



sols

APPORTS D'UN TRAITEMENT NON TRADITIONNEL POUR LE COMPACTAGE DES SOLS FINS

Gaëtan BLANCK^{1,2}, Olivier CUISINIER¹, Farimah MASROURI¹

¹ Laboratoire Environnement Géomécanique et Ouvrages (LAEGO), 54501 Vandœuvre-lès-Nancy.

² Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME).

1. INTRODUCTION

La prise en compte des problématiques de développement durable tend à modifier les pratiques des entreprises de terrassement. Cette démarche vise à concilier les aspects techniques et environnementaux dans les variantes proposées tout en respectant l'équilibre financier des projets. Conscientes de l'importance revêtue par cette problématique, les entreprises du monde de la construction se sont engagées début 2009 auprès du ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement sur un ensemble de points à améliorer en vue d'atteindre les objectifs du développement durable dans ce secteur [1]. Parmi les défis à relever figurent notamment la valorisation de l'ensemble des matériaux naturels extraits, la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la réduction de la consommation d'eau sur chantiers. La solution proposée pour répondre à ces objectifs implique le développement des techniques de traitement des sols existantes et l'innovation dans l'utilisation de produits non traditionnels. Ces produits sont issus de diverses industries et présentent l'avantage d'être peu onéreux et d'avoir *a priori* un impact environnemental limité. Ces produits très divers en nature

peuvent être classés en plusieurs catégories. Sont ainsi distinguées les solutions acides, solutions enzymatiques, lignosulfonates, émulsions bitumineuses, émulsions de résines végétales ou encore de polymères de synthèse [2]. Cependant, les conditions d'utilisation de ces produits restent encore mal connues et les études indépendantes sur le sujet sont peu nombreuses. Malgré les intérêts potentiels présentés par les produits non traditionnels, certains auteurs ([2], [3] et [4]) notent le manque d'études scientifiques détaillées permettant d'évaluer de façon objective les effets de ces produits sur les caractéristiques géotechniques des sols traités. Dans ce contexte, la mise en œuvre d'une démarche d'évaluation rigoureuse basée sur des études scientifiques s'impose.

Des guides d'utilisation des produits non traditionnels pour la réalisation de routes non revêtues ont été établis aux États-Unis ([5] et [6]). L'emploi de tels produits permettrait notamment d'augmenter la densité des sols. Les modifications induites par le traitement ont également comme effet de limiter l'érosion des sols tout en réduisant les émissions de poussières liées au trafic [7]. Parmi l'ensemble des produits disponibles, la présente étude s'intéresse aux solutions aqueuses acides dont l'utilisation est relativement



répandue au sein des produits non traditionnels. Ces produits agiraient par dissolution des minéraux argileux conduisant à améliorer le comportement mécanique des sols [8]. Cependant, le mécanisme d'action proposé n'est pas étayé d'observations expérimentales.

Des résultats issus de différents projets de traitement entrepris aux États-Unis entre 1992 et 1995 indiquent un certain nombre de succès lors de la mise en œuvre *in situ* de traitements non traditionnels acide [8]. Toutefois, dans certains cas, le traitement s'est soldé par un échec dont la cause est généralement attribuée à des erreurs dans les procédures d'application ou de dosage des produits utilisés. La présence de carbonate de calcium est également supposée influencer les résultats mécaniques obtenus après traitement [9]. D'autres études *in situ* ont mis en évidence des améliorations de 10 à 130 % de l'indice CBR des sections traitées après huit mois de cure [10]. En ce qui concerne les études en laboratoire, les résultats des essais mécaniques effectués n'ont montré que des modifications mineures des caractéristiques étudiées. Ainsi, des modifications de moins de 10% de la résistance à la compression simple d'une grave argilo-sableuse et d'un limon traités avec différents dosages (0,01 à 0,1 %) d'un produit acide ont été constatées ([2] et [12]). Les essais de compactage effectués par les mêmes auteurs n'ont pas montré de modifications significatives. Toutefois, certaines études ont mise en évidence une action du traitement sur les teneurs en eau optimales et densités sèches maximales de différents sols argileux ([11] et [13]).

Les résultats des études publiées dans la littérature indiquent un certain potentiel des produits non traditionnels acides en traitement des sols. Cependant, une grande variabilité des résultats est observée dont l'origine peut être liée à la nature des sols ou à celle des produits de traitement uti-

lisés. La présente étude vise ainsi à mettre en évidence le rôle de la nature du sol sur les effets du traitement acide retenu et à évaluer les implications techniques et environnementales qui découlent des effets observés.

2. MATÉRIAUX ET DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE

La présente partie expose les principales caractéristiques du produit de traitement et des trois sols étudiés puis détaille le protocole expérimental de confection des éprouvettes de sol.

2.1. Caractéristique du produit de traitement

Le produit de traitement étudié est commercialisé sous la forme d'une solution aqueuse d'acide sulfurique contenant du limonène sulfonaté. Toutefois, la composition exacte du produit n'est pas communiquée. La solution, de couleur noire doit être diluée dans l'eau avant aspersion sur le sol à traiter. Le dosage recommandé quelle que soit la nature du sol est de 0,2 L/m³. Sachant que la densité du produit est de 1,15 et en supposant une masse volumique sèche du sol compacté soit de 1,6 Mg/m³, le dosage équivalent en masse de produit par masse de sol sec est de 0,014 %. Ce dosage est nommé dosage de référence par la suite. Le produit est conservé à température ambiante à l'abri de la lumière selon les recommandations du fournisseur.

Propriété	Limon de Luxeuil	Limon de Xeuilley	Limon calcique
		Granulométrie	
Passant 80 µm (%)	89,6	95,0	97,1
Passant 2 µm (%)	32	25	26
		Limites d'Atterberg	
Limite de plasticité (%)	29	28	28
Limite de liquidité (%)	50	37	39
Indice de plasticité	21	9	11
		Surface spécifique	
VBS (g/100g)	2,1	3,1	3,8
		Teneur en carbonate	
CaCO ₃ (%)	0,1	1,3	22,3
		Classe de sol	
Classification GTR	A2	A2	A2

Tableau 1. Caractéristiques des trois limons étudiés.

2.2. Caractéristiques des sols

Trois sols fins sont étudiés (tableau 1). Ces sols appartiennent à la catégorie A2 selon le Guide des Terrassements Routiers (GTR). Parmi les trois sols, le limon calcique se distingue par sa teneur supérieure en carbonate de calcium (22,3 %). Cette particularité permet d'observer l'influence éventuelle de ce minéral sur le comportement mécanique du sol. Les effets du dosage sont évalués sur le limon de Luxeuil tandis que les deux autres limons sont traités au dosage de référence.

2.3. Préparation des éprouvettes

Préalablement à leur utilisation, les sols sont séchés dans une étuve à 60°C. Après mise à teneur en eau à 10 %, le sol est laissé au minimum 16 heures en sac hermétiquement fermé. Passé ce délai, la masse de produit nécessaire au traitement est prélevée à l'aide d'une seringue puis pesée à $\pm 0,01$ g près. La quantité de produit est alors mélangée au volume d'eau nécessaire pour amener le sol à la teneur en eau souhaitée. Si la quantité de produit est trop faible, une masse plus importante est prélevée et diluée dans un volume d'eau adéquat pour respecter le dosage visé. L'eau mélangée au produit de traitement est incorporée lentement au sol lors des opérations de malaxage effectuées à l'aide d'un malaxeur à couteaux. Après une heure de cure, le sol est compacté à l'énergie Proctor normale à l'aide d'une dame Proctor automatique selon la norme NF P 94-093.

Les éprouvettes réalisées pour la mesure de la résistance à la compression simple sont confectionnées par double pis-

tonnage dans des moules cylindriques de dix centimètres de hauteur et de cinq de diamètre. Chaque éprouvette est emballée dans du papier cellophane recouvert d'aluminium puis conservée dans une salle climatisée à 20°C. Chaque lot comporte trois éprouvettes. Les éprouvettes sont confectionnées à une teneur en eau égale à celle de l'Optimum Proctor Normal (OPN) de chaque traitement et 98,5 % de la masse volumique sèche maximale.

3. EFFET DU TRAITEMENT SUR LES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES SOLS

Les caractéristiques de compactage de chaque sol sont déterminées pour le sol non traité et après ajout de 0,014 % de produit de traitement selon la procédure décrite précédemment. Pour le limon de Luxeuil, l'influence du dosage sur les caractéristiques de compactage et de résistance à la compression simple a été étudiée. Les éprouvettes confectionnées pour la mesure de la résistance à la compression simple des sols subissent des temps de cure compris entre un et 60 jours.

3.1. Propriétés de compactage

L'ajout du produit de traitement au dosage de référence entraîne un déplacement de deux points de l'optimum du limon de Luxeuil vers le côté sec sans augmentation significative de la masse volumique sèche (figure 1). Un comportement différent est observé pour le limon de Xeuilley

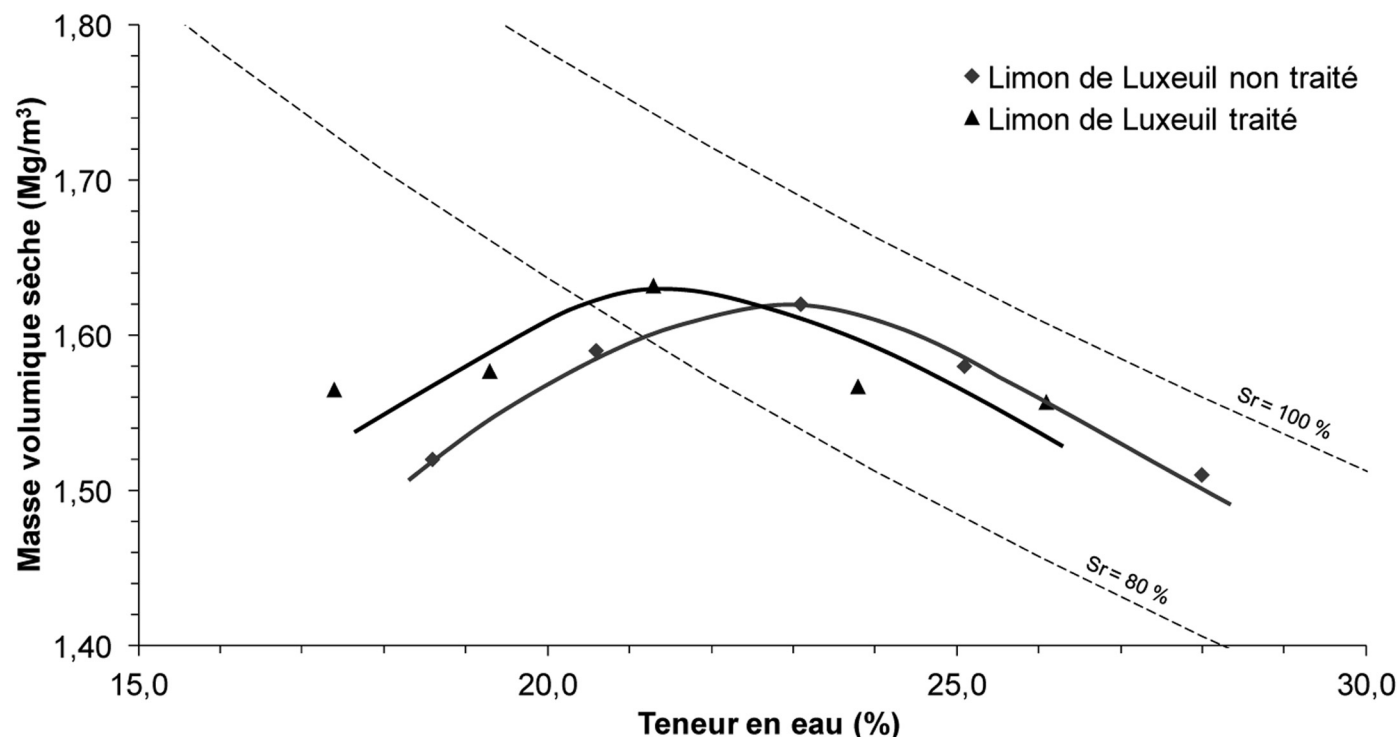


Figure 1. Effet du traitement à 0,014 % de produit acide sur la courbe de compactage Proctor normal du limon de Luxeuil.

pour lequel le traitement ne modifie pas l'optimum de compactage (figure 2). Le limon calcique réagit différemment des deux autres sols et présente une augmentation de $0,05 \text{ Mg/m}^3$ de la masse volumique sèche à l'optimum (figure 3). Cette augmentation est accompagnée du gain d'un point de teneur en eau à l'optimum Proctor (tableau 2).

La modification du dosage pour le limon de Luxeuil affecte la masse volumique sèche à l'optimum d'au maximum $0,03 \text{ Mg/m}^3$ sans faire varier la teneur en eau correspondante, celle-ci reste en effet comprise entre 21,0 et 21,5 % (tableau 3). Ainsi, les références de compactage ne sont pas affectées significativement entre les deux dosages extrêmes employés (0,004 et 0,028 %).

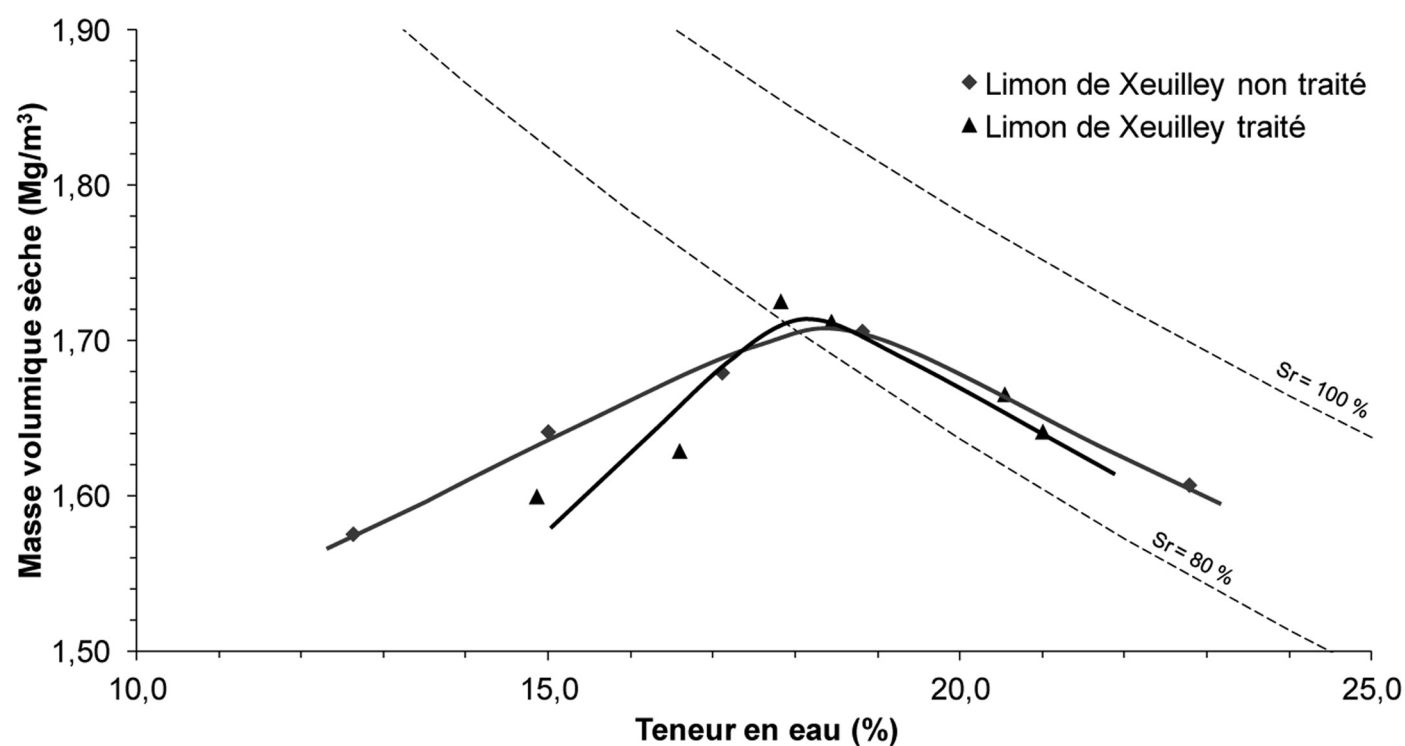


Figure 2. Effet du traitement à 0,014 % de produit sur la courbe de compactage Proctor normal du limon de Xeuilley.

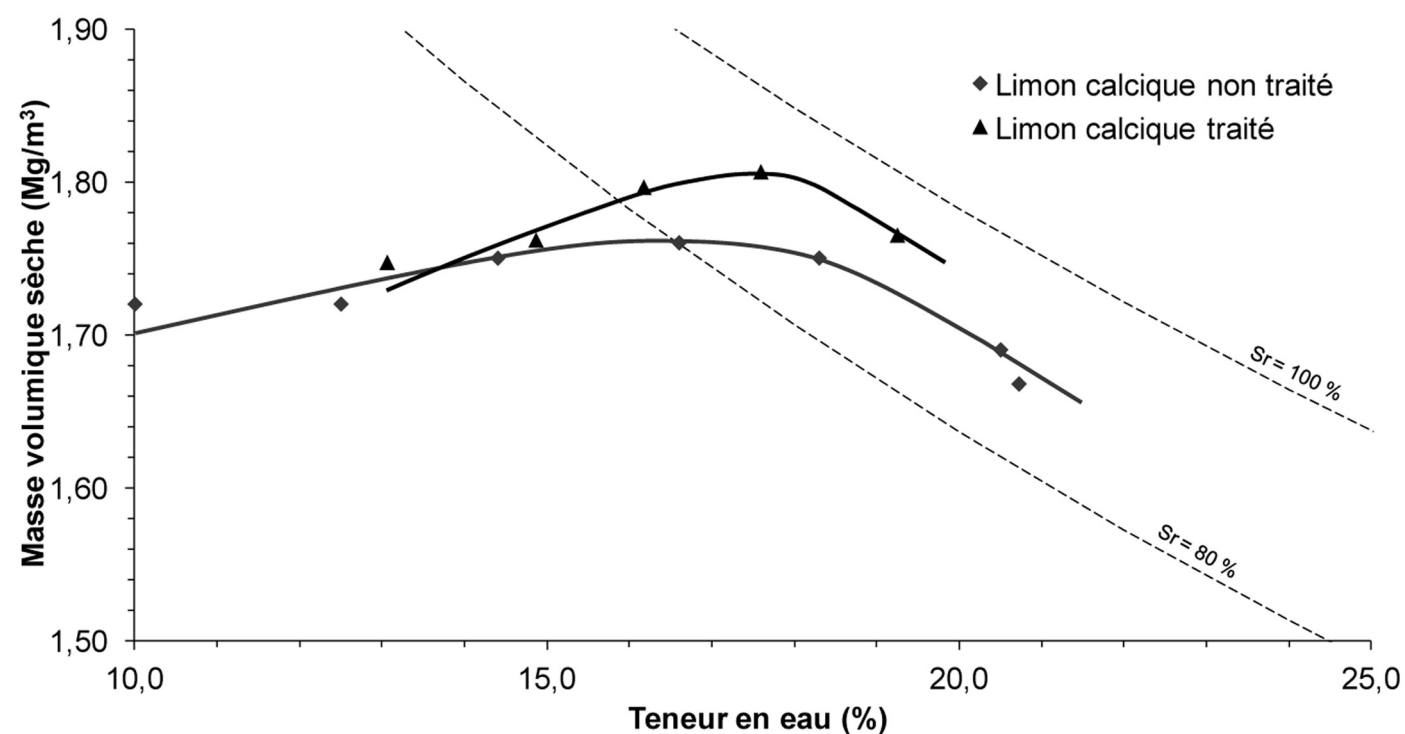


Figure 3. Effet du traitement à 0,014 % de produit acide sur la courbe de compactage Proctor normal du limon calcique.

Caractéristique	Limon de Luxeuil		Limon de Xeuilley		Limon calcique	
	NT	T	NT	T	NT	T
ρ_{dOPN} (Mg/m ³)	1,62	1,63	1,71	1,72	1,76	1,81
w_{OPN} (%)	23,2	21,3	18,5	18,3	16,5	17,5

Tableau 2. Caractéristiques de l’optimum de compactage pour chaque sol non traité (NT) et traité (T) à 0,014 %.

Limon de Luxeuil		
Dosage (%)	Caractéristiques à l’optimum Proctor normal	
	ρ_d (Mg/m ³)	w_{OPN} (%)
Non traité	1,62	23,2
0,004 %	1,65	21,0
0,007 %	1,64	21,5
0,014 %	1,63	21,3
0,028 %	1,62	21,5

Tableau 3. Références de l’optimum Proctor normal du limon de Luxeuil en fonction du dosage en produit de traitement.

3.2. Résistances à la compression simple

Les résultats obtenus montrent que pour le limon de Xeuilley et le limon calcique, les valeurs mesurées sont identiques avant et après traitement (figure 4). Le constat est différent pour le limon de Luxeuil. En effet, la résistance du sol traité est près de trois fois supérieure à celle du sol non traité et ce dès le premier jour de cure. Ce phénomène trouve une explication dans le déplacement vers le côté sec de l’optimum de compactage après traitement. Les éprouvettes confectionnées en sol traité sont de ce fait plus

sèches ($w = 21,3$ % au lieu de 23,2 %) et légèrement plus denses que celles en sol non traité. La résistance à la compression simple des trois sols traités ne montre pas d’évolution significative au cours du temps (figure 4). Ainsi, pour le limon de Luxeuil, les valeurs mesurées restent comprises entre 0,4 et 0,5 MPa entre un et 60 jours. L’effet d’une modification du dosage sur la résistance à la compression simple après sept et 28 jours de cure a été étudié sur le limon de Luxeuil avec des dosages compris entre 0,001 et 0,028 % (tableau 4). Les écarts entre les valeurs moyennes des différents dosages (0,32 à 0,43 MPa) peuvent être attribués aux différences de teneur en eau et

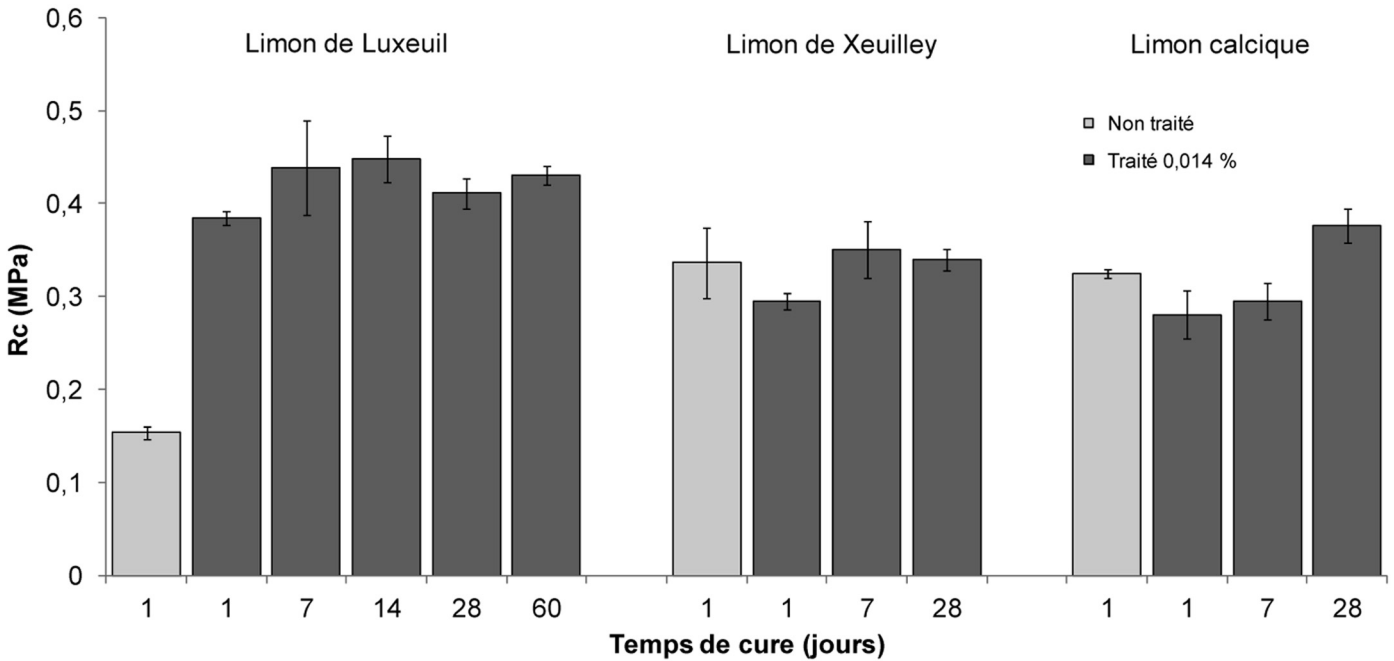


Figure 4. Évolution de la résistance à la compression simple des trois limons pour un dosage de 0,014 %.

de masse volumique sèche pouvant exister entre lots d'éprouvettes. Ainsi, la modification du dosage dans la gamme testée n'influence pas de manière significative la résistance à la compression simple du limon de Luxeuil.

Dosage	Rc à 7 j (MPa)	Rc à 28 j (MPa)
0,001 %	0,35	0,36
0,007 %	-	0,35
0,014 %	0,43	0,41
0,028 %	0,33	0,32

Tableau 4. Résistance à la compression simple à l'OPN du limon de Luxeuil pour différents dosages.

3.3. Bilan

La conduite des essais mécaniques a permis d'évaluer l'effet du traitement sur les caractéristiques de compactage et de résistance à la compression simple de trois limons. Pour chacun d'entre eux, les caractéristiques de l'optimum Proctor normal sont modifiées, sans qu'il n'y ait de tendance commune aux trois sols. L'optimum du limon de Luxeuil est déplacé vers des teneurs en eau plus faibles alors qu'aucune modification n'est observée pour le limon de Xeuilley. À l'inverse du limon de Luxeuil, l'optimum Proctor du limon calcique est déplacé vers une teneur en eau et une masse volumique sèche plus importante. Les résistances à la compression simple acquises par les trois sols traités n'évoluent pas au cours du temps. Ces valeurs sont par ailleurs identiques à celles des sols non traités sauf pour le limon de Luxeuil où les modifications des références de compactage entraînent une amélioration de la résistance à la compression simple. Enfin, pour le limon de Luxeuil, ni les propriétés de compactage ni celles de résistance à la compression simple ne sont affectées significativement par une modification du dosage. L'action du traitement sur les courbes de compactage du limon de Luxeuil et du limon calcique permet d'envisager les applications suivantes :

- la diminution de deux points de la teneur en eau optimale du limon de Luxeuil rend le traitement intéressant pour la mise en œuvre de ce sol s'il se trouve initialement dans un état sec. En effet, l'apport d'une quantité d'eau moindre est alors nécessaire pour atteindre w_{OPN} . L'économie d'eau ainsi réalisée peut se révéler déterminante notamment dans les régions où les ressources en eau sont peu disponibles, non renouvelables ou nécessitant un transport sur des distances importantes.
 - l'augmentation de densité observée à l'optimum de compactage du limon calcique signifie que l'aptitude du sol à se compacter est accrue par le traitement. Ainsi, pour atteindre une densité donnée, le traitement permet de réaliser une économie d'énergie de compactage.
- La diversité des effets du traitement sur les trois limons, ne permet pas à ce stade d'établir de lien direct entre la composition des sols et les effets observés. Les applications du traitement doivent de ce fait être évaluées au cas par cas. Afin de maîtriser la diversité des effets, la

recherche des mécanismes d'action est nécessaire dans le but d'identifier les paramètres conditionnant les modifications observées.

4. CONCLUSION

Le traitement de trois limons A2 avec un produit non traditionnel acide a permis de mettre en évidence des modifications des caractéristiques de compactage des sols. Pour deux sols testés cette modification va dans le sens d'une mise en œuvre plus aisée notamment du côté sec de l'optimum de compactage. Le choix du traitement non traditionnel acide permet pour ces sols de réduire la consommation d'eau et d'énergie nécessaire à leur mise en œuvre.

5. REMERCIEMENTS

Les résultats présentés sont issus de travaux financés par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME), Égis Géotechnique et DTP Terrassement. Les auteurs tiennent à remercier l'ensemble des personnes impliquées dans cette étude pour leur participation et leur soutien.

6. BIBLIOGRAPHIE

[1] « Convention d'engagement volontaire des acteurs de conception, réalisation et maintenance des infrastructures routières, voiries et espace public urbain », mars 2009.

[2] Tingle J.S., Santoni R.L., « Stabilization of clay soils with nontraditional additives », *Journal of the Transportation Research Board*, n°1819, 2003, p. 72-84.

[3] Katz L.E., Rauch A.F., Liljestrand H.M., Harmon J.S., Shaw K.S., Albers H., « Mechanisms of soil stabilization with liquid ionic stabilizer », *Journal of the Transportation Research Board*, n°1757, 2001, p. 50-57.

[4] Rauch A.F., Katz L.E., Liljestrand H.M., An analysis of the mechanisms and efficacy of three liquid chemical soil stabilizers, Report FHWA/TX-03/1993-1, Austin, 2003.

[5] Maher M., Marshall C., Harrison F, Baumgaertner K., Context Sensitive Roadway Surfacing Selection guide, Federal Highway Administration, Report No. FHWA-CFL/TD-05-004, 2005.

[6] Kestler M.A., Stabilization Selection Guide for Aggregate and Native-Surfaced Low Volume Roads, U.S. Department of Agriculture Forest Service, 2009.

[7] Surdahl R.W., Woll J.H., Marquez H.R., « Stabilization and Dust Control at the Buenos Aires National Wildlife Refuge, Arizona » *Transportation Research*

- Record : Journal of the Transportation Research Board*, n°1989, 2007, p. 312 – 321.
- [8] Scholen D.E., « Stabilizer mechanisms in nonstandard stabilizers », *Sixth International Conference on Low-Volume Roads*, vol. 2, 1995, p. 252–260.
- [9] Marquart D.K., Chemical Stabilization of three Texas Vertisols with Sulfonated Naphthalene, MS thesis, A&M University, College Station, 1995.
- [10] Visser A.T., « Procedure for evaluating stabilization of road materials with nontraditional stabilizers », *Journal of the Transportation Research Board*, n°1989, 2007, p. 21–26.

- [11] Rajendran D., Lytton R.L., Reduction of Sulfate Swell in Expansive Clay Subgrade in the Dallas District, Research Report TX-98/3929-1, Texas Transportation Institute, College Station, 1997.
- [12] Santoni R.L., Tingle J.S., Webster S.L., « Stabilization of silty sand with nontraditional additives », *Journal of the Transportation Research Board*, n°1787, 2002, p. 61–70.
- [13] Rauch A.F., Harmon J.S., Katz L.E., Liljestrand H.M., « Measured effects of liquid soil stabilizers on engineering properties of clay », *Journal of the Transportation Research Board*, n°1787, 2002, p. 33–41.



BULLETIN D'ABONNEMENT

À retourner aux Éditions ESKA

12, rue du Quatre-Septembre, 75002 PARIS
Tél. 01 42 86 55 65 – Fax 01 42 60 45 35

Nom
Raison sociale.....
Adresse.....
Code postal Ville Pays

Je m'abonne pour l'année **2012** (6 numéros/an) à la revue « *Annales du BTP* » :

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tarif FRANCE individuel (TTC) : 237 € | <input type="checkbox"/> Tarif ETRANGER individuel (HT) : 285 € |
| <input type="checkbox"/> Tarif FRANCE institution (TTC) : 296 € | <input type="checkbox"/> Tarif ETRANGER institution (HT) : 341 € |

Je joins : ☐ Un chèque bancaire à l'ordre des Editions ESKA
☐ Un virement bancaire aux Editions ESKA -
 BNP Paris - Champs Elysées - 30004-00804 - Compte 000101399.56

* 6/2011