

ECONOMIES DE RESSOURCES NATURELLES : APPORTS DES TRAITEMENTS NON TRADITIONNELS

IMPACT OF NON-TRADITIONAL TREATMENTS ON THE CONSUMPTION OF NATURAL RESSOURCES

Gaëtan BLANCK¹, Olivier CUISINIER², Farimah MASROURI², Emmanuel LAVALLEE¹

1 DTP Terrassement, Guyancourt, France

2 Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée, Vandœuvre-lès-Nancy, France

RÉSUMÉ — Les acteurs du secteur des terrassements font actuellement face à des défis techniques et environnementaux majeurs : valorisation de l'ensemble des matériaux naturels excavés ; réduction de la consommation d'eau ; réduction de la consommation d'énergie. Pour répondre à ces défis, l'une des solutions proposées considère l'utilisation de produits non-traditionnels issus de la transformation de matières premières renouvelables. L'étude présentée porte ainsi sur le traitement d'un limon A2 par deux produits non traditionnels : une solution enzymatique et un lignosulfonate de calcium. Lors du compactage, ces traitements induisent une augmentation des masses volumiques sèches du côté sec de l'optimum Proctor normal du limon. Dans un contexte de sols secs, une telle modification permet de mettre en œuvre le sol à des teneurs en eau plus faibles induisant une réduction de la consommation d'eau et d'énergie au cours de la phase de construction. Afin de déterminer l'impact environnemental global et les économies de ressources induites par l'utilisation des traitements, une analyse sur l'ensemble du cycle de vie de l'ouvrage en terre a été entreprise. La méthodologie utilisée est celle de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) rapportée à une unité fonctionnelle de 1000 m³ de sol compacté. Une fois le système défini, il est possible de quantifier les intrants du système et d'évaluer les impacts environnementaux de chaque variante. À l'échelle du cycle de vie de l'ouvrage, il a ainsi été mis en évidence que le traitement à base de solution enzymatique permettait de réaliser une économie d'eau de l'ordre de 45 000 L et une économie d'énergie d'environ 8 GJ soit l'équivalent de 190 L de carburant. A contrario, le traitement au lignosulfonate conduit à une forte dégradation du bilan environnemental. Ce dernier constat montre l'importance de l'évaluation environnementale notamment pour discriminer des variantes techniques équivalentes.

ABSTRACT — Sustainable development principles lead earthworks companies to use all natural materials, and reduce the energy and water consumption. In this context, the use of renewable industrial organic products has been proposed. This paper is focused on the effects of two treatments (an enzymatic solution and a

lignosulfonate) on the compaction properties of a low-plasticity silt. Induced modifications of the compaction properties showed interesting applications for the compaction of the silt when its natural water content is low. Therefore, for the enzymatic and lignosulfonate treatments, savings of water could be expected during the construction stage. Beyond these observations, the aim of the study was also to characterize the global environmental impact of the different application defined in accordance to the experimental results. Thus, for enzymatic and lignosulfonate treatments, a comparison of the global environmental impact was done thanks to a life cycle assessment methodology based on a functional unit of 1000 m³ of compacted soil. The results were compared to the untreated situation. On the one hand, this approach showed that the treatment with the enzymatic solution induced a reduction of the water consumption of 45 000 L and an energy saving of about 8 GJ which is roughly equivalent to 190 L of fuel. On the other hand, the lignosulfonate treatment induced a dramatic increase of the environmental impact. These observations underline the importance of the technical and environmental approach especially when technical alternatives are equivalent.

1. Introduction

Dans le domaine des terrassements, économiser les ressources naturelles est devenu un enjeu majeur, indispensable à la réduction des impacts environnementaux et des coûts des projets. La volonté d'adopter une approche globale fait que cette recherche d'économies ne se focalise plus uniquement sur les granulats d'apport extraits de carrières mais concerne également les économies d'eau et d'énergie. Cette approche environnementale a été en grande partie favorisée par le développement d'outils d'analyse de type "éco-comparateur" fondés sur les principes de l'analyse du cycle de vie (AFNOR, 2006). La prise en compte des problématiques de développement durable tend ainsi à se généraliser et vise à mettre en œuvre des solutions techniques toujours plus respectueuses de l'environnement et des populations sans mettre en péril l'économie des projets. 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 (Ministère en charge de l'environnement, 2009). 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. Répondre à cet objectif 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 en considérant l'utilisation de produits non traditionnels organiques issus de diverses industries (pétrolière, papetière, sucrière, etc.). Ces produits sont actuellement essentiellement utilisés pour la stabilisation de routes non revêtues en zones arides ou semi-arides (Scholen, 1995 ; Surdahl, 2007) 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, le domaine d'emploi et l'évaluation des performances des produits non traditionnels relève essentiellement de l'empirisme laissant une part importante d'incertitude quant à l'anticipation du comportement des sols traités. Par ailleurs, l'utilisation des produits non traditionnels se heurte à un verrou technique supplémentaire du fait de l'absence d'études portant sur le bilan environnemental des opérations de traitement des sols. Dans ce contexte, l'objectif de cet article est double. Il s'agit dans un premier temps de présenter les résultats expérimentaux obtenus pour le traitement d'un limon à l'aide de deux produits non traditionnels : une solution enzymatique et un lignosulfonate de calcium. Ces résultats vont permettre de définir les applications pouvant être envisagées. Dans un second temps, une analyse environnementale de ces applications est conduite à l'aide de la méthode de l'analyse du cycle de vie.

2. Matériel et méthodes

Deux traitements sont comparés par la suite, le traitement à la solution enzymatique et le traitement au lignosulfonate.

2.1. Produits de traitement

Le produit enzymatique est une solution aqueuse organique dérivée de la transformation des mélasses, un sous-produit de l'industrie sucrière. Préalablement à son utilisation, la solution est diluée dans l'eau apportée au sol. Le produit est utilisé au dosage massique courant de 0,002 %.

Le lignosulfonate de calcium utilisé se présente sous forme de poudre. Il s'agit de polymères organiques dérivant des lignines, sous-produit de l'industrie papetière. Lors de cette étude trois dosages massiques de 0,5 ; 2,0 et 5,0 % ont été testés. Le dosage à 2,0 % ayant les effets les plus marqués sur les caractéristiques du sol (Blanck et al., 2013), seuls ces derniers sont présentés par la suite.

2.2. Caractéristique d'identification du sol

Le sol testé est un limon fin peu plastique (tableau 1) fréquemment rencontré lors de travaux de terrassement en France, notamment en région parisienne où il est rattaché à la formation des limons des plateaux des cartes géologiques.

Tableau 1. Caractéristiques d'identification du sol testé.

Caractéristique	Valeur
Passant à 80 μm (%)	87
Passant à 2 μm (%)	19
Valeur au bleu de méthylène (g/100 g)	3,1
Limite de plasticité (%)	20
Limite de liquidité (%)	34
Indice de plasticité	14

2.3. Procédure de traitement

Pour 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 reposer 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 recherchée 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. Dans tous les cas, 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.

La figure 1 montre que les traitements à 0,002 % de solution enzymatique et 2,0 % de lignosulfonate entraînent des modifications similaires des propriétés de compactage du limon. Après traitement, 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. Par exemple, le traitement enzymatique permet d'atteindre un ρ_{dmax} de 1,86 Mg/m³ contre 1,82 Mg/m³ et une teneur en eau optimale 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). Les modifications des caractéristiques de compactage laissent entrevoir 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.

Le mode d'action des produits de traitement sur les propriétés de compactage pourrait être lié aux caractéristiques tensioactives des deux produits de traitement testés (Blanck et al., 2013). En effet, l'action de produits tensioactifs sur les caractéristiques mécaniques des sols a fait l'objet d'études spécifiques (par exemple Park et al., 2006) ayant conduit à observer un déplacement de l'optimum Proctor de certains sols vers le côté sec. Un mécanisme d'action similaire semble être à l'œuvre dans le cas des traitements non traditionnels étudiés.

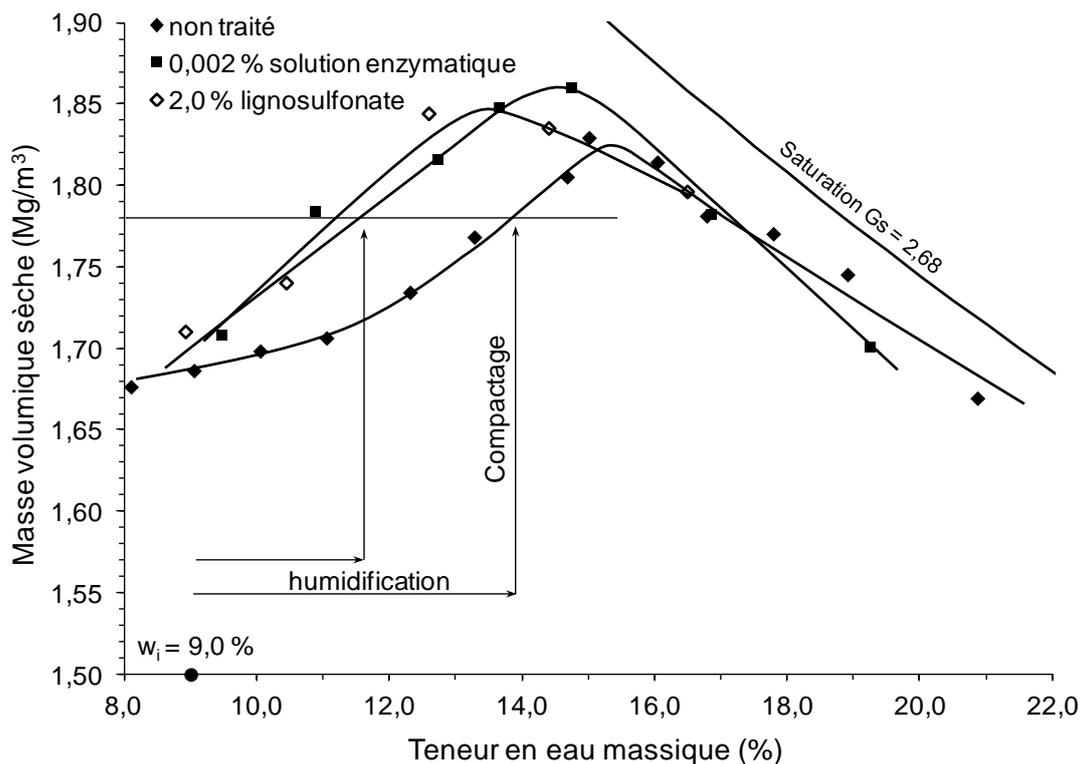


Figure 1. Courbes de compactage après traitement avec une solution enzymatique et un lignosulfonate. Les flèches correspondent aux exemples de situations de mise en œuvre qui en découlent pour une teneur en eau initiale de 9 %.

3.2. Application des traitements en terrassement

En supposant que la teneur en eau initiale du sol soit de 9,0 % (état très sec du GTR) et qu'un objectif de compactage de 1,78 Mg/m³ soit recherché, trois variantes de mise en œuvre peuvent être considérées pour un compactage à l'énergie Proctor normale (Figure 1).

1. Le sol non traité est humidifié jusqu'à une teneur en eau de 14,0 % puis compacté.
2. Le sol est traité à 0,002 % de produit enzymatique, la teneur en eau de compactage requise est alors de 11,5 %.
3. Le sol est traité au lignosulfonate qui est épandu sous forme de poudre, puis mélangé au sol. Le sol est ensuite humidifié afin d'atteindre une teneur en eau de 11,5 % avant compactage.

Les résultats expérimentaux (figure 1) montrent qu'il est possible, grâce aux traitements, d'atteindre un objectif de compactage donné pour une teneur en eau moindre permettant ainsi de réaliser une économie d'eau. Toutefois, il est nécessaire d'adopter une vision environnementale globale pour chacune des variantes. En effet, les étapes de production des substances utilisées, leur transport et leur mise en œuvre génèrent des impacts qui doivent être évalués sur l'ensemble des étapes du cycle de vie de l'ouvrage. Cet aspect est abordé dans la partie suivante grâce à une approche comparative.

4. Analyse du cycle de vie d'un remblai 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 de la méthode de calcul des impacts utilisée par la norme NF P 01-010 (AFNOR, 2004).

4.1. Définition du système

Le système étudié est un remblai construit à partir d'un sol de teneur en eau initiale de 9,0 %. 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 variantes. Par exemple, l'ensemble des étapes préparatoires au chantier, les étapes d'extraction ou encore de transport du sol n'a pas été pris 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. De même, 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 définies. Il a notamment été montré que le produit enzymatique possède des propriétés similaires à celles du Sodium Dodécyl Sulfate (SDS), un tensioactif courant, et qu'il agirait sur les sols selon un mécanisme similaire (Blanck et al., 2013). L'ICV du produit a donc été assimilé à celui du SDS dont l'ICV est connu (Stalmans et al., 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 élaboré aux 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 quantités d'intrants sont résumées dans le tableau 1. Les résultats mettent par exemple en évidence que 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 étapes. Le traitement au lignosulfonate nécessite quant à lui l'apport d'une masse de 35 600 kg de produit dont le transport représente une consommation de carburant estimée à 379 L.

Tableau 2. Comparaison des intrants du système pour les trois variantes étudiées.

Intrants	Non traité	Produit enzymatique	Lignosulfonate
Eau (L)	89 000	44 500	44 500
Produit (kg)	-	35,6	35 600
Camion routier	-	2,0	379
Diesel (L)	Arroseuse	5,2	2,9
	Pulvimixeur	456	228
	Compacteur	30	30
	Epandeur	-	2,9
	Fuel lourd (kg)	-	0,7

4.3. Calcul 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. 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. Il s'agit des catégories "production de déchets", "destruction de l'ozone stratosphérique" et "acidification atmosphérique". Au-delà des valeurs calculées, il est nécessaire de s'intéresser au 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 déchets 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 5 000 kg/personne/an produits en moyenne en Europe (Eurostat, 2010).

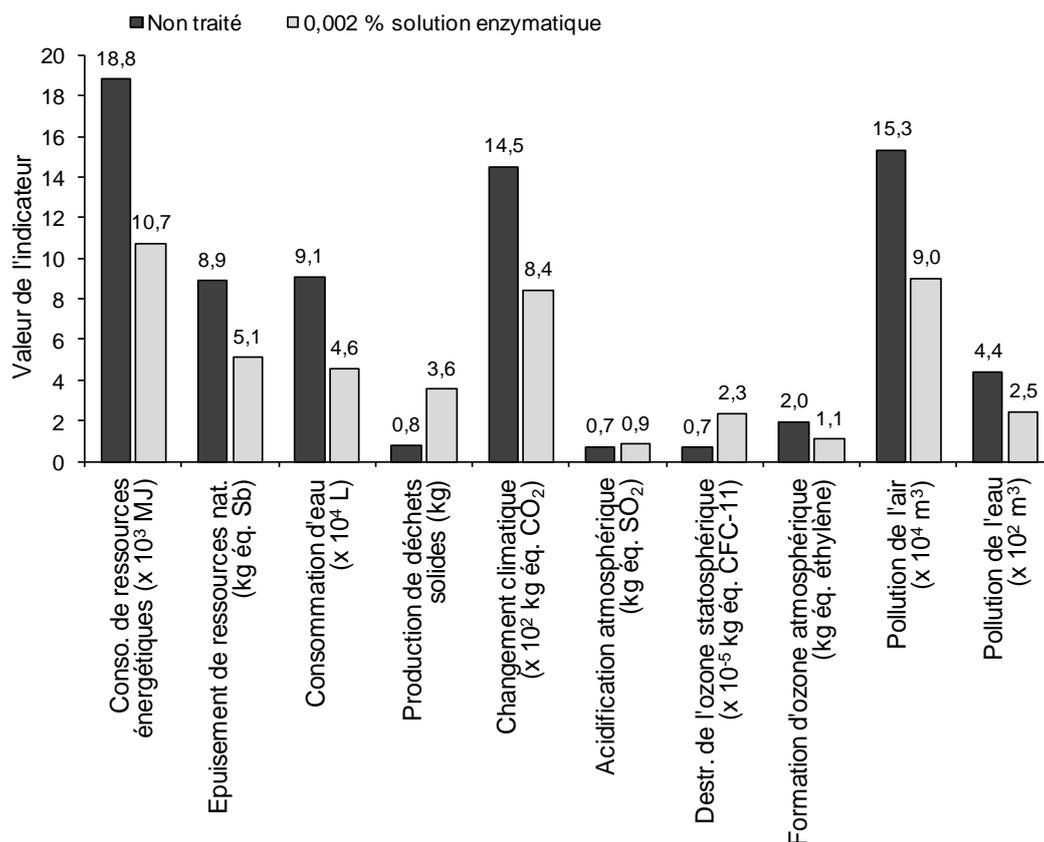


Figure 3. Comparaison des impacts environnementaux entre la variante non traitée et la variante considérant le traitement à 0,002 % de produit enzymatique.

Pour le traitement au lignosulfonate, le calcul des impacts révèle une forte dégradation du bilan environnemental du système (Figure 4). À titre d'exemple, la consommation énergétique pour 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 44 500 m³ de la consommation d'eau lors de l'étape de mise en œuvre (tableau 2), la consommation d'eau totale est plus élevée pour la variante traitée. En effet, sur l'ensemble du cycle de vie, elle 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 dont la contribution à l'impact global dépasse les 98 %.

Un constat similaire est effectué pour l'ensemble des autres catégories. Pour chacune d'entre elles, la contribution de la seule étape de production du lignosulfonate dépasse les 90 %.

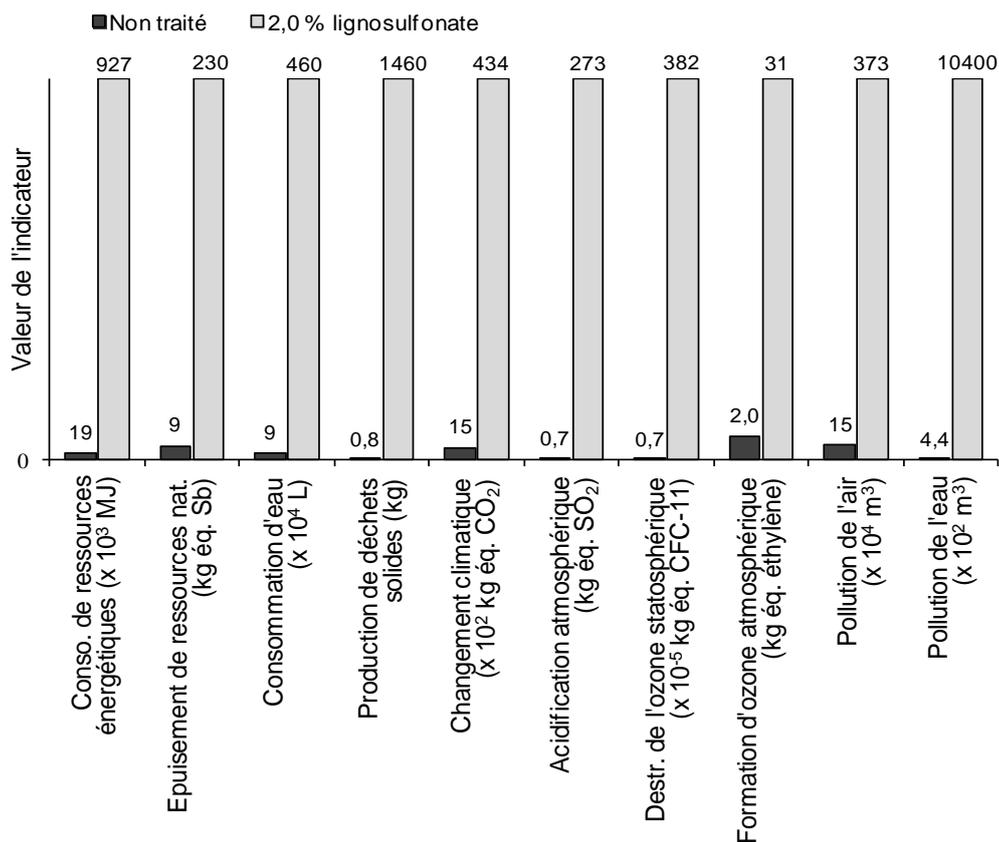


Figure 4. Comparaison des impacts environnementaux entre la variante non traitée et la variante considérant le traitement à 2,0 % de lignosulfonate.

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 l'éclairage du bilan environnemental grâce à une étude d'analyse du cycle de vie. Les essais de compactage ont permis d'identifier des variantes permettant de faciliter la mise en œuvre du limon. Pour les variantes étudiées, l'analyse du cycle de vie a montré que le traitement au produit enzymatique induisait une réduction de l'impact environnemental pour l'essentiel des catégories. Dans la situation étudiée, le traitement enzymatique permet ainsi de combiner intérêt technique et environnemental grâce aux économies de ressources naturelles réalisées (économies d'eau et de carburant issus de matières premières pétrolières) tout en permettant de valoriser des sols secs normalement inutilisables en l'état. A l'inverse, bien que le traitement au lignosulfonate permette de réaliser une économie d'eau lors de la mise en œuvre, l'analyse du cycle de vie montre une forte augmentation de l'impact environnemental s'expliquant en grande partie par l'impact environnemental élevé associé à l'étape de production du lignosulfonate.

Remerciements

Cette étude a bénéficié de financements de la part de 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 ce projet.

Références bibliographiques

AFNOR 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., Masrouri F. (2013). Soil treatment with organic non-traditional additives for the reduction of environmental impact of earthworks, Waste and Biomass Valorization, Vol. 4, n. 4, p. 703-708.

Eurostat (2010). "Generation of waste", dernière mise à jour le 06/12/2013
<http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do>

Ministère en charge de l'environnement. (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, 78 p.

Park J., Vipulanandan C., Jee Wong Kim, Myoung Hak Oh. (2006). Effects of surfactants and electrolyte solutions on the properties of soil", Environmental geology, Vol. 49, n. 7, p. 977-988.

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, 180 p.

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, 204 p.

Scholen D.E. (1995). Stabilizer Mechanisms in Nonstandard Stabilizers, Conference Proceedings 6: Sixth International Conference on Low-Volume Roads 2, p. 252-260.

Stalmans M., Berenbold H., Berna J.L., Cavalli L., Dillarstone A., Franke M., Hirsinger F., Janzen D., Koswig 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 Vol. 32, n. 2, p. 84-109.

Surdahl R.W., Woll J.H., Marquez H.R. (2007). Stabilization and dust control at the Buenos Aires national wildlife refuge, TRR: Journal of the Transportation Research Board 1989, p. 312-321.

Tingle J.S., Santoni R.L. (2003). Stabilization of clay soils with nontraditional additives, TRR: Journal of the Transportation Research Board 1819, p. 72-84.