

ANALYSE DU CYCLE DE VIE DES SOLUTIONS GÉOSYNTHÉTIQUES AU REGARD DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION CONVENTIONNELS

COMPARATIVE LIFE CYCLE ASSESSMENT OF GEOSYNTHETICS VERSUS CONVENTIONAL CONSTRUCTION MATERIALS

Alain NANCEY¹, Nicolas LAIDIÉ²

¹ Tencate Geosynthetics France

² DuPont de Nemours (Luxembourg) s.à r.l

RÉSUMÉ – Les géosynthétiques sont utilisés dans de nombreuses applications de génie civil. Dans la plupart des cas, ils remplacent ou optimisent l'utilisation d'autres matériaux. Une série d'analyses comparées du cycle de vie ont été menées pour plusieurs fonctions et types d'application. La performance environnementale des géosynthétiques est comparée à celle des matériaux de construction traditionnellement utilisés. Les spécifications de quatre constructions type (« Filtration », « Stabilisation de plateforme », « Couche drainante dans la construction de décharge » et « Mur de soutènement ») ont été établies par les membres de l'EAGM, qui représentent la grande majorité du marché européen des géosynthétiques.

Mots-clés : analyse du cycle de vie, E.A.G.M.

ABSTRACT – Geosynthetic materials are used in many different applications in the civil and underground engineering. In most cases, the use of geosynthetic material beneficially replaces the use of other construction materials. To this end a set of comparative life cycle assessment studies are carried out concentrating on various functions or application cases. The environmental performance of geosynthetics is compared to the performance of competing construction materials used. The specifications of four construction systems are established by the E.A.G.M. members representing the significant majority of the European market of geosynthetic materials: "Filtration", "Foundation stabilisation", "Landfill construction drainage layer", "Soil retaining wall".

Keywords: life cycle assessment, E.A.G.M.

1. Introduction

Les géosynthétiques sont utilisés dans de nombreuses applications de génie civil. Dans la plupart des cas, ils remplacent ou optimisent l'utilisation d'autres matériaux. L'association européenne des producteurs de géosynthétiques (EAGM) a mandaté ETH (École Polytechnique Fédérale) de Zurich et ESU-services Ltd pour quantifier et comparer la performance environnementale des matériaux de construction communément utilisés (tels que le béton, ciment, chaux ou gravier) avec celle des géosynthétiques. Pour cela, des analyses comparées du cycle de vie ont été menées sur quatre cas d'application : couche de filtration, structure de chaussée stabilisée, installation de stockage de déchets et mur de soutènement. La performance environnementale des géosynthétiques est comparée à celle des matériaux traditionnels utilisés.

Le dimensionnement de ces constructions-types a été réalisé par les membres de l'EAGM, représentant la majeure partie du marché européen des géosynthétiques.

Cas 1 : Filtration

Cas 2 : Stabilisation de structure de chaussée

Cas 3 : Couche drainante d'une installation de stockage de déchets

Cas 4 : Mur de soutènement

Cette publication présente les hypothèses et la méthodologie de l'évaluation de l'impact environnementale ainsi que les principaux résultats obtenus pour les quatre cas.

L'étude a été réalisée conformément aux normes ISO 14040 et ISO 14044. Trois experts indépendants en ont conduit une revue critique. Les données sources sur les matériaux géosynthétiques portent sur l'année 2009 et dans quelques cas exceptionnels 2008. La performance environnementale a été évaluée à travers huit indicateurs du type d'impact (chapitre 4).

Pour chacun des quatre cas, les alternatives ont été choisies de manière à être considérées comme équivalentes ou pour le moins comparables. Les géosynthétiques mentionnés dans chaque cas sont

des produits théoriques, combinaisons de produits couramment utilisés dans chaque application. Les solutions traditionnelles représentent les modes de construction conventionnels communs.

Des analyses de sensibilité statistique sont réalisées pour évaluer la fiabilité des résultats. Par exemple, faire varier l'épaisseur de la couche de filtration dans le cas 1 permet de prendre en compte différences spécifications techniques. De même, quatre alternatives de structures de chaussée sont comparées dans le cas 2, dont deux intègrent des géosynthétiques de renforcement et deux utilisent exclusivement du ciment et de la chaux.

Pour l'ensemble de l'étude, les données concernant les matériaux géosynthétiques ont été collectées auprès des producteurs participant au projet. Les inventaires du cycle de vie de chaque producteur ont permis d'établir un inventaire moyen du cycle de vie des géosynthétiques utilisés. Ces inventaires moyens du cycle de vie (ICV) sont établis pour chacun des quatre cas comme la moyenne arithmétique des performances environnementales des produits fabriqués par les participants au projet. Les spécifications techniques des quatre cas (par exemple la quantité de gravier et de diesel nécessaires à la construction) ont été vérifiées par des experts ingénieurs en génie civil. Les matériaux et les méthodes nécessaires à la construction sont modélisés grâce à des sources de données génériques, telles que «ecoinvent Data v2.2» (ecoinvent Centre 2010), qui contient des données d'inventaire de nombreux matériaux et services.

L'étude a été confiée par l'association européenne des producteurs de géosynthétiques (EAGM) à ESU-services Ltd et ETH Zürich en janvier 2010. Les membres du groupe de pilotage sont : Henning Ehrenberg (président), Dave Williams, David Cashman, Harry Groenendaal, Heiko Pintz, Heinz Homölle, Karl Wohlfahrt, Kjell De Rudder, Klaus Oberreiter, Nicolas Laidié, Massimo Antoniotti, Prof. Dr. Holger Wallbaum (ETHZ), Dr. Rolf Frischknecht (ESU-services Ltd.), Sybille Büsser (ESU-services Ltd.), René Itten (ESU-services Ltd.) et Matthias Stucki (ESU-services Ltd.).

La revue critique a été conduite conformément aux normes ISO 14040 et 14044 par un panel de trois experts indépendants dans le domaine de l'analyse du cycle de vie : Hans-Jürgen Garvens, Falkensee, Allemagne (président), Maartje Sevenster (MaS), Isaacs, Australie, Lars-Gunnar Lindfors, IVL, Stockholm, Suède

L'étude complète incluant la revue critique est disponible sur le site www.eagm.eu

2. Limites du système

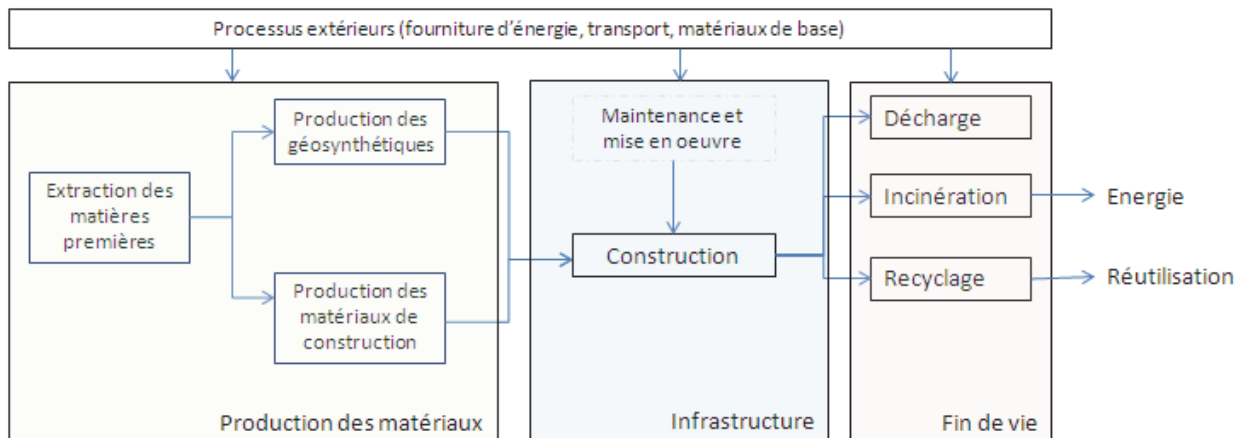


Figure 1. Arborescence simplifiée des processus

L'arborescence simplifiée des processus (Figure 1) met en évidence les plus importants processus élémentaires. La maintenance et le fonctionnement de l'infrastructure n'entrent pas dans les limites du projet. Les systèmes des produits des éléments d'infrastructure analysés dans les quatre cas englobent l'extraction des matières premières, leur transformation en matériaux de construction, la mise en œuvre et la fin de vie des éléments de l'infrastructure. L'exploitation et la maintenance des éléments de l'infrastructure sont exclues, sauf l'occupation du sol. La différence des durées de vie des ouvrages est prise en compte. Les processus de transport et d'infrastructure sont pris en compte. Tous les processus mentionnés décrivent des conditions européennes moyennes.

Sont exclus :

- l'exploitation et la maintenance des éléments de l'infrastructure (par exemple, éclairage, service hivernal, trafic), car ces activités sont hors du système analysé ;
- l'outil de production (machines) sur le site du fabricant, de par sa faible importance ;
- le stockage des matières premières et des géosynthétiques produits sur le site du fabricant, car l'énergie consommée est considérée comme négligeable ;
- l'emballage des géosynthétiques, car ils sont de faible importance (moins de 3% de la contribution en masse).

3. Collecte et qualité des données

Les données concernant la production des géosynthétiques ont été collectées auprès des fabricants participant au projet à l'aide de questionnaires. Les inventaires du cycle de vie de chaque participant ont servi de base à l'établissement d'un inventaire moyen du cycle de vie du géosynthétique.

Les données collectées englobent des informations qualitatives sur le système pertinent de produits et de processus du fabricant, des informations sur les fournisseurs du fabricant (lorsque cela est possible) ainsi que des données techniques de référence (par exemple, des études relatives au sujet, des déclarations sur les produits). Les informations qualitatives sur les constructions en béton renforcé proviennent de documents techniques de référence et d'avis d'experts. Des analyses du cycle de vie moyennes ont été établies pour chaque cas sur la base des moyennes arithmétiques de la performance environnementale des produits fabriqués par les membres participants à l'étude.

La principale source de données génériques utilisée pour cette étude est ecoinvent Data v2.2, qui inclut des données d'inventaire de nombreux produits et services.

Période de référence

Les données sur les matériaux géosynthétiques ont été collectées à l'aide de questionnaires portant sur l'année 2009 ou, dans quelques rares exceptions, sur l'année 2008. Les données disponibles sur les autres entrants et sur l'utilisation de l'outil de production sont parfois plus anciennes. La caractérisation des quatre cas constitue les meilleures pratiques actuelles.

Étendue géographique de l'étude

L'ensemble des données correspondent à des conditions européennes. Quelques données suisses sont utilisées pour estimer les conditions européennes, telles que la mise en décharge et l'incinération des déchets.

Référence technique

Dans chaque cas, les alternatives sont définies comme techniquement équivalentes ou au moins comparables. Les géosynthétiques utilisés dans les quatre cas représentent un mélange de différents types de produits adaptés à l'application. Les solutions conventionnelles représentent les types de construction les plus communément rencontrés.

Évaluation de l'incertitude

Des analyses par la méthode de Monte Carlo ont été réalisées dans chaque cas afin d'évaluer l'incertitude des données utilisées. L'analyse par la méthode de Monte Carlo est réalisée pour écarter les incertitudes dépendantes. Les résultats montrent que les incertitudes indépendantes ont un effet dans les deux alternatives comparées.

4. Évaluation de l'impact du cycle de vie

La performance environnementale est évaluée à l'aide des huit indicateurs d'impact suivants :

- **Demande d'énergie cumulée** – DEC (consommation d'énergie primaire, décomposée en non-renouvelable et renouvelable) : la DEC définit la consommation d'énergie d'origine fossile, nucléaire et renouvelable tout au long du cycle de vie d'un bien ou d'un service. Les deux indicateurs calculés sont : DEC, non renouvelable – de sources fossile et nucléaire et DEC, renouvelable – de sources hydraulique, solaire, éolienne, géothermique et biomasse. Ils sont tous deux exprimés en MJ-*eq*.
- **Le changement climatique** (potentiel de réchauffement global, GWP100) : Toutes les substances contribuant au changement climatique sont incluses dans l'indicateur Potentiel de changement

climatique (PRC). Le dimensionnement du temps de résidence des substances dans l'atmosphère et des émissions prévues sont considérées déterminer les potentiels de réchauffement climatiques. L'impact potentiel de l'émission d'un kilogramme d'un gaz à effet de serre est comparé à l'impact potentiel de l'émission d'un kilogramme de CO₂, résultant en kg CO₂-équivalents. Dans cette étude un horizon de 100 ans a été retenu, comme dans le protocole de Kyoto.

- **Formation d'ozone photochimique** : aussi dénommé brouillard d'été (« summer fogs »).
- **Formation de particules** : les particules sont à l'origine de problèmes de santé lorsqu'elles sont inhalées et pénètrent dans les voies respiratoires et les poumons.
- **Acidification** : changement de l'acidité des sols dû à des dépôts atmosphériques de sulfates, nitrates et phosphates. Les principales substances à l'origine de l'acidification sont NOX, NH₃ et SO₂.
- **Eutrophisation** : enrichissement de l'environnement aquatique en nutriments.
- **Utilisation des terres** : Chaque type d'occupation des sols a un effet différent sur la biodiversité. Cependant, ceci n'est pas pris en compte dans l'étude. L'indicateur d'occupation des sols inclut la somme totale, non pondérée de la surface occupée.
- **Consommation d'eau** : cet indicateur exprime la quantité totale d'eau utilisée (excluant l'eau utilisée pour les turbines de production hydroélectriques).

5. Analyses de sensibilité

Des analyses de sensibilité ont été menées afin de vérifier la fiabilité des résultats en faisant varier les hypothèses selon les différents scénarii suivants :

- l'épaisseur moyenne de la couche de gravier dans le cas 1A a été successivement réduite à 20cm puis porté à 40cm afin de prendre en considération différentes spécifications ;
- le liant hydraulique dans le cas 2 : en plus du scénario 2C prévoyant 50/50% de ciment/chaux, deux alternatives avec respectivement 100% de ciment et 100% de chaux vive ont été considérées ;
- la sensibilité au gel dans le cas 2 : dans les régions où le gel peut pénétrer la structure de chaussée jusqu'à un sol F3, un traitement du sol pour obtenir un sol non-gélif F2 est requis et le géosynthétique ne peut être appliqué directement sur le sol existant. Ainsi, une analyse de sensibilité est menée à travers le cas2B, dans laquelle la structure est stabilisée par remplacement du sol par un sol non gélif ;
- l'utilisation d'un géosynthétique de séparation dans le cas 2 : dans certains cas, l'utilisation d'un géosynthétique n'est pas nécessaire, comme dans le cas 2B. Un scénario exclut donc l'utilisation d'un géosynthétique de séparation ;
- le recyclage du béton n'est pas pris en compte dans les cas 4A et 4B, car le béton recyclé et le béton vierge ont des impacts environnementaux du même ordre de grandeur, donc aucun bénéfice ne peut être tiré de l'usage de béton recyclé. Pour les mêmes raisons, l'utilisation d'acier recyclé pour les fers à béton n'est pas prise en compte car l'acier est produit à partir de ferraille.

6. Cas 1 – Fonction filtration

6.1. Introduction

Les géosynthétiques sont utilisés dans les applications de génie civil où ils peuvent assurer la fonction de filtre. L'utilisation d'un géosynthétique en tant que filtre (cas 1B) est comparée à celle d'un filtre granulaire traditionnel (cas 1A). Un géosynthétique « moyen » a été défini pour synthétiser les caractéristiques moyennes des 3 types des géosynthétiques suivants:

- géotextile constitué de filaments continus,
- géotextile constitué de fibres courtes et
- géotextile tissés.

Les granulés de polypropylène sont utilisés comme matière première (cas 1B). Ils doivent être stabilisés contre les UV pour satisfaire aux exigences de durabilité. La masse surfacique moyenne est de 175 g/m².

La manière de construire un filtre dépend de plusieurs facteurs. Les conditions retenues pour la comparaison sont indiquées dans le tableau 1 et la figure 2. Un profil plus détaillé est montré sur la figure 3.

La comparaison de l'impact environnemental des cas 1A et 1B est réalisée sur une surface d'un mètre carré de filtre.

La profondeur d'excavation plus importante pour le cas 1A n'a pas été prise en considération pour la comparaison.

Tableau 1. Définition des cas 1A et 1B

Paramètres	Unité	Cas 1A Filtre granulaire	Cas 1B Filtre géosynthétique
Dimension du filtre	m ²	1	1
Géosynthétique de filtration	g/m ²	-	175
Matériau granulaire	cm	30	0

À partir de ces paramètres, il a été calculé que l'épaisseur D de la couche granulaire (cas 1A) est de 30 cm et celle de l'alternative géosynthétique (cas 1B) est égale à 1-2 mm. La figure 2 montre le profil type utilisé pour cette analyse du cycle de vie

L'effet de l'épaisseur du filtre granulaire sur le cycle de vie est évalué par une variation de +/- 10 cm.

La durée de vie typique est estimée à 30 ans pour les cas 1A et 1B. L'unité fonctionnelle pour le cas 1 est la fourniture d'1m² de filtre avec une conductivité hydraulique (valeur k) au moins égale à 0.1 mm/s et une durée de vie égale à 30 ans.

6.2. Inventaire du cycle de vie pour le système de filtre

Les cas 1A et 1B diffèrent dans la conception du filtre. La différence réside dans la quantité de matériau granulaire, la consommation d'énergie relative au matériau utilisé (transport, excavation, etc.) et l'utilisation du géosynthétique. Les matériaux granulaires recyclés ne sont pas considérés comme une alternative car ils ne sont généralement pas disponibles sur le site pour une construction nouvelle.

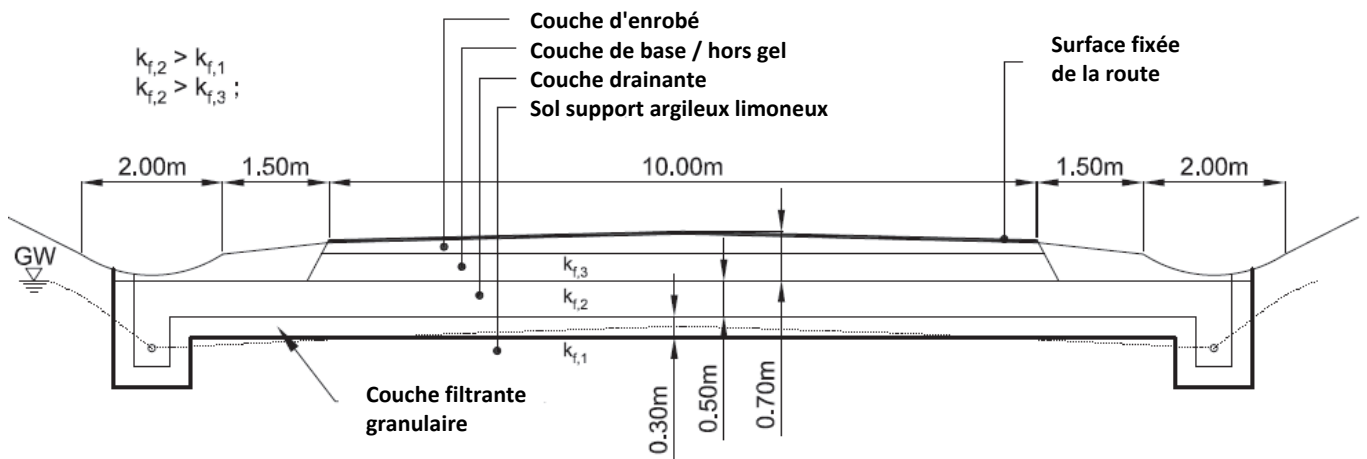
Les principales consommations engagées pour la construction du cas 1A et du cas 1B sont récapitulées dans le tableau. 2.

Les données sont rapportées à un filtre de 1m² d'une durée de vie de 30 ans. Les valeurs concernant les émissions de particules se rapportent aux émissions engendrées par les processus mécaniques (par exemple, versement et compactage du matériau granulaire). La surface de terrain utilisée n'est pas incluse dans cet inventaire de cycle de vie car le type de terrain utilisé pour la construction du filtre n'est pas connu.

Tableau 2. Consommation pour la construction de 1m² de filtre - cas 1A et 1B

	Unité	Cas 1A Total	Cas 1B Total
Matériau granulaire	t/m ²	0,69	-
Géosynthétique	m ² /m ²	-	1
Diesel (engins de terrassements)	MJ/m ²	2,04	1,04
Transport par camion	tkm/m ²	34,5	0,035
Transport par rail	tkm/m ²	-	0,07
Particules, > 10 µm	g/m ²	4,8	0
Particules, > 2,5 µm et < 10 µm	g/m ²	1,3	0

Cas 1A



Cas 1B

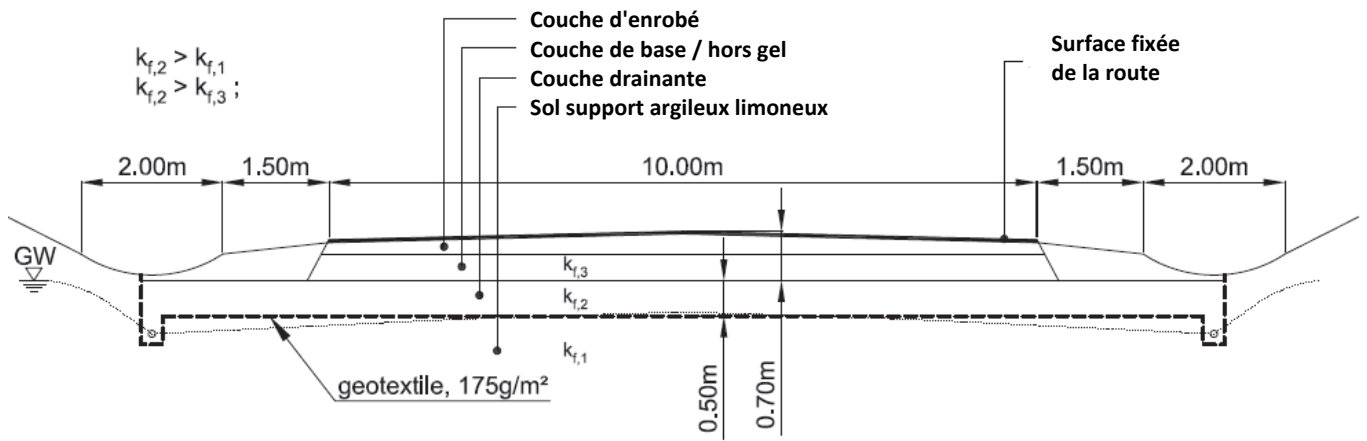


Figure 2. Profil en long du filtre granulaire (cas 1A) et du système de filtre avec géosynthétique (cas 1B)

Cas 1A

Cas 1B

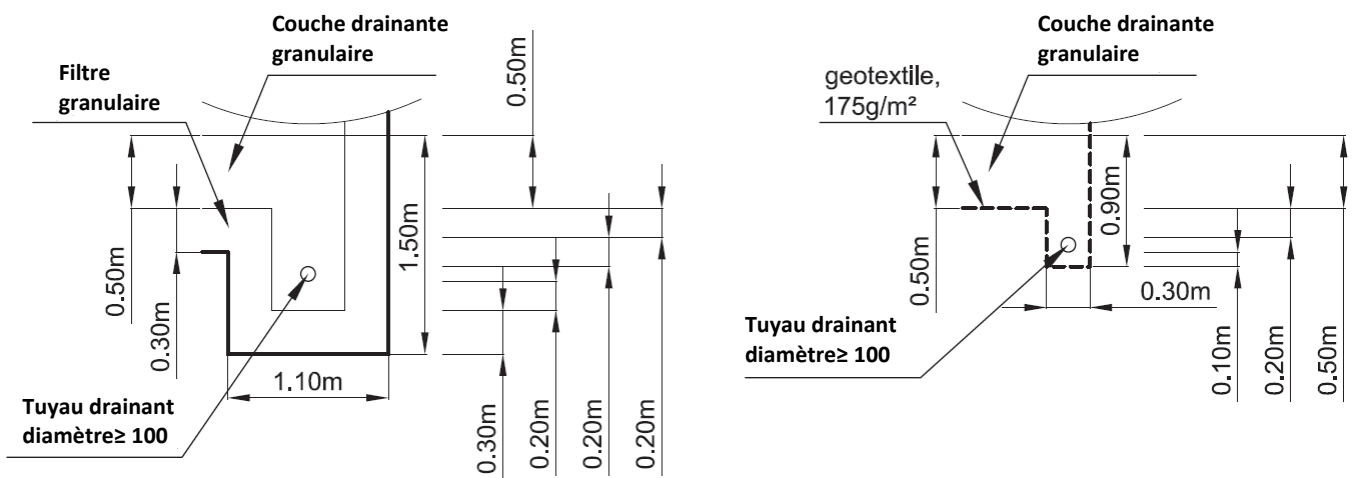


Figure 3. Profil en travers du filtre granulaire (cas 1A) et du système de filtre géosynthétique (cas 1B)

6.3. Inventaire du cycle de vie du géosynthétique

Pour cette analyse, 13 membres de l'EAGM ont répondu au questionnaire concernant la production de géosynthétiques utilisés en tant que filtre. La qualité des données reçues est considérée satisfaisante. Le niveau de détail a été équilibré dans quelques cas avant de modéliser le géosynthétique moyen équivalent. Le tableau 3 montre les principales valeurs relatives à la production de ce géosynthétique moyen.

Tableau 3. Chiffres clés pour la production de 1m² de géosynthétique utilisé en tant que filtre

	Unité	Valeur
Matières premières	kg/kg	1,05
Eau	kg/kg	2,16
Lubrifiants (huile)	kg/kg	0,0026
Électricité	kWh/kg	1,14
Énergie thermique	MJ/kg	1,49
Carburants pour chariots élévateurs	MJ/kg	0,09
Bâtiment	m ² /kg	2,51.10 ⁻⁵

6.4. Évaluation de l'impact du cycle de vie

Dans ce chapitre, l'impact environnemental correspondant à un mètre carré de filtre est évalué pour la totalité du cycle de vie. Le cycle de vie inclut l'approvisionnement des matières premières ainsi que la construction et les phases de recyclage.

Pour chaque indicateur de catégorie d'impact présenté sur la figure 4, le niveau 100% correspond à l'impact environnemental le plus élevé (cas 1).

La contribution de chaque catégorie d'impact est ventilée en : système de filtre, matières premières (matériau granulaire, géosynthétique), matériel utilisé pour la construction, transports (des matières premières au chantier de construction) et recyclage (inclut les transports du chantier de construction à la décharge et les impacts du recyclage des différents matériaux).

La figure 4 montre que les impacts environnementaux pour le cas 1B sont plus faibles que ceux engendrés par le cas 1A, ceci pour tous les indicateurs évalués.

La demande énergétique cumulée non-renouvelable pour la construction et le recyclage d'un filtre de 1 mètre carré, d'une durée de vie de 30 ans serait 131 MJ-*eq* dans le cas 1A et 19 MJ-*eq* dans le cas 1B. Les émissions cumulées des gaz à effet de serre s'élèveraient à 7,8 kilogrammes CO₂-*eq* pour le cas 1A et à 0,81 kilogramme CO₂-*eq* pour le cas 1B.

Le filtre dans le cas 1B engendre entre 0,2% et 14,3% de l'impact produit par le filtre 1A (consommation d'eau, consommation énergétique cumulée non-renouvelable). Les émissions de gaz à effets de serre du cas 1B correspondent à 10,4% de la quantité émise dans le cas 1A.

La principale différence entre les cas 1A et 1 B provient de l'utilisation et du transport du matériau granulaire. Par conséquent, l'utilisation de géosynthétiques peut contribuer à réduire l'impact sur l'environnement des systèmes de filtration, parce qu'elle se substitue à l'utilisation du matériau granulaire.

6.5. Analyse de la sensibilité

Dans l'analyse de sensibilité (cas 1AS1 et 1AS2), il est analysé comment les résultats de la sous-couche granulaire filtrante changent si l'épaisseur du filtre minéral est augmentée de 10 centimètres, soit une épaisseur totale de 40 centimètres (1AS1) ou si l'épaisseur du filtre minéral est diminuée de 10 centimètres, soit une épaisseur totale de 20 centimètres (1AS2).

La figure 5 montre que, si une sous-couche filtrante plus épaisse est construite (cas 1AS1), l'impact global sur l'environnement du filtre granulaire est augmentée de 33 % et que pour une sous-couche filtrante plus mince (cas 1AS2), il est diminué de 33 %. Néanmoins, la performance environnementale d'un filtre avec géosynthétique (cas 1B) est considérablement meilleure que celle d'un filtre granulaire dans chacun des cas 1A, 1AS1 et 1AS2.

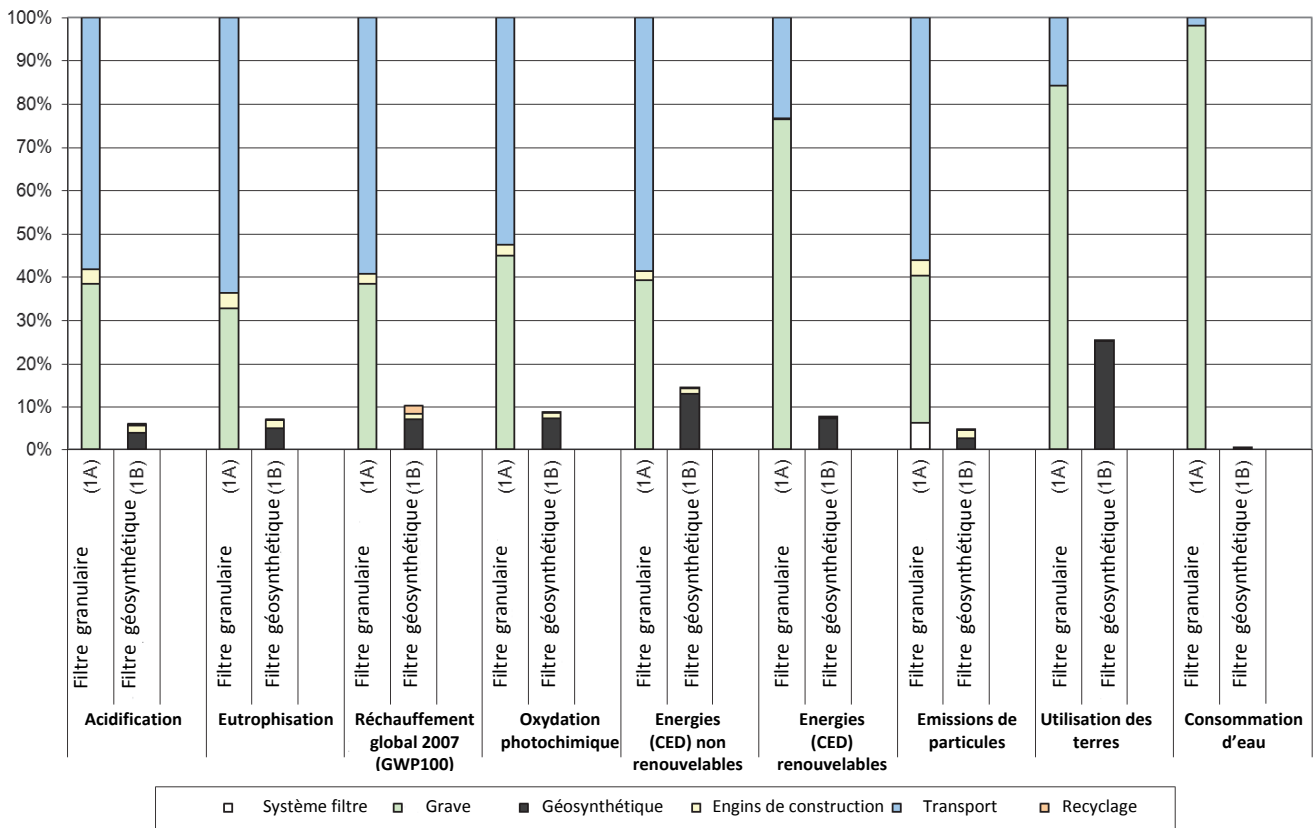


Figure 4. Catégories d'impacts sur l'environnement du cycle de vie d'un filtre de 1 m² pour les cas 1A et 1B. Pour chaque indicateur, le niveau 100% correspond à l'impact environnemental le plus élevé.

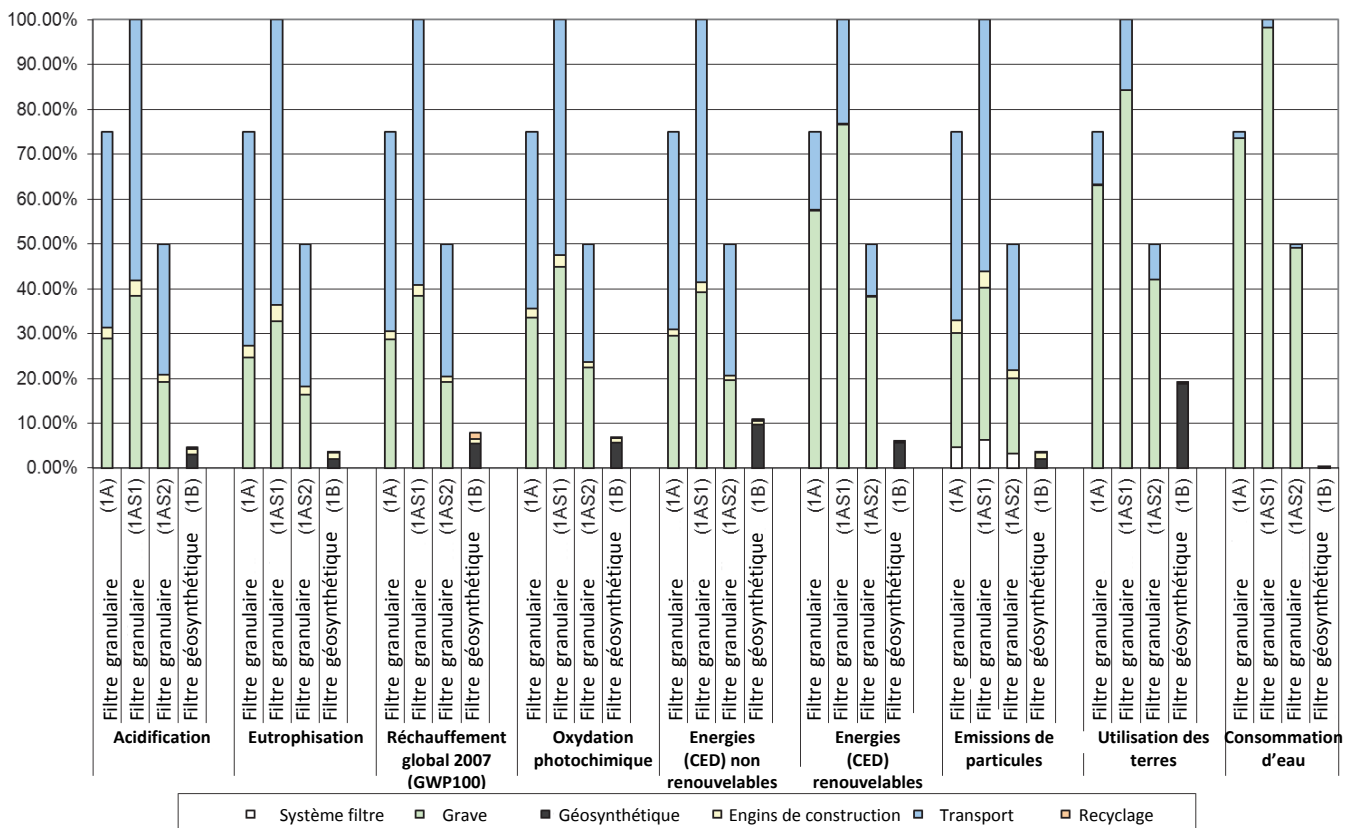


Figure 5. Analyse de sensibilité : Catégories d'impacts sur l'environnement du cycle de vie d'un filtre de 1 m² des cas 1A et du 1B. 1AS1 et 1AS2 se rapportent à l'analyse de sensibilité avec une épaisseur différente de la couche granulaire. Pour chaque indicateur, le niveau 100% correspond à l'impact environnemental le plus élevé.

6.6. Analyse de la contribution de la production d'un géosynthétique

Dans ce chapitre, l'impact environnemental d'un kilo de géosynthétique est évalué à partir de la fourniture et de l'utilisation de matières premières, des matériaux consommables, de l'énergie, des infrastructures et des processus de recyclage.

La catégorie « Géosynthétique » montre l'impact direct de la production du géosynthétique. Cela inclut la surface de terrain nécessaire pour produire le géosynthétique mais aussi les émissions (par exemple, NMVOC, particules et émissions COD) du procédé de production mais pas les émissions provenant de la combustion de carburant et de l'électricité.

L'impact environnemental d'un géosynthétique est montré sur la figure 6. Les émissions cumulées des gaz à effet de serre s'élèvent à 3,2 kilogrammes CO₂-eq par kg. Les impacts environnementaux sont principalement liés à la consommation de matière première et à la consommation électrique. Les matières premières incluent les matières plastiques et chimiques, les colorants et autres additifs. Les matières plastiques sont responsables pour 4% (utilisation des terres) à 80% (énergies non renouvelables) de l'ensemble des impacts. Les impacts des colorants, matières chimiques et autres additifs varient de 2% à 10%.

La répartition entre les différentes sources de production électrique est spécifique à chaque pays et a été modélisée pour chaque producteur. Les impacts de la consommation de l'électricité dépendent ainsi non seulement de la quantité de l'électricité requise mais également du modèle utilisé. La part élevée de l'électricité dans les énergies renouvelables peut être expliquée par l'utilisation des centrales électriques hydroélectriques dans plusieurs de ces modèles pour l'approvisionnement de l'électricité.

L'énergie pour le chauffage et la consommation de carburant pour les chariots élévateurs sont d'importance mineure. En ce qui concerne l'utilisation des terres, la production de géosynthétique joue un rôle important (92 % des impacts globaux).

Les impacts sont dominés par l'utilisation directe du sol, c'est-à-dire, la surface de terrain qui est occupée par l'usine du fabricant où le géosynthétique est produit. L'utilisation indirecte de la terre, celle provenant des processus ascendants est sensiblement inférieure parce qu'aucune utilisation de sol n'est répertorié dans les inventaires pour les matières plastiques et qu'aucun produit venant directement de la terre comme le bois sont employés à des niveaux importants.

L'eau consommée (eau du robinet, eau déminéralisée, eau décarbonatée) est incluse dans les matériaux consommables. Par conséquent, cette catégorie représente environ 15 % du montant total de l'eau utilisée.

6.7. Conclusion pour le cas 1

Un filtre utilisant un géosynthétique (cas 1B) a un impact environnemental plus faible qu'une couche filtrante constituée de matériau granulaire (cas 1A) pour tous les indicateurs de catégorie d'impact étudiés. Pour tous les indicateurs, le filtre avec le géosynthétique représente moins de 25 % des impacts d'un filtre granulaire conventionnel.

La demande cumulée en énergie non-renouvelable pour la construction et la mise en déchet d'un filtre de 1 m², d'une durée de vie de 30 ans est égale à 131 MJ-eq dans le cas 1A et 19 MJ-eq dans le cas 1B. Les émissions cumulées des gaz à effet de serre s'élèveraient à 7,8 kilogrammes CO₂-eq pour le cas 1A et à 0,81 kilogramme CO₂-eq pour le cas 1B.

Si un filtre granulaire plus mince est construit (cas 1AS2), les impacts sur l'environnement sont sensiblement réduits. Néanmoins, la différence avec le filtre géosynthétique (cas 1B) est encore significative.

Les filtres construits en Europe peuvent différer en géométrie et matières employées. Ainsi, des hypothèses étaient nécessaires pour modéliser une couche filtrante pour une route typique. Les données relatives à l'extraction de matériaux granulaires et l'utilisation des engins de terrassements sont basées sur des données génériques et la connaissance de différents experts en génie civil.

La profondeur d'excavation plus importante (Figures 2 et 3) pour le cas 1A n'a pas été prise en considération dans la comparaison. Une augmentation du volume excavé pour le cas 1A provoquerait un accroissement de l'impact sur l'environnement et de la différence par rapport au cas 1B.

En dépit des simplifications et des hypothèses nécessaires, les résultats de la comparaison sont considérés comme significatifs et fiables.

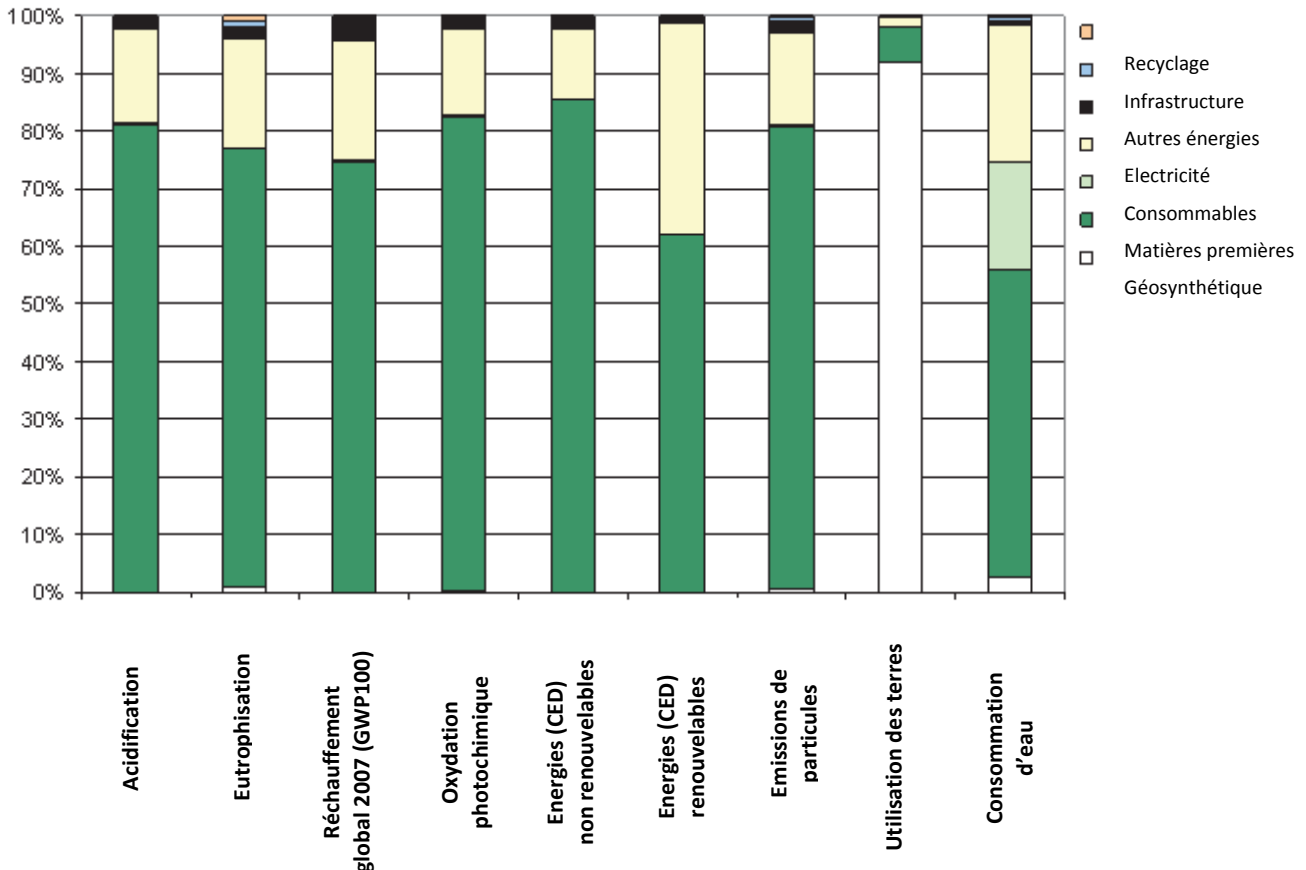


Figure 6. Impacts environnementaux du cycle de vie d'un géosynthétique de 1 kg. « Géosynthétique » fournit le poids direct de la production du géosynthétique. « Matières premières » inclut les matières plastiques, l'extrusion au besoin et les additifs. Les matériaux consommables incluent l'eau (robinet et déminéralisée) et l'huile de graissage. « Autres énergies » inclut l'énergie thermique et les carburants, « Infrastructure » couvre la construction de l'usine et « Recyclage » comprend le traitement des eaux résiduelles et la mise en dépôt de différents types de déchet.

7. Cas 2 – Stabilisation de plateforme

7.1. Introduction

Dans les ouvrages routiers, la couche support doit satisfaire aux spécifications relatives au compactage et à la capacité portante. L'amélioration de certaines caractéristiques du sol peut être nécessaire pour la construction sur des sols médiocres.

En plus de la construction d'une route conventionnelle avec une couche de sable et gravier non sensible au gel (cas 2A), l'amélioration de sol peut être faite avec un géosynthétique (cas 2B) ou en ajoutant de la chaux, du ciment ou un liant hydraulique (cas 2C). Les cas 2B et 2C mènent à une épaisseur réduite de la couche de sable et gravier.

Un géosynthétique « moyen » a été défini pour synthétiser les caractéristiques moyennes des 3 types des géosynthétiques suivants:

- géogrilles extrudées et étirées,
- géogrilles assemblées,
- tissés / géogrilles tricotées.

Les granulés de polypropylène constituent la matière première pour les géogrilles et tissés utilisés pour le cas 2B. La masse surfacique moyenne est de 250 g/m². En alternative, des grilles en polyester avec une masse surfacique de 260 g/m² (30 kN/m dans chaque direction) sont utilisées.

Le cas d'une route conventionnelle (2A) est comparé à une route renforcée par géosynthétiques (2B) et une route stabilisée à la chaux et au ciment (2C). L'exemple considéré est une route de classe III (3 millions de passages - 10 tonnes par essieu) avec la couche de surface au même niveau dans tous les cas. La route est construite sur un sol sensible au gel de classe F3.

Dans les régions où la profondeur de pénétration de gel n'atteint pas le sol sensible au gel, celui-ci n'a pas besoin d'être enlevé. Ceci est considéré par le cas standard 2B. Dans l'analyse de sensibilité le sol sensible de gel est enlevé et remplacé par le sol non sensible au gel pour répondre au critère de sol de la classe F2 (cas 2BS1).

Dans le cas d'une route stabilisée à la chaux et au ciment, l'amélioration est réalisée en mélangeant le sol existant à 50 % de ciment et à 50 % de chaux (cas 2C). Dans l'analyse de sensibilité, la stabilisation est réalisée en employant seulement la chaux (cas 2CS1) ou seulement le ciment (cas 2CS2). La figure 7 montre les profils des trois solutions alternatives.

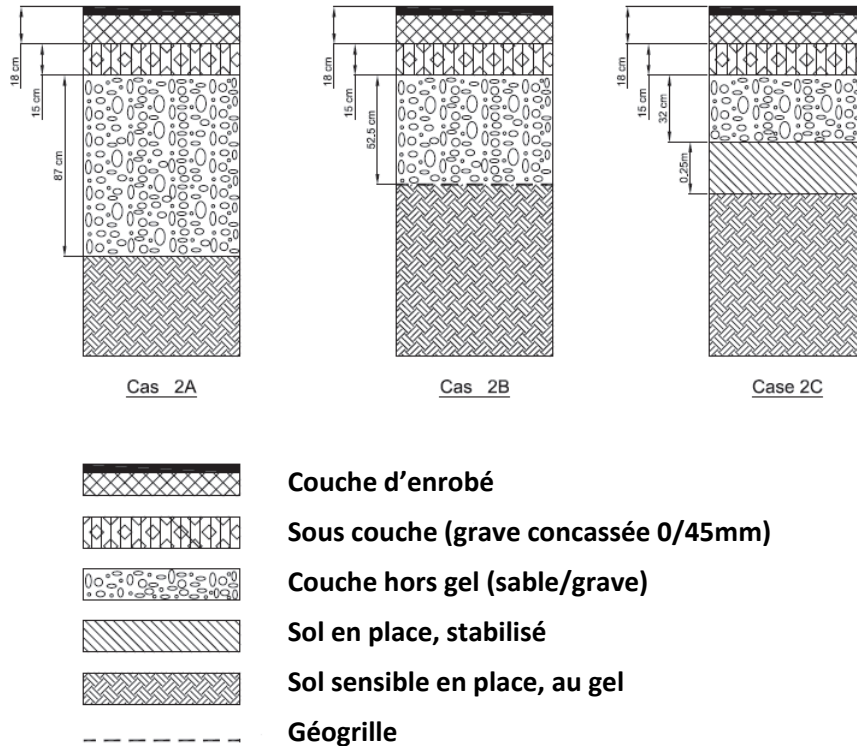


Figure 7. Profils d'une route standard (cas 2A, à gauche), d'une route renforcée par géogrille (cas 2B, au centre) et d'une route sur sol traité chaux/ciment (cas 2C, droite).

Les tableaux 4 et 5 montrent les valeurs spécifiques de chaque élément pour les trois solutions alternatives, respectivement dans leur situation de base et les analyses de sensibilité.

Tableau 4. Spécification des trois types de fondations

Paramètres	Unités	Cas 2A Route conventionnelle	Cas 2B Renforcée par géosynthétique	Cas 2C Stabilisée chaux/ciment
Largeur de la route	m	12	12	12
Géogrille	g/m ²	-	250 (PP) ou 260 (PET)	-
Géosynthétique de séparation et filtration	g/m ² (géosynthétique du cas 1)	-	150 (PP)	-
Stabilisant : ciment / chaux	poinds-%	-	-	2,25 / 3,75
Épaisseur sol stabilisé	cm	-	-	25
Couche d'assise	cm	87	52.2	32
Couche de base (0/45mm), STS	cm	15	15	15
Couche d'enrobé	cm	18	18	18
- couche de roulement	cm	4	4	4
- couche de liaison	cm	14	14	14

Tableau 5. Spécifications des fondations alternatives en utilisant la substitution de sol (2BS1), sans géosynthétique de séparation et de filtration (2BS1), et une stabilisation chaux uniquement et ciment uniquement (respectivement cas 2CS1 et 2CS2.)

Paramètre	Unités	2BS1 Renforcé par géosynthétique avec substitution de sol	2BS2 Renforcé par géosynthétique sans séparation ni substitution	2CS1 Sol stabilisé à la chaux	2CS2 Sol stabilisé au ciment
Largeur de la route	m	12	12	12	12
Géogridde	g/m ²	250 (PP) or 260 (PET)	250 (PP) or 260 (PET)	-	-
Géosynthétique de séparation et filtration (géosynthétique du cas 1)	g/m ²	150 (PP)		-	-
Stabilisation: chaux uniquement	poids-%			7,5 (5 à 10)	-
Stabilisation: ciment uniquement	poids-%			-	4,5 (3 à 6)
Épaisseur de sol stabilisé	cm			25	25
Sol extrait et mis en déchet (analyse de sensibilité)	cm	16,8	-	-	-
Couche de sol insensible au gel sable /gravier	cm	69	52,2		
Couche d'assise	cm	-	-	32	32
Couche de base (0/45mm),	cm	15	15	15	15
Couche d'enrobé	cm	18	18	18	18
- couche de roulement	cm	4	4	4	4
- couche de liaison	cm	14	14	14	14

La fondation est considérée pour une durée de vie de 30 ans en raison des conditions difficiles liées au sol médiocre. La couche d'enrobé se compose d'une couche de roulement de 4 centimètres avec une durée de vie de 15 ans. La couche de liaison est de 14 centimètres et a une durée de vie de 30 ans.

7.2. Inventaire du cycle de vie pour les éléments de l'infrastructure

Les cas 2A, 2B et 2C diffèrent dans la conception de la fondation. La consommation de matériaux et d'énergie liée à la construction et au recyclage de la couche de liaison et de la couche de roulement est identique dans chacun des trois cas. Par conséquent, la différence entre les trois cas provient de la quantité de matériaux graveleux et de ciment employé dans la couche de fondation, de la consommation d'énergie relative à la fondation (transport des matériaux, excavation etc.), et de l'utilisation de géosynthétiques. Les matériaux granulaires recyclés ne sont pas considérés comme une alternative car ils ne sont généralement pas disponibles sur le site pour une nouvelle construction de route.

Les données principales relatives à la construction d'une route pour les cas 2A, 2B et 2C sont récapitulées dans le tableau 6. L'information se rapporte à un mètre linéaire de route et à une durée de vie de 30 ans. Les émissions de COVNM proviennent du bitume et les valeurs concernant les émissions de particules se rapportent aux émissions des processus mécaniques.

7.3. Inventaire du cycle de vie du géosynthétique

Pour cette analyse, 7 membres de l'EAGM ont répondu au questionnaire concernant la production de géosynthétiques utilisés pour la stabilisation de fondation. La qualité des données reçues est considérée satisfaisante. Le tableau 7 montre les consommations principales relatives à la production de ce géosynthétique moyen.

Tableau 6. Valeurs principales se rapportant à la construction d'un mètre de route pour les cas 2A, 2B et 2C (durée de vie = 30 ans)

	Unités	Cas 2A		Cas 2B		Cas 2C	
		Total	Relatives à la fondation	Total	Relatives à la fondation	Total	Relatives à la fondation
Bitume	t/m	0,3	-	0,3	-	0,3	-
Grave	t/m	33,9	-	24,3	-	18,7	6,9
Ciment	t/m	-	-	-	-	0,16	0,16
Chaux	t/m	-	-	-	-	0,26	0,26
Géosynthétique de séparation	m ² /m	-	-	12	12	-	-
Géosynthétique de stabilisation	m ² /m	-	-	12	12	-	-
Diesel des engins de construction	MJ/m	1957	-	1972	-	1969	14,9
Transport, camion	tkm/m	1711	-	1232	-	994	41,4
Transport, fret, rail	tkm/m	-	-	2,0	2,0	41,4	41,4
Occupation terrain	m ² /m	12	12	12	12	12	12
COVNM (*)	kg/m	2,19	-	2,19	-	2,19	-
Particules, > 10 µm	g/m	237	-	170	-	131	-
Particules, > 2.5 µm et < 10 µm	g/m	63	-	45	-	35	-

(*) COVNM: composé organique volatil non méthanique

Tableau 7. Valeurs principales se rapportant à la production d'une couche géosynthétique de 1 kg utilisée dans la stabilisation de fondation

	Unité	Valeur
Matières premières	kg/kg	1,02
Eau	kg/kg	0,50
Lubrifiants (huile)	kg/kg	3,62.10 ⁻⁴
Électricité	kWh/kg	1,76
Énergie thermique	MJ/kg	1,75
Carburants pour chariots élévateurs	MJ/kg	0,15
Bâtiment	m ² /kg	1,41.10 ⁻⁵

7.4. Évaluation de l'impact du cycle de vie pour la stabilisation de fondation

Trois types de fondation alternatives sont analysées, une fondation conventionnelle (cas 2A), une fondation renforcée avec un géosynthétique (cas 2B) et une fondation stabilisée avec un mélange ciment/chaux (cas 2C). Le cycle de vie inclut la fourniture de matières premières aussi bien que les phases de construction et le recyclage.

Les impacts sur l'environnement pour la totalité du cycle de vie d'une route sont montrés sur la figure 8. Pour chaque indicateur de catégorie d'impact présenté, le niveau 100% correspond à l'impact environnemental le plus élevé. La contribution de chaque source d'impact est reportée : route, bitume, gravier, géosynthétique, ciment, chaux, engins de construction (inclut le mélange à chaud de gravier et de bitume et la mise en place), les transports (des matières premières au chantier de construction) et le recyclage (inclut des transports du chantier de construction à la décharge et les impacts des différents matériaux mis en déchet). Une part significative des impacts sur l'environnement est égale pour chacun des trois cas, parce que les couches d'asphalte et la couche de base sont identiques.

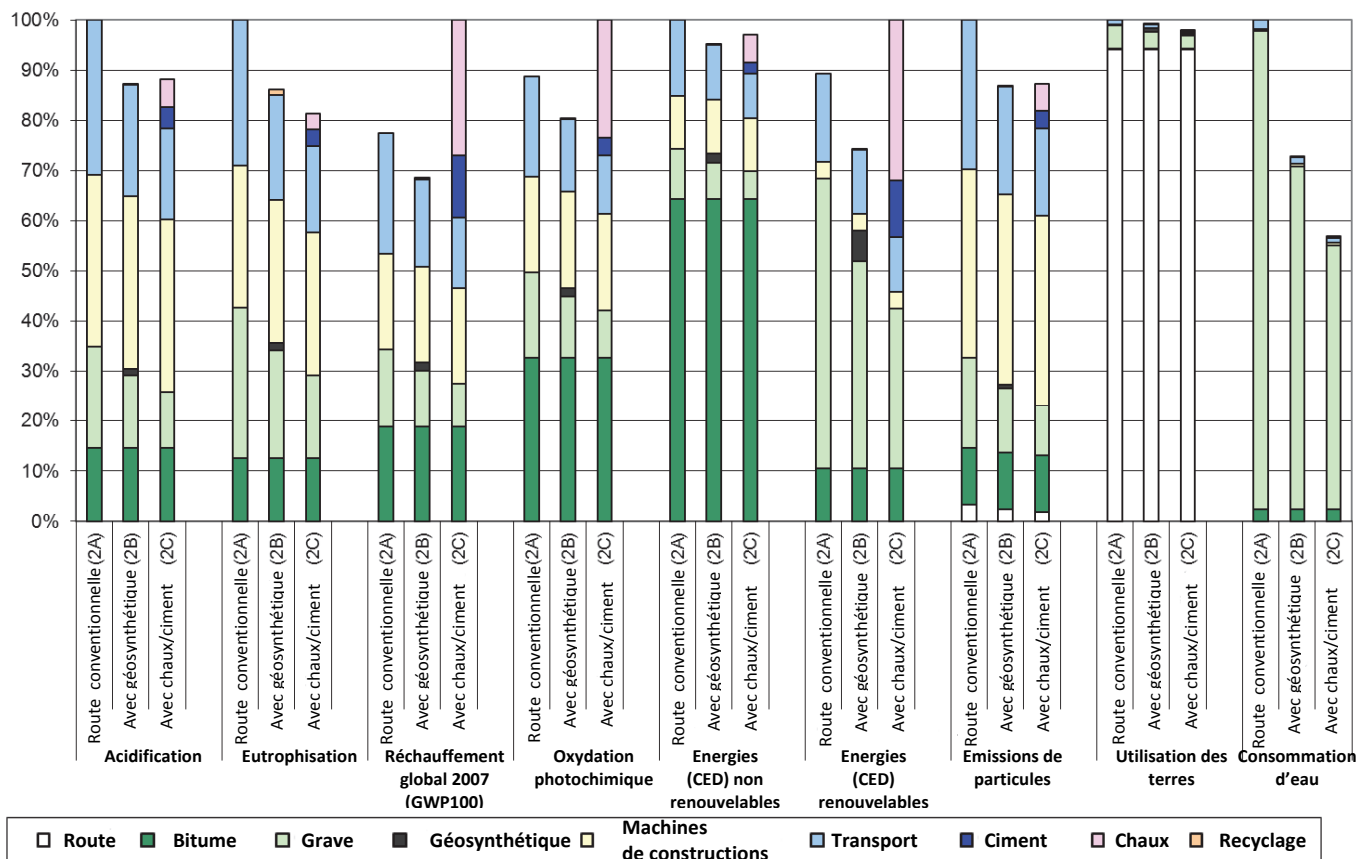


Figure 8. Impacts sur l'environnement du cycle de vie de 1 m de route avec différentes fondations, cas 2A, 2B et 2C. Pour chaque indicateur, le niveau 100% correspond à l'impact environnemental le plus élevé.

Les différences principales proviennent de la quantité de matériau granulaire requise, du ciment et de la chaux utilisés dans le cas 2C et du géosynthétique utilisé dans le cas 2B. Par rapport au cas 2A, on utilise environ 28% de moins de matériau granulaire dans le cas 2B et 45 % de moins dans le cas 2C. Les impacts sur l'environnement du matériau granulaire sont principalement provoqués par les engins de constructions et l'utilisation de l'électricité pendant l'extraction en carrière. En outre, les consommations liées au transport se corrént avec la quantité requise de matériaux granulaires, c'est-à-dire plus il y a de matériaux granulaires utilisés pour construire la route, plus il y a de transports.

L'utilisation du ciment et de la chaux a une influence élevée sur le résultat en ce qui concerne le réchauffement climatique global et la demande en énergie cumulée renouvelable (CED). Les impacts vis à vis du réchauffement climatique découlent principalement de la production de scories, à savoir des émissions géogéniques de CO₂, des émissions lors du procédé de calcination et du CO₂ fossile des carburants traditionnels. L'utilisation du géosynthétique contribue de manière significative à la demande en énergie cumulée renouvelable (8 %) en raison de la part de l'électricité d'origine hydraulique dans la consommation électrique totale utilisée pour la fabrication.

Le recyclage pour les cas 2A et 2C n'a pas d'impact environnemental, puisque le matériau est présumé provenir d'un stock de matériaux granulaires et les impacts sur l'environnement de l'excavation et du transport sont affectés au produit où le matériau est réutilisé. Le bitume est également laissé sur place. Dans le cas 2B, le géosynthétique peut être incinéré, mis en décharge ou réutilisé. Pour l'incinération et la mise en décharge, les poids respectifs sont inclus dans l'analyse. L'influence du recyclage du géosynthétique vis-à-vis de l'impact global sur l'environnement dans le cas 2B est inférieure à 0,7 %.

La part du géosynthétique vis-à-vis des impacts globaux de la route stabilisée est entre 0,75 % valeur concernant les émissions de particules et 6,1% pour la demande en énergie cumulée (CED) renouvelable. Ni le ciment ni la chaux vive ne sont nécessaires avec l'application d'un géosynthétique mais plus de matériau granulaire est exigé.

7.5. Analyse de la contribution de la production d'un géosynthétique

Dans ce chapitre, l'impact environnemental d'un kilogramme de géosynthétique est évalué à partir de la fourniture et l'utilisation de matières premières, les matériaux consommables, l'énergie, les infrastructures et les processus de recyclage.

La catégorie « Géosynthétique » (figure 9) montre l'impact direct de la production du géosynthétique. Cela inclut la surface de terrain nécessaire pour produire le géosynthétique mais aussi les émissions (par exemple, NMVOC, particules et COD émissions) du processus de production mais pas les émissions provenant de la combustion de carburant et de l'électricité.

L'impact environnemental d'un kilogramme de géosynthétique est montré sur la figure 9. Les émissions cumulées des gaz à effet de serre s'élèvent à 3,4 kilogrammes CO₂-eq par kg.

Les impacts environnementaux sont principalement liés à la consommation de matière première et à la consommation électrique. Les matières premières incluent les matières plastiques et chimiques, les colorants et autres additifs. Les matières plastiques sont responsables pour 2% (utilisation des terres) à 74% (CED énergies non renouvelables) de l'ensemble des impacts. Les impacts des colorants, matières chimiques et autres additifs varient de 9% (CED énergies non renouvelables) à 17% (surface occupée).

Comparé au géosynthétique du cas 1, la part de l'électricité est plus élevée dans ce cas-ci. C'est parce que plus d'électricité est nécessaire pour fabriquer le géosynthétique moyen utilisé dans le cas 2 par rapport au cas 1. De plus, les pertes de découpage sont réduites, ce qui nécessite moins de matières premières, et donc abaisse le poids du recyclage de ces matières premières. Cependant, en termes d'impact vis-à-vis du changement climatique, les deux géosynthétiques sont très similaires.

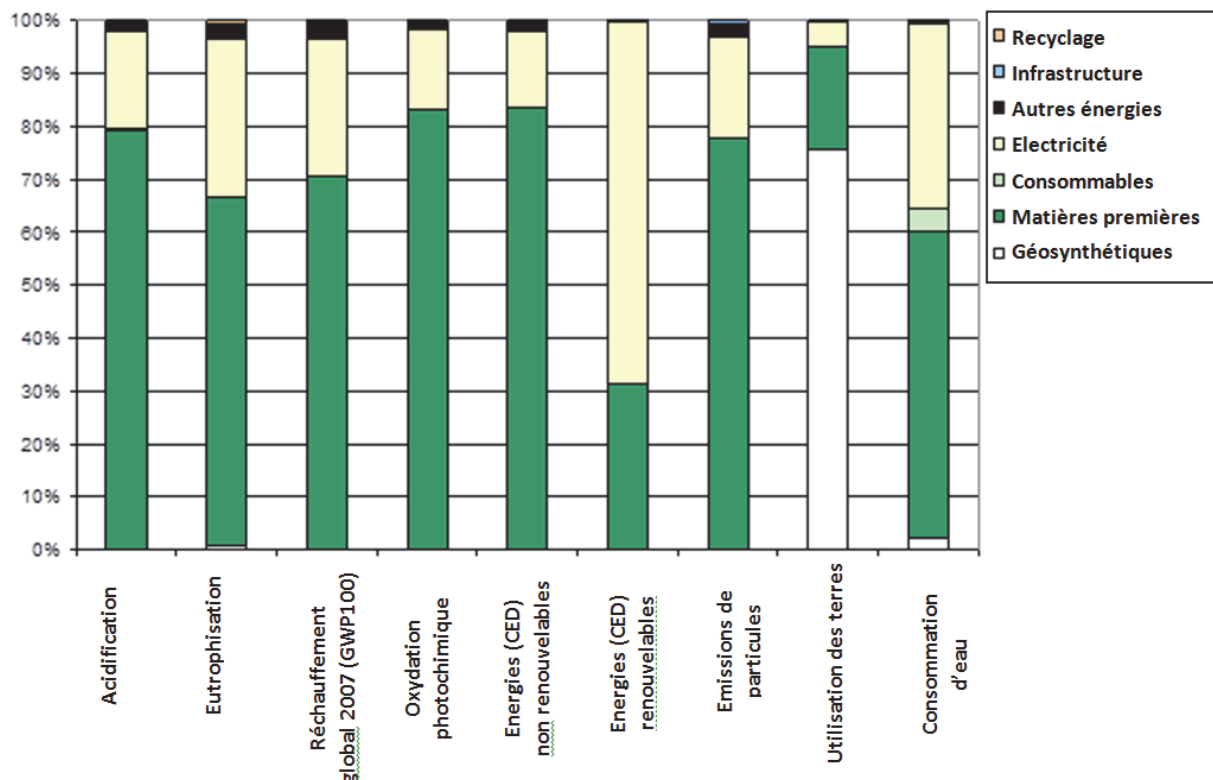


Figure 9. Impacts environnementaux du cycle de vie d'un géosynthétique de 1 kilogramme.

« Géosynthétique » fournit le poids direct de la production du géosynthétique. « Matières premières » inclut les matières plastiques, l'extrusion au besoin et les additifs. Les matériaux consommables incluent l'eau (robinet et déminéralisé) et l'huile de graissage. Les « autres énergies » incluent l'énergie thermique et les carburants, « infrastructure » couvre la construction de l'usine et « recyclage » comprend le traitement des eaux résiduaires et la mise en dépôt de différents types de déchet.

7.6 Conclusion pour le cas 2

Par rapport à une route conventionnelle (cas 2A), l'utilisation du géosynthétique amène à réduire les impacts sur l'environnement pour tous les indicateurs étudiés (cas 2B). Le géosynthétique doit remplacer au minimum une couche de 25 centimètres de matériaux granulaire dans une route conventionnelle pour avoir des impacts sur l'environnement égaux ou inférieurs pour tous les indicateurs.

La comparaison entre une route stabilisée avec un géosynthétique (cas 2B) et une route stabilisée avec le mélange ciment/chaux (cas 2C) est moins tranchée. D'une part, le cas 2B montre des impacts moins importants pour le changement climatique, l'oxydation photochimique et la demande énergétique cumulée renouvelable. D'autre part, l'acidification et les émissions de particules comme la demande en énergie cumulée non-renouvelable ont des impacts similaires, et le cas 2C montre des impacts plus faibles vis-à-vis de l'eutrophisation, l'utilisation des terres et la consommation d'eau.

L'impact vis-à-vis du changement climatique d'une route (classe III, 12 mètres de large, 30 ans de durée de vie) utilisant un géosynthétique est réduit d'environ 80 tonnes de CO₂-eq par kilomètre comparé aux impacts provoqués par la construction d'une route conventionnelle équivalente. Cette différence est égale environ à 11% de l'impact global sur le changement climatique des travaux de construction et du recyclage d'une route entière pendant ses 30 années de vie (à l'exclusion des émissions dues au trafic). Si nous comparons une route renforcée avec un géosynthétique à une route stabilisée avec un mélange ciment/chaux, l'impact vis-à-vis du changement climatique d'une route de la classe III est plus faible d'environ 300 tonnes de CO₂-eq par kilomètre avec l'utilisation d'un géosynthétique. Cette différence est égale environ à 30 % de l'impact global vis-à-vis du changement climatique de la construction et du recyclage d'une route entière pendant ses 30 années de vie (à l'exclusion des émissions du trafic).

Si la chaux ou le ciment sont utilisés seuls, à la place d'un mélange chaux/ciment, l'impact sur le changement climatique est accru par comparaison avec à une route conventionnelle ou une route renforcée par géosynthétique. L'utilisation de chaux augmente également l'impact sur l'environnement des catégories « oxydation photochimique » et « demande en énergie cumulée renouvelable ».

Les routes construites en Europe peuvent différer en section transversale et matières employées. Aussi, des hypothèses générales étaient nécessaires pour modéliser le profil transversal d'une route typique. Les données au sujet de l'extraction du matériau granulaire, de la stabilisation de sol et de l'utilisation des engins de construction sont basées sur des données génériques et la connaissance de plusieurs experts en génie civil.

En dépit des simplifications et des hypothèses nécessaires, les résultats de la comparaison sont considérés comme significatifs et fiables.

8. Cas 3 – Couche drainante dans la construction de décharge

8.1. Introduction

Les règles européennes spécifient l'épaisseur de matériau granulaire pour un système de drainage dans la couverture des centres de stockage de déchet dangereux/non-dangereux. La taille du granulat n'est pas définie en particulier. Un géosynthétique positionné sur le dispositif drainant est souvent utilisé pour empêcher la pénétration des particules fines du sol supérieur dans la couche granulaire. De même, un deuxième géosynthétique est à la base de la couche drainante comme couche de protection pour s'assurer que l'étanchéité n'est pas endommagée par les granulats.

Un géosynthétique de drainage peut être utilisé en remplacement de la couche conventionnelle de matériau granulaire drainant. Dans la pratique, les deux solutions emploient des géosynthétiques - au dessus et en-dessous de la couche de drainage. Toutes les autres couches de remblai ne changent ni en épaisseur ni dans leurs besoins en matériaux. Les profils de la solution conventionnelle et l'alternative géosynthétique sont montrés sur la figure 10.

La moyenne de deux types de géosynthétiques différents est utilisé pour représenter le comportement

- une grille de drainage,
- un géosynthétique 3D de filaments.

Des granulés de polypropylène ou de polyéthylène sont employés en tant que matière première dans le cas 3B. La masse surfacique du polymère de drainage est 500 g/m² (à l'exclusion des deux filtres géosynthétiques). Le matériau granulaire a une granulométrie plutôt uniforme de 16-32 millimètres et une épaisseur de 50 centimètres pour le cas 3A.

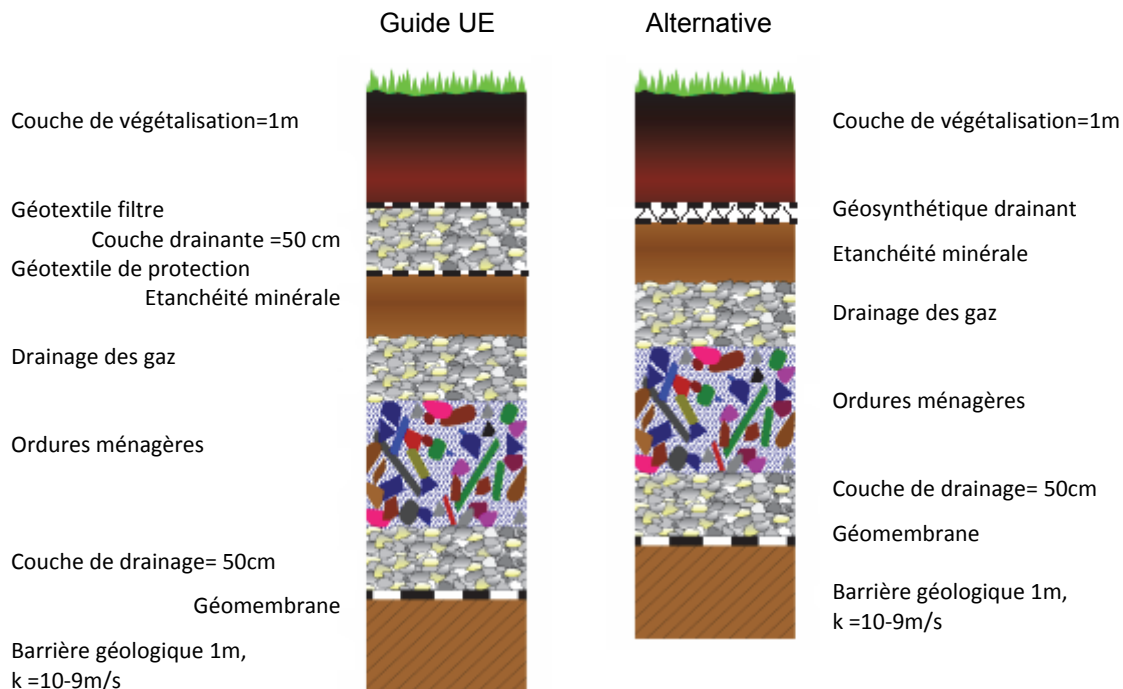


Figure 10. Schéma de la couverture d'un centre de stockage de classe 2 selon les directives de l'UE (cas 3A, à gauche) et avec géosynthétique comme couche alternative de drainage (cas 3B, à droite)

D'après la directive du Conseil Européen 1999/31/EC, une couche de drainage minérale avec une épaisseur de 0,50 m est exigée. La conductivité hydraulique de la couche de drainage (valeur k) n'a pas été définie pour la couche de drainage selon cette même directive. Chaque pays de l'Union Européenne doit respecter cette directive et peut posséder en sus une réglementation plus spécifique. Les réglementations introduites dans les pays de l'UE peuvent donc être légèrement différentes. En Allemagne, par exemple, des conditions supplémentaires pour la couche de drainage sont documentées (Gouvernement fédéral Allemand, 2009). Ici une conductivité hydraulique ≥ 1 mm/s (valeur k) est spécifiée et l'épaisseur $\geq 0,30$ m est définie comme suffisante pour les systèmes de couverture d'étanchéité. Des spécifications semblables à celles de l'Allemagne sont en usage aux Pays-Bas depuis des années.

Dans le cas où une solution alternative de drainage serait envisagée, il doit être prouvé que la capacité à long terme du produit de drainage est suffisante. Pour des géosynthétiques, un calcul de la capacité de drainage à long terme doit être effectué.

Plusieurs calculs et cas pratiques partout en Europe ont montré que des nappes de géosynthétique avec un cœur drainant moyen de 500 g/m^2 (moyenne de produits et de types de production différents) sont adaptées pour les systèmes finals de couverture.

Tableau 7. Valeurs spécifiques de la couche de drainage pour les deux solutions.

Paramètre	Unité	EU-Guidelines Guide UE	Alternative (géosynthétique)
Dimension de la décharge	m^2	100000	100000
Couche de drainage			
- grave 16/32	cm	50	
- cœur drainant	g/m^2		500

La durée de vie est supposée similaire dans les deux cas (100 ans).

8.2. Inventaire du cycle de vie pour la couche de drainage

Les cas 3A et 3B diffèrent dans la conception de la couche de drainage. La consommation de matériel et d'énergie, qui est liée à la construction et au recyclage des autres parties du remblai (par exemple, le

drainage de gaz, l'étanchéité minérale et la couche de végétalisation) sont égaux dans les deux cas et ne sont pas considérés dans cette étude. Par conséquent, la différence entre les deux cas réside dans la quantité de matériau granulaire et de géosynthétiques utilisés dans la couche de drainage et la consommation d'énergie relative (transport matériel, excavation etc.).

L'utilisation de matériau granulaire recyclé n'est pas considérée, car généralement ce type de matériau n'est pas disponible sur site, lors de la couverture d'un centre d'enfouissement. Dans le cas 3A, trois étapes sont requises pour réaliser la couche de drainage (sous-couche filtrante, couche de granulaire drainante, couche de protection) alors que, pour le cas 3B, une étape seulement est nécessaire car la protection et la sous-couche filtrante sont collés à la couche principale de drainage. Quelques chiffres clés de la construction d'une couche de drainage pour le cas 3A et le cas 3B sont récapitulés dans le tableau 8. L'information se rapporte à un mètre carré de couche de drainage, en considérant que la conductivité hydraulique est égale dans les deux cas. La durée de vie dans les deux cas est identique (100 ans). Les valeurs concernant les émissions particulières se rapportent à des émissions des processus mécaniques.

Tableau 8. Chiffres clés se rapportant à la construction d'un mètre carré de surface de drainage pour le cas 3A et le cas 3B avec une conductivité hydraulique minimale de 1 mm/s (durée de vie = 100 ans).

	Unités	Cas 3A	Cas 3B
Grave drainante	t/m ²	0,90	-
Géosynthétique filtre	m ² /m ²	1	-
Géosynthétique de protection	m ² /m ²	1	-
Géosynthétique de drainage ¹	m ² /m ²	-	1
Diesel utilisé par les engins de construction	MJ/m ²	4,5	3,8
Transport, camion	t.km/m ²	45,1	0,2
Transport, fret, rail	t.km/m ²	0,1	0,3
Occupation des sols	m ² /m ²	1	1
Particules > 10 µm	g/m	6,3	-
Particules > 2.5 µm & < 10 µm	g/m	1,7	-

¹ Le géosynthétique de drainage est constitué d'une âme drainante, d'un filtre géotextile et d'une couche de protection, ces derniers étant collés à l'âme drainante.

8.3 Inventaire du cycle de vie du géosynthétique

Trois réponses au questionnaire relatif à la production de géosynthétique de drainage utilisés dans des sites d'enfouissement servent de sources de données. En dépit de ce faible nombre, les producteurs ayant répondu représentent une part de marché significative de ce type de géosynthétique. La qualité des données reçues est considérée comme correcte. Le niveau du détail est équilibré pour modéliser une couche géosynthétique moyenne de drainage. Le tableau 9 montre les valeurs significatives pour la production d'une couche géosynthétique de drainage moyenne.

Tableau 9. Valeurs clés choisies se rapportant à la production d'un géosynthétique de drainage de 1 kg utilisé dans les centres d'enfouissement

	Unités	Valeurs
Matières premières	kg/kg	1,03
Eau	kg/kg	44
Lubrifiant (huile)	kg/kg	8,05.10 ⁻⁵
Electricité	kWh/kg	1,00
Energie thermique	MJ/kg	0,03
Diesel pour chariots élévateurs	MJ/kg	0,08
Bâtiment	m ² /kg	8,59.10 ⁻⁶

8.4 Évaluation de l'impact du cycle de vie

Dans cette section sont évalués les impacts sur l'environnement d'une couche de drainage de 1 m² dans un centre de stockage. Le cycle de vie inclut la fourniture de matières premières aussi bien que les phases de construction et de recyclage.

Sur la Figure 11 sont représentés les impacts sur l'environnement pour la totalité du cycle de vie de la couche de drainage dans un centre de stockage de déchets. Les impacts sur l'environnement du cas

ayant les impacts sur l'environnement les plus élevés (cas 3A) sont alignés à 100 %. Tous les impacts sont divisés en centre de stockage, matières premières (matériau granulaire, couches de géosynthétique), engins de terrassements (nécessaires pour la construction), transports (des matières premières vers le chantier) et le recyclage de l'ouvrage (inclut les transports du chantier de construction à la décharge et le recyclage des matériaux géosynthétiques).

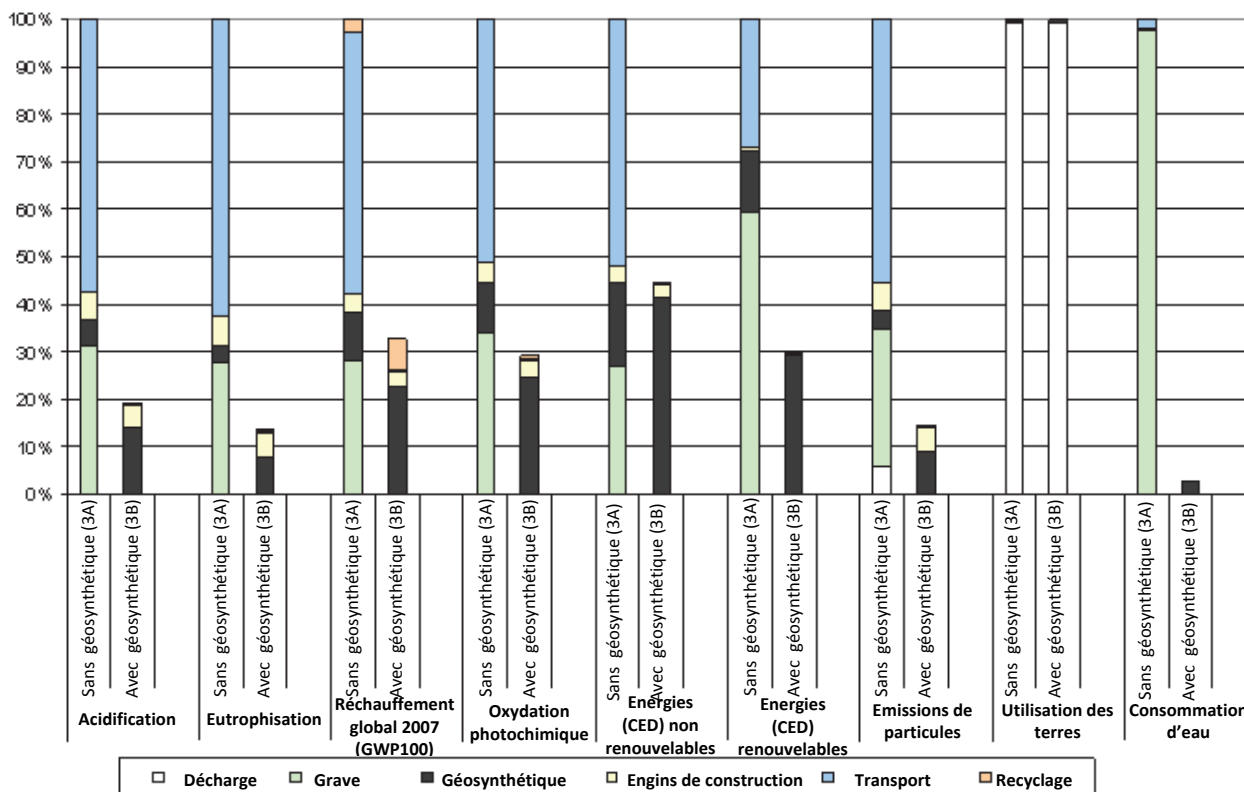


Figure 11. Impacts environnementaux d'une couche minérale de drainage de 1 m² (cas 3A) et d'un géosynthétique de drainage (cas 3B). Pour chaque indicateur, le cas ayant les impacts sur l'environnement les plus élevés est mesuré à 100 %.

Le cas 3B a un impact sur l'environnement inférieur au cas 3A pour toutes les catégories d'impact considérées. La demande d'énergie cumulée non-renouvelable pour la construction et le recyclage d'une couche de drainage d'un mètre carré serait 194 MJ-eq pour le cas 3A et 86 MJ-eq pour le cas 3B. Les émissions cumulées de gaz à effet de serre s'élèveraient à 10,9 kilogrammes de CO₂-eq pour le cas 3A et à 3,6 kilogrammes CO₂-eq pour le cas 3B. Respectivement, les émissions cumulées de gaz à effet de serre d'une couche de drainage d'un centre de stockage de 30 000m² de surface seraient de 320 t dans le cas 3A et 90 t dans le cas 3B.

La différence entre les cas 3A et 3B provient principalement de l'extraction et du transport du matériau granulaire utilisé pour le cas 3A. Pour tous les indicateurs, excepté l'utilisation des terres, les impacts sur l'environnement de la couche conventionnelle de drainage sont plus de deux fois plus élevés que ceux d'un géosynthétique de drainage.

8.5 Analyse de la contribution du géosynthétique de drainage

Dans cette section, sont évalués les impacts sur l'environnement d'un géosynthétique de drainage de 1 kilogramme. Le cycle de vie inclut la fourniture et l'utilisation des matières premières, des matériaux consommables, des vecteurs d'énergie, de l'infrastructure et des processus de recyclage. La catégorie géosynthétique sur le schéma 3 comporte les poids directs de la production géosynthétique. Ceci inclut la surface de terre occupée pour produire le géosynthétique aussi bien que les émissions du procédé de production (par exemple, NMVOC, particules et émissions de COD) mais pas les émissions liées à la production d'électricité ni à la combustion de carburant.

La figure 12 présente les impacts environnementaux de la couche de géosynthétique. Les émissions cumulées de gaz à effet de serre s'élèvent à 2,7 kilogrammes CO₂-eq par kilogramme de produit. Les impacts environnementaux sont principalement issus des matières premières et la consommation

d'électricité. Les matières premières incluent les plastiques et les produits chimiques. Les matières premières plastiques sont responsables de 0,1 % (utilisation des terres) à 85 % (CED non-renouvelable) des impacts globaux. Les impacts des produits chimiques sont négligeables.

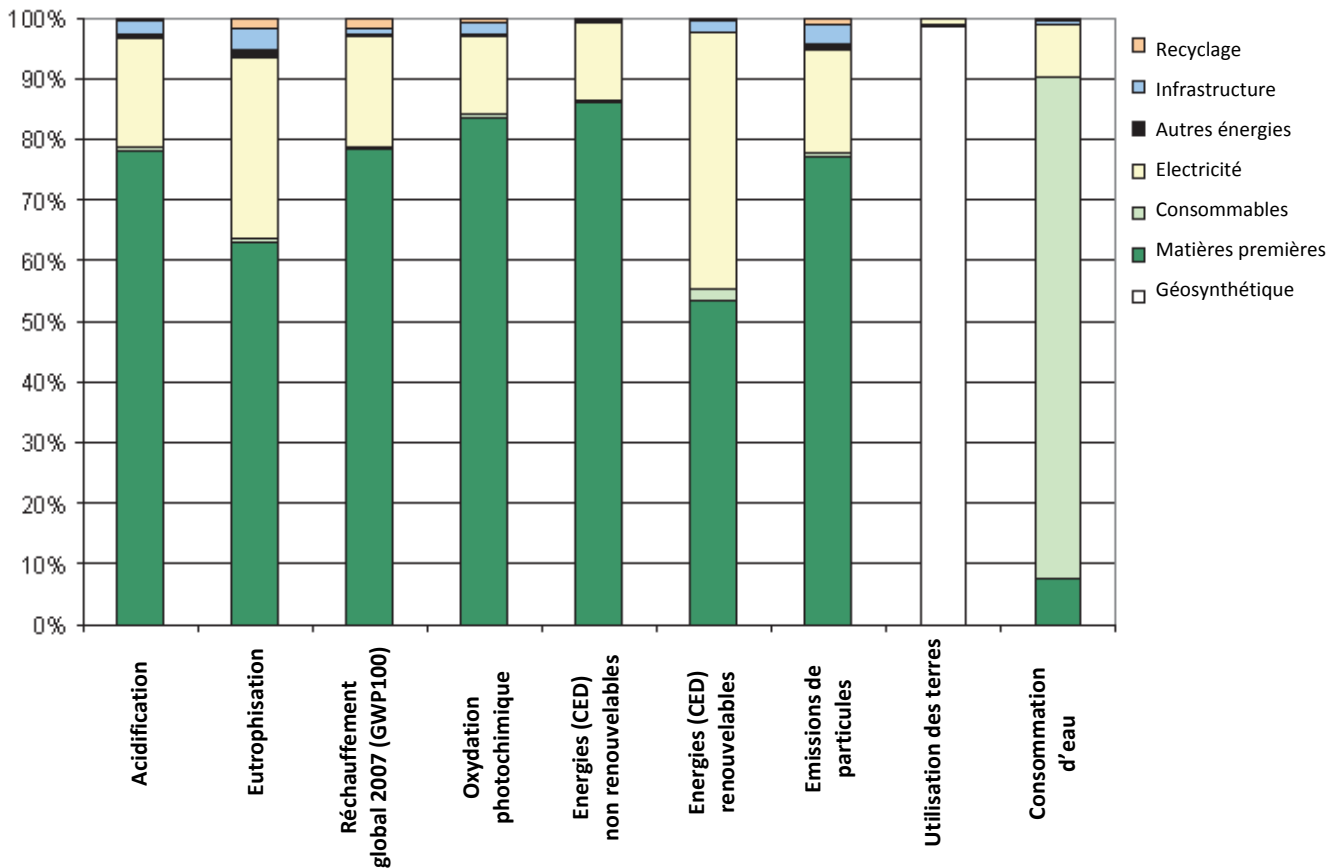


Figure 12. Impacts environnementaux du cycle de vie d'un kilogramme de géosynthétique.

Le géosynthétique inclut l'impact direct de la production du géosynthétique. Les matières premières incluent le plastique, l'extrusion si besoin et les additifs, les matériaux consommables incluent l'eau (robinet et dé-ionisée) et l'huile de graissage, les autres énergies incluent l'énergie et les carburants thermiques, l'infrastructure concerne l'usine et « recyclage » comporte le traitement des eaux résiduelles et le recyclage de différents types de déchets.

8.6. Conclusion pour le cas 3

Par rapport à une couche de drainage conventionnelle dans un site d'enfouissement, l'utilisation des géosynthétiques conduit à réduire les impacts environnementaux de la construction d'une couche de drainage pour tous les indicateurs étudiés, sauf pour l'utilisation des terres. L'impact spécifique sur la modification du climat de la construction d'une couche de drainage d'un site d'enfouissement (1 m² de surface avec une conductivité hydraulique (k-valeur) de 1 mm/s ou plus et durée de vie de 100 ans) est environ 7,8 kg éq CO₂ par m² plus faible avec l'aide de géosynthétiques par rapport à un système conventionnel. Cette différence est égale à environ 69 % de l'impact du changement climatique global des travaux de construction et du recyclage d'une couche de drainage conventionnel.

Les sites d'enfouissement construits en Europe peuvent différer en profil transversal et en matériaux utilisés selon les déchets mis en décharge. Ainsi, des hypothèses générales sont nécessaires pour modéliser une couche de drainage typique. Les données sur l'extraction des matériaux granulaires et l'utilisation de machines de construction sont issues des bases de données génériques et de la connaissance d'experts individuels en génie civil.

D'après les analyses d'incertitude, on peut sans risque affirmer que la solution de drainage avec géosynthétiques montre des impacts environnementaux moindres que ceux du drainage avec couche granulaire. Malgré les simplifications nécessaires et les hypothèses, les résultats de la comparaison sont considérés comme significatifs et fiables.

9. Cas 4 – Mur de soutènement

9.1. Introduction

Il peut être nécessaire dans certains cas, en particulier dans la construction d'infrastructures de transport, de réaliser des talus raidis ou des murs. Pour de tels murs, des structures de soutènement sont nécessaires. Les murs de soutènement doivent reprendre des efforts de traction et de cisaillement. Les murs de soutènement en béton (cas 4A) sont comparés aux talus en sol renforcé par géosynthétiques (cas 4B).

Sur la figure 13, le mur de soutènement considéré est long de 50 mètres et haut de 3 mètres, avec une pente de 5V:1H. En fait, la longueur du mur n'a aucune influence sur l'ACV car l'unité fonctionnelle se réfère à une coupe standard de 1 mètre.

Pour représenter la performance d'un géosynthétique, la moyenne des trois types de géogrilles différentes est utilisée, c'est-à-dire :

- géogrilles extrudées étirées,
- géogrilles soudées
- géogrilles tissées ou tricotées.

Des granulés de polyéthylène et PET sont utilisés comme matériau de base dans le cas 4. Pour celui-ci, une résistance à long terme de 14 kN/m doit être atteinte. Calculé en appliquant les facteurs de réduction, le poids moyen du géosynthétique est défini par rapport à la matière première utilisée :

- Polyéthylène (100kN/m) : géosynthétique de 750 g/m²
- PET (35kN/m) : géosynthétique de 280 g/m²

Le béton utilisé dans le cas 4A est classé dans la classe de résistance B300.

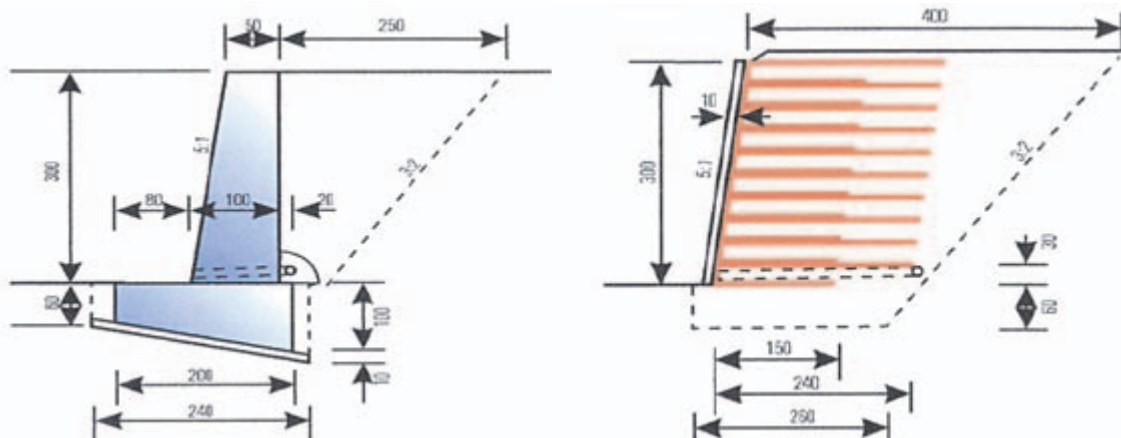


Figure 13. Schémas de murs de soutènement : mur en béton armé (cas 4A, à gauche) par rapport au mur en sol renforcé par géosynthétiques (cas 4B, à droite)

Le tableau 10 montre des valeurs spécifiques des murs de soutènement pour les deux variantes. Le matériau sur le site est utilisé comme matériau de remblai, remblais dans le mur et en matériau de recouvrement dans le cas 4B. Une couche de drainage en gravier d'une épaisseur d'au moins 30 cm derrière la paroi de béton est nécessaire. Pour être cohérent avec le cas 4A, une couche de grave de 80 cm est supposée dans les deux cas. Une grave roulée est utilisée pour le drainage.

Tableau 10. Spécification du mur béton armé (cas 4A) et en sol renforcé par géosynthétiques (cas 4B).

Description	Unité	Cas 4A	Cas 4B	Matériau
Longueur du mur	M	50	50	
Hauteur du mur	M	3	3	
Excavation pour la fondation	m ³	109		
Compactage de la base	m ²	121	262	Matériau du site
Éléments de coffrage	m ²	83		Panneau stratifié
Couche de propreté	m ²	120		Béton maigre
Béton de propreté	m ³	80		Béton, semelle
Élément de renforcement	Kg	2400		Acier d'armature
Coffrage face du mur	m ²	153		Panneau stratifié
Coffrage du mur (brut)	m ²	150		Panneau stratifié
Mur béton	m ³	105		Béton structurel,
Mur renforcé	Kg	5250		Acier d'armature
Joints	m ²	21		Plaques de polystyrène
Couche isolante	m ²	154		Bitume
Drainage	M	62	72	Polyéthylène PEHD
Filtre granulaire	m ³	10	11	Grave
Remblai non gélif	m ³	219		Grave et matériau du site
Compactage du remblai	m ²	500		Grave et matériau du site
Excavation fondation	m ³		79	Matériau du site
Matériau de la fondation	m ³		79	Matériau du site
Coffrage, support	m ²		153	Panneau stratifié
Géosynthétique fourniture et pose	m ²		1960	Géosynthétique
Remblai du mur	m ³		480	Matériau du site
Compactage des couches	m ²		1550	Grave et matériau du site
Béton projeté du parement	m ²		155	Béton structurel,
Matériau de couverture	m ³		45	Matériau du site

Une durée de vie de 100 ans est exigée dans les deux cas. Ceci est cohérent avec le guide EBGeo (Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, 2010) et la norme britannique "Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills » (British Standard Institute, 1995).

9.2 Inventaire du cycle de vie des éléments d'infrastructure

Quelques chiffres-clés importants de la construction d'un mur en béton armé (cas 4A) et un sol renforcé par géosynthétiques soutenant la structure (cas 4B) sont résumés dans l'onglet 2. Les données portent sur un mètre de structure de soutènement et une durée de vie de 100 ans. Le diesel est utilisé dans les engins de terrassements pour la réalisation de la fondation et le compactage du sol. Les émissions de COVNM montrées sont libérées par le bitume utilisé pour étanchéifier le mur de béton (cas 4A). L'utilisation de matériau granulaire recyclé n'est pas considérée, car généralement le matériau recyclé possédant les propriétés spécifiques nécessaires n'est pas disponible sur le site lors de la construction d'un soutènement.

Tableau 11. Chiffres-clés se référant à la construction d'un mur en béton armé (4 cas 4A) et un sol renforcé par géosynthétiques (cas 4B) (durée de vie = 100 ans)

	Unité	Cas 4A	Cas 4B
Béton, semelle et fondation	m ³ /m	1,60	-
Béton maigre	m ³ /m	0,24	-
Béton structural	m ³ /m	2,10	0,31
Acier des armatures	kg/m	153	-
Grave	t/m	4,3	4,3
Bitume	kg/m	2,84	-
Panneau 3 couches laminées	m ³ /m	0,01	-
Géosynthétique	m ² /m	-	39,2
Plaque de polystyrène	kg/m	0,25	-
Polyéthylène	kg/m	1,74	2,02
Gazole pour engins de construction	MJ/m	11,6	53,9
Transport, camions	tkm/m	701	265
Transport, fret, rail	tkm/m	33,2	6,9
Utilisation des sols	m ² /m	1,0	0,6
NMVOC	g/m	20	-

9.3 Inventaire du cycle de vie du géosynthétique

Un total de six questionnaires concernant la production de géogrilles utilisées pour les soutènements constitue les données de base. La qualité des données reçues est considéré comme précise. Le niveau de détail est équilibré avant la modélisation d'une géogrille moyenne. Le tableau 12 résume les principaux chiffres clés pour la production d'une géogrille moyenne.

Tableau 12. Chiffres-clés se référant à la production de 1 kg géogrille utilisé en mur de soutènement.

	Unité	Valeur
Matières premières	kg/kg	1,02
Eau	kg/kg	0,86
Lubrifiant (huile)	kg/kg	7,30.10 ⁻⁵
Électricité	kWh/kg	0,73
Énergie thermique	MJ/kg	1,24
Gazole pour chariots élévateurs	MJ/kg	0.13
Bâtiment	m ² /kg	6,32.10 ⁻⁶

9.4 Évaluation de l'impact du cycle de vie pour un mur de soutènement

Dans cette section, les impacts environnementaux d'un soutènement de 1 m avec une hauteur de 3 m au cours du cycle de vie complet sont évalués. Le cycle de vie comprend la fourniture de matières premières, mais aussi les phases de construction et de recyclage.

La figure 14 présente les impacts environnementaux sur le cycle de vie complet d'un soutènement. Les impacts du cas ayant les impacts environnementaux les plus élevés (cas 4A) sont mis à l'échelle de 100%. Pour chaque impact sont données les contributions du soutènement, des matières premières (béton, gravier, couches de géosynthétiques, acier d'armature, bitume, planche de bois), des matériels pour la construction (prescriptions de la construction), des transports (des matières premières au chantier de construction) et du recyclage du mur (comprenant les transports du chantier vers le lieu de stockage et les impacts de l'élimination des différents matériaux).

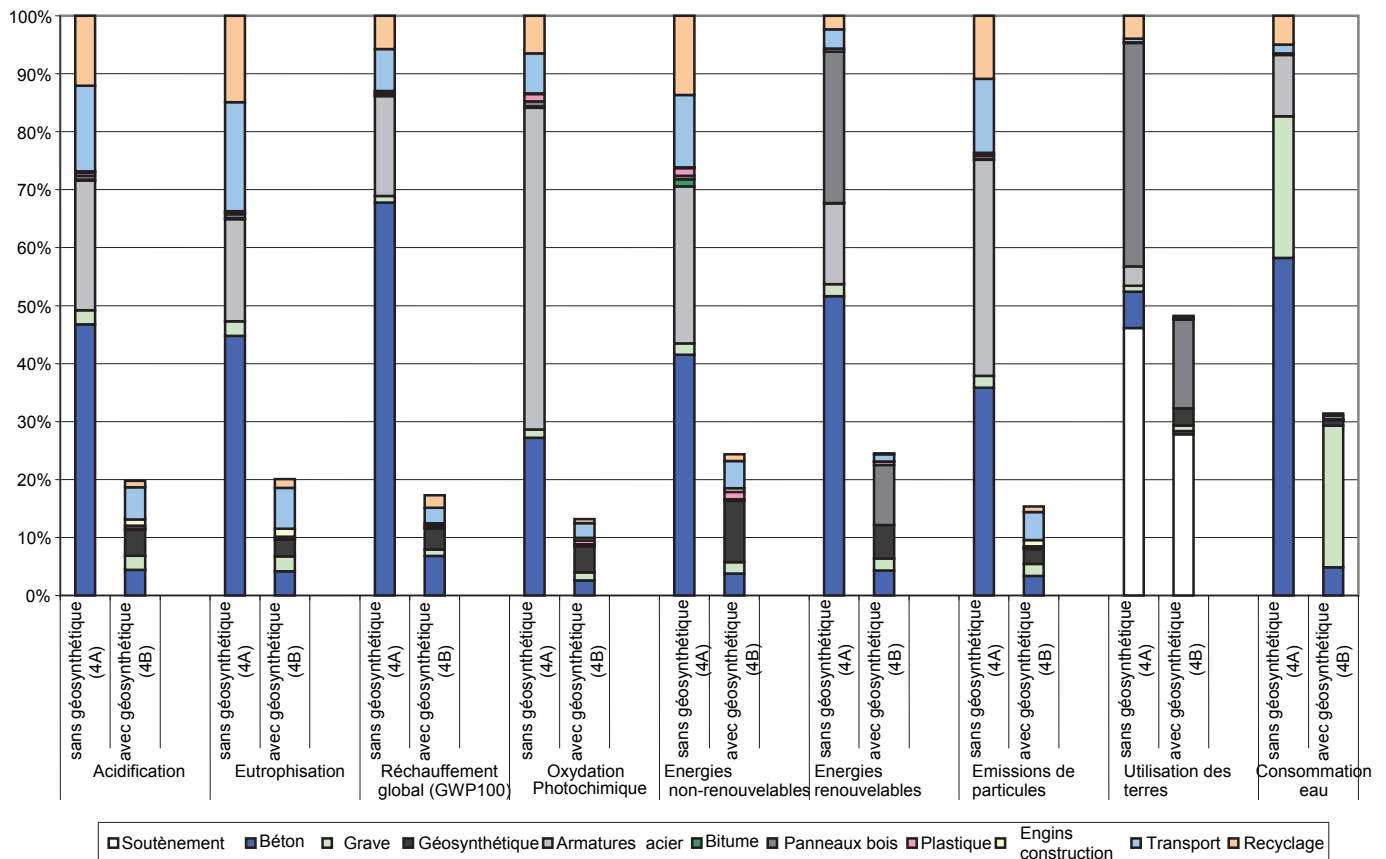


Figure 14 .Impacts environnementaux du cycle de vie d'un soutènement de 1 m, cas 4A et 4B. Pour chaque indicateur, le cas des impacts environnementaux plus élevés est égal à 100 ° %.

Le cas 4B provoque de plus faibles impacts environnementaux par rapport aux cas 4A pour toutes les catégories d'impacts étudiées. La demande cumulée en énergie non renouvelable de la construction et du recyclage d'un soutènement de 1 mètre de large avec une hauteur de 3 mètres est 12700 MJ-eq pour le cas 4A et 3100 MJ-eq pour le cas 4B. Les émissions de gaz à effet de serre cumulées s'élèvent à 1,3 t eq CO₂ dans le cas 4A et 0,2 t eq CO₂ dans le cas 4B. En conséquence, les émissions cumulées de gaz à effet de serre pour un soutènement de 300 m sont respectivement de 400 t dans le cas 4A et 70 t dans le cas 4B.

Les éléments les plus importants vis à vis des impacts environnementaux du cycle de vie du mur de soutènement en béton armé (cas 4A) sont le béton, les armatures en acier, le transport et le recyclage. Cet ordre de pertinence change selon les indicateurs de catégorie d'impact. La part élevée du béton dans l'indicateur de réchauffement global peut s'expliquer par le processus de production de clinker. Au cours de son processus de calcination géogéniques du CO₂ est produit. L'acier des armatures se compose de 63 % d'acier primaire et 37 % d'acier recyclé.

La plupart des impacts environnementaux de l'acier des armatures découle de la consommation de carburant et des émissions lors de la fabrication de frittage et de la fonte brute dans la chaîne d'approvisionnement de l'acier primaire. Le recyclage comprend le recyclage, mais aussi les transports du chantier à la décharge dans le cas où le matériel n'est pas recyclé. Les impacts du recyclage sont dominés par la grande quantité de béton qui est mis en décharge. Alors que les émissions directes de la mise en décharge de béton sont négligeables, la construction du centre de stockage et le transport du béton au site d'enfouissement sont importants.

Le béton, les géosynthétiques et surtout les transports ont les impacts plus élevées du cycle de vie d'un soutènement renforcé par géosynthétiques (cas 4B). La part de la géogrille vis-à-vis de l'impact global est relativement élevée, plusieurs nappes et donc une grande quantité de géogrilles sont nécessaires. En revanche, la plupart des matériaux utilisés dans la construction d'un soutènement sont disponibles sur le site et ainsi ne provoquent pas d'effets environnementaux importants. Le recyclage a le plus d'impact dans les catégories eutrophisation et réchauffement climatique. Les effets sur le réchauffement global proviennent de la combustion des géogrilles dans les installations d'incinération de déchets, ce qui conduit à des émissions de CO₂ fossiles. Les matériaux granulaires dominent l'indicateur

sur la consommation d'eau et la surface occupée par le soutènement pendant son utilisation est prépondérante dans l'utilisation des terres.

La différence en termes d'impact entre les cas 4A et 4B provient de la plus grande quantité de béton utilisée dans le cas 4A ainsi que de l'utilisation de l'acier, ce qui conduit par ailleurs à la hausse des dépenses liées au transport. Par rapport à la demande en énergie cumulée renouvelable et l'utilisation des terrains, les planches de bois augmentent la différence pour les impacts totaux car le bois est une ressource renouvelable avec une forte utilisation directe des terrains. L'utilisation directe des terrains est plus faible pour le cas 4B car le béton projeté dans le cas 4B est plus mince que pour le mur de béton, dans le cas 4A et la zone de remblai et le remblai lui-même ne sont pas considérés dans le bilan pour l'utilisation des terres.

La part des matériaux géosynthétiques dans les impacts environnementaux est comprise entre 3 % et 44 % (respectivement consommation d'eau et CED non-renouvelables).

9.5 Analyse de la contribution de la géogrille

Dans cette section, les impacts environnementaux de 1 kg de géogrille sont évalués. Le cycle de vie comprend la fourniture et l'utilisation de matières premières, matériaux consommables, vecteurs d'énergie, infrastructure et processus de recyclage. La catégorie géosynthétiques dans la figure 15 comprend les impacts directs de la production de géosynthétiques. Il s'agit de l'utilisation des terres pour produire le géosynthétique ainsi que les émissions du processus de production (par exemple les COVM, les particules et les émissions COD), mais pas les émissions provenant de la combustion d'électricité et de carburant qui sont affichées séparément.

Les impacts environnementaux de la géogrille sont indiqués sur la figure 15. Les émissions cumulées de gaz à effet de serre s'élèvent à 3,4 kg CO₂-eq / kg.

Les impacts sur l'environnement sont surtout dominés par la fourniture de matières premières et la consommation d'électricité. Les matières premières comprennent les différents types de plastiques. La combinaison des sources d'électricité de chaque pays est modélisée pour chaque société, et ainsi les effets de la consommation d'électricité dépendent non seulement de la quantité d'électricité nécessaire, mais aussi de la combinaison des sources.

La part plus élevée de l'électricité dans la demande en énergie cumulée renouvelable peut s'expliquer par l'utilisation de centrales hydroélectriques dans plusieurs combinaisons d'approvisionnement électrique. Et la part relativement élevée dans l'eutrophisation résulte principalement de l'électricité à partir de lignite.

La part de la consommation d'énergie destinée au chauffage et de carburant pour les chariots élévateurs se situe entre 0,01 % (utilisation des terres) et 2,8 % (réchauffement climatique). Elle n'est pas considérée d'une importance primordiale.

En ce qui concerne l'occupation des terres, la production de géosynthétiques joue un rôle important. Les impacts sont dominés par l'utilisation directe des terres par l'usine du fabricant. Les utilisations indirectes, c'est-à-dire l'utilisation des sols découlant des processus en amont, sont significativement plus faibles, car aucune utilisation de terres n'est indiquée dans les inventaires pour les matières premières plastiques et aucun produit ayant une utilisation intensive des terres, comme par exemple le bois, n'est employé dans des quantités importantes.

La consommation d'eau est incluse dans matériaux consommables. Par conséquent, cette catégorie représente environ 5 % de la quantité totale d'eau utilisée.

La proportion de l'électricité dans les impacts environnementaux de la géogrille utilisée dans le cas 4B est plus petite que celle utilisée dans les autres cas. Ceci est dû au fait qu'il faut moins d'électricité et parce que des matières premières différentes sont utilisées dans les autres cas. Le polypropylène (PP) est la matière de base dans la plupart des autres cas, tandis que le PET et le PE sont principalement utilisés dans le cas 4B. Selon les données pour l'inventaire du cycle de vie fournies par PlasticEurope et utilisées dans cette étude, la fourniture de 1 kg de granulés de PET et PE ont des impacts sur l'environnement plus élevés que celle de 1 kg de granulés PP.

Le cas 4B avec géogrille provoque l'émission de gaz à effet de serre par kilogramme dans une quantité comparable à celle des géosynthétiques pour le cas 1 et 2.

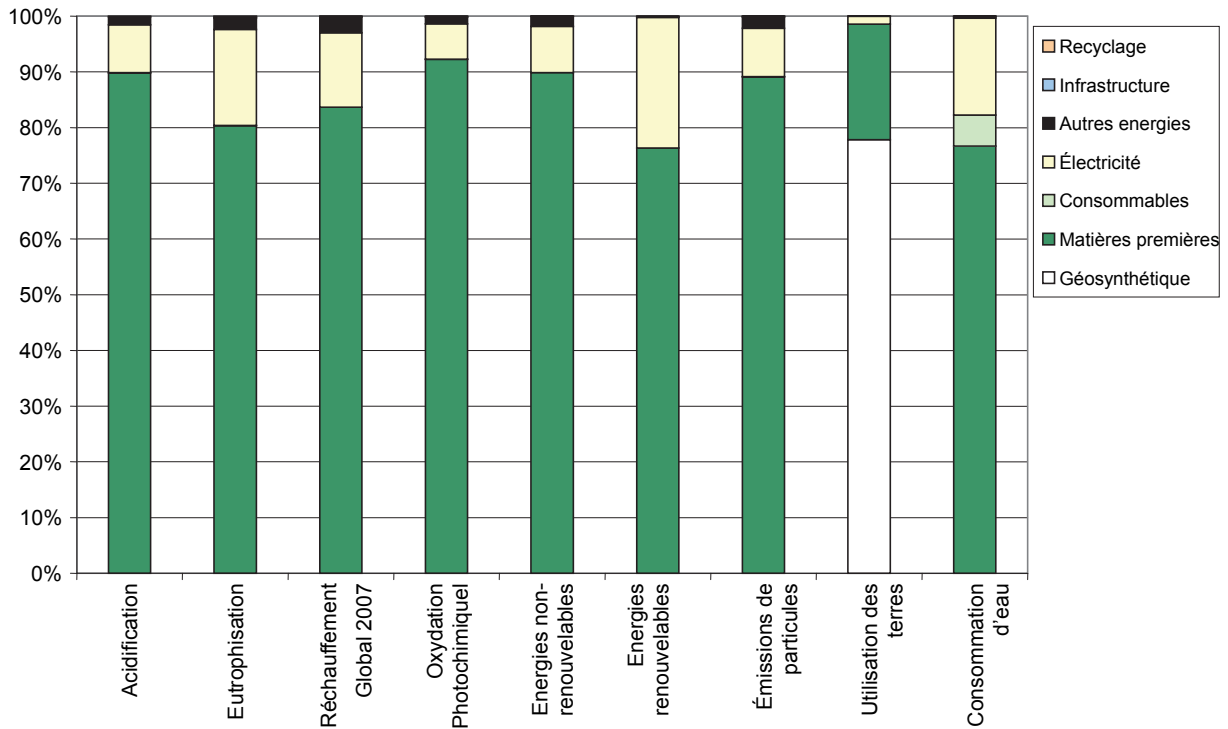


Figure 15: Impacts environnementaux du cycle de vie de 1 kilogramme de géogrille.

« Géosynthétique » inclut des charges directes liées à leur production. « Matières premières » inclut le plastique, l'extrusion si besoin et les additifs. « Matériaux consommables » inclut l'eau (robinet et déionisée) et l'huile lubrifiante. « Autres énergies » inclut l'énergie et les carburants thermiques. « Infrastructure » concerne l'usine et « Recyclage » comporte le traitement des eaux résiduelles et le recyclage des différents types de déchets.

9.6 Conclusion pour le cas 4

L'utilisation de géosynthétiques conduit à une réduction des impacts environnementaux d'un mur de soutènement pour tous les indicateurs étudiés. L'impact spécifique sur le changement climatique de la construction d'un soutènement (mur de 3 m de hauteur pour 1 m de largeur) avec géosynthétiques est plus faible d'environ 1 tonne CO₂-eq par mètre par rapport à une solution conventionnelle. Cette différence est égale à environ 84% de l'impact sur le changement climatique des travaux de construction et de recyclage d'un système conventionnel de mur de soutènement pour une durée de vie de 100 ans.

Le renforcement de talus implique des solutions spécifiques adaptées à chaque situation particulière. La hauteur des murs de soutènement et les charges horizontales peuvent différer, ce qui peut mener à des différences dans l'épaisseur et la structure de renforcement. C'est pourquoi des hypothèses étaient nécessaires pour modéliser un mur de soutènement typique. Les informations sur les matériaux du site employés, sur l'extraction de matériau granulaire, sur le béton et l'utilisation des engins de construction sont basées sur des données génériques et sur la connaissance de différents experts en génie civil.

En se basant sur l'analyse d'incertitude, on peut sans risque affirmer qu'un soutènement renforcé par géosynthétiques présente des impacts sur l'environnement inférieurs à ceux d'un mur en béton. En dépit des simplifications et des hypothèses nécessaires, les résultats de la comparaison sont considérés comme significatifs et fiables.

10. Conclusion

Les géosynthétiques sont utilisés dans de nombreuses applications de génie civil parmi lesquelles la construction de couche filtrante, la stabilisation de plateformes routières, les centres d'enfouissement de déchets et les murs de soutènement. Dans la plupart des cas, ils remplacent des matériaux minéraux tels que le gravier, le ciment, la chaux ou le béton.

Cette étude a permis de comparer les impacts environnementaux du cycle de vie de constructions équivalentes avec et sans géosynthétiques. Elle a démontré que l'utilisation de géosynthétiques peut

permettre de réduire significativement l'impact sur le changement climatique global dans tous les cas étudiés. En outre, l'utilisation des géosynthétiques conduit à une réduction des impacts environnementaux tels que l'acidification, l'eutrophisation et les demandes cumulées en énergie, par rapport à des constructions conventionnelles.

La principale contribution à l'impact environnemental des géosynthétiques provient des matières premières utilisées et de la consommation énergétique. Cependant, la proportion de cette contribution dans les catégories d'impacts environnementaux de chacun des quatre cas est faible, à l'exception du cas 4, dans lequel elle peut avoir plus d'importance pour certains indicateurs.

La variation entre les différents types de fabricants n'affecte pas les résultats généraux, ce qui rend les résultats applicables à tout type de produits.

Les analyses du cycle de vie pour les quatre cas représentent des constructions typiques de nouveaux ouvrages. Les données sur les matériaux, les machines et les modes de transport sont basées sur des données génériques et la connaissance des experts en génie civil. Malgré les simplifications et les hypothèses nécessaires à ce genre d'exercices, les résultats sont considérés comme représentatifs et fiables. Néanmoins, les méthodes de dimensionnement et de construction peuvent varier d'un pays à l'autre de l'Union Européenne. Les quatre cas doivent donc être considérés comme des exemples d'applications courantes dans lesquelles les géosynthétiques sont utilisés.

Les résultats des analyses du cycle de vie ne permettent pas de prédire si, en général, les géosynthétiques sont l'option la plus favorable du point de vue environnemental, car les différentes alternatives disponibles et les différents types de construction et de conception doivent être pris en compte dans la comparaison.

Il est conseillé d'établir des modèles basés sur des paramètres clés dans chacun des quatre cas, afin d'évaluer différents types de constructions alternatives. C'est particulièrement important pour le cas 4 dans lequel les situations réelles peuvent exiger des solutions techniques complexes. Dans de tels modèles, les facteurs importants tels que la quantité de gravier, de ciment, de béton ou de géosynthétique nécessaires pourraient constituer des données d'entrée pour calculer les impacts environnementaux des alternatives concernées.

11. Références bibliographiques

- Elsing A., Fraser I. (2012). Comparative life cycle assessment of geosynthetics versus conventional construction materials, a study on behalf of the E.A.G.M., Case 2, Foundation Stabilization, EUROGEO 5, Valencia, Spain.
- Fraser I., Elsing A. (2012) Comparative life cycle assessment of geosynthetics versus conventional construction materials, a study on behalf of the E.A.G.M., Case 4, Soil Retaining Wall, EUROGEO 5, Valencia, Spain.
- Laidié N., Shercliff D. (2012). Comparative life cycle assessment of geosynthetics versus conventional construction materials, a study on behalf of the E.A.G.M., Case 1, Filter Function, EUROGEO 5, Valencia, Spain.
- Stucki M., Büsser S., Itten R., Frischknecht R., Wallbaum H. (2011). Comparative life cycle assessment of geosynthetics versus conventional construction material. ESU-services Ltd. commissioned by European Association for Geosynthetic Manufacturers (EAGM), Uster and Zürich, Switzerland.
- Wallbaum H., Stucki M., Büsser S., Itten R., Frischknecht R. (2012). Comparative life cycle assessment of retaining walls in traffic infrastructure, 12th Baltic Sea Geotechnical Conference, Rostock, Germany.
- Werth K., Höhny S. (2012). Comparative life cycle assessment of geosynthetics versus conventional construction materials, a study on behalf of the E.A.G.M., Case 3, Landfill Construction Drainage Layer, EUROGEO 5, Valencia, Spain.