

ANALYSE DU CYCLE DE VIE D'UNE SOLUTION GEOSYNTHETIQUE EN INFRASTRUCTURE GEOTECHNIQUE DE TRAMWAY

METERFI Yasmine¹, TROUZINE Habib^{1,2,3}, YALAOUI Nadia¹

¹Civil Engineering and Environmental Laboratory, Sidi Bel Abbes University

²EOLE, Civil Engineering Department, Tlemcen University

³ASAG_Algerian Geosynthetics Scientific Association

RESUME :

Les infrastructures de transport jouent un rôle clé dans la mobilité urbaine durable en limitant la congestion et les émissions polluantes. L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) permet d'évaluer et d'optimiser leur impact environnemental, notamment grâce aux géosynthétiques, qui renforcent la stabilité et la durabilité des ouvrages. Malgré leur efficacité, des défis subsistent en termes de coûts et d'adaptabilité aux sols. En intégrant l'ACV dans les choix d'ingénierie, il est possible de concevoir des infrastructures plus durables et économiquement optimisées. Dans ce travail, nous analysons l'apport des géosynthétiques dans les infrastructures de tramway en nous appuyant sur l'ACV pour évaluer leurs performances et avantages écologiques.

MOTS CLES : Géosynthétiques, Infrastructure de tramway, ACV, Durabilité, Impact environnemental, Innovation technologique.

1. INTRODUCTION

Les géosynthétiques sont des matériaux polymères utilisés dans les projets de génie civil pour améliorer les propriétés mécaniques, hydrauliques ou chimiques du sol. Ils se présentent sous différentes formes, telles que les géotextiles, géogrilles, géomembranes ou géocomposites, chacun ayant des fonctions spécifiques selon le contexte d'utilisation.

Les géosynthétiques, largement utilisés en génie civil, remplacent ou optimisent l'utilisation de matériaux traditionnels pour améliorer les performances des ouvrages géotechniques. Ils renforcent la capacité portante des sols, assurent un drainage efficace, empêchent le mélange des couches, limitent l'érosion, et protègent contre les infiltrations. En stabilisant les sols et en améliorant leur durabilité, ils contribuent à la pérennité des infrastructures, tout en réduisant les coûts d'entretien et l'impact environnemental[1].

Grâce à ces avantages, leur usage s'est considérablement répandu dans le monde de l'ingénierie. Les géosynthétiques remplissent plusieurs fonctions techniques, telles que la séparation, le renforcement, le filtrage, le drainage et l'étanchéité.

Ils trouvent des applications variées dans plusieurs domaines :

- Hydraulique (digues, bassins, canaux),
- Décharges et sites de confinement (étanchéité, protection de l'environnement),
- Génie civil (tunnels, fondations),
- Et particulièrement en géotechnique routière.

Dans ce dernier domaine, les géosynthétiques, notamment les géotextiles non-tissés, sont utilisés pour améliorer la stabilité et la durabilité des plateformes routières ou ferroviaires. Ils permettent de renforcer les remblais, réduire les tassements, faciliter le drainage et séparer les couches de

matériaux pour éviter la contamination. Ces fonctions sont particulièrement importantes dans des contextes géologiques complexes, comme les zones marécageuses, où les contraintes mécaniques et hydriques peuvent compromettre la performance de l'ouvrage.

Parmi les technologies et techniques de transport, les processus d'optimisation jouent un rôle clé dans la construction de villes plus intelligentes et durables. Ils permettent d'améliorer l'efficacité, l'équité et la qualité de vie en optimisant la structure urbaine. La recherche opérationnelle, domaine auquel appartiennent ces techniques d'optimisation, a fortement bénéficié des avancées technologiques[2]. Dans ce contexte, les infrastructures de tramway constituent une solution durable et efficace pour la mobilité urbaine en réduisant la congestion et les émissions polluantes. Elles améliorent la qualité de vie, favorisent l'aménagement des espaces publics et renforcent la connectivité des quartiers. Leur impact environnemental peut être optimisé grâce aux géosynthétiques et à l'Analyse du Cycle de Vie (ACV), permettant de minimiser leur empreinte écologique.

Le tramway est un pilier de la mobilité urbaine durable, offrant une alternative écologique et efficace aux transports routiers. Il réduit la congestion, les émissions polluantes et améliore l'accessibilité en ville. Son intégration urbaine favorise des espaces publics de qualité. L'optimisation de son impact environnemental passe par des matériaux innovants et une approche en cycle de vie).

La construction des infrastructures de tramway, en surface ou en souterrain, doit tenir compte des conditions géologiques et géotechniques sur l'ensemble du tracé. Une analyse approfondie du terrain est essentielle pour évaluer la compatibilité des sols et du roc avec le projet, anticiper les risques potentiels (tassements, instabilité des talus, faible capacité portante) et identifier des solutions adaptées pour garantir la stabilité et la durabilité des infrastructures[3].

L'évaluation des impacts environnementaux à chaque phase d'un projet est essentielle pour un génie civil plus durable. La reconnaissance géotechnique, bien que peu impactante en elle-même, joue un rôle clé dans l'optimisation de la planification et la réduction des effets environnementaux indésirables. Son intégration précoce favorise une gestion plus responsable des ressources et l'adoption de pratiques d'ingénierie durables[4].

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) est un outil essentiel pour évaluer les impacts environnementaux des infrastructures à chaque étape de leur existence. En offrant une vision globale, de la conception à la fin de vie des ouvrages, elle permet d'optimiser la planification, de limiter les externalités négatives et d'orienter les choix vers des solutions plus durables. En intégrant l'ACV dans les décisions d'ingénierie, il est possible de concevoir des infrastructures plus durables et économiquement optimisées[5].

Les géosynthétiques représentent une alternative innovante et durable aux solutions géotechniques traditionnelles. Leur légèreté et leur facilité de mise en œuvre permettent de réduire les coûts et les délais de construction tout en améliorant la stabilité des sols, le drainage et la résistance aux tassements. En limitant l'extraction de matériaux naturels comme le béton, le ciment ou le gravier, ils contribuent à une réduction significative de l'empreinte environnementale des projets de génie civil.

Des études d'Analyse du Cycle de Vie (ACV) ont comparé leur impact environnemental à celui des matériaux conventionnels dans diverses applications, notamment la filtration, la stabilisation des fondations, la construction de décharges et le renforcement des pentes. Ces analyses démontrent que les géosynthétiques optimisent l'utilisation des ressources et réduisent les impacts négatifs sur l'environnement. Leur adoption s'inscrit ainsi dans une démarche écoresponsable, favorisant des infrastructures plus durables, performantes et adaptées aux défis actuels du génie civil [6].

Dans ce travail, nous appliquons l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) pour évaluer l'impact environnemental d'une solution géosynthétique utilisée dans une infrastructure géotechnique de tramway. L'étude suit plusieurs étapes essentielles : la définition des objectifs et du périmètre, Évaluation des ressources de matériaux et d'énergie, l'évaluation des impacts environnementaux, puis l'interprétation des résultats. Cette démarche vise à comparer les performances environnementales des géosynthétiques par rapport aux matériaux traditionnels et à optimiser les choix d'ingénierie pour une infrastructure plus durable et efficiente.

1.1. Présentation des géosynthétiques et leur application en infrastructure de tramway

1.1.1 Définition et classification des géosynthétiques

Les géosynthétiques sont couramment employés en génie civil et infrastructure, offrant une alternative efficace aux matériaux conventionnels dans de nombreuses applications[1].

Les géosynthétiques sont des matériaux polymériques utilisés dans les ouvrages de génie civil et géotechnique pour améliorer les performances des sols et optimiser la durabilité des infrastructures. Leur utilisation permet de renforcer, drainer, filtrer, séparer ou imperméabiliser les sols selon les besoins des projets.



Figure 1. *Géosynthétiques dans la route ferroviaire*

Utilisés de manière appropriée, les géosynthétiques peuvent renforcer les performances des infrastructures ferroviaires, en prolongeant leur durée de vie et en espaçant les interventions de maintenance



Figure 2 *Renforcement des voies ferrées par l'association de géocellules, de géogrilles et de géotextiles non tissés [7]*

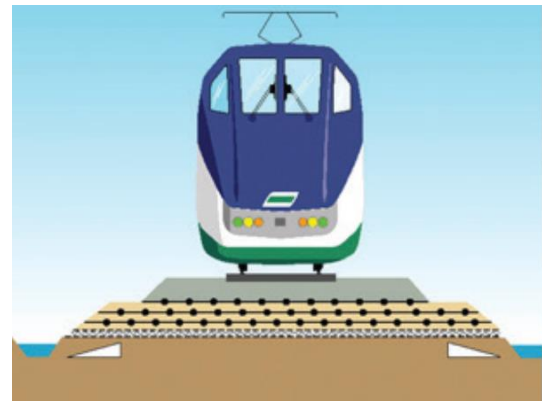
Construits souvent sur des sols meubles, les chemins de fer subissent des charges rapides, répétées et cycliques dues au passage des trains.

Ces charges, transmises des rails au sol de fondation, provoquent des tassements absolus et différentiels pouvant rapidement altérer la qualité de la voie.

L'utilisation de géosynthétiques permet de stabiliser l'assise ferroviaire, de limiter les tassements et d'allonger la durée de vie de l'infrastructure [7].



Sans géosynthétiques.



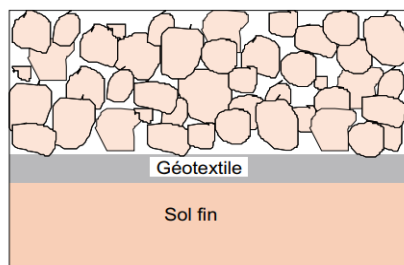
Avec géosynthétiques

Figure 3. Voie ferrée construite sur sol meuble sans géosynthétiques et renforcée par des géosynthétiques [7]

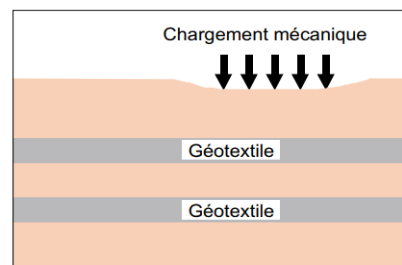
Classification des géosynthétiques :

Les géosynthétiques regroupent plusieurs types de matériaux aux fonctions spécifiques :

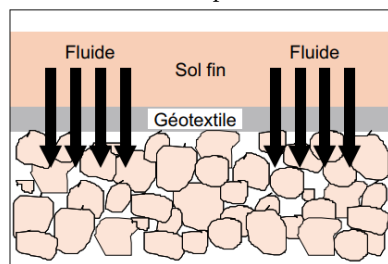
Géotextiles : Permettent la filtration, la séparation et le renforcement des sols.



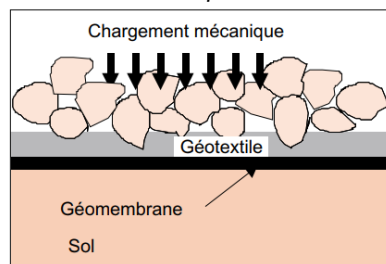
Fonction séparation



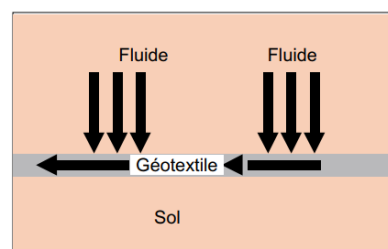
Fonction renforcement



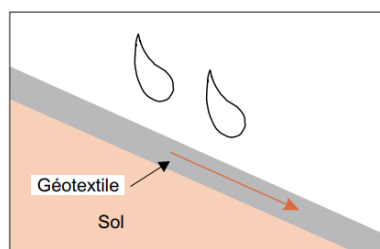
Fonction filtration



Fonction protection



Fonction drainage



Fonction anti-érosion

Figure 4. Fonctions des géosynthétiques selon la norme internationale [8]

Géogrilles : Utilisées pour renforcer et stabiliser les fondations et les talus.

Géomembranes : Assurent l'étanchéité, notamment dans les ouvrages hydrauliques et les décharges.

Géocomposites : Combinent plusieurs fonctions en associant différents types de géosynthétiques.

Géonattes et géocellules : Favorisent le drainage et la stabilisation des sols érosifs.

L'intégration des géosynthétiques dans les infrastructures géotechniques, comme les plateformes de tramway, contribue à une construction plus durable en réduisant l'empreinte environnementale et les coûts de maintenance.

1.1.2 Utilisation des géosynthétiques en infrastructures de tramway

Les géosynthétiques jouent un rôle essentiel dans la construction et l'optimisation des plateformes de tramway en améliorant la stabilité, la durabilité et la performance des infrastructures. Leur utilisation permet notamment de :

Renforcer les sols : Les géogrilles et géotextiles stabilisent les sols de faible capacité portante, réduisant ainsi les tassements et les risques de déformation de la plateforme.

Optimiser le drainage : Les géocomposites drainants facilitent l'évacuation des eaux, limitant les problèmes liés à l'humidité et augmentant la longévité de la structure.

Assurer la séparation des couches : Les géotextiles empêchent le mélange des matériaux, maintenant ainsi l'efficacité des couches de fondation et de ballast.

Réduire l'impact environnemental : En limitant l'utilisation de matériaux naturels comme le gravier ou le sable, les géosynthétiques contribuent à une conception plus durable et économique des infrastructures.

2. METHODOLOGIE DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV)

2.1. Définition et principes de l'ACV

Selon les normes ISO 14040 et ISO 14044, l'analyse du cycle de vie (ACV) est une méthode rigoureuse et standardisée qui permet d'évaluer les impacts environnementaux d'un produit, d'un procédé ou d'un système tout au long de son cycle de vie. Cette approche couvre toutes les étapes, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la gestion en fin de vie, en passant par la fabrication, le transport, l'utilisation et l'entretien. L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) est une méthode d'évaluation qui mesure et compare les impacts environnementaux des activités humaines. Elle vise à optimiser les processus de production dans une approche d'éco-conception [5].

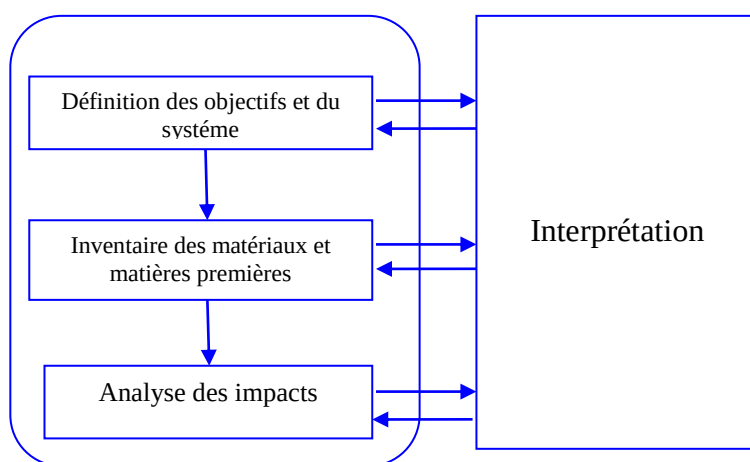


Figure 5. Phases de l'analyse du cycle de vie[5]

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV), définie par la norme ISO 14040, est un outil du développement durable permettant d'évaluer de manière quantitative et multicritère les impacts environnementaux d'un produit ou d'une infrastructure à chaque phase de son existence. Elle analyse l'ensemble du cycle de vie, de l'extraction des matières premières à la production, l'utilisation et la gestion en fin de vie. En compilant et évaluant les flux entrants et sortants d'un système de produit, elle permet d'optimiser les choix de conception et d'identifier les solutions les plus durables. Son application aux

infrastructures et aux ouvrages géotechniques contribue à réduire leur empreinte écologique tout en garantissant performance et pérennité[9][10].

La méthodologie d'Analyse du Cycle de Vie (ACV), conformément aux normes internationales ISO 14040[11], permet non seulement de quantifier les impacts environnementaux actuels, mais aussi d'identifier les pistes d'amélioration pour réduire ceux à venir. En général, une étude ACV met en évidence les principaux contributeurs aux impacts environnementaux, ce qui permet de concentrer les efforts là où ils sont les plus efficaces. À ce stade, les données issues de l'inventaire sont traduites en différentes catégories d'impacts[12].

2.2. Les différentes étapes de l'ACV appliquées aux géosynthétiques

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) appliquée aux infrastructures de tramway permet d'évaluer et d'optimiser l'impact environnemental des matériaux utilisés, notamment les géosynthétiques. Elle se déroule en plusieurs étapes[10] :

1. *Définition des objectifs et du périmètre* : L'étude vise à analyser l'impact environnemental des solutions géosynthétiques dans la construction des plateformes de tramway, en les comparant aux matériaux traditionnels et en identifiant les leviers d'amélioration.

2. *Inventaire des flux* : Cette phase consiste à recenser les ressources consommées (énergie, matières premières) et les émissions générées (CO₂, déchets) tout au long du cycle de vie des géosynthétiques intégrés aux infrastructures du tramway.

3. *Évaluation des impacts environnementaux* : L'analyse porte sur les effets environnementaux des différentes solutions mises en œuvre, tels que l'empreinte carbone, la consommation d'eau ou la durabilité des structures.

4. *Interprétation des résultats* : Les données obtenues permettent d'identifier les choix les plus durables et d'optimiser la conception des plateformes de tramway en intégrant des solutions géosynthétiques adaptées.

3. ÉTUDE DE CAS : ACV D'UNE SOLUTION GEOSYNTHETIQUE DANS UNE INFRASTRUCTURE DE TRAMWAY

Dans le cadre du projet de plateforme de tramway traversant une zone marécageuse à Sidi Bel Abbès, deux solutions techniques de traitement de sol ont été envisagées. La première repose sur l'utilisation de géosynthétiques, comme dans le cas étudié dans le travail de Yaalaoui et al. [13], combinant une purge partielle du sol, la mise en place de granulats et l'intégration d'un géotextile en polypropylène non tissé. Cette approche vise à optimiser la stabilité du sol tout en réduisant les volumes de matériaux utilisés, les besoins en transport et l'impact environnemental global. En parallèle, une solution plus traditionnelle consistant en la substitution totale du sol compressible par des matériaux granulaires a également été considérée.

L'objectif de cette étude est d'évaluer et de comparer les performances environnementales de ces deux alternatives à travers une Analyse du Cycle de Vie (ACV), conformément aux normes ISO 14040 et ISO 14044. L'évaluation porte notamment sur les émissions de CO₂, la consommation de ressources naturelles, les besoins en transport ainsi que les déchets générés.

Présentation simplifiée des deux solutions de traitement du sol:

Dans le cadre de la stabilisation d'une plateforme de tramway en zone marécageuse, deux solutions techniques ont été envisagées.

Solution 1 : Traitement avec géotextile:

Tableau 1. Tableau explicatif de la solution de géotextile

Élément	Description
Type de traitement	Purge partielle du sol + renforcement avec géotextile
Matériaux utilisés	GNT 0/63, GNT 0/31.5, géotextile non tissé en polypropylène
Objectif principal	Améliorer la portance, drainer l'eau et réduire les tassements

Avantages environnementaux	Moins de matériaux extraits, réduction du transport, meilleure durabilité
Mise en œuvre	Rapide, simple à installer, solution déjà expérimentée localement

Solution 2 : Substitution totale du sol:

Tableau 2. *Tableau explicatif de la solution substitution totale du sol*

Élément	Description
Type de traitement	Excavation complète du sol compressible
Matériaux utilisés	Granulats grossiers et insensibles à l'eau (sans géosynthétique)
Objectif principal	Éliminer tout risque de tassement ou instabilité
Avantages environnementaux	Volume de terrassement important, transport massif, ressources fortement sollicitées
Mise en œuvre	Plus longue, plus coûteuse, plus d'impact sur le site naturel

Ces deux approches techniques seront ensuite comparées selon la méthode de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV), en tenant compte de critères environnementaux tels que : les émissions de CO₂, la consommation d'énergie, les ressources mobilisées, et les déchets générés.

3.1. ACV de la première solution: avec géotextile

L'objectif principal de cette ACV est d'évaluer l'impact environnemental de l'utilisation de géosynthétiques, et plus particulièrement d'un géotextile en polypropylène non tissé, dans le cadre de la stabilisation d'une plateforme de tramway traversant une zone marécageuse à Sidi Bel Abbès. La solution vise à améliorer la portance et le drainage du sol compressible, tout en réduisant les tassements et l'instabilité. Le champ d'étude couvre l'ensemble du cycle de vie de la solution : extraction des matières premières, transport, mise en œuvre, exploitation et fin de vie [13].

3.1.1. Inventaire des flux

L'inventaire a porté sur :

Les matériaux utilisés : (Gravillons Non Traitée) GNT 0/63 et 0/31.5 extraits localement, et géotextile en polypropylène non tissé.

Le transport : les distances ont été optimisées grâce à la disponibilité des matériaux en Algérie, réduisant les émissions liées à la logistique.

La mise en œuvre : une mise en place rapide et mécanisée, limitant la durée des travaux et la consommation énergétique sur chantier.

L'exploitation : une réduction de la fréquence et de l'intensité de l'entretien, grâce à une meilleure stabilité et durabilité.

La fin de vie : le géotextile est durable sur le long terme, réduisant les besoins en remplacement ou en maintenance lourde.

3.1.2. Évaluation des impacts environnementaux

Émissions de gaz à effet de serre (GES) :

L'utilisation du géotextile permet de réduire les quantités de granulats nécessaires, diminuant les émissions liées à leur extraction et à leur transport.

Consommation d'énergie :

La solution nécessite moins de ressources énergétiques sur toute la durée de vie de l'infrastructure, grâce à la réduction du volume de matériaux à transporter et à installer.

Utilisation des ressources :

Moins de granulats extraits = moins de pression sur les carrières locales, contribuant à la préservation des ressources naturelles.

Tableau 3. Analyse environnementale de la solution avec géosynthétique

Phase	Sous-Phase	Indicateurs Clés	Impacts Environnementaux	Données Quantitatives (Exemples)
1. Construction	Extraction des GNT	- Énergie consommée - Émissions de GES - Perturbation des sols	- Consommation d'énergie pour l'extraction - CO ₂ lié au transport des granulats - Impact sur les carrières	50–100 kg CO ₂ eq./tonne de GNT (selon distance)
	Production des géotextiles	- Énergie fossile utilisée - Pollution chimique	- Production à partir de pétrole (polypropylène) - Rejets lors de la fabrication	3–5 kg CO ₂ eq./m ² de géotextile
	Mise en œuvre	- Consommation carburant des engins - Déchets de chantier	- Terrassement limité - Compactage du sol avec engins	~10–20 L gasoil/heure pour un compacteur
2. Exploitation	Entretien de la voie	- Réduction fréquence d'entretien	- Stabilité améliorée - Moins de tassement, donc moins de réparations	Jusqu'à 30% de réduction d'entretien estimée
3. Fin de vie	Démantèlement	- Énergie de déconstruction - Gestion des déchets	- GNT réutilisable en remblais - Géotextiles : déchets plastiques (enfouissement/incinération)	70% GNT recyclable 0–30% recyclage géotextile possible

3.1.3. Interprétation des résultats

L'intégration du géotextile dans la structure de la plateforme offre une solution plus durable sur le plan environnemental. Elle permet une économie de matériaux, une réduction de l'empreinte carbone du chantier et une diminution des besoins futurs en maintenance. Les bénéfices environnementaux sont clairs : moins d'extraction, moins de transport, moins d'énergie consommée et une gestion des eaux plus efficace. Cette solution apparaît donc non seulement techniquement performante, mais aussi écologiquement responsable.

Tableau 4. Tableau Résumé de l'ACV : Solution 1 (avec géosynthétique)

Critère analysé	Description / Résultats
Type de traitement	Purge partielle + granulats + géotextile
Consommation de matériaux	Réduite (moins de granulats)
Besoins en transport	Moindres (volumes limités)
Énergie consommée	Plus faible
Émissions de CO ₂	Plus faibles
Avantage particulier	Drainage amélioré grâce au géotextile

3.2. ACV de la seconde solution : Substitution totale du sol (solution traditionnelle avec granulats)

3.2.1. Définition des objectifs et du champ d'étude

Cette étude vise à évaluer qualitativement les impacts environnementaux d'une solution alternative consistant à remplacer entièrement le sol compressible par des matériaux granulaires. Cette méthode est souvent adoptée lorsque le sol en place est trop faible pour supporter les charges, notamment dans les zones marécageuses ou saturées en eau.

L'objectif est de comparer cette méthode à la solution avec géotextile en se concentrant uniquement sur l'aspect environnemental, conformément aux recommandations méthodologiques des normes ISO 14040 et 14044.

3.2.2. Inventaire des flux (approche théorique)

L'analyse de l'inventaire du cycle de vie (Life Cycle Inventory – LCI) constitue une étape centrale dans le processus d'ACV. Une fois les objectifs, le champ de l'étude et les frontières du système clairement définis, l'ensemble des flux entrants et sortants doivent être inventoriés avec précision. Cela inclut les quantités de matériaux extraits, les distances de transport, les consommations d'énergie, ainsi que les émissions dans l'air, l'eau et le sol.

Les émissions sont modélisées sous forme de rejets cumulatifs instantanés, permettant d'évaluer leur impact potentiel à chaque étape du cycle de vie. Cependant, la disponibilité des données spécifiques aux matériaux ou aux procédés peut s'avérer limitée. Il est donc essentiel de collecter des données représentatives, proches des conditions réelles du cas étudié, afin d'assurer la fiabilité et la cohérence des résultats[12].

Extraction et transport des matériaux :

Dans le cadre de la solution de substitution totale du sol, l'estimation de l'énergie consommée pour le transport repose sur des hypothèses courantes, en considérant l'utilisation de camions fonctionnant au diesel. L'analyse étant de nature comparative, seuls les éléments spécifiques à cette solution sont pris en compte, tandis que les opérations communes aux deux alternatives sont exclues. Les étapes telles que la vibration ou le compactage, jugées négligeables sur le plan énergétique, ne sont pas intégrées dans le calcul. Les données mobilisées pour l'excavation, le transport et la mise en œuvre proviennent de sources issues de la littérature spécialisée dans l'analyse environnementale des infrastructures[14].

La substitution du sol nécessite l'excavation de grandes quantités de sol naturel, qui doivent être transportées et mises en décharge ou réutilisées ailleurs. À cela s'ajoute l'apport massif de matériaux granulaires, comme les GNT (Gravillons Non Traitée), extraits de carrières et transportés sur de longues distances.

Conséquences environnementales :

Consommation importante d'énergie pour l'excavation, le transport et la mise en œuvre, émissions de CO₂ élevées dues aux engins de chantier et aux camions.

L'extraction, la transformation et le transport des matières premières requièrent une quantité importante d'énergie et entraînent des émissions polluantes, notamment sous forme de poussières. Cette forte consommation énergétique, toutes sources confondues, participe au changement climatique mondial. Une stratégie efficace pour réduire les émissions de CO₂ consiste à privilégier l'utilisation de matériaux dont l'impact environnemental est moindre[15][16].

Installation et exploitation :

L'épaisseur de la couche de substitution est généralement plus importante que dans la solution avec géotextile, ce qui augmente la quantité de matériaux utilisés. Le temps de mise en œuvre est également plus long, avec un impact prolongé sur l'environnement local (poussières, bruit, circulation).

Fin de vie et maintenance :

Bien que la solution soit robuste, elle peut nécessiter un entretien périodique en cas de tassements différentiels ou de mauvaise gestion des eaux. L'absence de matériaux drainants intégrés comme le géotextile peut entraîner une accumulation d'humidité.

3.2.3. Évaluation des impacts :

Émissions de gaz à effet de serre (GES) :

Plus importantes que dans la solution avec géotextile, en raison de la quantité de matériaux extraits et transportés.

Consommation de ressources :

La solution repose principalement sur l'utilisation de matériaux naturels non renouvelables, ce qui augmente la pression sur les ressources minérales.

Gestion des eaux :

L'absence de couche drainante comme le géotextile peut entraîner une remontée capillaire ou une stagnation de l'eau, ce qui augmente les risques d'instabilité et d'entretien à long terme.

Occupation des sols et déchets :

L'excavation massive génère d'importants volumes de déblais, qui doivent être traités ou stockés, posant des problèmes de gestion des déchets.

Tableau 5. Analyse environnementale de la solution avec substitution totale du sol

Phase	Sous-Phase	Indicateurs Clés	Impacts Environnementaux	Données Quantitatives (Exemples)
1. Construction	Extraction massive de GNT	- Énergie consommée - Émissions GES - Perturbation majeure des sols	- Forte consommation de granulats - Plus de camions, donc plus de CO ₂ émis - Impact plus élevé sur les ressources naturelles	80–150 kg CO ₂ eq./tonne de GNT (estimation augmentée)
	Excavation et remplacement	- Carburant pour engins lourds - Déchets d'excavation	- Excavation complète → sol dégradé - Dépôt de déblais à gérer	~15–25 L gasoil/heure pour pelles et camions
	Mise en œuvre	- Consommation carburant supplémentaire	- Plus d'allers-retours de camions	Quantité de GNT transportée doublée par rapport à la Solution 1
2. Exploitation	Entretien de la voie	- Maintenance plus fréquente	- Risque de tassement différé (moins maîtrisé sans géotextile)	Entretien classique sans réduction spécifique
3. Fin de vie	Démantèlement	- Énergie de déconstruction - Gestion des déchets	- GNT : possibilité de réemploi - Déblais excavés : souvent déchets non	60–70% recyclage possible pour GNT

			valorisables	
--	--	--	--------------	--

3.2.4. Interprétation des résultats:

Comparée à la solution avec géotextile, la substitution totale du sol présente des désavantages environnementaux notables : plus forte consommation de ressources, émissions de GES accrues, et moins bonne gestion de l'humidité. Bien qu'elle puisse offrir une stabilité mécanique équivalente, son impact écologique est généralement plus lourd.

Tableau 6. Résumé de l'ACV : Solution 2 (substitution totale du sol)

Critère analysé	Description / Résultats
Type de traitement	Excavation complète et remplacement par granulats
Consommation de matériaux	Très élevée
Besoins en transport	Importants (grands volumes à déplacer)
Énergie consommée	Plus élevée
Émissions de CO ₂	Plus élevées
Inconvénient particulier	Plus de déchets générés, plus de ressources utilisées

Tableau 7. Comparaison synthétique des deux solutions

Critère	Solution 1 : Géosynthétique	Solution 2 : Substitution totale
Consommation de matériaux	Faible	Très élevée
Transport	Réduit	Important
Énergie consommée	Faible	Élevée
Émissions de CO ₂	Faibles	Élevées
Gestion de l'eau	Améliorée (drainage)	Non spécifique
Durabilité environnementale	Meilleure	Moins bonne

La Solution 1 (traitement avec géotextile) présente des avantages environnementaux notables : réduction de la consommation de granulats, limitation des émissions de CO₂ liées au transport, et amélioration de la durabilité de la structure nécessitant moins d'entretien. En revanche, la Solution 2 (substitution totale du sol) est plus consommatrice de ressources naturelles et génère davantage d'émissions de gaz à effet de serre en raison de l'excavation complète et du transport accru des matériaux. Ainsi, du point de vue environnemental, la première solution apparaît plus durable et mieux adaptée.

4. CONCLUSION

Dans un contexte où la préservation des ressources naturelles et la réduction de l'empreinte écologique deviennent des priorités, cette étude a comparé deux approches de traitement de sol pour la réalisation d'une plateforme de tramway en zone marécageuse. La première solution, intégrant un géotextile en polypropylène, s'inscrit dans une logique de durabilité en limitant l'extraction de matériaux, en réduisant les besoins en transport et en améliorant le drainage. La seconde, basée sur la substitution complète du sol, bien que techniquement efficace, engendre des impacts environnementaux plus importants en raison du volume élevé de matériaux mobilisés et des opérations de terrassement intensives.

L'analyse du cycle de vie (ACV), menée selon les normes ISO 14040 et 14044, a permis d'évaluer de manière structurée les flux de matière et d'énergie associés à chaque solution. Elle a mis en évidence l'avantage environnemental de l'approche avec géosynthétiques, notamment en matière d'émissions de CO₂, de consommation de ressources et de gestion de l'eau.

Ce travail confirme ainsi l'intérêt croissant pour les géosynthétiques comme alternative durable dans le domaine des infrastructures. Leur utilisation ne se limite pas à une amélioration technique des

performances, mais participe activement à la réduction des impacts environnementaux, tout en optimisant les coûts et la durabilité des ouvrages.

5. REFERENCES

- [1] A. Nancey and N. Laidié, Analyse Du Cycle De Vie Des Solutions Géosynthétiques Au Regard Des Matériaux De Construction Conventionnels Comparative Life Cycle Assessment of Geosynthetics Versus Conventional Construction Materials4(2013), pp. 45–71.
- [2] T. Borchers, D. Wittowsky, and R. A. S. Fernandes, A Comprehensive Survey and Future Directions on Optimising Sustainable Urban Mobility, IEEE Access. 12(2024), pp. 63023–63048.
- [3] V. D. Q. Aecom, Identification et évaluation des impacts(2019).
- [4] C. M. Purdy, A. J. Raymond, J. T. Dejong, A. Kendall, C. Krage, and J. Sharp, Life-cycle sustainability assessment of geotechnical site investigation, Canadian Geotechnical Journal 6(2022), pp. 863–877.
- [5] E. Antoinet, M. Saadé, and A. Sarelli, L ' Analyse du Cycle de Vie (ACV) appliquée aux ouvrages géotechniques, Journées Natl. Géotechnique Géologie l'Ingénieur – Poitiers (2024).
- [6] P. Stolz, R. Frischknecht, M. Stucki, S. Büsser, R. Itten, and H. Wallbaum, Comparative Life Cycle Assess-ment of Geosynthetics versus Conventional Construction Materials European Association of Geosynthetic product Manufacturers (EAGM)(2019).
- [7] I. G. Society, Applications of Geosynthetics in Railways: Applocations and Benefits.
- [8] S. Lambert, Les géotextiles : fonctions, caractéristiques et dimensionnement(2000).
- [9] R. H. Jeroen B. Guinée , Marieke Gorrée, L. van O. Gjalt Huppes , René Kleijn , Arjan de Koning, H. de B. Anneke Wegener Sleswijk , Sangwon Suh , Helias A. Udo de Haes, H. de Bruijn, and H. de Bruijn, Life cycle assessment An operational guide to the ISO standards(2001).
- [10] H. B. M. Belkhir, K. Louhab, S. Bougherara and N. D. L. Samar, Guide Pratique de la Mise en Place de la Démarche Analyse du Cycle de Vie Selon la Norme ISO 14040 et ISO 14044, CALEC, Rés.
- [11] ISO 14040, Évaluation du cycle de vie,Environmental management, Principes et cadre, BSI, Londres., (2006).
- [12] M. Medine, H. Trouzine, J. Barroso, D. E. Aguiar, and H. Djadouni, Life Cycle Assessment of Concrete Incorporating Scrap Tire Rubber: Comparative Study, Revue Nature et Technologie 02(2022), pp. 1–11.
- [13] N. Yalaoui, H. Trouzine, M. Meghachou, B. Abbès, and S. M. Aissa Mamoune, Multiphysics analysis of tramway geotechnical infrastructure: numerical modelling, Engineering and Computational Mechanics2(2023), pp. 50–64.
- [14] G. Heerten, Reduction of climate-damaging gases in geotechnical engineering practice using geosynthetics, Geotextiles and Geomembranes 30(2012), pp. 43–49.
- [15] M. Seddik Meddah, Recycled aggregates in concrete production: Engineering properties and environmental impact, MATEC Web of Conferences 101(2017), pp. 1–8.
- [16] P. K. MEHTA, Reducing the environmental impact of concrete, concrete can be durable and environmentally friendly. Point of view, Concrete International 271(2001), pp. 61–66.