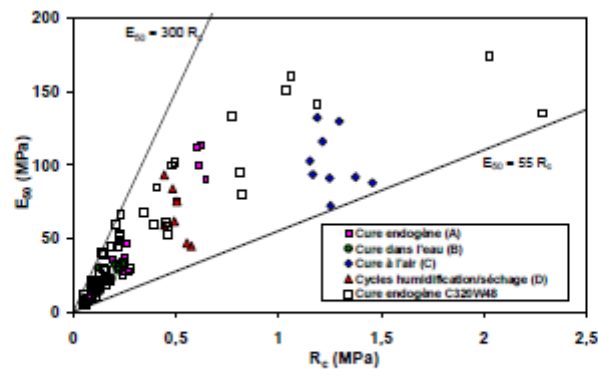
**Figure 5.** Déformation à la rupture  $\epsilon_r$  du LJ traité au ciment ( $210$  et  $320 \text{ kg/m}^3$ ) en fonction de  $R_c$  pour différentes conditions de cure.





**Figure 6.** Module  $E_{50}$  du SF traité au ciment ( $265 \text{ kg/m}^3$ ) en fonction de  $R_c$  pour différentes conditions de cure.

Les modules de déformation  $E_{50}$  du sable de Fontainebleau augmentent avec la résistance à la compression (figure 6). Les rapports  $E_{50}/R_c$  sont compris entre 55 et 160. Les valeurs obtenues par Jegandan *et al.* (2010), figure 6, suivent cette tendance pour des résistances inférieures à 3 MPa, mais le module se stabilise pour des  $R_c$  plus élevées. Pour le limon de Jossigny (figure 7), les rapports  $E_{50}/R_c$  sont généralement plus élevés que pour le sable et compris entre 55 et 300. Des rapports similaires ont été rapportés dans la littérature (Porbaha, 2000a).



**Figure 7.** Module  $E_{50}$  du LJ traité au ciment ( $210$  et  $320 \text{ kg/m}^3$ ) en fonction de  $R_c$  pour différentes conditions de cure.

## 5. Conclusion

L'utilisation de différents protocoles pour la préparation en laboratoire de mélanges sol - ciment (avec des dosages correspondant à la technique du soil mixing) influencent les caractéristiques des sols traités. Dans certaines conditions, le protocole de malaxage peut entraîner une dispersion des résistances supérieure aux variations liées à des teneurs en ciment différentes. Les mesures de teneurs en eau associées aux variations de résistance suggèrent que le protocole de mélange a une influence sur l'hydratation du ciment. La

résistance à la compression des sols traités au ciment varie en fonction des conditions de cure. Les effets de ces conditions de cure dépendent du type de sol et du temps de cure. La détermination de résistances caractéristiques pour le dimensionnement des ouvrages de soil mixing à partir d'essais sur des mélanges sol - ciment réalisés en laboratoire doit donc être associée à un protocole de malaxage spécifique et à des conditions de cure en laboratoire correspondant à celles de l'ouvrage considéré. Enfin, les relations observées entre le module E50, la déformation à la rupture  $\epsilon_r$  et la résistance à la compression  $R_c$  varient selon le type de sol et sont similaires aux tendances rapportées dans la littérature.

## 6. Bibliographie

- AFNOR, Détermination de la résistance en compression, NF EN 1926, 2007.
- ASTM, D559 Standard Test Methods for Wetting and Drying Soil-Cement Mixtures, 2003.
- Ahnberg, H., « Stabilising effects of different binders in some Swedish soils », *Ground Improvement*, vol. 7, n° 1, 2003, p. 9-23.
- Ganne, P., Huybrechts, N., De Cock, F., Lameire, B., & Maertens, J., « SOIL MIX walls as retaining structures – critical analysis of the material design parameters », *Geotechnical challenges in Megacities*, June 7-10 2010, Moscow.
- Holm, G., « Deep Mixing », *Soft Ground Technology, ASCE Geotechnical Special Publication*, n° 112, 2000, p.105–122.
- Jegandan, S., Liska, M., Osman, A. A.-M., Al-Tabbaa, A., « Sustainable binders for soil stabilisation », *Ground Improvement*, vol. 63, n° 1, 2010, p. 53-61.
- Le Runigo B., Durabilité d'un limon traité à la chaux et soumis à différentes sollicitations hydrauliques, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes et Université de Nantes, 2008.
- Massarsch, K. R., Topolnicki, M., « Regional Report : European Practice of Soil Mixing Technology ». *International Conference on Deep Mixing Best Practice and Recent Advances Deep mixing '05*, May 23-25 2005, Stockholm.
- Porbaha, A., Shibuya, S., Kishida, T., « State of the art in deep mixing technology. Part III: geomaterial characterization », *Ground Improvement*, vol. 4, n° 3, 2000a, p. 91–110.
- Porbaha, A., Shibuya, S., Kishida, T., « State of the art in deep mixing technology. Part IV: design considerations », *Ground Improvement*, vol. 4, n° 3, 2000b, p. 111–125.
- Szymkiewicz, F., Le Kouby, A., Reiffsteck, P., Fanelli, S., « Influence de la granulométrie sur la résistance à la compression d'un sol-ciment : comparaison entre deux sols », La Bourboule.

Terashi, M., « Theme Lecture : Deep Mixing Method - Brief State of the Art ». *Proceeding of the 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1997, Hamburg, p. 2475–2478.

Terashi, M., Kitazume, M., « Keynote lecture “Current Practice and future perspective of QA/QC for Deep-Mixed ground ». *International Symposium on Deep Mixing and Admixture Stabilization*, May 19-21 2009, Okinawa.

Topolnicki, M., Chapter 9 In situ soil mixing. In Moseley, M. P., Kirsch, K., *Ground Improvement* (Second ed.). Abingdon, Spon Press, 2004.