

---

# Évaluation des effets d'un produit acide en traitement des sols

Blanck Gaëtan<sup>1,2\*</sup>, Cuisinier Olivier<sup>1</sup>, Farimah Masrouri<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Environnement Géomécanique et Ouvrages (LAEGO), rue du Doyen Marcel Roubault, 54501 Vandœuvre-lès-Nancy.

<sup>2</sup> Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME).

\* [gaetan.blanck@ensg.inpl-nancy.fr](mailto:gaetan.blanck@ensg.inpl-nancy.fr)

---

*RESUME. Le traitement à la chaux ou aux liants hydrauliques est couramment utilisé afin d'améliorer les caractéristiques géotechniques des sols. Cependant, certains sols ne sont pas aptes à ce type de traitement. Afin de répondre aux problématiques de développement durable impliquant notamment la valorisation de l'ensemble des matériaux naturels excavés, il a été proposé l'utilisation de dérivés de sous-produits industriels. Dans ce contexte, trois sols fins ont été traités avec un produit acide contenant du limonène sulfonaté. Les résultats ont mis en évidence un décalage de la courbe Proctor vers le côté sec. Cette modification conduit à une amélioration immédiate des résistances à la compression simple du sol traité. La modification des caractéristiques de compactage rend ce type de traitement intéressant pour la mise en œuvre des sols secs et permettrait de réaliser des économies d'eau et d'énergie. Cependant, les effets observés apparaissent comme très dépendants de la nature du sol.*

*ABSTRACT. Lime or cement treatment is commonly used in earthworks field to improve geotechnical properties of fine soils. However, some soils can not be treated with these products. Sustainable development principles lead earthworks companies to try to re-use all natural extracted materials on the construction site. To reach this aim, the use of industrial by-products with limited environmental impact has been proposed. In this study, three silty soils were treated with an acid sulfonated limonene solution. The experimental results showed a reduction of the optimum Proctor water content that leads to an immediate improvement of the unconfined compressive strength of treated soil. The modifications of compaction characteristics allowed a better compaction of dry soils and could permit to save water and energy. However, the effects of the treatment seem to be highly dependent on soil nature.*

*MOTS-CLE : Traitement de sol, produit non traditionnel, limons, compactage, résistance à la compression, acide, limonène sulfonaté.*

*KEYWORDS: Soil treatment, nontraditional stabilizer, silty soils, compaction, compressive strength, acid, sulfonated limonene.*

---

## 1. Introduction

La prise en compte des problématiques de développement durable tend à modifier les pratiques des entreprises de terrassement. La valorisation de l'ensemble des matériaux naturels extraits dans l'emprise du chantier est devenue une priorité au même titre que la réduction de la consommation d'eau et d'énergie. Les techniques de traitement des sols à la chaux ou aux liants hydrauliques sont couramment utilisées afin d'améliorer les caractéristiques géotechniques des sols et de limiter les emprunts de matériaux extérieurs. Cependant, certains sols ne sont pas aptes à subir ce type de traitement. Il s'agit notamment des sols contenant des perturbateurs de prise (Le Borgne, 2010) ou nécessitant des apports d'eau importants pour être mis en œuvre. Afin de répondre aux problématiques de développement durable impliquant notamment la valorisation de l'ensemble des matériaux naturels excavés, différents produits non traditionnels pourraient être utilisés. Ces produits sont issus de diverses industries et présentent l'avantage d'être bon marché et d'avoir *a priori* un impact environnemental limité. Cependant, leurs conditions d'utilisation 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 (Katz *et al.*, 2001 ; Rauch *et al.*, 2002 ; Tingle et Santoni, 2003) 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 conduite d'évaluations rigoureuses s'impose.

Des guides d'utilisation des produits non traditionnels pour la réalisation de routes non revêtues ont été établis aux États-Unis (Maher *et al.*, 2005 ; Kestler, 2009). Leur emploi permettrait notamment d'augmenter la densité des sols, de limiter leur érosion tout en réduisant les émissions de poussières liées au trafic. Parmi l'ensemble des produits disponibles, la présente étude s'intéresse aux produits acides contenant du limonène sulfonaté 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 (Scholen, 1995). 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* des traitements (Scholen, 1995). 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 (Marquart, 1995). 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 (Visser, 2007). Cependant, les résultats des essais effectués en laboratoire n'ont montré que des modifications mineures des caractéristiques

mécaniques étudiées. Par exemple, 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 d'un produit acide ont été constatées (Santoni *et al.*, 2002 ; Tingle et Santoni, 2003). De même, les essais de compactage effectués par les mêmes auteurs n'ont pas permis de mettre en évidence de modifications significatives. Toutefois, certaines études ont montré des augmentations ou diminutions d'un à deux points des teneurs en eau à l'optimum de compactage pour différents sols argileux (Rauch *et al.*, 2003 ; Rajendran et Lytton, 1997).

Les résultats des études citées préalablement montrent le potentiel des produits non traditionnels acides en traitement des sols. Cependant, une grande variabilité des résultats est observée. Son origine peut être liée à la fois à la nature des sols et à celle des produits acides utilisés. Ainsi, cette étude cherche principalement à mettre en évidence le rôle de la nature du sol sur les effets du traitement et à proposer des applications pour les sols considérés.

## **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 acide utilisé au cours de l'étude est commercialisé sous la forme d'une solution aqueuse d'acide sulfurique concentrée. La présence de limonène sulfonaté est également signalée par le fournisseur. 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/m<sup>3</sup>. La densité du produit étant de 1,15, en supposant une masse volumique sèche du sol de 1,6 Mg/m<sup>3</sup>, le dosage en masse de produit par masse de sol sec est alors 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.

### **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.

Propriété	Limon de Luxeuil	Limon de Xeuilley	Limon calcique
Granulométrie			
Passant 80 $\mu\text{m}$ (%)	89,6	95,0	97,1
Passant 2 $\mu\text{m}$ (%)	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 <sub>3</sub> (%)	0,1	1,3	22,3
Classe de sol			
Classification GTR	A2	A2	A2

**Tableau 1.** *Caractéristiques des trois limons étudiés.*

### 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 +/- 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 permettant la mesure de la résistance à la compression simple sont confectionnées par double pistonage 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.

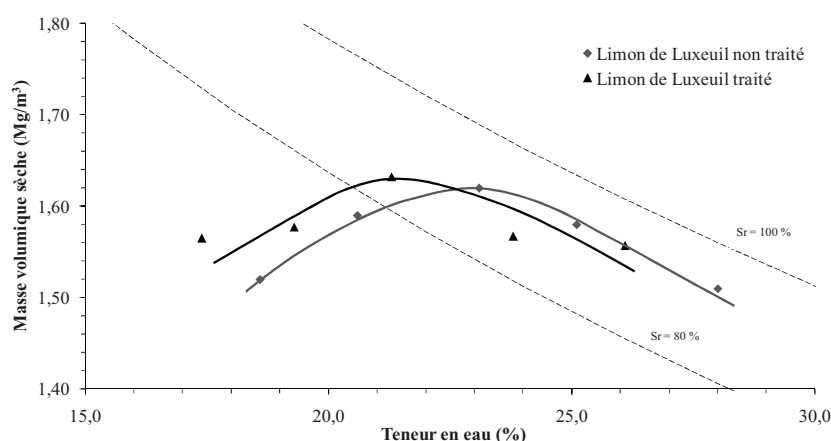
### 3. Effet du traitement sur les caractéristiques mécanique des sols

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.

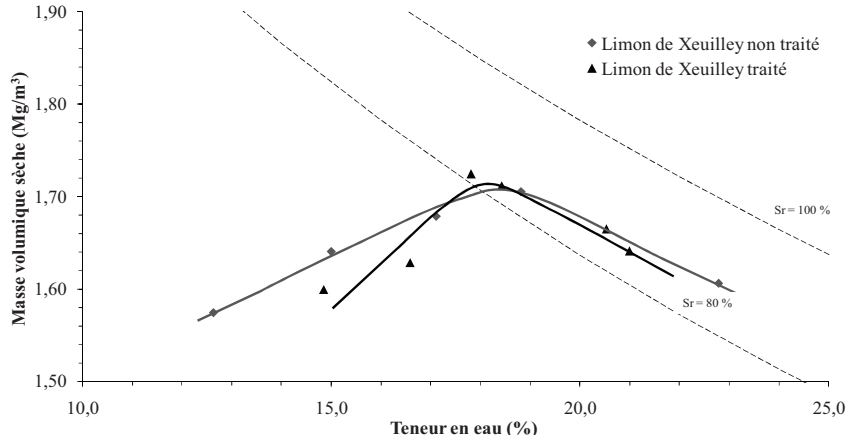
#### 2.2. Propriétés de compactage

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 Xeulley 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).

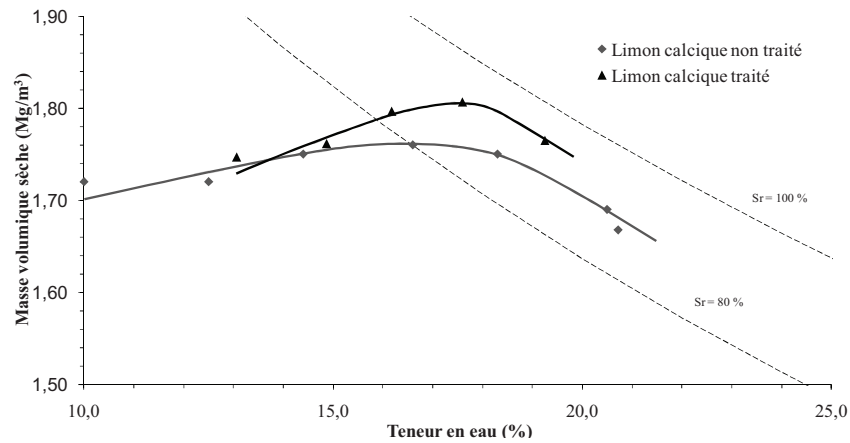
La modification du dosage pour le limon de Luxeuil affecte la masse volumique sèche à l'optimum d'au maximum  $0,03 \text{ Mg/m}^3$  sans faire varier la teneur en eau correspondante, celle-ci reste en effet comprise entre 21,0 et 21,5 % (tableau 3). Ainsi, les références de compactage ne sont pas affectées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



**Figure 1.** Effet du traitement à 0,0014 % de produit acide contenant du limonène sulfonaté sur la courbe de compactage Proctor normal du limon de Luxeuil.



**Figure 2.** Effet du traitement à 0,0014 % de produit acide contenant du limonène sulfonaté sur la courbe de compactage Proctor normal du limon de Xeuilley.



**Figure 3.** Effet du traitement à 0,0014 % de produit acide contenant du limonène sulfonaté 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
$\rho_{dOPN}$ (Mg/m <sup>3</sup> )	1,63	1,62	1,71	1,72	1,81	1,76
$w_{OPN}$ (%)	23,1	21,2	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	
	$\rho_d$ (Mg/m <sup>3</sup> )	w (%)
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.*

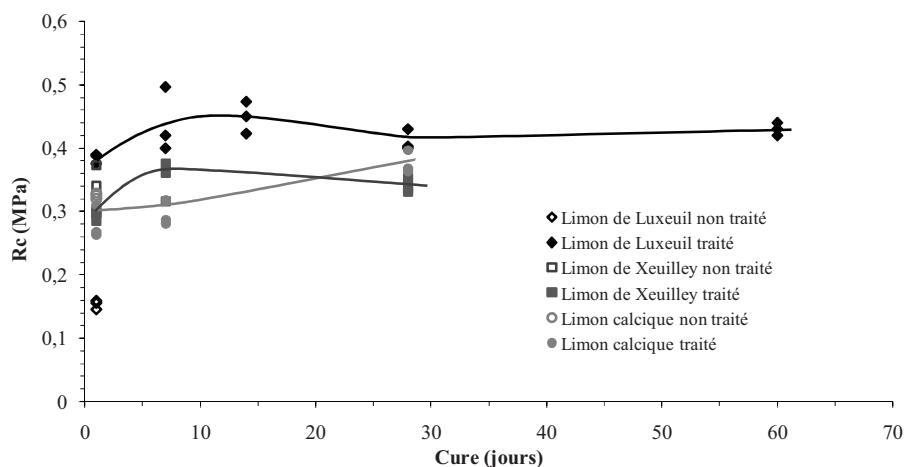
### 3.2. Résistances à la compression simple

Les résultats obtenus montrent que pour le limon de Xeulley 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 0,0028 % (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 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.*



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

### 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. A 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. Compte tenu de la diversité des effets du traitement sur les trois limons, il n'est pas possible à ce stade d'établir de lien direct entre la composition des sols et les effets observés. Ainsi, aucune généralisation ne peut être effectuée. Les applications du traitement doivent de ce fait être évaluées au cas par cas. Afin de maîtriser la variabilité des résultats, la poursuite de la recherche des mécanismes d'action est nécessaire pour comprendre les paramètres conditionnant les modifications observées.



#### 4. Conclusion

Le traitement de trois limons A2 avec un produit non traditionnel contenant du limonène sulfonaté a permis de mettre en évidence des modifications des caractéristiques de compactage des sols. 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'ajout du produit de traitement avec l'eau apportée pour humidifier le sol permet de réduire la quantité d'eau nécessaire pour atteindre l'optimum de compactage. 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. Le choix d'un traitement avec un produit non traditionnel acide permet dans ce cas de réduire la consommation d'eau du chantier à performances mécaniques comparables.

#### 5. Remerciements

Cette étude est financée par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) sous forme d'une thèse en partenariat avec Égis Géotechnique et DTP Terrassement. Les auteurs tiennent à remercier l'ensemble des personnes impliquées dans le comité de pilotage de la thèse pour leur participation et leur soutien.

#### 6. Bibliographie

- Katz L.E., Rauch A.F., Liljestrang 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.
- Kestler M.A., *Stabilization Selection Guide for Aggregate and Native-Surfaced Low Volume Roads*, U.S. Department of Agriculture Forest Service, 2009.
- Le Borgne T., *Caractérisation et quantification des éléments perturbateurs de prise lors du traitement des sols*, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2010.
- 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.
- Marquart D.K., *Chemical Stabilization of three Texas Vertisols with Sulfonated Naphthalene*, MS thesis, A&M University, College Station, 1995.
- 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.

XXIX<sup>e</sup> Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 31 mai 2011.

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.

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.

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.

Scholen D.E., « Stabilizer mechanisms in nonstandard stabilizers », *Sixth International Conference on Low-Volume Roads*, vol. 2, 1995, p. 252–260.

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.

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.