

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Injectabilité d'un loess par des coulis de renforcement

Injectability of a loess by reinforcement grouts

J.-C. Dupla, J. Canou

Université Paris-Est, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, UR Navier-CERMES, Marne-la-Vallée, France

J.-M. Terpereau, G. Marchadier(†)

SNCF, Direction de l'ingénierie, St-Denis, France

ABSTRACT

Loess are particular soils, including an often loose and unstable structure, formed of aggregates and macropores, resulting from their mode of formation by wind deposit. They can be the seat of large strains of collapse when they are wetted and can, for some of them, liquefy when they are saturated. We present in this communication the results of experimental work intended to study the injectability of a loess of the North of France, in order to stabilize it compared to a possible liquefaction risk under railway loading. The injectability was carried out on in situ samples, using a specific injection device to inject various types of grouts. First, we present the prototype device and the experimental procedure used, then the results obtained from various grouts such as micro cement suspensions, silicates and nanosilices and we show the interest of this last product in terms of injectability for this specific soil.

RÉSUMÉ

Les loess sont des sols particuliers, comportant une structure souvent lâche et instable, formée d'agrégats et de macropores, résultant de leur mode de formation par dépôt éolien. Ils peuvent être le siège de déformations d'effondrement importantes lorsqu'ils sont humidifiés et peuvent même, pour certains d'entre eux, se liquéfier lorsqu'ils sont à l'état saturé.

On présente dans cette communication les résultats de travaux destinés à étudier l'injectabilité d'un loess du nord de la France, en vue de le stabiliser par rapport à un risque potentiel de liquéfaction sous sollicitation ferroviaire. L'injectabilité a été réalisée sur des éprouvettes intactes du sol prélevées in situ, à l'aide d'un dispositif d'injection spécifique permettant d'injecter différents types de produits. Après avoir présenté le dispositif d'essai prototype et la procédure expérimentale utilisée, on présente les résultats obtenus à partir de différents produits tels que des suspensions de micro ciments, des silicates et des nanosilices et l'on montre l'intérêt de ce dernier produit en termes d'injectabilité pour ce sol spécifique.

Keywords : grouting, soil, loess, cement, silicate, colloidal silica

1 INTRODUCTION

En vue de stabiliser les sols loessiques, présentant des risques d'effondrabilité (Karam, 2007), situés sur la ligne LGV nord, plusieurs solutions de renforcement ont été envisagées (colonne de sol-ciment, injection...). La solution qui présente de nombreux avantages est l'injection, par imprégnation, de coulis de renforcement. En effet, cette méthode est bien connue depuis les années 40 (Cambefort, 1967 ; Gouvenot, 1998) et ne nécessite pas de forages de grands diamètres qui seraient complexes à réaliser en voie. Des premiers traitements par injection ont été réalisés jusque récemment. Ces traitements, utilisant principalement des coulis de ciment classiques et pouvant aller jusqu'à des profondeurs de l'ordre de 10 à 15 mètres, restent relativement difficiles à contrôler et peuvent éventuellement induire des désordres tels que soulèvements locaux de terrain et/ou de voie.

On trouve actuellement plusieurs types de coulis en fonction de la nature du sol à traiter, à savoir des coulis « chimiques » pour les sols fins et des coulis à base de ciment pour les sols grenus. Cependant, les premiers posent des problèmes de pérennité dans le temps et de toxicité (Gouvenot 1998), et les seconds ont un pouvoir de pénétration limité dans des matrices fines. Depuis quelques années, des coulis de ciment surmoulus sont apparus afin de résoudre les difficultés de pénétration (Shimoda et Ohmori 1982 ; Zebovitz et al. 1989 ; Delfosse-Ribay et al, 2002). Mais également des coulis à base de nanosilice qui respectent l'environnement et permettent de réduire le potentiel de liquéfaction des sables (Gallagher et al. 2007). Cependant, ce dernier produit n'a pas encore été utilisé dans des sols fins comme les less.

Les travaux ont pour premier objectif d'étudier, en laboratoire, l'injectabilité d'un loess prélevé sur le site dans des conditions aussi proches que possible des conditions actuellement utilisées pour réaliser les traitements d'injection sur le site, en particulier en termes des caractéristiques des coulis mis en œuvre. Les coulis de référence utilisés sont à base de ciments surmoulus, silicate et nanosilice. On montre en particulier l'intérêt du coulis de nanosilice, qui présente un pouvoir de pénétration équivalent au silicate, une fois qu'il est dilué, tout en respectant l'environnement.

2 DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX ET MATÉRIAU

2.1 Les dispositifs expérimentaux

Les dispositifs expérimentaux comprennent trois ensembles principaux, à savoir les équipements de fabrication et de caractérisation des coulis, le dispositif d'injection et la cellule d'injection contenant l'éprouvette à injecter (Figure 1). Cette cellule, développée par Saada (2006), permet de confiner l'éprouvette de sol à injecter sous un état de contrainte isotrope grâce à l'application d'une pression d'eau dans la cellule (principe analogue à celui d'une cellule triaxiale). Elle est équipée de deux capteurs de pression, l'un pour mesurer la pression de confinement régnant dans la cellule, l'autre pour mesurer la pression d'injection.

Comme on peut le voir sur le schéma de principe (Figure1), les embases supérieure et inférieure forment un réservoir de forme conique qui permet d'assurer une arrivée du fluide sur

toute la section de l'éprouvette, et sur lequel sont placés une grille et un tamis, dont le rôle est de retenir les particules de sol et de laisser passer les particules du coulis sans filtration.

A ces éléments principaux viennent s'ajouter différents équipements et accessoires tels que les dispositifs d'identification et de caractérisation des sols, le bâti de découpe des éprouvettes, etc.

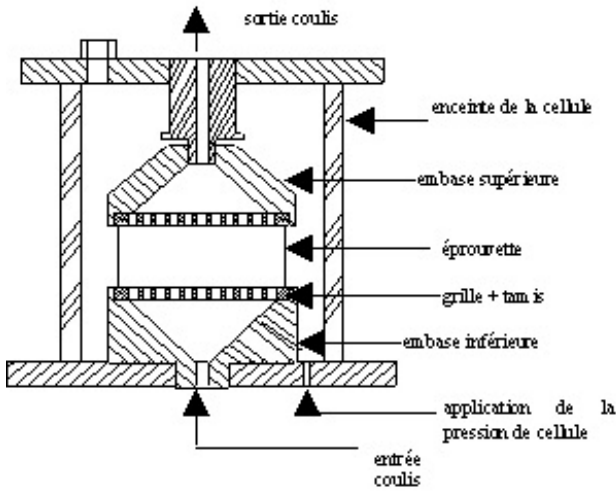


Figure 1 : Schéma de principe de la cellule d'injection

La figure 2 présente le schéma de principe de l'essai d'injection à pression contrôlée.

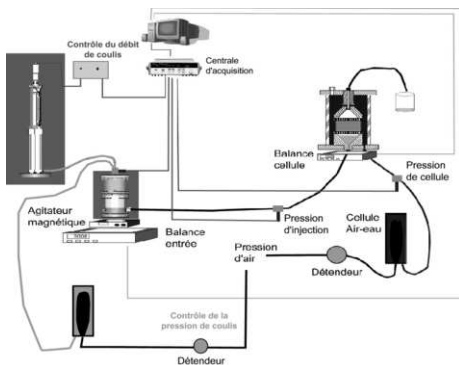


Figure 2 : Schéma fonctionnel de l'essai d'injection à pression contrôlée

L'essai d'injection comporte quatre phases principales successives, décrites ci-dessous :

- Préparation, caractérisation et mise sous contrainte de l'éprouvette de sol à injecter ;
- Préparation et caractérisation du coulis ;
- Injection du coulis ;
- Démontage et récupération de l'éprouvette injectée pour traitement ultérieur.

2.2 Préparation, caractérisation et mise sous contrainte des éprouvettes

La caractérisation du loess a été réalisée par Karam (2007). Les principales caractéristiques sont données dans le tableau 1.

Tableau 1 : Principales caractéristiques du loess

%<2 µm	w _L (%)	I _p -	ρ _d (Mg/m ³)	w _{nat} (%)	e -	S _{mat} (%)
16	28	9	1,39	18,1	0,93	53

Le loess prélevé sur le site d'étude est disponible au laboratoire sous forme de blocs intacts (environ 24x25x34 cm) découpés avec précaution, conditionnés dans des caisses en plastique étanches et entièrement paraffinés afin de leur conserver leur teneur en eau naturelle. La première étape consiste à découper dans ces blocs des éprouvettes de 80 mm de diamètre et de 40 mm de hauteur.

On découpe tout d'abord un parallélépipède de section carrée 10x10 cm, que l'on place sur le bâti de découpe (Fig. 3). On utilise un fil à couper le beurre pour donner une forme cylindrique à l'éprouvette. Les copeaux de matériaux sont utilisés pour déterminer la teneur en eau du loess. Une fois cette opération terminée, l'éprouvette fait exactement 80 mm de diamètre et environ 180 mm de hauteur. On vient alors découper quatre cylindres de 40 mm de hauteur, qui sont pesés et mesurés.



Figure 3 Découpe des éprouvettes de loess

3 LE PROGRAMME EXPERIMENTAL

Le programme expérimental a, en fait, comporté la réalisation d'essais d'injection, se découpant de la manière suivante :

- Essais avec les coulis de ciments surmoulus ;
- Essai avec le silicate ;
- Essais avec la nanosilice.

Les paramètres étudiés ont été principalement :

- pour les coulis de ciment : granulométrie du ciment ;
- pour les nanosilices : taux de dilution, pressions d'injection et de confinement.

En ce qui concerne le silicate, un seul essai a été réalisé à une dilution (Essai 3, Tableau 2)

Tableau 2 Principales caractéristiques des essais réalisés

Essai	Coulis	E/P %	σ' _c kPa	P _{inj} kPa
1	A12	2000	100	40
2	A6	2000	100	40
3	SI	100	400	250
4	NS	0	500	300
5	NS	20	500	310
6	NS	20	25	50

E/P : Dilution massique de l'eau / produit

NS : NanoSilice ; SI : Silicate ; A 12 : Spinor A12 ; A6 : Spinor A6

3.1 SUR COULIS DE CIMENT SURMOULU

On s'est orienté tout de suite sur des coulis fabriqués à partir d'un ciment fin (Spinor A12, $d_{100}=12\mu\text{m}$) et d'un ciment ultra fin (Spinor A6, $d_{100}=6\mu\text{m}$). En effet, on sait que les ciments classiques (type CLK, $d_{100}=200\mu\text{m}$) ne sont pas injectables dans les sols fins (Cambefort, 1967). Ces ciments viennent de la société Holcim.

Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 4. Les essais ont été réalisés à une pression de confinement de 100 kPa, et à une pression d'injection de 40 kPa. Le rapport massique de dilution (E/C) est égal à 2000%. Dans le cas du coulis à base de ciment A12, on n'a pas observé de sortie de fluide en aval de l'éprouvette. Par contre, pour le coulis à base de ciment A6, on a pu observer la sortie d'un fluide clair. Une analyse granulométrique n'a pas permis de mettre en évidence la présence de particules de ciment. On en déduit que le loess a agi comme un filtre pour le coulis. Cependant, on peut penser que des grains de ciment arrivent à pénétrer en partie basse de l'éprouvette (la prise de masse de l'éprouvette est assez importante), ce qui provoque une diminution de la porosité, et une filtration de plus en plus importante du coulis sans, pour autant, atteindre le colmatage complet de l'espace poreux. Dans le cas du coulis de ciment fin (A12), ce colmatage doit être total.

On n'a donc pas réussi à injecter le loess de manière satisfaisante avec ces deux coulis. Ce résultat montre que les suspensions de ciment, mêmes très diluées, ne sont pas adaptées à l'injection par imprégnation de ce sol, quelle que soit la finesse de la poudre de ciment utilisée.

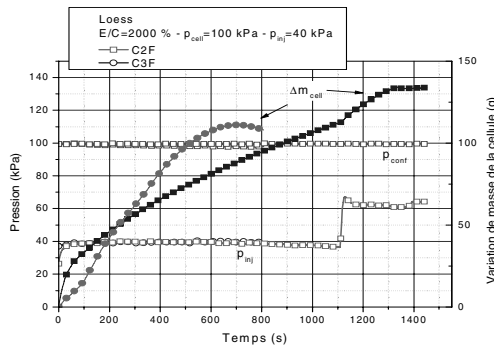


Figure 4 Influence de la granulométrie du ciment (C2F et C3F)

4 ESSAI AVEC LE SILICATE

La figure 5 présente les résultats de l'essai d'injection réalisé avec le silicate. Nous avons utilisé la dilution de 100% pour le silicate (E/S=100%). L'essai est réalisé à une pression de confinement de 400 kPa, et une pression d'injection de 250 kPa.

Les premières mesures réalisées correspondent à l'état initial ($p_{inj}=250\text{ kPa}$, $p_{cell}=400\text{ kPa}$, $\Delta m_{epi}=0$). L'ouverture du robinet d'entrée provoque une chute de la pression d'injection (perméabilité infinie), car le coulis remplit le tuyau d'entrée et le cône inférieur. Lorsque le coulis atteint l'éprouvette, la pression appliquée remonte progressivement (faible perméabilité du loess) à la valeur de consigne et se stabilise. En termes d'évolution de masse de l'éprouvette, on observe un taux d'augmentation important et quasi linéaire lors de la première phase (remplissage du cône inférieur), puis le taux diminue progressivement jusqu'à la sortie du coulis. On obtient un régime quasi permanent à la fin de l'essai avec une pression constante et une prise de masse quasi nulle. Ce résultat montre que le matériau ne semble pas filtrer le coulis.

5 ESSAIS AVEC LA NANOSILICE

La nanosilice est une suspension de particules très fines de silice (de l'ordre de quelques nanomètres). La nanosilice utilisée, nommée Meyco MP320 (fournie par la société BASF), est à base de silice colloïdale ($d_{50} = 7\text{ nm}$). Ce produit a été développé pour l'injection des failles et des fissures dans les roches, ainsi que pour la consolidation des sables. Il est également largement utilisé pour l'exécution des tunnels (phase de creusement ou imperméabilisation des tunnels existants).

Le produit se présente sous forme d'une suspension, dont la gamme de température d'utilisation varie entre $+5^\circ$ et $+40^\circ\text{ C}$. La suspension ne peut pas faire prise sans l'ajout d'un « accélérateur », à base de NaCl, dont le dosage massique par rapport à la nanosilice (A/N) permet de contrôler le temps de prise.

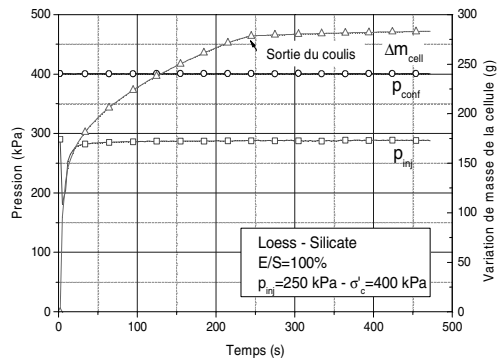


Figure 5 Essai d'injection avec le silicate

On a réalisé préalablement une série d'essais pour déterminer le temps de prise de la nanosilice pure et diluée à 20 % en fonction du dosage de l'accélérateur. Les résultats sont présentés sur la figure 6. On observe que l'on peut régler le temps de prise assez précisément entre quelques minutes et plusieurs heures. Le temps de prise a été fixé à 2 heures, ce qui correspond à une rapport massique accélérateur sur nanosilice (A/N) d'environ 17 %. pour une dilution de 20% et 11 % pour le produit pur.

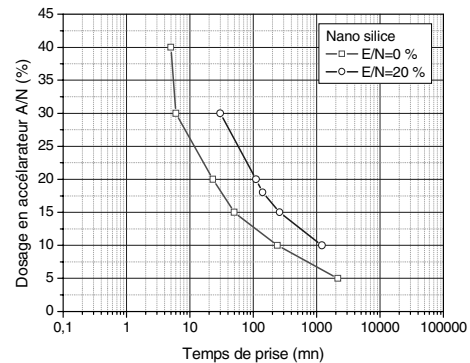


Figure 6 Temps de prise de la nanosilice en fonction de la dilution et de la concentration en accélérateur

La figure 7 présente une synthèse des résultats sur l'influence de la dilution de la nanosilice sur l'injectabilité du

loess à une teneur en eau naturelle ($w=18\%$). Les résultats montrent qu'il est nécessaire de diluer la nanosilice pour imprégner le matériau, et que l'imprégnation est d'autant plus rapide que la pression d'injection est grande. En effet, dans le cas du produit pur ($E/N=0\%$), le coulis n'est pas sorti de l'éprouvette.

Ces résultats montrent que la nanosilice est injectable dans un loess à condition de la diluer.

Si l'on compare les résultats obtenus avec la nanosilice ($E/N=20\%$) et le silicate ($E/S=100\%$), ont obtenu des résultats pratiquement identiques en termes de prise de masse de la cellule (Figure 8). Ces résultats montrent que les deux coulis présentent la même injectabilité vis-à-vis du loess, bien que la nanosilice comporte des particules très fines.

Cependant, il faut noter qu'il est impossible de gérer le temps de prise du silicate comme cela est possible avec le dosage en accélérateur pour la nanosilice.

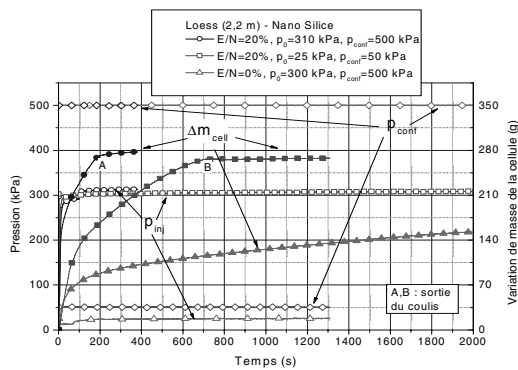


Figure 7 Essais d'injection avec la nanosilice

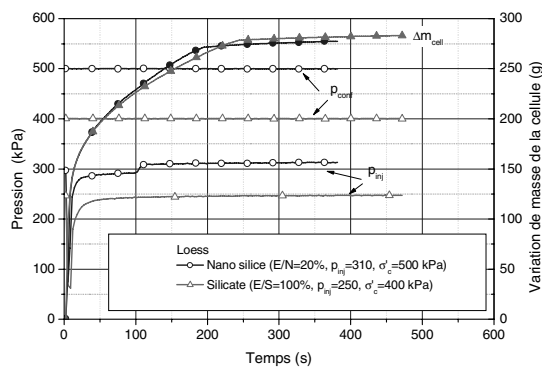


Figure 8 Comparaison de l'injectabilité du silicate et de la nanosilice.

6 CONCLUSION

On donne ci-dessous les principales conclusions auxquelles on a pu arriver, sur la base des travaux réalisés sur l'injectabilité d'un loess naturel, et présentés dans cette communication.

1) Les coulis de ciments surmoulus (Spinor A12 et Spinor A6) ne sont pas adaptés à ce type de sol, les particules en suspension étant encore trop grosses pour la matrice à injecter ;

2) L'injectabilité du silicate testé paraît bonne. On arrive facilement à un régime permanent similaire à celui obtenu lors de l'injection d'eau. On a une bonne consistance de l'échantillon après prise. Par contre, on ne contrôle pas bien la prise et, en particulier, le temps de prise, qui peut dépendre de nombreux facteurs. Par ailleurs, un problème important lié aux silicates est celui du vieillissement et de l'altération du produit dans le temps ainsi que de sa stabilité dans le temps.

3) L'injectabilité de la nanosilice diluée est bonne, et l'on atteint, comme pour le silicate, un régime quasi permanent bien établi, ce produit présentant l'avantage, par rapport au silicate, d'un bon contrôle du temps de prise grâce à un accélérateur. Par rapport aux silicates, le produit présente l'avantage d'être non toxique, ce qui est intéressant par rapport à des préoccupations d'environnement.

La nanosilice paraît être, sur la base des premiers essais réalisés, un produit très intéressant pour les loess, méritant un approfondissement des recherches sur le plan de l'injectabilité du produit. De plus, il est également nécessaire d'évaluer le gain de résistance du loess injecté au cours de la prise de la nanosilice.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Cambefort, H. 1967. Injection des sols. Tome I. Principes et méthodes. Editions Eyrolles. Paris.
- Delfosse-Ribay, E., Djeran-Maigre, I., Cabrillac, R. & Gouvenot, D. 2002. Influence of grouts on unconfined creep behaviour of grouted Fontainebleau sand: experimental study and primary creep modelling. *Ground Improvement*, **6** (1): 23-37.
- Gallagher, P.M., Conlee, C.T. & Rollins, K.M. 2007. Full-scale testing of colloidal silica grouting for mitigation of liquefaction risk. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **133** (2): 186-196.
- Gouvenot, D. 1998. State of the art in European grouting. *Ground Improvement*, 1998, **2** : 51-67.
- Karam, J.P. 2007. Etude de la rhéologie des loess du Nord de la France Application à l'évaluation de leur risque de liquéfaction. Thèse de l'ENPC, Paris, 260 p.
- Saada, Z., Canou, J., Dormieux, L. & Dupla, J.C. 2006 Evaluation of elementary filtration properties of a cement grout injected in a sand. *Canadian Geotechnical Journal*, **43** (12) : 1273-1289.
- Shimoda, M. & Ohmori, H. 1982. Ultra fine grouting material. *Grouting in Geotechnical Engineering*, ASCE, New York, pp. 77-91.
- Zebowitz, S., Krizek, R.J. & Atmazidis, D.K. 1989. Injection of fine sands with very fine cement grout. *Journal of Geotechnical Engineering Div., ASCE*, **115** (12) : 1717-1733.