
Evaluation de l'impact environnemental d'un ouvrage de soutènement avec un remblai renforcé par des pneus usagés

H. Djadouni¹, H. Trouzine²

¹Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès, Algérie, Faculté de Technologie, Département de Génie Civil, mail : djadounihachemi@yahoo.fr

²Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès, Algérie, LGCE Laboratoire de Génie Civil & Environnement, mail : h.trouzine@yahoo.fr

RÉSUMÉ. Les pneus usagés représentent un déchet encombrant, polluant et préoccupant, et le volume est en augmentation chaque année. L'utilisation des déchets pneumatiques en mélange 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 et permet d'utiliser un mince mur de soutènement. On s'intéresse dans cet article à l'évaluation de l'impact environnemental dans le cas de l'utilisation des pneus usagés en ouvrages de soutènement dans une démarche de développement durable, en utilisant un outil d'évaluation environnementale basé sur l'analyse du cycle de vie (ACV). Pour cela un premier cas de référence (remblai non renforcé) et un deuxième cas d'ouvrage de soutènement avec un remblai renforcé par des pneus usagés partiellement découpés sont analysés. La comparaison a montré une demande nettement plus faible d'énergie cumulée (DEC) et une réduction des émissions de CO₂ pour la solution des pneus usagés.

ABSTRACT. Used tires represent an annoying and polluting waste, and the volume is increasing every year. The use of waste tires in mixture with soil as lightweight backfill materials behind the retaining walls is a viable method towards reduction of this waste, and this can lead to reduce the lateral earth pressure on the structure and allows use of a thin retaining wall. We are interested in this paper in the evaluation of the environmental impact in the case of the use of used tires in retaining structures in a sustainable development approach, using an environmental assessment tool based on the Life Cycle Assessment (LCA). For this, a first reference case (unreinforced backfill) and a second case of retaining structure with a reinforced backfill by partially cut used tires are analyzed. The comparison showed a considerably smaller cumulated energy demand (CED) and a reduction in CO₂ emission for the used tires solution.

MOTS-CLÉS : pneus usagés, ouvrage de soutènement, poussée de la terre, analyse du cycle de vie (ACV), demande d'énergie cumulée (DEC), émissions de CO₂.

KEY WORDS: used tires, retaining structure, earth pressure, life cycle assessment (LCA), cumulated energy demand (CED), CO₂ emission.

1. Introduction

La discussion politique, mais aussi la recherche et la science, sont actuellement affectées par la demande de «développement durable». Dans le contexte original, le «développement durable» est non seulement limité aux exigences d'économie d'énergie et de matières premières, mais comprend un modèle de développement durable dans le monde entier sur la base de la protection des composants des ressources naturelles. Pour atteindre un développement durable avec succès, l'approche de la protection du climat dans le monde entier propagée à économiser de l'énergie et de réduire radicalement les émissions de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone) [HEE, 12].

Pour deux projets d'ouvrage de soutènement, un ouvrage de soutènement traditionnel avec un remblai non renforcé et un autre ouvrage de soutènement avec un remblai renforcé par des pneus usagés, les analyses du cycle de vie (ACV) pour les méthodes de construction des deux solutions ont été faites. En ce qui concerne ces deux exemples de la construction d'infrastructures, la performance environnementale est évaluée à l'aide de deux indicateurs d'impact environnemental. Ce sont la demande d'énergie cumulée (DEC) et les émissions de CO₂, les deux catégories d'impact peuvent être utilisées comme «ACV courtes» pour l'évaluation écologique. En prenant

en compte l'extraction et la production de matériaux de construction utilisés, le chargement, le transport et l'installation.

Les deux indicateurs permettant d'analyser la performance environnementale des méthodes de construction. La demande d'énergie cumulée est utilisée pour obtenir un aperçu de l'efficacité de l'utilisation des ressources énergétiques. Le changement climatique est considéré en raison de son grand potentiel à l'environnement et son importance dans la politique environnementale internationale [STU, 11].

2. Les avantages des méthodes de construction utilisant des pneus usagés

En raison de la croissance rapide de l'utilisation de l'automobile dans le monde entier, d'énormes quantités de déchets de pneus sont produites. Il est estimé qu'environ 2-3 milliards de pneus sont jetés chaque année dans le monde entier [ROT, 96; WAN, 11; LAZ, 14]. L'Algérie produit à elle seule environ 25918,50 tonnes/an de pneus usagés [TRO, 11; LAZ, 14]. Avec l'augmentation des quantités, il devient plus difficile et plus coûteux de les éliminer en toute sécurité sans menacer la santé humaine et l'environnement. Les façons les plus courantes de recycler les pneus sont l'enfouissement, la conversion en carburant auxiliaire, la pyrolyse, la découpe, le retraitement et la réutilisation. Les applications en ingénierie géotechnique, l'ingénierie de la route, la conservation de l'eau et du sol, et de l'ingénierie marine utilisent des pneus usagés intacts. Ces applications qui ne nécessitent pas de processus complexes sont considérées comme économiques et écologiques [LON, 93; HAU, 90; GAR, 00 à; LAZ, 14].

Il y a plusieurs avantages de l'utilisation des pneus usagés dans les applications de génie civil. L'une des caractéristiques les plus importantes de pneumatiques usagés est qu'ils sont un matériau léger. Lorsque les routes sont construites sur des sols faibles et compressibles, les considérations de stabilité et de tassement sont essentielles. Un avantage de l'utilisation de pneus usagés soit comme matériau de remplissage léger en digues ou comme des remblais dans les ouvrages de soutènement est que les pneus usagés ne sont pas biodégradables et sont donc plus durables. Comme les pneus usagés sont légers, plus petits efforts horizontaux sont induits derrière un mur de soutènement construit avec du sable renforcé par des pneus usagés comme matériau de remblai, par rapport à un mur de soutènement ayant seulement le sol comme matériau de remblai. En outre, le sable renforcé par des pneus usagés a une résistance au cisaillement relativement élevée. En raison de ses propriétés, l'épaisseur du mur de soutènement peut être réduite et des économies en poids sont obtenues. En outre, les pneus usagés sont des matériaux de drainage libre, et donc ne contribuent pas à une production excessive de pression interstitielle qui peut provoquer des problèmes de stabilité lors du chargement du matériau de remblayage [YOO, 06].

3. Analyse du cycle de vie

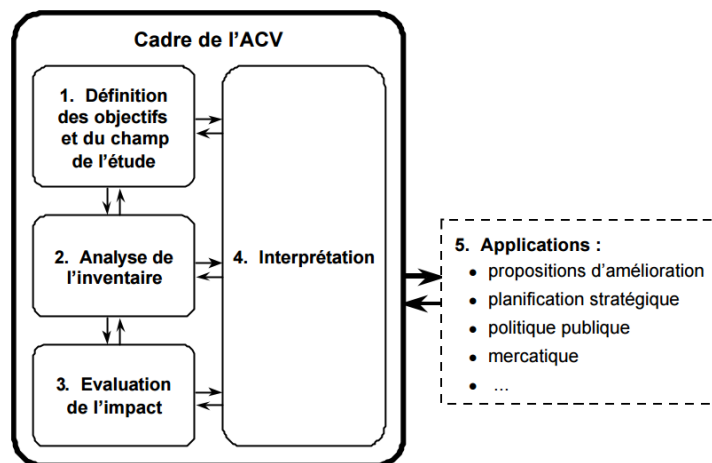
L'analyse de cycle de vie (ACV) est une méthode normalisée (ISO 14040 - 14044) permettant l'évaluation des flux de matières et d'énergies, ainsi que des impacts environnementaux potentiels d'un système (« produit » ou « service ») au cours de son cycle de vie. L'ACV est un outil d'évaluation qualitative et quantitative des avantages environnementaux d'un processus, permettant le classement des systèmes, y compris dans le domaine de la construction [EGL, 11].

La figure 1 montre les étapes d'une ACV. L'analyse de cycle de vie est articulée en quatre étapes [HEE, 12]:

- étape 1 : Définition des objectifs et du champ de l'étude,
- étape 2 : Inventaire des flux matières et énergies associés aux étapes du cycle de vie,
- étape 3 : Evaluation des impacts potentiels à partir des flux matières et énergies recensés,
- étape 4 : Interprétation des résultats obtenus en fonction des objectifs retenus : cette étape est itérative avec les 3 précédentes de manière à toujours valider que les résultats obtenus permettent de répondre aux objectifs de l'étude (par exemple, il arrive que la non disponibilité de certaines données puisse conduire, en cours d'étude, à restreindre le champ de l'étude).

Pour établir les bilans comparatifs du cycle de vie pour différents produits, les préconditions suivantes sont nécessaires:

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



(rq : les applications ne rentrent pas dans le champ d'application des normes)

Figure 1. Constituants d'une analyse du cycle de vie (conformément à la norme DIN EN ISO 14040 2006-10 /14044, 2006-2010).

La comparaison est effectuée à l'aide des facteurs des bilans suivants:

- l'excavation des matières premières (p. ex. le sol, le sable, le gravier, le calcaire, l'argile, le minerai de fer, le pétrole brut).
- Le transport des matières premières vers le site ou le fabricant.
- La production des produits primaire (p. ex. le ciment, l'acier de construction).
- Le transport des produits primaires vers le fabricant ou le site de construction.
- La fabrication des produits (p. ex. le béton).
- Le transport des produits vers le site de construction.
- L'intégration des produits (p. ex. la distribution, le fraisage, la consolidation, la pose).

Compte tenu de ces facteurs, il est possible de calculer la demande d'énergie cumulée (DEC) qui peut être déclarée avec des unités différentes (p. ex. MJ/kg, MJ /m³, etc.).

Si une grande partie des effets environnementaux résultent de la fourniture et de la consommation d'énergie, la demande d'énergie cumulée (DEC) peut être utilisée comme une première vérification approximative « analyse du cycle de vie courte» dans de nombreux cas. Elle fournit au moins les premiers indices en ce qui concerne une évaluation écologique. La DEC est un premier indicateur pour une première évaluation approximative d'énergie, de transport et de services matériels [EGL, 11].

Les comparaisons ont été faites avec Athena Impact Estimator, qui est l'outil qui évalue les ensembles basés sur la méthode de l'analyse du cycle de vie reconnue internationalement (LCA). Il intègre ses propres bases de données d'inventaire du cycle de vie des matériaux de construction largement acclamé d'Athéna, ainsi que celles contenues dans la base de données américaine (<http://www.nrel.gov/lci>). L'estimateur d'impact produit un inventaire du cycle de vie détaillé pour un design entré. Il génère également un ensemble d'indicateurs d'impact sous forme graphique et tabulaire basé sur l'outil US EPA pour la réduction et de l'analyse des impacts chimiques et autres impacts environnementaux (<http://www.athenasmi.org>).

4. Caractérisation des ouvrages de soutènements

Dans les environs de la wilaya d'Alger, Algérie, une nouvelle route reliant devrait améliorer les conditions de circulation locales. La conception a été demandée pour un ouvrage de soutènement traditionnel pour soutenir la section de route. Une autre conception d'ouvrage de soutènement avec un remblai de sable renforcé par des pneus usagés a été présentée donnant l'occasion de comparer ces solutions à l'égard de leur impact environnemental.

4.1. Géométrie et conditions du sol

Géométriquement, le mur de soutènement (type cantilever) est en béton armé avec 6,00 m de hauteur et 0,50 m d'épaisseur (Figure 2). Le tableau 1 résume toutes les caractéristiques mécaniques et géotechniques. Le remplissage de la terre est un sol sablonneux avec une longueur semi-infini de 22,50 m. La surface du remblai est plane et porte un supplément (deux charges, permanente et exploitation).

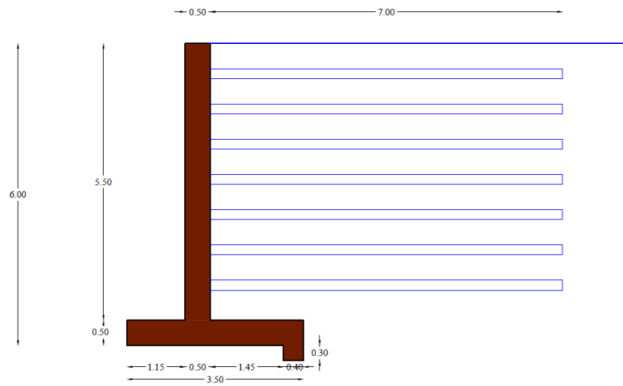


Figure 2. Ouvrage de soutènement avec remblai renforcé par des couches de pneus.

Tableau 1. Caractéristiques des matériaux.

Matériaux	Propriétés
Mur de soutènement	$E_M = 3.10^4$ MPa $\nu_M = 0.30$ $\gamma_M = 26.43$ kN/m ³
Sable	$\gamma_s = 16.8$ kN/m ³ $C_s = 0$ kPa $\varphi_s = 42^\circ$
Sable renforcé pneumatiques	$\gamma_{SP} = 15,96$ kN/m ³ $C_{SP} = 2$ kPa $\varphi_{SP} = 50^\circ$

4.2. Cas étudiés

L'ouvrage de soutènement traditionnel avec remblai non renforcé est l'une des solutions les plus couramment utilisées dans les ouvrages de soutènement. Cependant, les solutions de remblai renforcé avec des pneus usagés ont des intérêts économiques et géotechniques et méritent que nous mettions en avant leur intérêt environnemental. Pour cela, deux cas distincts sont étudiés; un cas de référence où le mur ne supporte que le sable et un second cas où le sable est renforcé par des couches de pneus usagés. Le but de l'étude est d'évaluer ce qui est le meilleur choix du point de vue environnemental.

4.2.1. Ouvrage de soutènement avec remblai non renforcé

Le remblai est du sable propre. Les tests Standard Proctor indiquent une densité sèche maximale de 1,845 à une teneur en eau optimale de 10,5% et un poids unitaire de 20 kN/m³. Le sable était uniforme et drainant, avec moins de 5% de particules fines et une trace de gravier. L'enveloppe de rupture indique un angle de frottement interne effectif de 42°, pour une densité moyenne à sec 1,790. La densité in situ des couches de sable compacté a été vérifiée, la densité sèche moyenne des sections de sable était 1,680. Le degré de compactage est d'environ 90%. Le coefficient de poussée active est déterminé en utilisant la méthode de Coulomb, et il est d'environ 0,19. Le glissement de la paroi est considéré avec un coefficient de frottement de 0,4.

4.2.2. Ouvrage de soutènement avec remblai renforcé pneumatiques

Dans ce cas, le même sable est renforcé par des couches de pneus de véhicules légers de type flancs sans bandes de roulement sur le bord (avec une paroi latérale enlevée). La hauteur du pneu est de 20 cm et la couche de sable est de 50 cm. Les renforts sont linéaires modélisés sous la forme d'une superposition de la couche de sable et de déchets pneumatique. L'interaction sable-caoutchouc est considérée comme ayant un coefficient de frottement de glissement de 0,58; le coefficient de frottement caoutchouc- mur est égal à 0,65. Le coefficient de poussée active est calculé de la même manière que dans le premier cas, il est d'environ 0,13.

4.3. Excavation, transport et installation des matériaux de construction

Lorsque l'on compare les méthodes de construction traditionnelles ou développées sur la base de DEC ou d'autres catégories d'impact, il faut évaluer l'excavation et la production de tous les différents matériaux de construction nécessaires. Le transport vers le chantier de construction et l'installation du matériel de construction ou d'un produit doivent être considérés. La demande d'énergie cumulée pour les ouvrages avec le sol en tant que matériau de construction est composée de la demande d'énergie pour l'excavation, le transport et l'installation. De ce fait, l'émission de CO₂ est directement liée à la consommation de carburant de l'équipement de construction et de camions [STU, 11].

Dans cette étude, le pneu est utilisé après la fin de durée de vie. Les pneus usagés sont transportés 10 km par camion à partir du site d'enfouissement sanitaire vers le site de construction. En outre, les pneus usagés ont été tranchés sur place pour enlever une paroi latérale en utilisant un spécialement conçu, léger, à faible coût, la machine transportable. Cette machine effectue la découpe de pneus en soutenant le pneumatique horizontal tandis qu'un vérin hydraulique équipé d'une lame d'acier au carbone de découpage découpe une paroi latérale alors que le pneumatique est entraîné en rotation. Une équipe de deux personnes a été en mesure de couper environ 200 pneus par heure, si les pneus étaient propres. La paroi latérale découpée a été placée à l'intérieur du pneu pour éviter la production de déchets inutiles. Les couches de pneus ont été placées côte à côte, reliées entre elles par trois tours d'une longueur de 2,5 m, un diamètre de 9,5 mm de corde en polypropylène, remplis de sable et compactées [GAR, 00a].

5. Résultats et discussion

5.1. Analyse de la stabilité externe

Pour les deux cas, le poids du mur de soutènement est calculé, et la poussée active du remblai est calculée selon la méthode de Coulomb. Les résultats sont présentés dans le tableau 2.

Tableau 2. Poids et poussée active obtenus.

Ouvrage de soutènement	Poids (kN)	Poussée active (kN/m ²)
Cas de référence (remblai non renforcé)	2791	116.66
Ouvrage de soutènement avec remblai renforcé pneus usagés	2292	80.50

En plus des économies de poussée active et de poids, la stabilité du mur de soutènement est renforcée par l'utilisation de pneus usagés. Une comparaison entre les facteurs de sécurité contre le glissement et le renversement pour les deux cas est présentée dans le tableau 3. Les facteurs de sécurité pour ouvrage de soutènement avec remblai du sable renforcé pneumatiques étaient significativement plus élevés que pour l'ouvrage traditionnel avec seulement du sable comme matériau de remblai. Par conséquent, le mur de soutènement du sable renforcé pneus usagés est considéré comme plus stable que le mur de soutènement avec du sable non renforcé comme matériau de remblai.

Tableau 3. Facteurs de sécurité estimés.

Ouvrage de soutènement	Facteurs de sécurité	
	Glissement	Renversement

Cas de référence (remblai non renforcé)	2.17	2.70
Ouvrage de soutènement avec remblai renforcé pneus usagés	3.34	3.96
<i>Valeur minimale recommandée</i>	1.5	1.5

5.2. Analyse de l'impact du cycle de vie

Dans les deux cas, l'acier d'armature, le béton et le transport du sable ont contribué considérablement à la DEC et émissions de CO₂. Les détails sont donnés dans les tableaux 4 et 5. La demande d'énergie cumulée (DEC) pour la solution des pneus usagés ne représentait pas environ 96% de la solution traditionnelle avec remblai non renforcé. La demande d'énergie cumulée (DEC) est d'environ 1,04 fois moins que l'approche de la construction traditionnelle avec seulement du sable comme matériau de remblai. Les émissions de CO₂ se montent à 1440 t CO₂-eq dans le premier cas et de 1250 t CO₂-eq dans le deuxième cas (Figure 3).

La différence dans les impacts environnementaux entre les deux cas se pose principalement sur la plus grande quantité de béton utilisée dans le premier cas de référence, ce qui conduit en outre à une demande accrue d'énergie cumulée (CED) et plus d'émissions de CO₂. D'autre part, les pneus usagés appliqués pour remplacer certains de sable, ce qui provoque des effets considérablement plus élevés lors de son extraction et transport vers le lieu d'utilisation.

La part élevée du béton dans le potentiel de réchauffement planétaire peut être expliquée par le processus de production de clinker. Au cours de son processus de calcination, CO₂ géogénique se pose. L'acier de renforcement est constitué de 63% d'acier primaire et 37% d'acier recyclé. La plupart des impacts environnementaux de l'acier d'armature proviennent de la consommation de carburant et les émissions au cours de la fritte et la production de fonte dans la chaîne d'alimentation de l'acier primaire. La part du sable aux impacts globaux est relativement élevée en raison de leur quantité considérable, et donc beaucoup de transport est nécessaire. Le transport est conduit à des émissions de CO₂, ce qui peut être expliqué par la forte proportion dans les impacts du réchauffement climatique. La part de l'utilisation des pneus usagés sur les impacts environnementaux globaux en deuxième cas se situe entre 28,24% et 5,84% (les impacts du réchauffement climatique et de la demande d'énergie cumulée, respectivement).

Tableau 4. Demande d'énergie cumulée pour tous les composants de l'ouvrage de soutènement traditionnel.

Ouvrage de soutènement avec remblai non renforcé	Donnée [unité]	Masse [unité]	Donnée [unité]	DEC [MJ]
Longueur totale	22.5 m			
Hauteur moyenne	6.00 m			
Production du béton standard C20/25	102.15 m ³	2.4 t/m ³	1183.33 MJ/t	290105.18
Transport du béton de l'usine vers le site de construction	30 km	245.16 t	2.5 MJ/tkm	18387
Production d'acier d'armature du béton HA 400	14.13 t		23900 MJ/t	337707
Transport d'acier structurel vers le site de construction	30 km	14.13 t	2.5 MJ/tkm	1059.75
Production du mur de soutènement cantilever (pelle, chargeur sur pneus, pompe à béton, etc.)	102.15 m ³		15 MJ/m ³	1532.25
Excavation du sol par pelle rétrocaveuse 475.2 m ³	475.2 m ³		7.6 MJ/m ³	3611.52
Transport des terres excavées à la décharge	10 km	817.38 t	2.5 MJ/tkm	20434.5
Transport de sable 1598.2 t, distance de transport 30 km	30 km	1598.2 t	2.5 MJ/tkm	119865
Insertion de sable par bulldozer, épaisseur de la couche 0.30 m	866.25 m ³		8.98 MJ/m ³	7778.92
Compactage de sable par compacteur au rouleau, épaisseur de la couche 0,30 m	866.25 m ³		5.40 MJ/m ³	4677.75
DEC totale [GJ]				805 GJ

Tableau 5. Demande d'énergie cumulée pour tous les composants de l'ouvrage de soutènement avec remblai renforcé pneumatiques.

Ouvrage de soutènement avec remblai renforcé par des pneus usagés	Donnée [unité]	Masse [unité]	Donnée [unité]	DEC [MJ]
Longueur totale	22.5 m			
Hauteur moyenne	6.00 m			
Production du béton standard C20/25	83.58 m ³	2.4 t/m ³	1183.33 MJ/t	237366.53
Transport du béton de l'usine vers le site de construction	30 km	200.59 t	2.5 MJ/tkm	15044.4
Production d'acier d'armature du béton HA 400	14.13 t		23900 MJ/t	337707
Transport d'acier structurel vers le site de construction	30 km	14.13 t	2.5 MJ/tkm	1059.75
Production du mur de soutènement cantilever (pelle, chargeur sur pneus, pompe à béton, etc.)	83.58 m ³		15 MJ/m ³	1253.7
Excavation du sol par pelle rétrocaveuse 475.2 m ³	475.2 m ³		7.6 MJ/m ³	3611.52
Transport des terres excavées à la décharge	10 km	817.38 t	2.5 MJ/tkm	20434.5
Transport de sable 1335.4 t, distance de transport 30 km	30 km	1335.4 t	2.5 MJ/tkm	100155
Insertion de sable par bulldozer, épaisseur de la couche 0.30 m	723.8 m ³		8.98 MJ/m ³	6499.72
Compactage de sable par compacteur au rouleau, épaisseur de la couche 0,30 m	645.75 m ³		5.40 MJ/m ³	3487
Compactage de pneus-sable par compacteur au rouleau, épaisseur de la couche 0,30 m	220.5 m ³		5.40 MJ/m ³	1190.7
Transport de pneus usagés vers le site de construction, 2849 pneus ; 142.45 m ³	10 km	20.49 t	2.5 MJ/tkm	512.25
Découpe de pneus usagés (enlèvement d'une paroi latérale)	2849 pneus	14.5 heures	4.75 kw/h	248.19
Production de polypropylène corde, 0.04 kg/m	12662 m	0.5 t	88900 MJ/t	44450
DEC Totale [GJ]				773 GJ

Note : les données de production des matériaux de construction sont prélevées de bases de données de l'outil "Athena" (p. ex. béton, acier, etc.). En outre, les données des applications comme l'excavation, transport et installation ont été publiées par Egloffstein en 2011 comme indiqué dans la liste de référence.

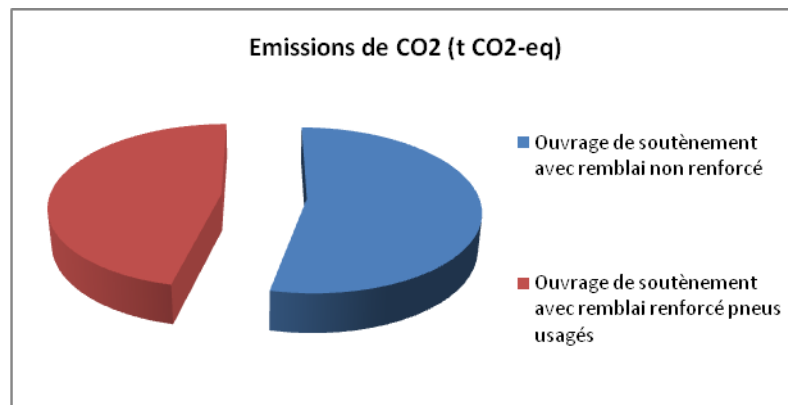


Figure 3. Comparaison des émissions de CO₂ pour les deux solutions.

6. Conclusions et recommandations

La demande mondiale de réduction de la consommation d'énergie et le réchauffement climatique causé par les émissions de CO₂ sont de grands défis pour les constructions d'infrastructures. La prochaine étape pour

démontrer les avantages écologiques est donnée par la comparaison de deux exemples d'ouvrages de soutènement qui montre que les solutions des pneus usagés ont un impact environnemental plus faible en raison de la demande beaucoup moins importante d'énergie cumulée (DEC) et de potentiel de réchauffement planétaire.

Comme le béton est un matériau avec une très forte demande d'énergie cumulée et une forte émission de CO₂ et d'autres gaz de pollution, l'avantage de la solution de pneus usagés en comparaison avec la solution classique peut être principalement attribué à la demande réduite en béton et en granulats. En effet, il y a une économie de béton dans l'épaisseur du mur de soutènement et un remplacement d'une proportion de sable par des pneus usagés obtenus à partir de déchets pneumatiques (économies de près de 18,17% de béton et 16,44% de sable).

Sur la base des résultats de l'étude, on peut conclure que l'utilisation de pneus usagés en mélange avec le sol en tant que matériau de remblai derrière le mur de soutènement est non seulement écologique, mais elle est aussi économiquement très avantageuse. En outre, l'utilisation de pneus usagés dans les ouvrages de soutènement contribue à réduire la grande quantité de pneus stockés actuellement dans les décharges et ce qui contribue à réduire l'empreinte écologique de ces sites.

7. Bibliographie

- [EGL 11] EGGLEFFSTEIN T. A., HEERTEN G., MAUBEUGE K., « Ecological comparison between construction methods with hydraulic binder as well as geosynthetics », *24th Annual GRI*, Dallas, 16 March 2011, Texas.
- [GAR 00a] GARGA V. K., O'SHAUGHNESSY V., « Tire-reinforced earthfill. Part 1 : Construction of a test fill, performance, and retaining wall design », *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 37, n° 1, 2000, p. 75-96.
- [HAU 90] HAUSMANN M. R., « Slope remediation », *Proceedings of the stability and performance of slopes and embankments conference, ASCE Geotechnical Special Publication*, vol. 2, 1990, p. 1274-1317.
- [HEE 12] HEERTEN G., « Reduction of climate-damaging gases in geotechnical engineering practice using geosynthetics », *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 30, 2012, p. 43-49.
- [LAZ 14] LAZIZI A., TROUZINE H., ASROUN A., BELABDELOUAHAB F., « Numerical simulation of tire reinforced sand behind retaining wall under earthquake excitation », *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 4, n° 2, 2014, p. 605-611.
- [LON 93] LONG N. T., *Le Pneusol : Recherches-Réalisations-Perspectives*, Thèse de doctorat du LCPC, INSA Lyon, 1993.
- [ROT 96] ROTHFUSS C., CHA C. Y., « Utilization of a scrap tire-waste oil derived carbonous residue as an asphalt modifier », *Polymer Recycling*, vol. 2, n° 3, 1996, p. 201-2012.
- [STU 11] STUCKI M., BÜSSER S., ITTEN R., FRISCHKNECHT R., Comparative life cycle assessment of geosynthetics versus conventional construction materials, rapport de recherche n° 319, November 2011, Uster.
- [TRO 11] TROUZINE H., ASROUN A., ASROUN N., BELABDELOUAHAB F., LONG N. T., « Problématique des pneus usés en Algérie », *Nature & Technologies*, vol. 5, 2011, p. 28-35.
- [WAN 11] WANG C. Y., CHENG J. H., SHIH H. P., CHANG J. W., « Ring columns as pier scour countermeasures », *International Journal of Sediment Research*, vol. 26, n° 3, 2011, p. 353-363.
- [YOO 06] 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, 2006, p. 1033-1044.
- Athena Sustainable Materials Institute [en ligne]. <http://www.athenasmi.org> (consulté le 20 mars 2016).
- DIN EN ISO 14044 (2006) Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006); German and English version EN ISO 14040:2006 Beuth Verlag Berlin.
- DIN EN ISO 14044 (2006) Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006); German and English version EN ISO 14044:2006. Beuth Verlag Berlin.