

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) appliquée aux ouvrages géotechniques

Life Cycle Assessment (LCA) for geotechnical structures

Eric Antoinet¹
Myriam Saadé²
Adrien Sarelli³

¹ Antea Group, Orléans

² ENPC, Labo Navier

³ Antea Group, Strasbourg

RÉSUMÉ – L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) est une méthode d'évaluation de l'ensemble des impacts environnementaux d'un projet afin d'améliorer son éco-conception. Cette méthode considère l'ensemble de la durée de vie de l'ouvrage, depuis sa construction, sa maintenance et son exploitation jusqu'à sa déconstruction. L'article présente les grands principes théoriques de l'ACV puis les résultats d'une application à un ouvrage géotechnique en comparant différents types de murs de soutènement.

ABSTRACT – Life Cycle Assessment (LCA) is a method for evaluating all the environmental impacts of a project in order to improve its eco-design. This method considers the entire lifespan of the structure, from its construction, maintenance, and operation to its deconstruction. The article presents the main theoretical principles of LCA then the results of an application to a geotechnical structure by comparing different types of retaining walls.

1. Introduction

Au-delà de l'ambition d'une neutralité carbone en France en 2050, tous les acteurs de l'acte de construire du domaine du bâtiment et des travaux publics doivent s'intéresser aux impacts environnementaux de leurs projets. La recherche de solutions techniques vertueuses associant sobriété et pérennité minimisant les impacts environnementaux devient un élément important du développement d'un projet de construction. Les ouvrages géotechniques, comme constituants indispensables de ces ouvrages, doivent donc être intégrés à cet objectif.

Les matériaux majoritairement utilisés pour la construction des ouvrages géotechniques (fondations, murs et écrans de soutènement, traitement de sol ...) sont les bétons, réalisés à partir de ciments, et l'acier. Ces deux familles de matériaux ont des impacts environnementaux importants, en particulier vis-à-vis des émissions de gaz à effet de serre.

La minimisation des impacts environnementaux passe en premier lieu par un dimensionnement optimisé mais également par le choix de solutions techniques et de méthodes constructives plus vertueuses.

L'évaluation de l'empreinte carbone d'un ouvrage est bien évidemment un élément fondamental mais une approche seulement focalisée sur ce sujet peut conduire à n'avoir qu'une vision partielle des impacts environnementaux. La méthode de l'analyse du cycle de vie (ACV) présentée dans cet article est une méthode plus complète qui permet de prendre en compte l'ensemble des impacts environnementaux et ceci sur toute la durée de vie de l'ouvrage, du berceau à la tombe suivant la terminologie retenue.

Le présent article est basé sur les travaux menés par les équipes de l'ENPC et d'Antea Group dans le cadre des projets scientifiques PEO-GEO, ASIRI+ et MINERVE.

2. Présentation de méthode d'Analyse du Cycle de Vie (ACV)

2.1. Principe général de l'ACV

L'ACV est une méthode fonctionnelle, multicritère d'évaluation de l'impact environnemental. Elle a pour objectif de quantifier et rendre comparables les dommages à l'environnement causés par les activités humaines. C'est un outil analytique dont la fonction est l'amélioration des processus productifs dans une démarche d'éco-conception. Son principe repose sur la définition d'une unité fonctionnelle, représentant la fonction du système modélisé, et à laquelle tous les flux de matière, d'énergie et les impacts sont rapportés. Pour différents scénarios de production d'un bien, les flux de matière et d'énergie émis vers et extraits de l'environnement sont estimés au cours de l'inventaire. Sur la base de ces flux, les impacts environnementaux sont évalués pour différentes catégories ou domaines à protéger tels que le climat, la santé humaine, les écosystèmes...). A chaque phase de l'analyse, l'interprétation permet de discuter les hypothèses et les résultats et de proposer des recommandations pour réduire les impacts (Figure 1).

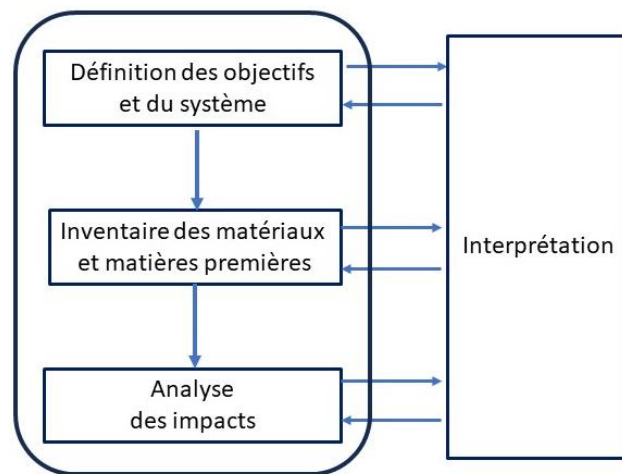


Figure 1. Phases de l'analyse du cycle de vie

L'originalité de la méthode de l'ACV par rapport à d'autres approches repose sur l'estimation des flux de matière et de leurs impacts potentiels sur l'ensemble du cycle de vie d'un produit, afin d'éviter des propositions d'améliorations du système productif menant à des déplacements d'impact d'une catégorie à une autre, ou d'une étape du cycle de vie à une autre.

2.2. Démarche pas à pas

Après avoir défini les objectifs et le champ de l'étude, l'ACV est menée étape par étape :

Etape 1 - Définition de l'unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle est la grandeur quantifiant la fonction du système, sur la base de laquelle les scénarios évalués sont comparés. Pour une unité fonctionnelle donnée, on quantifie pour chaque scénario les flux de référence, à savoir les quantités de produits requises et achetées pour remplir cette fonction. Le choix de l'unité fonctionnelle est crucial car il influe sur le résultat de l'étude. L'unité fonctionnelle est une grandeur qui doit être mesurable et additive.

Etape 2 - Modélisation et frontière du système (ou périmètre)

Les flux de référence sont calculés pour un système de production donné, modélisé selon une approche systémique. Le système modélisé est subdivisé en processus unitaires, assurant chacun une activité unique ou un groupe d'activités. Les processus unitaires sont ensuite reliés les uns aux autres par des flux de produits. Les processus unitaires sont reliés à l'environnement par des flux élémentaires (entrant ou sortant). Le niveau de détail de la modélisation d'un processus unitaire dépend des objectifs de l'étude, et des données à disposition pour le renseigner.

La modélisation du système de production requiert également de déterminer les processus à inclure et à exclure. Les limites du système incluent théoriquement tous les processus économiques requis pour réaliser sa fonction. En pratique, l'ACV nécessite généralement de fixer les frontières du système et d'exclure certains processus, en respectant des règles de cohérence.

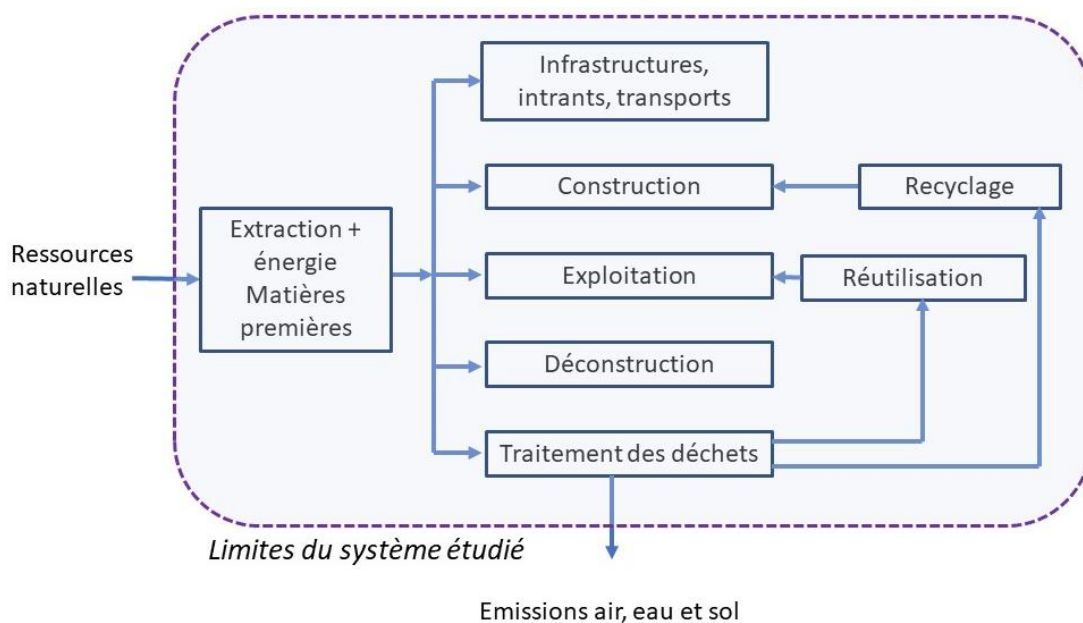


Figure 2. Limites du système et principales étapes du cycle de vie d'un ouvrage

La modélisation du système prend généralement en considération les processus impliqués dans les différentes étapes du cycle de vie de l'ouvrage :

- extraction des matériaux primaires, énergie requise par la fabrication des matières premières,
- mise à disposition des infrastructures de transformation, des machines et du transport,
- construction de l'ouvrage,
- utilisation, entretien et maintenance de l'ouvrage,
- déconstruction avec la génération de déchets ou de leur valorisation (réutilisation, recyclage ou valorisation énergétique).

Etape 3 - Inventaire

L'inventaire du cycle de vie quantifie les flux de matière et d'énergie extraites ainsi que les émissions polluantes dans l'eau, l'air et le sol. Il consiste à quantifier les flux de matière et d'énergie entrant et sortant du système, rapportés à l'unité fonctionnelle définie précédemment. L'inventaire s'effectue sur la base des flux de référence estimés

précédemment, multipliés par des facteurs d'émission et d'extraction. Ces facteurs fournissent, pour chaque unité de matière et d'énergie consommée par unité fonctionnelle, la quantité de chaque substance émise vers ou extraite de l'environnement. Ils sont disponibles dans des bases de données d'inventaire telles qu'*Ecoinvent*.

Etape 4 - Analyse de l'impact environnemental

L'analyse de l'impact environnemental permet de mettre en équivalence les différents flux de matière et d'énergie, en les rapportant à différentes catégories d'impact environnemental. Cette phase du cycle de vie consiste d'abord à catégoriser les émissions et les extractions de substance dans différentes catégories d'impact (par exemple, changement climatique, effets sur la santé humaine...), puis à caractériser le potentiel de ces substances à causer un ou plusieurs impacts environnementaux. Cette caractérisation s'effectue en appliquant une ou plusieurs méthodes d'analyse de l'impact (par exemple, ReCiPe ou IMPACT World+), généralement tirés des méthodes d'analyse de l'impact en se basant sur les indicateurs de la norme NF EN 15804 (cf. § 2.5).

Les impacts considérés sont :

- Acidification (ACI)
- Changement climatique (CC) : biogénique, fossile ou changement d'usage du sol,
- Ecotoxicité sur les eaux ECOTOX (métaux, substances inorganiques, substances organiques),
- Eutrophisation (EUTFresh, EUTmar, EUTter) : eau douce, eau de mer, terrestre,
- Toxicité humaine (HTOXcan, HTOXn can) : cancer, non cancer,
- Radiation ionisante (IR),
- Utilisation du sol (LU),
- Appauvrissement de la couche d'ozone (OD), formation d'ozone photochimique (POF),
- Particules (POF),
- Utilisation de ressources (RESfos et RESmin) : fossiles, minéraux et métaux,
- Utilisation de l'eau (WU).

Etape 5 - Interprétation

L'interprétation a pour objectif d'identifier les étapes du cycle de vie sur lesquelles intervenir pour réduire des résultats d'une ACV porte sur chaque phase de l'ACV. Elle vise également à déterminer les paramètres clés, à tester la robustesse des résultats de l'analyse ainsi qu'à estimer les incertitudes.

2.3. Limites et potentialités d'une ACV

En tant qu'outil d'évaluation environnementale, l'ACV est une méthode holistique permettant de comparer des scénarios entre eux. La méthode est transparente tant que les hypothèses sous-tendant l'analyse sont clairement spécifiées et testées dans le cadre d'études de sensibilité. En particulier les choix effectués lors de la délimitation du système, en matière d'allocation, les valeurs des paramètres clés doivent être explicités.

La dimension multicritère, très intéressante en terme analytique, peut se révéler complexe lorsqu'il s'agit de traduire l'évaluation à l'échelle décisionnelle, qui favorise un

transfert d'information succincte. Cette simplification de l'information repose également souvent sur des pondérations qu'il est nécessaire de préciser.

L'ACV est une méthode en plein développement, tout particulièrement en matière de bases de données d'inventaire et de méthode d'évaluation de l'impact environnemental. Cela implique des innovations constantes d'indicateurs d'impact, de prise en compte des variabilités spatiales et temporelles, de territorialisation des flux ou des facteurs de caractérisation, entraînant des mises à jour fréquentes.

On notera que les aspects économiques et sociaux ne sont pas évalués et peuvent faire l'objet d'une analyse complémentaire, sous réserve d'une démarche cohérente avec l'évaluation environnementale.

2.4. Bases de données

L'ACV est une méthode qui requiert une grande quantité de données pour pouvoir calculer d'une part les flux de matière extraites de l'environnement, puis de substances émises vers l'environnement, et d'autre part les impacts environnementaux. Ces calculs reposent en grande partie sur des bases de données d'inventaire et des bases de données dites « filles ».

- Les bases de données d'inventaire fournissent des facteurs d'émission de polluants et d'extraction de ressources pour certains produits, matériaux et procédés industriels. La base de données d'inventaire de référence est *Ecoinvent*, fournissant des données pour des procédés génériques à l'échelle mondiale ou nationale.
- Les bases de données « filles » fournissent des scores d'impact par produit, matériaux et procédés. Elles reposent sur les bases de données d'inventaire, souvent *Ecoinvent*, mais ne fournissent pas le détail de l'inventaire des émissions et des extractions. En France, INIES (www.inies.fr) est la base de données de référence pour les produits de construction DIOGEN (www.diogen.fr) fournit quant à elle des données par matériaux.

2.5. Aspects normatifs

La réalisation d'une ACV est cadrée par deux normes ISO : ISO 14040 (2006) et ISO 14044 (2006).

La norme ISO 14040 décrit les principes et le cadre de l'analyse du cycle de vie (ACV), notamment la définition de l'objectif et du champ d'application de l'ACV, la phase d'analyse de l'inventaire du cycle de vie (ICV), la phase d'analyse de l'impact du cycle de vie (AICV), la phase d'interprétation du cycle de vie, le rapport et la revue critique de l'ACV, les limites de l'ACV, la relation entre les phases de l'ACV et les conditions d'utilisation des choix de valeurs et des éléments facultatifs.

La norme ISO 14044 spécifie quant à elle les exigences et fournit des lignes directrices pour l'ACV. Elle couvre les études d'ACV et les études d'inventaire du cycle de vie (ICV).

Différentes normes européennes sont également en vigueur pour l'évaluation de l'impact environnemental des ouvrages de génie civil, dans la série « Contribution des ouvrages de construction au développement durable » :

- NF EN 15643 - - Cadre pour l'évaluation des bâtiments et des ouvrages de génie civil,
- NF EN 15978 - Évaluation de la performance environnementale des bâtiments - Méthode de calcul
- NF EN 17472 - Évaluation de la contribution au développement durable des ouvrages de génie civil - Méthodes de calcul,

- NF EN 15804 - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction,
- NF EN 15941 - Qualité des données pour l'évaluation environnementale des produits et des ouvrages de construction - Sélection et utilisation des données.

3. Spécificité des ouvrages géotechniques

Les premières ACV réalisées sur des ouvrages géotechniques ont permis de faire un premier retour d'expérience :

- Contrairement aux biens manufacturés qui peuvent être construits en grand nombre, chaque ouvrage de génie-civil constitue plus ou moins un prototype unique,
- La durée de vie de ces ouvrages est longue, voire très longue (≥ 100 ans) et les sujets de durabilité et maintenance peuvent représenter une part importante des impacts,
- Une partie des ouvrages géotechniques ne pas être déconstruit en fin de vie de la structure supportée. Par exemple un pieu en béton moulé dans le sol ne peut pas être déconstruit.
- Les ouvrages et travaux requis (injection, traitement de sol) pour les phases provisoires peuvent avoir un impact important.

Il est souvent délicat de définir l'unité fonctionnelle, en particulier du fait que la limite entre les ouvrages géotechniques et la structure supportée n'est pas nécessairement pertinente. Deux compétences d'ingénieries doivent donc être associées pour mener à bien l'ACV. Une optimisation indépendante des seuls ouvrages géotechniques ou des seules structures supportées pourrait conduire à des majorations des impacts environnementaux de la structure non optimisée (plus de béton ou plus d'acier), ce qui montre la nécessité d'avoir une vision globale de la conception au niveau de l'unité fonctionnelle de l'ouvrage.

4. Exemple d'un mur de soutènement

L'exemple d'ACV ci-après correspond à l'étude d'un mur de soutènement, d'une hauteur hors sol de 4,5 m, permettant de construire une plateforme à l'amont. Pour ce cas d'étude, les 3 solutions techniques suivantes sont envisageables : mur cantilever, mur Redi-rock et mur en gabion. En considérant que le mur de soutènement est associé à l'exploitation d'un processus industriel, la durée de vie de l'ouvrage a été considérée de 30 ans. Au-delà de cette période, l'ouvrage est déconstruit. Les calculs sont réalisés pour une unité fonctionnelle de 1 m linéaire de mur. Dans cet exemple, la maintenance du mur n'est pas requise.

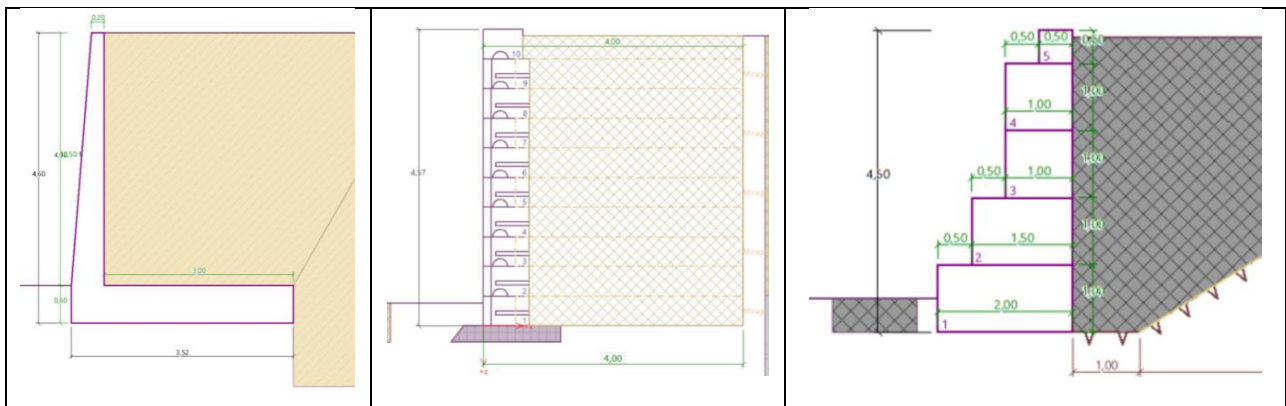


Figure 3. Schémas des scénarios considérés : cantilever à gauche, mur Redi Rock au centre et mur en gabion à droite

Le tableau 1 donne l'évaluation de l'empreinte carbone (GES) pour les 3 solutions techniques. Les calculs sont menés en considérant un béton standard et des aciers neufs, hypothèses conservatrices. Le mur en gabion, moins gourmand en béton et acier nécessite beaucoup moins de matériaux impactant comme le béton. L'utilisation d'un béton très bas carbone modifierait bien évidemment les résultats de l'analyse. Le score obtenu par l'ACV est également indiqué dans ce tableau : il s'agit du score donné par le logiciel utilisé (Umberto), sachant qu'une valeur faible correspond à de moindres impacts environnementaux.

Tableau 1. Principaux résultats de l'ACV d'un mur de soutènement (pour un mètre linéaire)

Type de mur	Cantilever	Redi Rock	Gabion
Emissions de GES	1,3 T eCO ₂	1,3 T eCO ₂	0,7 T eCO ₂
Répartition par phase des émissions de GES			
Matériaux primaires	61 %	50 %	42 %
Construction du mur	24 %	35 %	44 %
Fin de vie du mur	15 %	15 %	14 %
Score global de l'ACV	2 400	1 800	1 300

La figure 4 permet de comparer les 3 solutions techniques pour chaque catégorie d'impact, sur la base d'un score environnemental sur le cycle de vie, donné ici en relatif : une note basse qualifie des impacts environnementaux plus faibles.

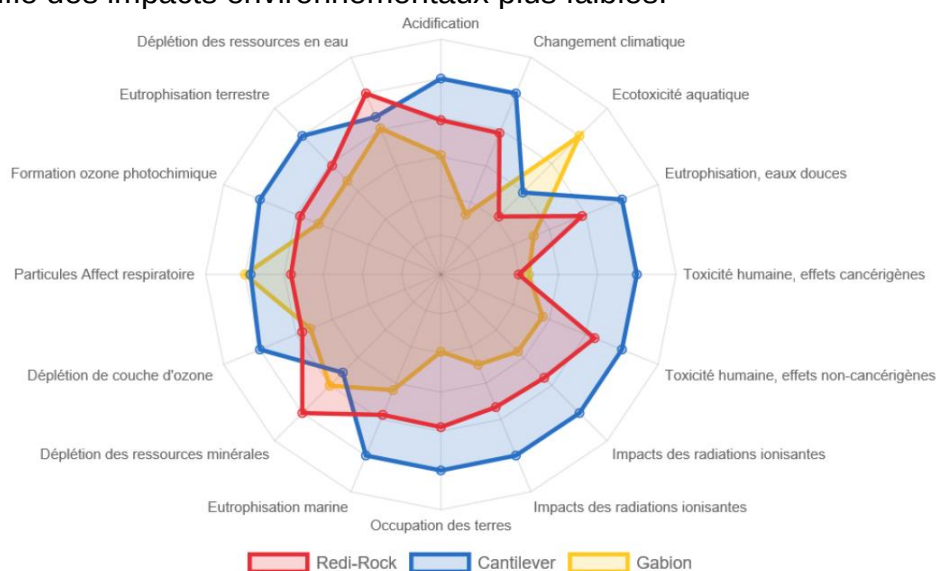


Figure 4. Comparaison des scénarios pour différentes catégories d'impact (scores relatifs)

La figure 5 présente l'étude de la sensibilité des résultats à l'angle de frottement interne du remblai à l'arrière du mur pour un mur poids. Une augmentation de l'angle de frottement du sol, en réduisant la poussée des terres, permet de réduire les quantités de matériaux et donc certains impacts environnementaux.

5. Insertion de l'ACV dans le processus d'étude

La Commission européenne (<https://www.eca.europa.eu/fr/publications?ref=sr-2023-17>) a mis en évidence qu'environ 80 % des impacts environnementaux sont déterminés lors de la phase de conception. Nous n'avons pas connaissance de données spécifiques pour le

bâtiment et les travaux publics, mais il est clair que la phase de conception est une phase essentielle pour minimiser les impacts environnementaux.

Il est donc nécessaire d'intégrer ces aspects dès le démarrage des études d'avant-projet, voire des études préliminaires. Néanmoins une ACV demande des informations détaillées et précise sur la conception, la réalisation et l'exploitation de l'ouvrage, peu compatibles avec une définition en grande masse d'un projet d'ouvrage, qui peut évoluer fortement au cours du temps.

L'insertion de l'ACV dans le processus de conception requiert ;

- ⇒ d'un œil expert pour orienter la conception vers les solutions efficaces
- ⇒ de se tenir à jour très régulièrement des connaissances sur les impacts des matériaux, les producteurs faisant des efforts importants pour réduire les impacts,
- ⇒ de disposer d'outils à développer pour connecter directement les maquettes 3D aux processus d'ACV.

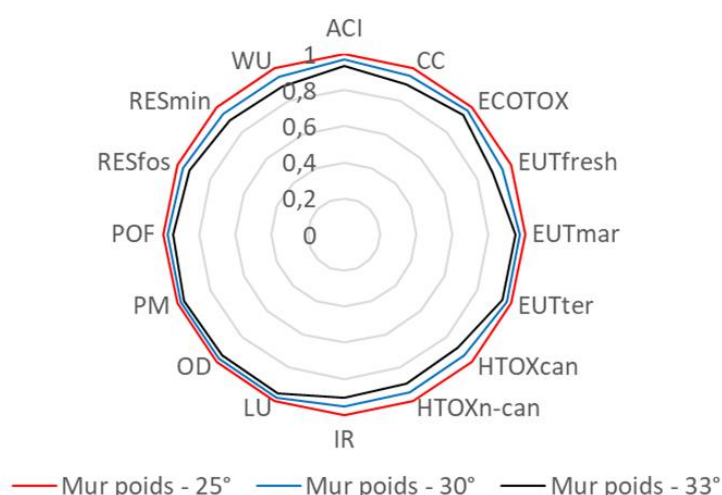


Figure 5. Mur poids - Impacts environnementaux liés à l'angle de frottement interne du sol

6. Conclusions

La méthode d'Analyse du Cycle de Vie est relativement complexe et donc assez difficile à mettre en œuvre dès les phases initiales de conception des ouvrages de génie-civil et géotechniques. Néanmoins, les premières applications réalisées pour des ouvrages géotechniques (murs de soutènement, pont, amélioration de sol par inclusions rigides) ont mis en évidence le grand intérêt de l'ACV pour une éco-conception, en particulier pour la vision globale de la vie de l'ouvrage qu'elle requière.

Des approches un peu simplifiées sont à développer pour inscrire pleinement l'ACV dans le processus d'éco-conception, dès les phases amont des projets.

7. Remerciements

Ces travaux ont été soutenus par la Fondation FEREC dans le cadre de son appel à projet de 2021 (projet PEO-GEO) et par Bpifrance et l'IREX dans le cadre du projet national Minerve (PIA4).

8. Références bibliographiques

- ISO (International Organization for Standardization) (2006a) ISO 14040:2006: Environmental management – life cycle assessment – principles and framework. ISO, Geneva, Switzerland.
- ISO (2006b) ISO 14044:2006: Environmental management – life cycle assessment – requirements and guidelines. ISO, Geneva, Switzerland.
- Saadé, M. et Jolliet, O. (2024). Analyse du cycle de vie, Comprendre et réaliser un écobilan, EPFL Press, 4ème édition, Lausanne, Suisse.