

Méthodes non traditionnelles de traitement des sols : apports techniques et impact sur le bilan environnemental d'un ouvrage en terre.

Soil treatment with non traditional additives in earthworks: evaluation of the technical and environmental improvements.

Blanck G.

Agence de l'environnement et de la Maîtrise de l'Énergie, Angers, France
LEMTA (CNRS, UMR 7563), Université de Lorraine, France.

Cuisinier O., Masrouri F.

LEMTA (CNRS, UMR 7563), Université de Lorraine, France.

RÉSUMÉ : Dans le contexte actuel de fort développement des problématiques environnementales, la mise au point de techniques permettant de valoriser au mieux les matériaux de terrassement tout en limitant l'impact environnemental des chantiers est devenue un enjeu majeur. L'une des solutions innovantes proposées est d'utiliser des sous-produits industriels organiques en traitement des sols. Ainsi, l'objectif de cette étude est d'évaluer les apports de trois produits non traditionnels (un produit acide, un produit enzymatique et un lignosulfonate) sur le compactage et la portance d'un limon et d'en évaluer les effets sur le bilan environnemental d'un ouvrage en terre. Dans un premier temps, les résultats expérimentaux ont montré que les traitements enzymatique et au lignosulfonate permettaient d'augmenter les masses volumiques sèches atteintes et d'économiser de l'eau lors de la mise en œuvre du limon à condition que sa teneur en eau initiale soit faible. Dans un second temps, la comparaison des impacts environnementaux des deux traitements effectuée suivant la méthode d'analyse du cycle de vie, a permis d'identifier la variante ayant l'impact environnemental le plus restreint.

ABSTRACT: Sustainable development principles lead earthworks companies to use all natural materials on the construction site and to reduce the environmental impact of their activities. In this context, the use of industrial organic products has been proposed. The aim of this study is to characterize the modification of compaction and bearing capacity of a silt treated with three non-traditional additives (an acid solution, an enzymatic solution and a lignosulfonate). Observed modifications of the compaction properties showed interesting applications for the compaction of the silt when its natural water content is low. For the enzymatic and lignosulfonate treatments, savings of water could be expected during the construction stage. For these two treatments, a comparison of the global environmental impact was made thanks to a life cycle assessment study.

MOTS-CLÉS : Terrassement, traitements non traditionnels, compactage, analyse du cycle de vie, impact environnemental.

KEYWORDS: Earthworks, nontraditional treatments, compaction, life cycle assessment, environmental impact.

1 INTRODUCTION

La prise en compte des problématiques de développement durable tend à se généraliser dans le monde de l'entreprise tous secteurs confondus. Cette démarche conduit à proposer et à mettre en œuvre des solutions techniques toujours plus respectueuses de l'environnement et des populations sans mettre en péril l'économie des projets. Les entreprises du monde de la construction ont pleinement pris conscience de l'importance de bâtir en tenant compte de ce principe. Ainsi, les principaux acteurs du secteur de la conception, réalisation et maintenance des infrastructures routières se sont engagés début 2009 auprès du ministère en charge de l'écologie sur un ensemble de points à améliorer en vue d'atteindre les objectifs du développement durable dans ce secteur. Parmi les défis à relever, l'un revêt une importance primordiale pour les entreprises de terrassement : il s'agit de la valorisation de l'ensemble des matériaux naturels excavés sur chantiers pour atteindre d'ici 2020 l'objectif « zéro apport extérieur » (Ministère en charge de l'environnement 2009). En effet, parmi les sols extraits, tous ne peuvent pas être utilisés directement comme matériaux de construction, en raison de leur nature ou de leur état hydrique. Il s'agit par exemple de sols très argileux, ou de sols dont la teneur en eau est trop élevée, ou au contraire trop faible par rapport à l'optimum de mise en œuvre. Ne pas valoriser ces matériaux revient à les considérer comme des déchets et nécessite alors de les évacuer en dépôts. Le déséquilibre de volume ainsi créé est alors

fréquemment compensé par un apport de granulats extraits de carrières dont l'impact environnemental est plus élevé.

Répondre à l'objectif de valorisation des matériaux du site passe à la fois par le développement des techniques traditionnelles de traitement des sols (chaux, liants hydrauliques) mais aussi par l'étude de solutions innovantes. Dans ce contexte de diversification des techniques, l'utilisation de produits non traditionnels organiques issus de diverses industries (pétrolière, papetière, sucrière, etc.) est proposée. Ces produits sont actuellement essentiellement utilisés pour la stabilisation de routes non revêtues (Scholen 1995, Surdahl 2007), ou dans une optique d'amélioration des performances mécaniques des sols (par exemple Tingle et Santoni 2003) et de réduction de leur potentiel de gonflement (Rajendran et Lytton 1997, Rauch *et al.* 2003). Cependant, l'emploi des produits non traditionnels relève essentiellement de l'empirisme laissant une part importante d'incertitude quant à l'anticipation du comportement des sols traités.

Au-delà des aspects uniquement techniques, il est également nécessaire d'aborder les traitements sous l'angle de leur bilan environnemental pour y intégrer plus amplement les aspects du développement durable. L'une des approches possibles est fondée sur les principes de l'analyse du cycle de vie (AFNOR 2006). La seconde phase de cette étude consiste à calculer et à comparer les bilans environnementaux des différentes variantes de traitement sur l'ensemble des phases du cycle de vie de la construction d'un ouvrage en terre. En effet, l'utilisation des produits non traditionnels se heurte à un verrou technique

supplémentaire du fait de l'absence d'études ayant porté sur le bilan environnemental des opérations de traitement des sols.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

Trois traitements non traditionnels ont été testés sur un limon. Suivant leur nature, une procédure spécifique est suivie.

2.1 Produits de traitement

Le produit classé dans la famille des produits acides est une solution aqueuse d'acide sulfurique contenant du limonène sulfonaté, sous-produit de l'industrie de la transformation des agrumes. Les résultats expérimentaux obtenus au laboratoire et ceux issus de la littérature (par ex. Tingle et Santoni 2003, Rauch *et al.* 2003) n'ayant pas montré de sensibilité des résultats mécaniques par rapport au dosage, un dosage classique de 0,01 % est utilisé.

Le produit enzymatique est une solution aqueuse organique dérivée de la transformation des mélasses, un sous-produit de l'industrie sucrière. Comme les propriétés mécaniques des sols traités ne semblent pas affectées par des modifications du dosage (Tingle et Santoni 2003, Velasquez *et al.* 2006), un dosage courant de 0,002 % est utilisé pour ce traitement.

Le troisième produit est une poudre de lignosulfonate de calcium, polymères organiques dérivant des lignines, sous-produit des industries papetières. Certaines études ont montré que les valeurs de résistance à la compression simple sont maximales pour un dosage de 5 % (Tingle et Santoni 2003, Santoni *et al.* 2002). Dans cette étude, les dosages massiques de 0,5 ; 2,0 et 5,0 % sont donc testés.

2.2 Caractéristiques du limon étudié

Le sol testé est un limon fin (87 % de passant à 80 μm), peu plastique ($w_L = 34\%$; $IP = 14$) fréquemment rencontré lors de travaux de terrassement en France, en région parisienne.

2.3 Procédure de traitement

Pour les traitements au produit acide et à la solution enzymatique, la première étape de préparation consiste à humidifier le sol avec de l'eau distillée pour atteindre une teneur en eau de 3 % inférieure à la teneur en eau finale souhaitée. Le mélange est effectué à l'aide d'un malaxeur à couteaux puis est laissé reposé 24 heures en sacs hermétiquement fermés. Le produit de traitement est alors dilué dans la quantité d'eau requise pour atteindre la teneur en eau souhaitée puis ajouté progressivement au sol lors de l'opération de malaxage. Pour le traitement au lignosulfonate, le produit est directement ajouté au sol préalablement humidifié. Indépendamment du traitement, un temps de cure d'une heure est respecté avant compactage.

3 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Les résultats expérimentaux présentés portent sur les caractéristiques de compactage et de portance du limon traité.

3.1 Propriétés de compactage

Les essais de compactage ont été menés conformément à la norme NF P 94-093 dans des moules CBR. Pour chaque teneur en eau, un essai de poinçonnement selon NF P 94-078 permet de déterminer la valeur de l'Indice Portant Immédiat (IPI) du sol. Pour le traitement au lignosulfonate, seul le dosage de 2,0 % est représenté sur la figure 1. Il s'agit du dosage pour lequel l'effet sur la courbe de compactage est maximal.

La figure 1 montre que le traitement à 0,01 % de produit acide n'entraîne pas de changement significatif. En revanche, après ajout de 0,002 % de solution enzymatique et de 2,0 % de lignosulfonate, l'optimum Proctor est atteint pour des teneurs en eau optimales (w_{opt}) plus faibles et des masses volumiques

sèches maximales (ρ_{dmax}) plus élevées. Ainsi, pour le traitement enzymatique, ρ_{dmax} est de 1,86 Mg/m^3 au lieu de 1,82 Mg/m^3 et w_{opt} de 14,5 % au lieu de 15,5 %. Du côté sec de l'optimum, les traitements au produit enzymatique et au lignosulfonate contribuent à augmenter les masses volumiques sèches dans une gamme de teneurs en eau allant de 8 à 15 %.

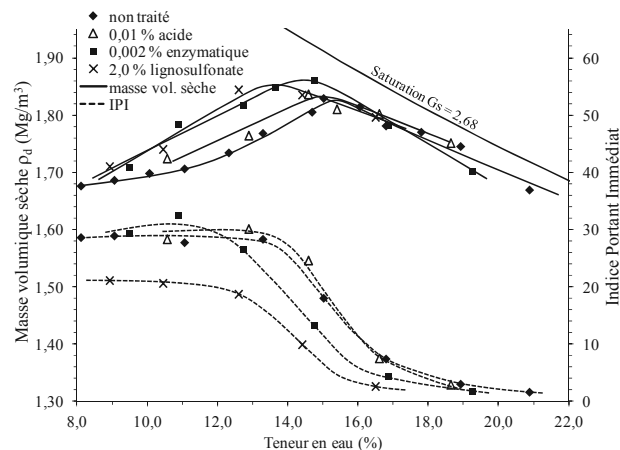


Figure 1. Courbes de compactage et de portance du limon traité avec trois produits non traditionnels.

3.2 Exemple d'application au traitement d'un sol sec

Les résultats expérimentaux montrent que certains traitements affectent la courbe de compactage en déplaçant l'optimum vers le côté sec et en augmentant les densités sèches obtenues. Cet effet peut trouver des applications intéressantes lors de la mise en œuvre de sols dont la teneur en eau initiale est située du côté sec de l'optimum. Ainsi, en supposant que la teneur en eau initiale du sol soit de 9,0 % (état très sec) et un objectif de compactage de 1,78 Mg/m^3 , trois variantes de mise en œuvre peuvent être considérées pour un compactage à l'énergie Proctor normale (Figure 2) :

- le sol non traité est humidifié jusqu'à une teneur en eau de 14,0 % puis compacté,
- le sol est traité à 0,002 % de produit enzymatique, la teneur en eau de compactage requise est alors de 11,5 %,
- le sol est traité au lignosulfonate qui est épandu sous forme de poudre, puis mélangé au sol. Ensuite, la teneur en eau du sol est augmentée pour atteindre la valeur de 11,5 % puis le sol est compacté.

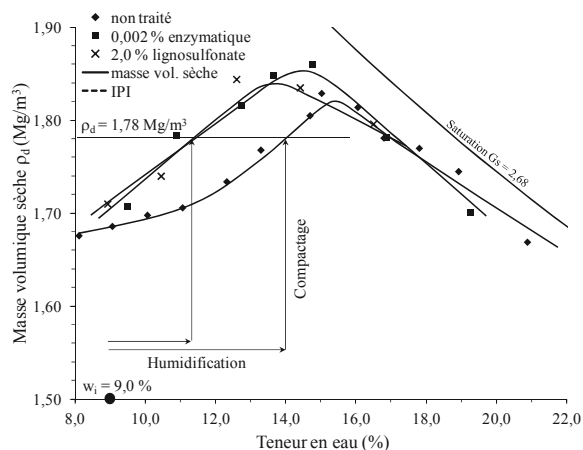


Figure 2. Comparaison des variantes de mise en œuvre du limon considérant une humidification puis un compactage à l'énergie Proctor normale.

Dans le cas du traitement au produit enzymatique et à 2,0 % de lignosulfonate, le compactage peut avoir lieu à une teneur en eau de 11,5 % au lieu de 14,0 % ce qui représente une économie d'eau de 44,5 m³ pour 1000 m³ de sol compacté.

Les résultats expérimentaux ont montré qu'il était possible, grâce aux traitements, d'atteindre un objectif de compactage donné pour une teneur en eau moindre ce qui permet de réaliser une économie d'eau. Toutefois, les étapes de production des substances utilisées, leur transport et leur mise en œuvre génèrent des impacts environnementaux qu'il est nécessaire d'évaluer sur l'ensemble des étapes du cycle de vie de l'ouvrage. L'objectif principal de la partie suivante est ainsi de définir dans quelle mesure les variantes traitées induisent une réduction de l'impact environnemental global par rapport à la mise en œuvre du sol non traité.

4 ANALYSE EN CYCLE DE VIE D'UN REMLAI TRAITÉ

La démarche appliquée est celle définie dans les normes régissant l'analyse du cycle de vie. Le principe consiste à quantifier les intrants pour un système donné puis à calculer l'impact environnemental associé grâce aux données d'Inventaire du Cycle de Vie de ces intrants (ICV). L'impact environnemental est alors évalué à l'aide d'une méthode de calcul de l'impact. Au cours de cette étude, la méthode utilisée par la norme NF P 01-010 (AFNOR, 2004) est appliquée.

4.1 Définition du système

Le système étudié est un remblai dont la masse volumique sèche visée est de 1,78 Mg/m³. La teneur en eau initiale du sol est supposée être de 9,0 % ce qui permet de se situer dans un contexte où les traitements présentent les meilleurs avantages (Figure 2). L'IPI minimal requis est fixé à 10 pour assurer une bonne traficabilité des engins de chantier. L'unité fonctionnelle choisie correspond à un volume compacté de 1000 m³.

Définir le système revient à différencier les processus qui sont pris en compte dans l'étude et ceux qui en sont exclus. Au cours de cette étude, une démarche comparative a été adoptée ce qui a permis de réaliser un certain nombre de simplifications en ne considérant que les étapes qui diffèrent entre les variantes. Par exemple, l'ensemble des étapes préparatoires au chantier, les étapes d'extraction ou encore de transport du sol n'ont pas été prises en compte dans le calcul des impacts environnementaux car ces étapes sont identiques pour toutes les variantes.

4.2 Calcul des intrants

Les intrants considérés sont l'eau, les produits de traitement et les carburants. Les quantités des autres intrants (volume de sol par exemple) sont identiques pour toutes les variantes ce qui permet de les retirer du système.

La quantité d'eau requise est directement calculée à partir de la différence entre la teneur en eau initiale et finale. L'ICV de la production de l'eau dépend principalement de son origine. Par exemple, l'eau peut être prélevée sur des réseaux d'eau potable, dans des cours d'eau, ou encore être pompée dans un forage. Il est également possible d'anticiper les besoins en eau du chantier en créant des bassins pour y stocker les eaux de pluie. Compte tenu de la diversité des approvisionnements possibles et du manque de données statistiques relatives aux prélèvements d'eau sur chantiers, l'impact environnemental associé à l'étape de prélèvement de l'eau ne sera pas pris en compte et devra être discuté dans une étude de sensibilité.

Les quantités de produit enzymatique et de lignosulfonate requises sont directement calculées en considérant le volume de sol à traiter et les dosages appliqués. L'ICV du produit enzymatique n'est cependant pas disponible. Des hypothèses de

substitution ont donc été être prises. Il a notamment été montré que le produit enzymatique possède des propriétés similaires à celles du Sodium Dodécyl Sulfate, un tensioactif courant, et qu'il agirait sur les sols selon un mécanisme similaire (Blanck *et al.* 2012). L'ICV du produit a donc été assimilé à celui du SDS dont l'ICV est connu (Stalmans *et al.* 1995, Hirsiger et Schick 1995).

L'ICV du lignosulfonate est issu d'une étude réalisée par Modahl et Vold (2011) à partir des données obtenues pour une usine située à Sarpsborg en Norvège.

Les étapes de transports consomment deux types de carburants : du diesel pour les poids lourds effectuant les transports routiers, et du fuel lourd pour les cargos chargés du transport maritime nécessaire à l'importation du produit enzymatique depuis les Etats-Unis. Connaissant la consommation de carburants nécessaire au transport des différents intrants, l'ICV de cette étape peut être calculé à partir des données du fascicule FD P01-015 (AFNOR, 2006). Quant à la consommation des engins de chantier, elles sont issues du retour d'expérience de DTP Terrassement.

Pour chacune des variantes, les intrants calculés sont résumés dans le tableau 1. Les résultats mettent par exemple en évidence que les variantes traitées consomment moins d'eau par rapport à la variante non traitée (44 500 L au lieu de 89 000 L). Pour le traitement au produit enzymatique, la consommation du pulvimixeur est deux fois moindre en comparaison avec la variante non traitée car une seule passe suffit pour effectuer le traitement contrairement à la variante non traitée où l'humidification doit être réalisée en deux passes. Le traitement au lignosulfonate nécessite quant à lui l'apport d'une masse de 35 600 kg de lignosulfonate dont le transport représente une consommation de carburant estimée à 379 L.

Tableau 1. Comparaison des intrants du système pour les trois variantes étudiées.

Intrant	Non traité	0,002 % Produit enzymatique	2,0 % Lignosulf.
Eau (L)	89 000	44 500	44 500
Produit (kg)	-	35,6	35 600
Diesel (L)	Camion	-	2
	Arroseuse	5,2	2,9
	Pulvimixeur	456	228
	Compacteur	30	30
	Épandeur	-	-
Fuel lourd (kg)	-	0,7	-

4.3 Calculs des impacts environnementaux

Pour le traitement au produit enzymatique (Figure 3), le calcul des indicateurs des 10 catégories d'impact proposés dans la norme NF P 01-010 montre que la variante traitée présente des impacts réduits dans 7 catégories sur 10 (consommation de ressources énergétiques, épuisement de ressources naturelles, consommation d'eau, changement climatique, formation d'ozone atmosphérique, pollution de l'air, pollution de l'eau). La consommation d'énergie est par exemple réduite de plus de 40 % et passe de 18,8.10³ MJ à 10,7.10³ MJ si le traitement au produit enzymatique est mis en œuvre. Au contraire, pour trois catégories, l'impact est augmenté, la production de déchets et la destruction de l'ozone stratosphérique en tête, suivie de l'acidification atmosphérique. Au-delà des valeurs calculées, il est nécessaire de se poser la question du caractère significatif des écarts observés. En effet, pour la production de déchets par

exemple, la variante traitée présente un impact 4,5 fois plus élevé, cependant, l'augmentation de la production de déchet ne représente en valeur que 2,8 kg pour 1000 m³ de sol compacté ce qui correspond à un volume très faible en comparaison aux 5200 kg/personne/an produite en moyenne en Europe (Eurostat 2008).

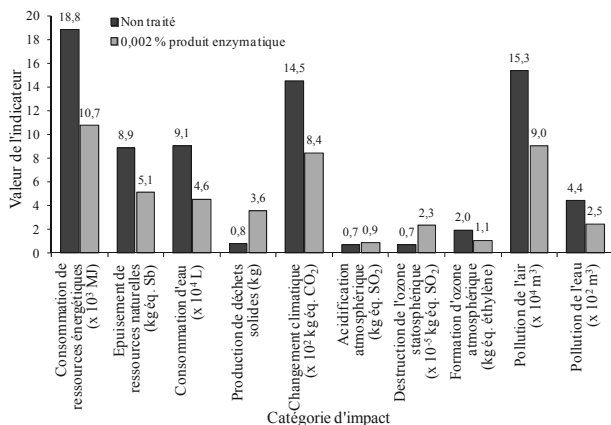


Figure 3. Comparaison des impacts environnementaux entre la variante non traitée et la variante considérant le traitement à 0,002 % de produit enzymatique.

Pour le traitement au lignosulfonate, le calcul des impacts révèle que le traitement conduit à dégrader fortement le bilan environnemental du système (Figure 4). À titre d'exemple, la consommation énergétique pour la variante considérant le traitement au lignosulfonate est évaluée à 927.10³ MJ au lieu de 18,8.10³ MJ pour la variante non traitée.

Les résultats montrent également que malgré une réduction de la quantité d'eau consommée lors de l'étape de mise en œuvre, la consommation d'eau totale est plus élevée pour la variante traitée. En effet, sur l'ensemble du cycle de vie, la consommation d'eau est estimée à 460.10⁴ L pour le traitement au lignosulfonate au lieu de 9,1.10⁴ L pour la variante non traitée. Cette différence est essentiellement due à la consommation d'eau nécessaire à la production du lignosulfonate.

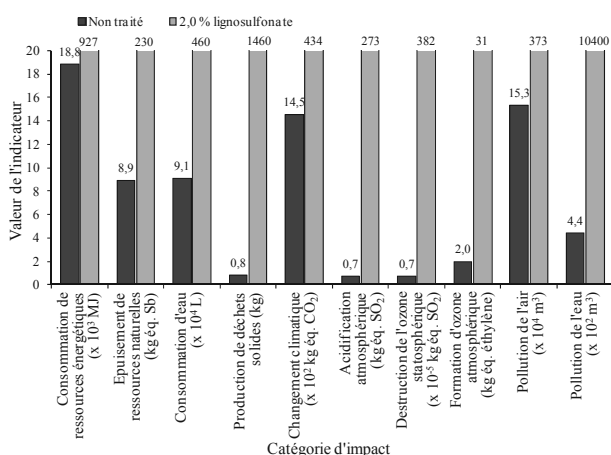


Figure 4. Comparaison des impacts environnementaux entre la variante non traitée et la variante considérant le traitement à 2,0 % de lignosulfonate.

5 CONCLUSION

L'étude présentée a l'originalité d'aborder des méthodes non traditionnelles de traitement à la fois sous l'angle des aspects géotechniques et sous celui des aspects environnementaux grâce à une étude d'analyse du cycle de vie. Les essais de compactage

et de portance ont permis d'identifier des variantes permettant de faciliter la mise en œuvre du limon et de réaliser des économies d'eau. Pour ces variantes, l'analyse du cycle de vie a montré que le traitement au produit enzymatique induisait une réduction de l'impact environnemental dans l'essentiel des catégories. Dans la situation étudiée, le traitement permet ainsi de combiner intérêt technique et environnemental. Au contraire, le traitement au lignosulfonate génère une forte augmentation de l'impact environnemental ce qui limite l'intérêt du traitement. Afin de confirmer la robustesse de l'étude environnementale, celle-ci devra être complétée par une étude de sensibilité portant sur les hypothèses et données d'entrées du système.

6 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.

7 REFERENCES

- AFNOR NF EN ISO 14040. 2006. Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre.
- AFNOR NF P01-010. 2004. Qualité environnementale des produits de construction - Déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction.
- AFNOR FD P01-015. 2006. Qualité environnementale des produits de construction - Fascicule de données énergie et transport.
- Blanck G., Cuisinier O., Masroui F. 2012. Soil treatment with non-traditional additives in earthworks. WASCON 2012 - Göteborg.
- Eurostat (2008), "Generation of waste", last update 06 March 2012. http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env_wasge_n&lang=en
- Hirsinger F. and Schick K.P. 1995. A life cycle inventory for the production of alcohol sulphates in Europe. *Tenside Surfactants Detergents*. (2), 128-139.
- Ministère en charge de l'écologie. 2009. Convention d'engagement volontaire des acteurs de conception, réalisation et maintenance des infrastructures routières, voiries et espace public urbain.
- Modahl I.S., Vold B.I. 2011. The 2010 LCA of cellulose, ethanol, lignin and vanillin from Borregaard Sarpsborg. Ostfold Research.
- Rajendran D., Lytton R.L. 1997. Reduction of sulfate swell in expansive clay subgrade in the Dallas district. Research Report TX-98/3929-1, Texas Transportation Institute, College Station.
- Rauch A.F., Katz L.E. and Liljestrand H.M. 2003. An analysis of the mechanisms and efficacy of three liquid chemical soil stabilizers. Report FHWA/TX-03/1993-1, University of Texas, Austin.
- Scholen D.E. 1995. Stabilizer Mechanisms in Nonstandard Stabilizers. *Conference Proceedings 6: Sixth International Conference on Low-Volume Roads 2*, 252-260.
- Stalmans M., Berenbold H., Berna J.L., Cavalli L., Dillarstone A., Franke M., Hirsinger F., Janzen D., Kosswig K., Postlethwaite D., Rappert T., Renta C., Scharer D., Schick K.-P., Schul W., Thomas H., Van Sloten R. 1995. European life-cycle inventory for detergent surfactants production. *Tenside surfactant detergent 32* (2), 84-109.
- Surdahl R.W., Woll J.H. and Marquez H.R. 2007. Stabilization and dust control at the Buenos Aires national wildlife refuge, Arizona. *TRR: Journal of the Transportation Research Board* 1989 (1), 312-321.
- Tingle J.S. and Santoni R.L. 2003. Stabilization of clay soils with nontraditional additives. *TRR: Journal of the Transportation Research Board* 1819 (2), 72-84.
- Velasquez R.A., Marasteanu M.O. and Holzalski R.M. 2006. Investigation of the effectiveness and mechanisms of enzyme products for subgrade stabilization. *International Journal of Pavement Engineering* 7 (3) 213-220.
- Santoni R.L., Tingle J.S. and Webster S.L. 2002. Stabilization of silty sand with nontraditional additives. *TRR: Journal of the Transportation Research Board* 1787, 61-70.