

Etude paramétrique en laboratoire du matériau Deep Soil-Mixing

Laboratory parametric study of the Deep Mixing material

Szymkiewicz F., Le Kouby A., Reiffsteck P., Mosadegh A., Tacita J.-L.
IFSTTAR, boulevard Newton, Champs-sur-Marne, F-77447 Marne la Vallée Cedex 2

RÉSUMÉ : Le Deep Soil-Mixing consiste à mélanger mécaniquement un liant hydraulique avec le sol en place en vue d'améliorer ses propriétés mécaniques. En France, de nouvelles exigences concernant la méthode et le matériau sont apparues à mesure que son champ d'applications s'est étendu. Dans cette communication, le travail de recherche entrepris à l'IFSTTAR est présenté. Il a consisté à mener en laboratoire une étude paramétrique, en réalisant des mélanges dits "de référence". Trois sables et cinq sols fins ont été traités (à l'état pur ou mélangés entre eux) en faisant varier à chaque fois les quantités de ciment et d'eau, afin d'observer l'influence de la granulométrie, de l'argilosité et de la quantité d'eau présente dans le mélange sur la résistance. Les retombées de ce travail sont la proposition d'abaques reliant la résistance au dosage en ciment et au rapport C/E, et des formules permettant pour les sols grenus de prédire la résistance à 28 jours en fonction du pourcentage de fines dans le sol et du dosage en ciment.

ABSTRACT: The Soil-Mixing consists in mixing a hydraulic binder into the soil mechanically in order to improve its mechanical properties. In France, these new applications imply new requirements on the method as well as on the material. In this paper, the research work undertaken at IFSTTAR is presented: it consisted in carrying out a parametric study on reference mixtures. Three sands and five fine soils were treated with different cement and water contents to observe the influence of particle size, clay content and the amount of water present in the mixture on its strength. Benefits of this work is the proposal of abaci connecting the strength of the material to its cement content and cement / water ratio (C / E), and formulas allowing the prediction, for granular soils, of the strength of the material at 7 and 28 days depending on the percentage of fines in the soil and on the cement content.

MOTS-CLÉS: Deep Mixing, sol, ciment, résistance, compression simple, abaque.

KEYWORDS: Deep Mixing, soil, cement, strength, unconfined compression, abacus.

1 INTRODUCTION

La méthode du Deep Mixing présente de nombreux avantages (respect de l'environnement, exécution facile et rapide ainsi que coût faible) qui ont grandement contribué à étendre son domaine d'applications (amélioration des sols, confinement des pollutions et réalisation d'éléments structurels). Ces nouvelles applications nécessitent une meilleure compréhension de la méthode et du matériau. Les caractéristiques du matériau Deep Mixing (en particulier l'homogénéité et la continuité) sont de plus en plus étudiées, au fur et à mesure que le domaine d'application s'agrandit. De même, des méthodes de prédiction de la résistance du matériau sont en cours de développement.

Babasaki et al. (1996) citent quatre facteurs qui influencent la croissance de la résistance du matériau: les caractéristiques du liant, la nature et l'état du sol rencontré, le malaxage et les conditions de cure. Porbaha et al. (2000) affirment qu'il est communément admis que la résistance du sol traité au ciment augmente avec le temps, de la même façon qu'un béton. De nombreuses études ont été menées pour proposer des formules en ce qui concerne la prédiction de la résistance du matériau. Bruce (2001) et Topolnicki (2004) ont proposé des relations générales reliant le gain de résistance à la nature du sol à traiter, ainsi que des plages de résistances atteignables pour ces mêmes sols après 28 jours de cure. En outre, des formules ont été proposées pour prédire la résistance du matériau à partir d'un ou plusieurs facteurs énoncés par Babasaki et al. (1996). Pour les bétons, des lois portant sur le développement de la résistance et dépendant uniquement du rapport ciment sur eau du mélange étudié ont été établies. Ces lois ont été testées sur le Soil-Mixing, mais se sont avérées inadaptées.

Mais d'autres formules ont été proposées, en tenant compte du ciment, de l'eau et / ou du contenu en fines du sol traité. Cependant, il n'existe toujours pas de formule largement applicable pour estimer la résistance du matériau et intégrant tous les facteurs qui devraient être pris en compte (CDIT, 2002), car au jour d'aujourd'hui, aucune norme internationale n'existe pour la préparation des échantillons de sol traités en laboratoire (Kitazume et al., 2009). De plus, certaines formules ne peuvent être appliquées qu'à un site particulier, tandis que d'autres ne peuvent être appliquées qu'à certains sols.

Cet article présente les résultats d'une étude paramétrique exhaustive ayant mis l'accent sur la résistance du matériau Deep Mixing. Des relations liant la résistance aux paramètres du Deep Mixing ainsi qu'un abaque pouvant servir au dimensionnement d'ouvrages sont proposées.

2 PROGRAMME EXPERIMENTAL

2.1 Matériaux

Les sols testés au cours de cette étude vont des sables purs aux argiles pures, avec des limons et des sols artificiels reconstitués à partir de sable de Fontainebleau mélangé avec de l'argile ou du Silica Flour, afin de permettre l'étude de l'impact de la nature et de la quantité des fines sur la résistance du matériau Deep Mixing. Le tableau 1 présente les principales caractéristiques des sols testés.

Tableau 1. Principales caractéristiques granulométriques et valeurs au bleu de méthylène (VBS) des sols utilisés

Soils	d ₆₀ (mm)	d ₃₀ (mm)	d ₁₀ (mm)	Percent passing 2 mm	Percent passing 80 µm	Percent passing 2 µm	VBS
Fontainebleau sand (SF)	0,22	0,18	0,15	100	0,1	0	0,01
Triel sand	0,38	0,23	0,13	89,2	2,33	0	0,1
Fréjus sand	0,5	0,23	0,07	94,25	11,8	0	0,2
Silica Flour (SilicaF)	0,028	0,011	0,004	100	95,2	≈ 5	0,14
Silt TGV	-	-	-	100	98,9	19	2,3
Silt Vémars	-	-	-	96,8	82	30	4
kaolinite Soka (kaoS)	-	-	-	100	100	82	1,25
kaolinite de Provins	-	-	-	100	100	92	6,67
illite du Puy	-	-	-	100	95,1	56	5,4
illite Arvel	-	-	-	100	100	76	5,9
Montmorillonite Arvel	-	-	-	100	100	53	28

Les sols artificiels sont nommés par l'abréviation citée entre parenthèses dans le tableau 1 : par exemple, un sol artificiel fait de 75% de sable de Fontainebleau et 25% de kaolinite Soka sera nommé SF75-kaoS25. Plus de détails sur tous ces sols peuvent être trouvés dans Szymkiewicz (2011).

Le ciment utilisé pour ce programme expérimental est un ciment de haut fourneau contenant au moins 85% de laitier de haut fourneau, avec le reste de clinker Portland et un peu de gypse (Classement Européen: "HRC" CEM III / C 32,5 N CE PM-ES NF). Ce ciment présente une résistance à développement lent, et son temps de prise initial est de 4 heures après hydratation.

2.2 Malaxage, coulage et conservation

Les sols ont été traités avec des teneurs en ciment diverses allant de 70 à 400 kg/m³, couvrant ainsi toute la gamme usuelle de dosages des applications Deep Mixing. Sol et ciment ont d'abord été soigneusement mélangés à sec et manuellement, afin d'obtenir une consistance uniforme. Ils sont mis dans le malaxeur et l'eau est ajoutée. La teneur en eau du mélange (w_i) a été choisie afin d'obtenir un matériau auto-plaçant, ce qui signifie qu'il doit être suffisamment fluide pour s'écouler sous son propre poids. Ainsi, w_i doit être au moins égale à la limite de liquidité du mélange (Szymkiewicz et al., 2012 b).

Le matériau est ensuite malaxé pendant 5 minutes pour les sols non cohérents et pendant 10 minutes pour les sols cohérents. Le mélange est ensuite coulé dans des moules cylindriques de 52 mm de diamètre, et, pour éviter les bulles d'air dans les échantillons, piqué et vibré.

Les moules sont ensuite bouchés et scellés dans un sac hermétique contenant une humidité relative élevée. Ceux-ci sont conservés à une température de 20 ± 3 °C jusqu'à la date d'essai (7, 14, 21, 28, 56 et 90 jours).

Le test de compression simple a été choisi principalement pour sa fiabilité et son utilisation internationale. La charge verticale statique a été appliquée à une vitesse constante de 0,3 mm min⁻¹. Le déplacement axial externe a été mesuré à l'aide d'un LVDT. Plus de détails peuvent être trouvés dans Szymkiewicz et al. (2012 a).

2.3 Représentativité des résultats

De nombreux essais sur tout type de sol ont été effectués, afin d'évaluer la répétitivité, reproductibilité et la répétabilité des résultats (figure 1). La figure 1a montre que la méthode de réalisation des éprouvettes et leurs conditions de cure assurent une bonne répétitivité et reproductibilité des résultats, puisque deux mélanges (Fontainebleau C 265 et C 320) ont été répétés en suivant exactement la même procédure, le lendemain, par le même opérateur (Fontainebleau C 320) et par un autre opérateur

(Fontainebleau C 265). La figure 1b montre que la répétitivité des tests est assurée: le coefficient de variation est égal à 7% pour le Puy du Argile, et égale à 9,3% pour les sols sableux.

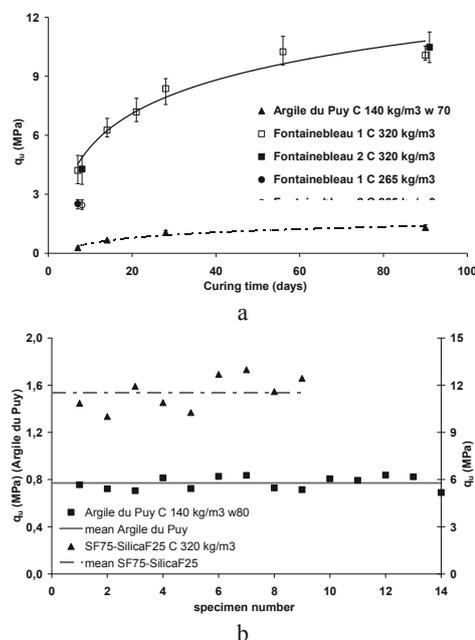


Figure 1. Représentativité des résultats : répétitivité et reproductibilité (a) et répétitivité (b).

3 RÉSULTATS ET ANALYSES

3.1 Effet du ciment et des fines sur la résistance des sols granulaires non plastiques

Consoli et al. (2010) ont proposé une fonction puissance (Eq. 1) comme étant la plus adaptée à la relation expérimentale entre la résistance à la compression simple (q_u) et le dosage en ciment (C).

$$q_u = a \times C^b \quad (1)$$

où a est un paramètre exprimé en kPa et b un paramètre sans dimension. Les deux sont des paramètres expérimentaux.

Szymkiewicz et al. (2012 a) ont observé la même relation pour différents sols reconstitués ou naturels et non plastiques. Ils ont également observé que les paramètres expérimentaux a et b sont fonction (au bout de sept jours de cure) du paramètre C_{63} , qui représente le pourcentage de fines dans le sol. Ainsi, ils ont

proposé une formule (Eq. 2) permettant de prédire la résistance du matériau Deep Mixing constitué d'un sol non plastique et de ciment, connaissant le C_{63} du sol, le dosage cible en ciment C (%), et les teneurs en eau initiale et finale w_i et w_f du matériau. Comme les résultats in situ et obtenus en laboratoire sont très comparables dans le cas de sols granulaires, une telle formule peut être utilisée directement pour des applications sur site.

$$q_{u28} = \frac{w_f}{w_i} \times 64.032 \times C^{1.777-0.171 \ln C_{63}} \times C_{63}^{0.544} \quad (2)$$

3.2 Effet du ciment, de l'eau et des fines sur la résistance des sols plastiques

Pour les sols cohérents (c'est-à-dire argileux ou limoneux), cependant, il n'est pas si simple d'analyser l'influence du ciment et des fines.

Tout d'abord, alors que la teneur en eau nécessaire pour obtenir un matériau auto-plaçant ne varie pas beaucoup dans le cas des sols strictement non plastiques (puisque les particules de sol sont inertes à l'eau), celle-ci est très variable lorsque des particules d'argile sont présentes dans le sol. D'autre part, le domaine optimal d'ouvrabilité du matériau Deep Mixing (défini par Szymkiewicz et al. (2012) comme la teneur en eau comprise entre les limites de liquidité et de floculation du sol traité (figure 2a)) est très faible dans le cas d'un sol non plastique, tandis qu'au contraire pour les sols traités plastiques, il peut être très important. En outre, le domaine d'ouvrabilité des sols évolue en fonction de la quantité de ciment ajoutée et le type de sol rencontré.

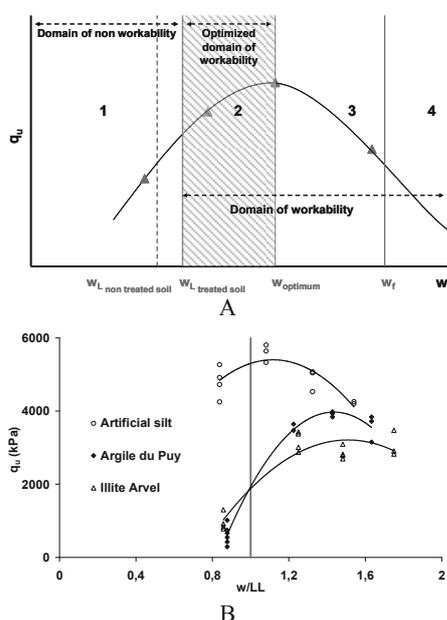


Figure 2. Représentation du domaine d'ouvrabilité (a) et détermination de la teneur en eau optimale (b) du matériau Deep Mixing.

Enfin, des essais sur éprouvettes ayant 28 jours ont également montré l'existence d'une teneur en eau optimale, indépendante de la teneur en ciment du mélange, mais fonction de l'indice de plasticité du sol d'origine (figure 2b). Par conséquent, il est presque impossible de dissocier le dosage en ciment de l'eau lors de l'étude des sols plastiques traités au ciment.

De plus, les sols plastiques présentent une cohésion qu'il est très important de prendre en compte, puisqu'elle apporte un gain de résistance supplémentaire. Pour déterminer l'effet de cette cohésion, des sols constitués de sable et de particules fines non plastiques d'une part, et de sable et de particules fines

plastiques d'autre part, en différentes proportions, ont été traités, à différents dosages en ciment. Les résultats ont montré que, pour un dosage en ciment constant, les sols traités faits de sable à 75% et de particules fines à 25% sont plus résistants que les sols purs traités. Ceci peut s'expliquer en partie par une optimisation de la distribution granulométrique, ce qui augmente la densité du matériau. Cependant, les particules plastiques participent aussi à l'augmentation de la résistance du matériau, via un apport de cohésion non drainée supplémentaire. Les résultats ont montré que cette résistance supplémentaire due à cette cohésion diminue avec l'augmentation de la teneur en ciment. Entre 210 et 320 kg/m^3 de ciment, les particules d'argile cessent d'avoir un effet bénéfique sur la résistance et peuvent commencer à être considérées comme un agent polluant.

Néanmoins, la fonction reliant la résistance au ciment pour les sols plastiques peut encore être exprimée comme une fonction puissance : le paramètre b , défini précédemment, diminue à mesure que le pourcentage de fines dans le sol augmente (comme pour un sol non plastique, d'ailleurs) jusqu'à ce qu'il atteigne 1. Ensuite, la relation devient linéaire (Eq. 3), de la forme :

$$q_u = c + a \times C^b \quad (3)$$

avec b toujours égal à 1, et a et c des paramètres expérimentaux exprimés en kPa.

Les paramètres c et a varient en fonction de la nature du sol (figure 3a), de même qu'en fonction du temps de cure. Cependant, aucune relation logique ne peut être proposée. La teneur en eau initiale du matériau semble quant à elle n'influencer que le paramètre c (figure 3b).

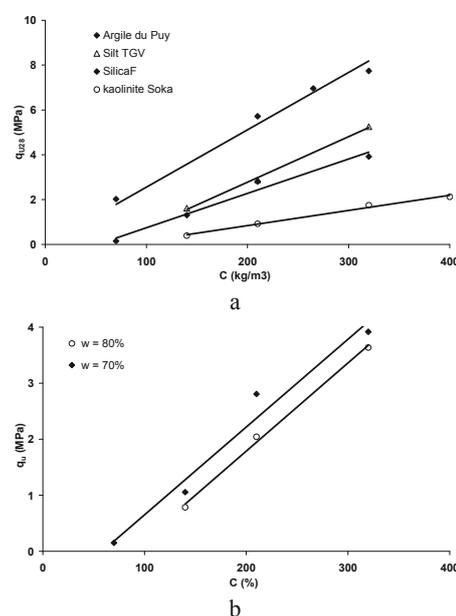


Figure 3. Relation résistance – dosage en ciment pour 4 sols plastiques (a) et pour un sol plastique à différentes teneurs en eau (b).

Dans le cas du Deep Mixing, où le matériau doit être suffisamment fluide pour être auto-plaçant, c est toujours nul ou négatif. Il existe donc un dosage seuil en ciment qui conditionne le succès du traitement au ciment d'une argile.

On voit bien qu'il est nécessaire de continuer les travaux en se focalisant sur les sols plastiques, puisqu'aucune formulation générale n'a encore pu être proposée qui permettrait de prédire la résistance du matériau.

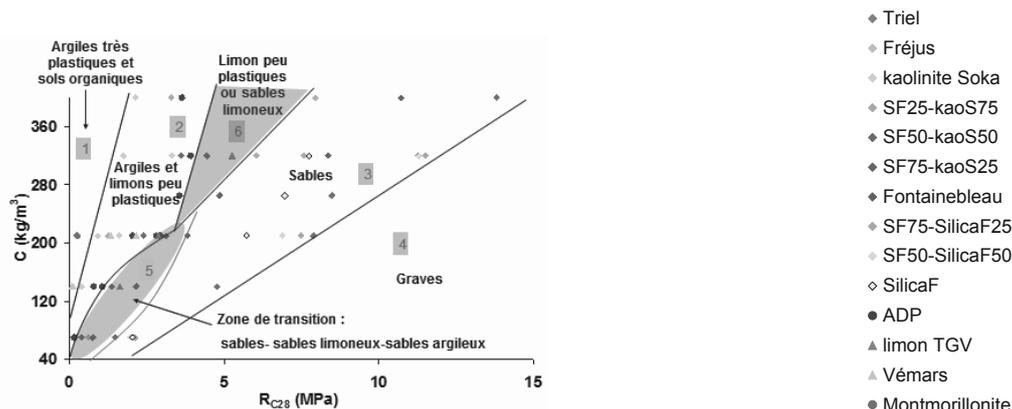


Figure 4. Abaque résistance – dosage en ciment pour un matériau Deep Mixing auto-plaçant.

3.3 Proposition d'un abaque Résistance – Dosage en ciment

Au cours de cette étude, 57 mélanges à partir de 14 sols et 6 dosages en ciment différents ont été réalisés et testés à chaque âge. Un des objectifs de cette étude était la réalisation d'abaques afin d'aider les ingénieurs à déterminer le dosage en ciment nécessaire à la réalisation des travaux à partir de la résistance mécanique nécessaire du matériau. Ces 57 points peuvent donc être placés dans le plan $C = f(R_{C28})$ pour obtenir un premier abaque (figure 4), qui n'intègre pas de manière précise l'influence de l'eau, mais en tient compte tout de même de manière générale, puisque les mélanges testés ont été réalisés à des teneurs en eau s'étalant de la limite de liquidité à la limite de floculation. Nous avons choisi comme résistance de référence la R_{C28} , ce qui est toujours très parlant pour les industriels car elle est la référence utilisée pour les bétons, et aussi car c'est la résistance la plus grande que nous puissions prédire pour les mélanges à base de sols grenus. Cet abaque a été validé en la confrontant à des résultats obtenus sur site par des entreprises françaises.

Six zones peuvent être clairement identifiées sur cet abaque : la première représente le domaine des sols très plastiques et des sols organiques. La seconde représente celui des sols moyennement ou peu plastiques, qu'ils soient argileux ou limoneux, tandis que les troisième et quatrième sont dédiées aux sables et graves. Les graves traitées n'ont pas pu être testées en laboratoire, du fait de la petite taille des éprouvettes, qui n'aurait pas assuré une bonne représentativité du matériau. Deux zones un peu particulières se détachent : ce sont les zones 5 et 6 qui sont des zones dites de transition. Elles représentent les résultats présentés au paragraphe 3.1.

4 CONCLUSION

Dans cette communication, le travail de recherche mené à l'IFSTTAR depuis plusieurs années, de concert avec les différents acteurs du Deep Mixing français, est présenté. Une relation (validée par des retours chantier et des éléments bibliographiques) est proposée, qui permet de prédire la résistance des sols non plastique traités au ciment selon la méthode du Deep Mixing, c'est-à-dire avec une teneur en eau initiale suffisante pour que le matériau créé soit auto-plaçant, en connaissant seulement la granulométrie du sol, le dosage cible en ciment, et la teneur en eau initiale du mélange (ce qui sous-entend que les paramètres d'exécution sont contrôlés tout au long du chantier).

L'étude montre que la transition d'un sol non plastique à un sol plastique se fait de manière logique, en gardant la même forme de relation entre la résistance finale et le dosage en ciment, même si la nature même des particules argileuse fait que l'eau

et le temps auront un impact beaucoup plus important sur les sols plastiques que sur les sols purement grenus. L'existence d'optimums, en ce qui concerne le couple teneur en eau – dosage en ciment, permet néanmoins d'affirmer qu'il sera bientôt possible de proposer une formulation générale, à un âge donné.

Un abaque, réalisé à partir de cette étude et validé grâce à des retours chantier, est proposé : il permet, de manière simple, de déterminer le dosage en ciment à utiliser afin de s'assurer de l'obtention de la résistance mécanique requise, en fonction de la nature du sol rencontré.

Les perspectives de ce travail sont donc la poursuite de l'étude des sols argileux traités, ainsi que le développement d'une méthode de dimensionnement des ouvrages en matériau Deep Mixing, en mettant l'accent sur l'étude de l'homogénéité du matériau sur site.

5 REFERENCES

- Babasaki, R., M. Terashi, T. Suzuki, A. Maekawa, M. Kawamura and E. Fukazawa (1996). Factors influencing the strength of improved soil, Grouting and Deep Mixing. 2nd International Conference on Ground Improvement Geosystems
- Bruce, D. A. (2001). "Practitioner's guide to the deep mixing method." *Ground Improvement* 5(3): 95-100.
- CDIT. (2002). The Deep Mixing Method – Principle, Design and Construction. The Netherlands: A.A. Balkema Publishers.
- Consoli, N.C., Caberlon Cruz, R., Floss, M.F., & Festugato, L. (2010). Parameters controlling tensile and compressive strength of artificially cemented sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136, 759–763.
- Kitazume, M., & Nishimura, S. (2009). Influence of specimen preparation and curing conditions on unconfined compression behaviour of cement-treated clay. Deep Mixing'09, Japan.
- Porbaha, A., Shibuya, S., & Kishida, T. (2000). State of the art in deep mixing technology, Part III: Geomaterial characterization of deep mixing. *Ground Improvement*, 4, 91–110.
- Szymkiewicz, F. (2011). Evaluation des propriétés mécaniques du matériau Soil-Mixing (PhD Thesis). Paris: Université Paris-Est.
- Szymkiewicz, F., Guimond-Barrett, A., Le Kouby, A. & Reiffsteck, P. (2012 a) "Influence of grain size distribution and cement content on the strength and aging of treated sandy soils". *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16, 7, pp 882–902.
- Szymkiewicz, F., Tamga, F-S., Le Kouby, A. & Reiffsteck, P. (2012 b), "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*, submitted.
- Topolnicki, M. (2004). Chapter 9: In situ soil mixing. In M.P.M.K. Kirsch (Ed.), *Ground Improvement* (pp. 331–423). Abingdon, UK: Spon Press.