

IMPACT ENVIRONNEMENTAL D'UN OUVRAGE DE SOUTÈNEMENT AVEC UN REMBLAI RENFORCÉ PAR DES PNEUS USAGÉS ET DES GÉOTEXTILES

H. Djadouni¹, H. Trouzine², A. Gomes Correia³

¹ *Département de Génie Civil, Faculté de Technologie, Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès, Algérie*

² *LGCE Laboratoire de Génie Civil & Environnement, Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès, Algérie*

³ *University of Minho, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal*

Email : djadounihachemi@yahoo.fr

Résumé : Les pneus usagés sont produits et cumulés dans des volumes importants causant une menace croissante pour l'environnement. L'utilisation de ces déchets avec le sol comme des matériaux de remblai légers derrière les murs de soutènement est une méthode viable vers la réduction de ces déchets, et cela peut conduire à une réduction de la poussée des terres sur la structure. L'association des géotextiles avec cette application permet la maîtrise du comportement des remblais, vue la très grande compressibilité des pneus usagés. On s'intéresse dans cet article à l'évaluation de l'impact environnemental d'un ouvrage de soutènement utilisant des pneus usagés et des géotextiles, en utilisant un outil d'évaluation environnementale basé sur l'analyse du cycle de vie (ACV). Pour cela deux variantes sont étudiées, un premier cas de référence (remblai non renforcé) et un deuxième cas d'ouvrage de soutènement avec un remblai renforcé par des pneus usagés déchiquetés et des géotextiles sont analysés. Les indicateurs de l'impact sur l'environnement de la seconde variante sont très encourageants comparés à ceux de la première variante.

Mots-clés : Géotextiles ; Pneus usagés ; Ouvrage de soutènement ; Analyse du cycle de vie (ACV).

1. Introduction :

La discussion politique, mais aussi la recherche et la science, sont actuellement affectés par la demande de «développement durable». Dans le contexte d'origine, « développement durable » est non seulement limité aux exigences d'économie d'énergie et de matières premières, mais comprend un modèle d'un développement mondial durable, fondée sur la protection des composants des ressources naturelles.

La volonté et la capacité d'atteindre ces objectifs durables décideront de notre avenir complètement indépendant du hypothétique scénario de changement climatique avec plus ou moins d'influence anthropique et impacts régionaux difficilement prévisibles. L'approche de la protection du climat dans le monde entier propagé à économiser de l'énergie et de réduire radicalement les émissions, en particulier le dioxyde de carbone CO₂ qui causé le réchauffement climatique (Heerten, 2012).

Pour deux projets de soutènement, cas de référence (remblai non renforcé) et d'ouvrage de soutènement avec un remblai renforcé par des pneus usagés déchiquetés (lambeaux de pneus) et des géotextiles, des analyses du cycle de vie (ACV) pour ces constructions ont été faites. En ce qui concerne ces deux exemples, la demande d'énergie et les émissions associées démontrent les impacts décisifs sur l'environnement, la demande d'énergie cumulée (DEC) et les émissions peuvent être utilisées comme «ACV courte» pour l'évaluation écologique, tenant compte de l'extraction et la production de matériaux de construction utilisés, le chargement, le transport et l'installation. La demande d'énergie cumulée (DEC) et les émissions de CO₂ et d'autres impacts environnementaux sont déterminées pour chacune des alternatives de construction.

2. Les avantages de l'utilisation des pneus usages et des géosynthétiques

L'avantage d'utiliser des lambeaux de pneus comme des remblais pour les murs de soutènements est que des lambeaux de pneus ne sont pas biodégradables et sont donc plus durable. Depuis lambeaux de pneus sont légers, plus petites contraintes horizontales sont induites derrière un mur de soutènement construit avec un mélange de sol et de lambeaux de pneus comme matériau de remblai, par rapport à un mur de soutènement ayant seulement le sol. En outre, les mélanges lambeaux de pneus-sable ont une résistance de cisaillement relativement élevée. En raison de ces propriétés, l'épaisseur d'un mur de soutènement peut être réduite et obtient des économies. En outre, les lambeaux de pneus sont des matériaux à drainage libre, et donc ne contribuent pas à la génération de la pression interstitielle excessive qui peut provoquer des problèmes de stabilité lors du chargement du matériau de remblayage (Yoon et al., 2006).

Pour le cas de l'utilisation des géosynthétiques, depuis de nombreuses années, il a été rapporté au sujet des avantages économiques et écologiques des méthodes de construction avec géosynthétiques en géotechnique et ingénierie hydraulique (Koerner et al., 1998). Comparaison des méthodes de construction traditionnelles avec celles utilisant des géosynthétiques, ces derniers résultent une réduction considérable des coûts de construction et/ou le temps de construction et beaucoup moins de masses qui doivent être excavées, transportées et installées.

3. Description du modèle

3.1. Géométrie et conditions du sol

Géométriquement, le mur de soutènement est un mur cantilever en béton armé avec 5,80 m de hauteur et 0,50 m d'épaisseur (figure 1). Mécaniquement, le module de Young du mur de soutènement est $E=3,107 \text{ kN/m}^2$, le coefficient de Poisson est d'environ 0,3 et sa densité est d'environ $26,43 \text{ kN/m}^3$. Le tableau 1 résume toutes les caractéristiques. Le remblai est un sol sablonneux avec une longueur semi-infini de 22,50 m. La surface du remblai est plane et ne comporte pas de surcharge.

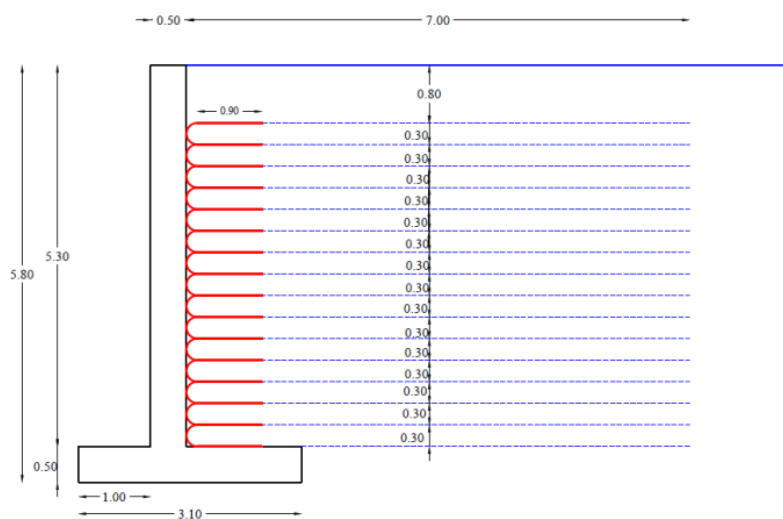


Figure 1 : Détails géométriques du mur

Tableau 1. Caractéristiques du modèle :

Matériaux	Propriétés
Mur de soutènement	$E_M=3.E+7 \text{ kN/m}^2$ $\nu_M=0.30$ $\gamma_M=26.43 \text{ kN/m}^3$
Sable	$E_M=100.000 \text{ kN/m}^2$ $\nu_M=0.25$ $\gamma_S=17.5 \text{ kN/m}^3$ $C_S=2 \text{ kPa}$ $\phi_S=34^\circ$
Mélange copeaux de pneus-sable	$E_M=80.000 \text{ kN/m}^2$ $\nu_M=0.22$ $\gamma_{CS}=11.5 \text{ kN/m}^3$ $C_{CS}=2 \text{ kPa}$ $\phi_{CS}=50^\circ$

3.2. Propriétés des matériaux

3.2.1. Copeaux de pneus

La taille nominale des copeaux de pneus, ce qui est la taille qui comprend 50% ou plus du débit dans une opération de déchiquetage de pneus usés (ASTM D 6270), était de 38 mm. Les longueurs de pneus déchiqueter ont variés entre 38 et 76 mm. Les ceintures d'acier dans les pneus ont été partiellement éliminées. Le poids total de l'unité des lambeaux de pneus livrés sur le site avant le compactage était égal à $4,9 \text{ kN/m}^3$. Le choix de la taille des copeaux de pneus est basé sur des considérations techniques et économiques.

3.2.2. Sable

Dans cette étude, on a utilisé du sable dans le mélange sol-copeaux de pneus, ce dernier est un sable de granulométrie uniforme avec moins de 6% des particules passant au tamis n° 200. Il est classé comme un sable mal-classés (SP) selon le Système de Classification Unifié des Sols (USCS). Le poids total de l'unité de ce sable avant compactage est égal à $17,5 \text{ kN/m}^3$.

3.2.2. Mélange copeaux de pneus-sable

Le rapport en poids du mélange copeaux de pneus-sable utilisé était égal à 23/77 (50/50 en volume). Ce rapport de mélange a été choisi en fonction de la disponibilité des articles et sur les recommandations de (Bosscher et al., 1992).

3.3. Cas étudiés

3.3.1. Mur de soutènement avec remblai non renforcé

Le mur de soutènement ayant seulement du sable comme matériau de remblai, et le coefficient de poussée actif est déterminée en utilisant la méthode de Coulomb, et il est d'environ 0,28. Le glissement du mur est considéré avec un coefficient de frottement de 0,4.

3.3.2. Mur de soutènement avec remblai renforcé par des copeaux de pneus

Dans ce cas, le mur de soutènement est remblayé avec un mélange de sable et de copeaux de pneus comme matériau de remblai, et le coefficient de poussée active est calculé de la même façon que dans le premier cas, il est d'environ 0,13. Comme les copeaux de pneus sont entièrement recouverts avec le sable, l'interaction sable-caoutchouc est considérée comme ayant un coefficient de frottement de glissement de 0.5; le coefficient de frottement mur-géotextile est égal à 0,55 ; le coefficient de frottement sable-géotextile est égal à 0,45.

Basé sur les résultats des tests de cisaillement direct à grande échelle, l'angle de frottement des copeaux de pneus seuls ou en mélange avec du sol est varié de 30° à 54° (Tatlisoz et al., 1998). En outre, la couche copeaux de pneus-sable a été complètement enveloppée avec des

tissus géotextiles pour se conformer à la norme (ASTM Standard D6270). Les pratiques industrielles exigent également non-tissé, l'aiguille de filaments continus perforé polypropylène ou polyester tissu géotextile (Wright, 2012).

4. Résultats et discussion

4.1. Analyse de la stabilité externe

Dans les deux cas, le poids des murs de soutènements est calculé, et la poussée active des remblais est calculée en utilisant la méthode de Coulomb. Les résultats sont présentés dans le tableau 2.

En plus des économies de poids et de poussée active, la stabilité du mur de soutènement est renforcée par l'utilisation de copeaux de pneus. Une comparaison entre les facteurs de sécurité contre le glissement, renversement, tassement, et la différence de tassement pour les deux cas est présentée dans le tableau 3.

Tableau 2. Résultats obtenus :

Ouvrage de soutènement	Poids (tonne)	Poussée active (kN)
Cas de référence (remblai non renforcé)	249.76	62.94
Mur de soutènement avec remblai renforcé	202.48	39.55

Tableau 3. Facteurs de sécurité estimés :

Ouvrage de soutènement	Facteurs de sécurité			
	Glissement	Renversement	Tassement	Différence de tassement
Cas de référence (remblai non renforcé)	2.55	2.56	2.61	2.36
Mur de soutènement avec remblai renforcé	3.78	2.98	3.25	3.35
Valeur minimale recommandée	1.5	1.5	1	1

Les facteurs de sécurité pour un mur de soutènement avec remblai renforcé copeaux de pneus ont été significativement plus élevés que pour une solution traditionnelle avec remblai non renforcé. Par conséquent, le mur de soutènement avec un mélange de sable et de copeaux de pneus comme matériaux de remblai est considéré plus stable.

4.2. Analyse du cycle de vie

Une analyse du cycle de vie (ACV) désigne l'analyse systématique de l'impact environnemental des produits au cours de leur cycle de vie (l'excavation et le traitement des matières premières, la production, la distribution et le transport, l'utilisation, la consommation et l'élimination). Cela comprend tout impact sur l'environnement lors de la production, de la phase d'utilisation et de l'élimination du produit ainsi que les processus en amont et en aval connectés à ce (p. ex. production des matières premières et processus). Impact sur l'environnement peut inclure toute écologiquement pertinentes extraites de l'environnement (p. ex. de l'huile brute, le sol, et le minerai) ainsi que les émissions dans l'environnement (p. ex. les déchets et les émissions de CO₂).

Figure.2 montre les phases d'une analyse du cycle de vie et la corrélation entre les termes analyse de l'inventaire du cycle de vie, bilan de l'impact ou de l'analyse de l'impact, respectivement, et de l'évaluation. Les applications directes des analyses du cycle de vie comprennent, par exemple, le développement et l'amélioration des produits, la planification stratégique, les processus de prise ou de marketing de décisions politiques, etc.

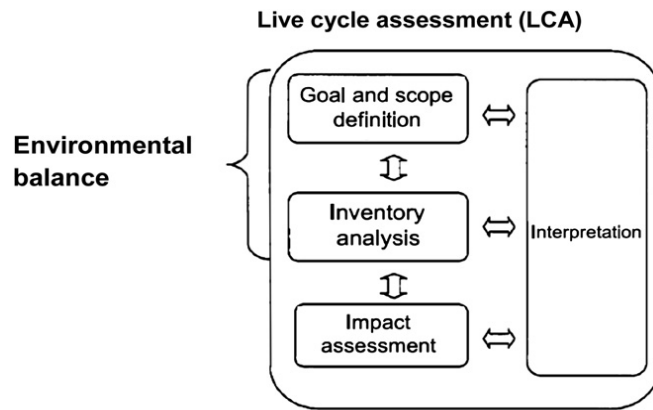


Figure. 2 : Constituants d'une analyse du cycle de vie
(Conformément à la norme DIN EN ISO 14040 2006-10 / 14044, 2006-2010).

Les comparaisons environnementales ont été faites avec Athena Impact Estimator 5.1, qui est le seul outil qui évalue des assemblées en fonction de la méthode de l'analyse du cycle de vie renommée internationale (ACV) en Amérique du Nord. Il intègre propres bases de données d'inventaire du cycle de vie des matériaux de construction largement acclamés d'Athéna ainsi que celles contenues dans la base de données américaine LCI (www.nrel.gov/lci).

Cet outil produit un inventaire du cycle de vie détaillé pour une assemblée entrée. Il génère également un ensemble d'indicateurs d'impact sommaire sous forme graphique et tabulaire selon l'outil US EPA pour la réduction et de l'analyse des produits chimiques et d'autres impacts environnementaux (the US Environmental Protection Agency's TRACI-Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts) méthodologie de l'indicateur d'impact du cycle de vie (version 2007). L'outil prend en charge les mesures de caractérisation basé sur des méthodes d'estimation d'impact mi-point, y compris les neuf mesures environnementales (catégories environnementales) utilisées pour résumer les résultats de l'évaluation environnementale:

1. Acidification Potential
2. Aquatic Eutrophication Potential
3. Global Warming Potential
4. Human Health Criteria Air-mobile
5. Ozone Depletion Potential
6. Smog Potential
7. Total Primary Energy
8. Non Renewable Energy
9. Fossil Fuel Consumption

Pour établir les bilans comparatifs de cycle de vie pour différents produits les conditions suivantes sont nécessaires:

- même champ d'application
- même l'état de technologie
- même gamme de fonctions

La comparaison est effectuée au moyen des facteurs de bilan suivants:

1. Excavation des matières premières (p. ex. sol, sable, gravier, calcaire, marne, argile, minerai de fer, pétrole brut, etc.).
2. Transport des matières premières vers le site ou le fabricant.

3. Production des produits primaires (p. ex. ciment, chaux, acier structurel, etc.).
4. Transport des produits primaires chez le fabricant ou le site de construction.
5. Fabrication des produits (p. ex. béton, géotextiles, etc.).
6. Transport des produits sur le site de construction.
7. Intégration des produits (p. ex. la distribution, fraisage, consolidation, pose, etc.).

Compte tenu de ces facteurs, il est possible de calculer la demande d'énergie cumulée (DEC) qui peut être indiquée avec les différentes unités suivantes:

- MJ/kg par rapport au produit, ou
- MJ/m³ par rapport au sol compacté/stabilisé, ou
- MJ/m² par rapport à la surface.

Si une grande partie des effets environnementaux résultent de l'approvisionnement et de la consommation d'énergie, la DEC peut être utilisée comme un premier contrôle grossier « analyse du cycle de vie courte » dans de nombreux cas. Il fournit au moins des premiers indices à l'égard de l'évaluation écologique.

La DEC est un premier indicateur d'une première évaluation approximative des services énergie, des transports et matérielles. Même si la DEC nécessite également des données, les données sur l'énergie peuvent être collectées et normalisées facilement.

4.3. Comparaison environnementale

Lorsque l'on compare les méthodes de construction traditionnelles avec l'utilisation des pneus usagés et des géosynthétiques sur la base de DEC ou d'émission de CO₂ et d'autres impacts environnementaux, il faut évaluer l'excavation et la production de tous les différents matériaux de construction nécessaires. Transport vers le site de la construction et l'installation du matériel de construction ou d'un produit doit être considéré, aussi.

La comparaison entre un ouvrage de soutènement traditionnel (remblai non renforcé) et un autre avec un remblai renforcé par des copeaux de pneus et des géotextiles est présentée dans les tableaux 4, 5 et 6, et elle a également montré des résultats considérablement meilleurs pour la solution des pneus usagés déchiquetés et des géosynthétiques en ce qui concerne à la fois, la demande d'énergie cumulée (DEC) et les indicateurs de l'impact sur l'environnement.

L'avantage de la solution d'un mur de soutènement avec un remblai de sable renforcé par des copeaux de pneus et des géosynthétiques rapport à la solution classique peut être principalement causé par la diminution de la demande du béton et des agrégats, ce qui provient de l'économie de béton dans l'épaisseur du mur de soutènement et le remplacement d'une proportion importante de sable par copeaux de pneus.

Tableau 4. Demande d'énergie cumulée (DEC) pour tous les composants d'ouvrage de soutènement traditionnel.2325 :

Mur de soutènement avec remblai non renforcé	Donnée [unité]	Masse [unité]	Donnée [unité]	DEC [MJ]
Longueur totale	22.5 m			
Hauteur moyenne	5.8 m			
Production béton standard C20/25	94.31 m ³	2.4 t/m ³	657 MJ/t	148708
Transport du béton de l'usine vers le chantier de construction	20 km	226.36 t	2.5 MJ/tkm	565.9
Production d'acier d'armature du béton ST 500/550, 70 kg/m ³ pour le mur de soutènement	1.428 t		27.690 MJ/t	39.54
Transport d'acier structurel vers le chantier de construction	50 km	1.428 t	2.5 MJ/tkm	3.57
Production de l'ouvrage de soutènement (Pelle, chargeur sur pneus, pompe à béton, etc.)	94.31 m ³		15 MJ/m ³	1414.65
Exploitation du sol excavé par pelle rétrocaveuse 452.25 m ³	452.25 m ³		7.6 MJ/m ³	3437.1
Production du sable pour le remblai derrière le mur de soutènement 1460.8 t	834.75 m ³		222.7 MJ/m ³	185898.8
Transport du sable 1460.8 t, distance de transport 15 km	15 km	1460.8 t	2.5 MJ/tkm	3652
Insertion du sable par bulldozer, épaisseur de la couche 0,30 m	834.75 m ³		8.98 MJ/m ³	7496
Compactage du sable par compacteur au rouleau, épaisseur de la couche 0,30 m	834.75 m ³		5.40 MJ/m ³	4507.65
DEC totale [G.J]				355.723

Tableau 5. Demande d'énergie cumulée (DEC) pour tous les composants d'ouvrage de soutènement utilisant des pneus usagés et des géosynthétiques :

Mur de soutènement avec remblai renforcé par des pneus usagés et des géosynthétiques	Donnée [unité]	Masse [unité]	Donnée [unité]	DEC [MJ]
Longueur totale	22.5 m			
Hauteur moyenne	5.8 m			
Production béton standard C20/25	76.43 m ³	2.4 t/m ³	657 MJ/t	120514.8
Transport du béton de l'usine vers le chantier de construction	20 km	226.36 t	2.5 MJ/tkm	565.9
Production d'acier d'armature du béton ST 500/550, 70 kg/m ³ pour le mur de soutènement	1.35 t		27.690 MJ/t	37.38
Transport d'acier structurel vers le chantier de construction	50 km	1.428 t	2.5 MJ/tkm	3.57
Production de l'ouvrage de soutènement (Pelle, chargeur sur pneus, pompe à béton, etc.)	76.43 m ³		15 MJ/m ³	1146.45
Exploitation du sol excavé par pelle rétrocaveuse 452.25 m ³	452.25 m ³		7.6 MJ/m ³	3437.1
Production du sable pour le remblai derrière le mur de soutènement 620.14 t	354.37 m ³		222.7 MJ/m ³	78952.9
Transport du sable 620.14 t, distance de transport 15 km	15 km	620.14 t	2.5 MJ/tkm	1550.35
Déchetage des pneus usagés en copeaux de pneus (Machine de déchetage transportable, six tonnes par heure)	173.64 t		... MJ/t	...
Transport des copeaux de pneus 173.64 t, distance de transport 15 km	15 km	173.64 t	2.5 MJ/tkm	434.1
Mélange des copeaux de pneus et du sable (chargeur sur pneus)	708.74 m ³		15 MJ/m ³	10631.1
Insertion du mélange copeaux de pneus-sable par bulldozer, épaisseur de la couche 0,30 m	708.74 m ³		8.98 MJ/m ³	6364.48
Compactage du mélange copeaux de pneus-sable par compacteur à rouleau, épaisseur de la couche 0,30 m	708.74 m ³		5.40 MJ/m ³	3827.19
Insertion du sol d'encaissement par bulldozer, épaisseur de la couche 0,80 m	126 m ³		8.98 MJ/m ³	1131.48
Compactage du sol d'encaissement par compacteur à rouleau, épaisseur de la couche 0,80 m	126 m ³		5.40 MJ/m ³	680.4
Production du géotextile par m ² en PP pour le renforcement du remblai	0.16 kg/m ²	464.76 kg		
production du polypropylène non-tissé, 2904.75 m ²	0.16 kg/m ²	464.76 kg	0.324 MJ/kg	150.58
Transport du non-tissé vers le chantier de construction, la distance vers le fabricant	270 km	0.4647 t	2.5 MJ/tkm	1.1617
Installation du géotextile par pelle chargeur sur pneus	2904.7 m ²		1.04 MJ/m ²	3020.88
DEC totale [GJ]				232,449

Tableau 6. Catégories d'impact pour les deux solutions :

Catégories d'impact	Unité	Ouvrage de soutènement traditionnel	Ouvrage de soutènement utilisant pneus usagés et des géosynthétiques
Global Warming Potential	kg CO ₂ eq	8.48E+04	5.00E+04
Acidification Potential	kg SO ₂ eq	7.02E+02	3.83E+02
HH Particulate	kg PM _{2,5} eq	1.64E+02	9.86E+01
Eutrophication Potential	kg N eq	4.25E+01	2.18E+01
Ozone Depletion Potential	kg CFC-11 eq	2.13E-04	1.72E-04
Smog Potential	kg O ₃ eq	2.17E+04	1.11E+04
Total Primary Energy	MJ	1.02E+06	6.50E+05
Non-Renewable Energy	MJ	1.01E+06	6.44E+05
Fossil Fuel Consumption	MJ	9.95E+05	6.33E+05

5. Conclusion

La demande mondiale de réduction de la consommation d'énergie et l'émission réduite de gaz liés au climat tels que le CO₂ sont de grands défis pour l'industrie de la construction, aussi. Les avantages économiques et écologiques sur la base des économies de coûts et la réduction dramatique de la manipulation des masses de terre ou des solutions «vertes» utilisant des méthodes de construction avec des pneus usagés et des géosynthétiques sont déjà connus bien.

La prochaine étape pour démontrer les avantages écologiques est donnée par la comparaison de deux exemples de construction de soutènement, qui révèlent que les alternatives utilisant des pneus usagés et des géosynthétiques ont un impact moindre sur l'environnement grâce à une demande beaucoup moins d'énergie cumulée (DEC), les émissions de CO₂ et les autres indicateurs d'impacts. Les deux projets présentés ici peuvent stimuler d'autres chercheurs d'effectuer des comparaisons entre les différentes approches de conception en géotechnique, aussi.

Références

- [1] ASTM Standard D6270. Standard practice for use of scrap tires in civil engineering applications. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2008e1.
- [2] Bosscher, P.J., Edil, T.B., Eldin, N.N. Construction and performance of a shredded waste tire test embankment. Transportation Research Record 1345, TRB, National Research Council, Washington DC, pp. 44–52, 1992.
- [3] Heerlen, G. Reduction of climate-damaging gases in geotechnical engineering practice using geosynthetics. Geotextiles and Geomembranes, Vol. 30, pp. 43-49, 2012.
- [4] Koerner, J., Soong, T.-Y., Koerner, R.M. Retaining wall costs in the USA. GRI report no. 20. Geosynthetic Institute, Folsom, PA, USA, 38 pp, 1998.
- [5] Tatlisoz, N., Edil, T.B., Benson, C.H. Interaction between reinforcing geosynthetics and soil tire chip mixtures. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 124 (11), 1109-1119. ASCE, 1998.
- [6] Wright, J. Geotextile specifications in TDA projects. Personal communication; 2012.
- [7] Yoon, S., Prezzi, M., Siddiki, N.Z., Kim, B. Construction of a test embankment using a sand-tire shred mixture as fill material. Waste Management, Vol. 26, pp. 1033-1044, 2006.