

QUELQUES CONSIDERATIONS PRATIQUES POUR LIMITER L'EMPREINTE ENVIRONNEMENTALE DES OUVRAGES

ENHANCING THE ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY OF GEOTECHNICAL DESIGNS: PRACTICAL CONSIDERATIONS

Charles Bernuy¹, Jasmine Targhaoui¹

¹ Terrasol, Lyon, France

RÉSUMÉ – Les ingénieurs géotechniciens sont appelés à jouer un rôle dans la réduction de l'impact environnemental des solutions techniques, en agissant à la fois sur les méthodes de construction et les volumes de matériaux mis en œuvre. Ils doivent être en mesure d'évaluer différents indicateurs environnementaux (dont l'indicateur carbone communément utilisé en référence), tout en adoptant des approches méthodologiques permettant d'augmenter le taux de travail des fondations.

ABSTRACT – Geotechnical engineers have the responsibility to actively reduce the environmental footprint of projects, by working on both construction methods and material quantities. This involves assessing various environmental indicators (such as the commonly referenced carbon indicator), while adopting methodological approaches to increase foundation nominal working pressures.

1. Introduction

Les gaz à effet de serre (GES) sont des composés atmosphériques qui contribuent à la captation de la chaleur solaire. Leur augmentation est responsable du réchauffement climatique. Des stratégies nationales et internationales sont mises en œuvre pour une transition progressive vers une économie à zéro émission nette de carbone d'ici 2050.

La réduction de l'empreinte carbone des ouvrages géotechniques est souvent associée à leur optimisation. Mais avant même d'optimiser, le choix de la typologie de solution doit se faire de manière éclairée. Trouver la solution technique la moins émissive en GES nécessite que l'ingénieur soit capable de quantifier l'empreinte carbone de différentes solutions et d'effectuer des comparaisons des bilans carbone.

2. Leviers pour l'ingénieur géotechnicien

Afin d'aider les ingénieurs à évaluer l'empreinte environnementale de leurs projets, des outils d'aide à la décision adaptés au niveau d'information disponible sont essentiels. Terrasol a développé le module *Ecow* sur la plateforme *Orbow* pour accompagner les ingénieurs dans une démarche de conception écoresponsable des projets géotechniques.

Un deuxième levier d'intervention implique l'adoption d'approches moins conventionnelles. Le dimensionnement des ouvrages géotechniques repose sur l'application de coefficients de sécurité qui ont un impact direct sur les quantités de matériaux mises en œuvre, et par conséquent sur l'empreinte environnementale. Ces coefficients garantissent la robustesse et la pérennité des ouvrages géotechniques en limitant les déplacements. Bien que largement éprouvées par l'expérience, ces limitations restent conventionnelles et peuvent être mieux appréhendées en affinant la manière dont les déplacements des ouvrages sont estimés au cours du temps. Des approches de

dimensionnement basées sur les déplacements admissibles des fondations pourraient par exemple permettre d'augmenter le taux de travail.

3. Choix de conception bas carbone

3.1. Cadre général

L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est une méthodologie pour évaluer les impacts d'un "produit" sur l'environnement durant l'ensemble de son cycle de vie. L'analyse d'ACV peut être appliquée à une construction, en faisant un bilan de l'ensemble des flux de matière et d'énergie. En France, la norme NF EN 15804 spécifie les règles et les lignes directrices pour la réalisation d'une ACV des produits de construction, en définissant les méthodes de calcul des indicateurs d'impact.

L'indicateur clé, « réchauffement climatique », est privilégié en raison de sa pertinence directe et de sa documentation approfondie dans la littérature scientifique. Il est exprimé en équivalent CO₂ (kg_{éq} CO₂), une unité standardisée mesurant les émissions de tous les GES sur la base de leurs potentiels de réchauffement. L'article se concentre sur cet indicateur. Il est néanmoins important de souligner la nécessité d'une approche globale qui prend en compte d'autres indicateurs.

3.2. Problématiques

Calculer l'empreinte environnementale d'un projet géotechnique s'avère complexe en raison de la diversité de données disponibles. A cela s'ajoute le fait que le référentiel normatif évolue régulièrement. Les méthodes de calcul et la liste des indicateurs clés peuvent être amenées à changer dans les prochaines années.

Les facteurs d'émission (FE) proviennent de bases de données, publiques et privées, contenant parfois des milliers de ces facteurs. Comparer directement les FE n'est pas trivial comme les méthodologies de calcul peuvent différer quelque peu d'un standard à un autre. Dans le cadre du développement de l'outil *Ecow*, les FE privilégiés sont ceux figurant dans le tableau ci-dessous.

Produit/activité	Source utilisée
Béton	SNBPE (Syndicat National du Béton Prêt à l'Emploi)
Ciment	ATHIL (association technique de l'industrie des liants hydrauliques)
Acier	Ecoinvent
Transport	Ademe – Base carbone

Tableau 1. Source des principaux facteurs d'émission utilisés

Les valeurs des FE sont entachées d'incertitude. Au-delà de la valeur en elle-même, il est essentiel de comparer des fourchettes d'incertitude pour adopter une approche prudente dans l'interprétation des résultats.

3.3. Module *Ecow* de la plateforme *Orbow*

Différents outils existent pour calculer les émissions de GES des projets de génie civil. Toutefois, un examen approfondi a révélé que ces outils présentent des limitations, notamment en ce qui concerne les paramètres nécessaires pour les calculs. Cela a motivé Terrasol à concevoir le module *Ecow* sur la plateforme web *Orbow*.

Ce module *Ecow* permet d'évaluer les émissions de GES des projets géotechniques de tout type (terrassement, fondations, soutènements, renforcements de sol, etc.) et de les comparer. Basé sur une synthèse des bases de données disponibles, le développement a principalement visé à rationaliser les paramètres d'entrée, adaptant ainsi l'outil au niveau

de connaissances d'un ingénieur d'étude. Des fonctionnalités avancées sont également disponibles, répondant, par exemple, aux besoins d'un ingénieur travaux ayant un niveau de connaissance plus approfondi.

4. Présentation du cas d'étude

Dans le cadre de cet article, un projet de réparation d'un ouvrage de soutènement supportant une chaussée est étudié. L'hypothèse est que la poussée induite par les charges variables en tête du mur entraîne des déplacements excessifs. Pour conforter le mur, trois solutions techniques différentes ont été comparées (cf. Figure 1) :

- Solution 1 : une dalle sur micropieux ;
- Solution 2 : une paroi clouée ;
- Solution 3 : des tirants d'enserrement et un contre rideau (micro-berlinoise).

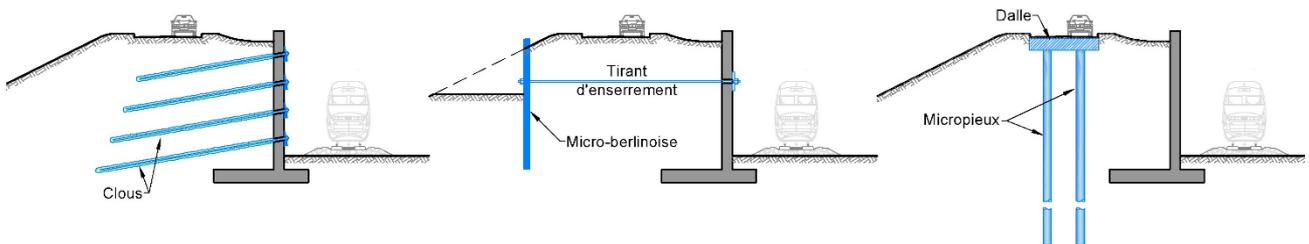


Figure 1. Schéma des trois solutions techniques étudiées

Pour garantir une comparaison pertinente, des calculs de dimensionnement géotechnique ont été effectués afin de déterminer les dimensions des clous, des micropieux, des tirants, etc. Bien que les solutions présentent des avantages et contraintes techniques variées, l'objectif était d'atteindre une performance technique similaire.

5. Empreinte carbone des différentes solutions de conception

5.1. Solution 1 : dalle sur micropieux

Les principales caractéristiques techniques pour la solution de dalle sur micropieux sont les suivantes :

- 14 micropieux de longueur 15 m, de diamètre 250 mm, armés de tubes pétroliers ;
- Tubage provisoire ;
- Survolume lié à l'injection de 5 %.

La longueur significative des micropieux s'explique par la nécessité de les ancrer dans l'horizon porteur sous les remblais de chaussée.

Cette solution conduit aux émissions de GES suivantes (cf. Tableau 2 et Figure 2).

	Fourchette d'incertitude		
	Basse	Moyenne	Haute
Émissions (t_{eq} CO₂)	19.1	26.6	34.6

Tableau 2. Evaluation des émissions de GES de la solution dalle sur micropieux

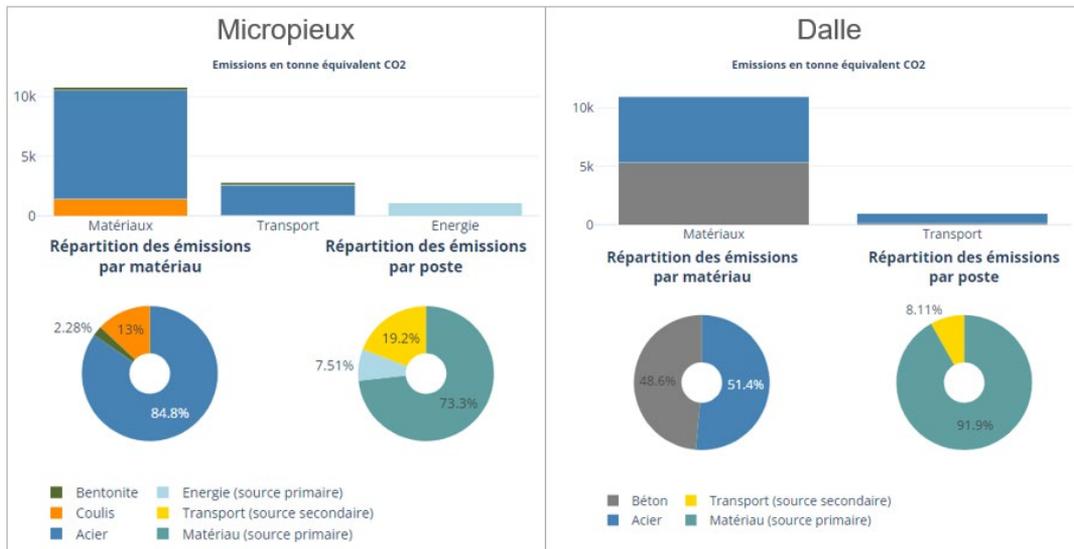


Figure 2. Evaluation des émissions de GES fourchette moyenne de la solution micropieux

5.2. Solution 2 : paroi clouée

Les principales caractéristiques techniques pour la solution de paroi clouée sont les suivantes :

- 342 ml de clous, de diamètre de forage 120 mm, avec barres GEWI ;
- Survolume de coulis de 5 % ;
- Béton projeté sur 35 m², d'épaisseur 15 cm, avec 2 nappes de treillis soudés.

Cette solution conduit aux émissions de GES suivantes (cf. Tableau 2).

	Fourchette d'incertitude		
	Basse	Moyenne	Haute
Émissions (t_{eq} CO₂)	9.2	13.2	18.5

Tableau 3. Evaluation des émissions de GES de la solution paroi clouée

5.3. Solution 3 : tirants d'enserrement

Pour cette troisième solution technique, des tirants d'enserrement sont mis en place à travers le mur et ancrés dans un contre-écran de type micro-berloise, réalisée dans le talus à l'arrière du mur.

Les principales caractéristiques techniques pour la solution de tirants d'enserrement sont les suivantes :

- 8 tirants horizontaux (80 ml) de diamètre 50 mm ;
- 8 profilés HEB 180 de hauteur 3.5 m ;
- Béton projeté sur 19 m², d'épaisseur 15 cm, avec une nappe de treillis soudés.

Cette solution conduit aux émissions de GES suivantes (cf. Tableau 4).

	Fourchette d'incertitude		
	Basse	Moyenne	Haute
Émissions (t_{eq} CO₂)	5.8	8.4	12.6

Tableau 4. Evaluation des émissions de GES de la solution tirants d'enserrement (hors terrassement)

La particularité de cette solution réside dans la nécessité préalable de créer une plateforme de travail pour réaliser la paroi micro-berlinoise avec la précision requise. En complément du calcul précédent, il convient donc d'inclure dans l'étude comparative les émissions liées aux mouvements de terre qui surviennent :

- Lors de l'extraction des matériaux ;
- Pendant les opérations de transport des matériaux :
 - Depuis le site d'apport ;
 - En interne sur le chantier ;
 - Jusqu'au site de mise en dépôt à la fin des travaux ;
- Lors de la mise en œuvre des remblais en début de chantier et de leur excavation à la fin du chantier.

Pour estimer ces émissions, les facteurs agrégés de niveau 2 issus du travail du Cerema « *Recommandations pour l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre des projets routiers* » sont utilisés. Sur la base des hypothèses formulées pour ce cas d'étude, ces travaux de mouvements des terres (500 m³) conduisent aux émissions suivantes (cf. Tableau 5).



	Fourchette d'incertitude		
	Basse	Moyenne	Haute
Émissions (t_{eq} CO₂)	1.9	3.1	4.3

Tableau 5. Evaluation des émissions de GES de la solution tirants d'enserrement (mouvement des terres uniquement)

5.4. Discussion

Un graphique comparatif des émissions de GES sont fournis ci-après (cf. Figure 3) pour les trois solutions : dalle sur micropieux (variante 1), paroi clouée (variante 2) et tirants d'enserrement (variante 3).

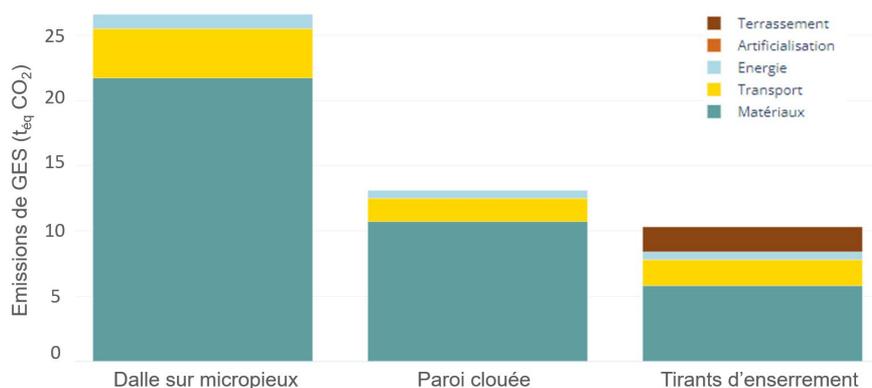


Figure 3. Comparaison de l'empreinte de GES fourchette moyenne des trois solutions par matériaux

La comparaison des trois solutions techniques sur le plan de l'empreinte carbone montre que la variante 1 (dalle sur micropieux) est plus émissive que les deux autres (et ce quelle que soit la fourchette d'incertitude considérée). Cela s'explique par le fait que les micropieux ont une longueur de 15 m afin d'atteindre la couche d'ancrage, ce qui conduit à des quantités importantes de matériaux (armatures et coulis).

Les variantes 2 et 3 montrent des niveaux similaires d'émissions de GES. Cela s'explique par le fait que les deux solutions présentent des quantités de matériaux comparables. Les clous s'apparentent aux tirants, le parement en béton projeté de la paroi clouée s'apparente

à la micro-berlinoise. Pour cette dernière, bien que la surface de béton projeté soit limitée, les profilés métalliques augmente l'empreinte carbone.

La solution « tirant d'enserrement » s'avère être la moins émissive en GES. Dans le cas présent, il est notable que les critères environnementaux ne sont pas en opposition aux critères financiers. En effet, la variante 3 présente le coût financier le plus bas des trois. Par ailleurs, la solution la plus émissive (dalle sur micropieux) émet deux fois plus d'émissions de GES que la solution paroi clouée, bien que les deux présentent des coûts financiers similaires.

6. Impact du cadre normatif

6.1. Discussion sur le niveau de sécurité

Outre l'analyse comparative de variantes, il est intéressant d'adopter une approche plus large et d'examiner l'impact des facteurs de sécurité sur les émissions de GES. Dans le cadre du formalisme des Eurocodes et, de manière générale, des codes utilisant le principe de dimensionnement aux états limites, un facteur de sécurité est appliqué sur les résistances. Cela correspond implicitement à une limitation des déplacements, mais l'évaluation des déplacements n'est pas pour autant vérifiée.

Pour certains ouvrages, les tassements ou déplacements horizontaux n'affectent pas le bon fonctionnement, ouvrant ainsi la possibilité d'optimiser davantage en adoptant des taux de travail plus élevés. Ces propos doivent être nuancés par le fait que dans certains cas, réduire le facteur de sécurité peut entraîner l'activation de mécanismes de second ordre. L'objet n'est donc pas d'éliminer toute la marge de sécurité, mais plutôt de la rationaliser au cas par cas en vue d'optimisation le cas échéant.

6.2. Impact sur l'empreinte carbone de la solution micropieux

Dans cette partie, il est choisi de s'intéresser à la solution de dalle sur micropieux et plus précisément uniquement à la problématique de chargement axial. Afin de simplifier le problème, il est considéré une seule couche de sol avec les propriétés suivantes :

- Module pressiométrique $E_M=8$ MPa
- Coefficient rhéologique $\alpha=0.33$
- Pression limite pressiométrique nette $p_i^*=800$ kPa
- Frottement axial unitaire limite $q_s=110$ kPa

L'analyse porte sur la modulation du coefficient de sécurité global. Le cas de l'ELS caractéristique est considéré avec une charge de 500 kN par micropieu.

Trois aspects sont étudiés en parallèle :

- Portance, calculée à l'aide du module *Fondprof* (*Foxta*) ;
- Tassement, calculé à l'aide du module *Taspie+* (*Foxta*) ;
- Emissions de GES, calculées à l'aide du module *Ecow* (*Orbow*).

Seul le terme de frottement est considéré comme il s'agit de micropieux. Le facteur de sécurité globale sur la résistance au frottement (Q_s) en accord avec la norme NF P 94-262/A1 pour l'ELS caractéristique vaut $1.98 \left(\frac{\gamma_R}{\beta_s} \cdot \gamma_{R,d1} \cdot \gamma_{R,d2} \right)$.

Les lois de transfert utilisées pour caractériser le frottement s'appuient sur la formulation semi-empirique à deux paliers proposée par Frank et Zhao (applicable en théorie en deçà de la charge de fluage, mais appliqué ici pour tous les cas étudiés à titre purement indicatif). La Figure 4 et la Figure 5 montrent que pour le présent cas d'étude : en diminuant le facteur de sécurité global sur la portance de 2 à 1.5 (correspondant à la charge de fluage), le tassement est multiplié par 1.4 (de 5 mm à 7 mm, soit une augmentation acceptable) tout en réduisant significativement les émissions GES. Pour un coefficient de sécurité inférieur, la charge de fluage est dépassée et les tassements divergent logiquement.

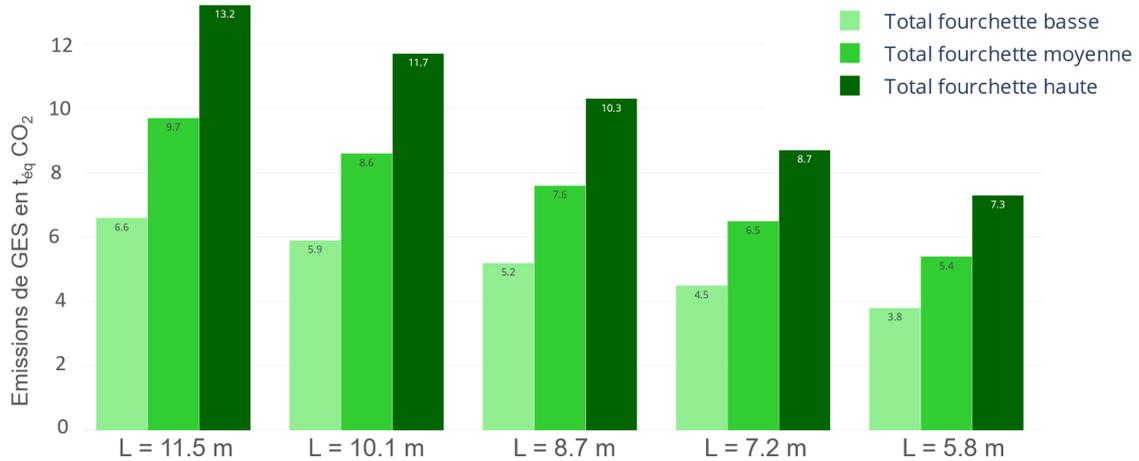


Figure 4. Comparaison des émissions carbone des 14 micropieux en fonction de leur longueur

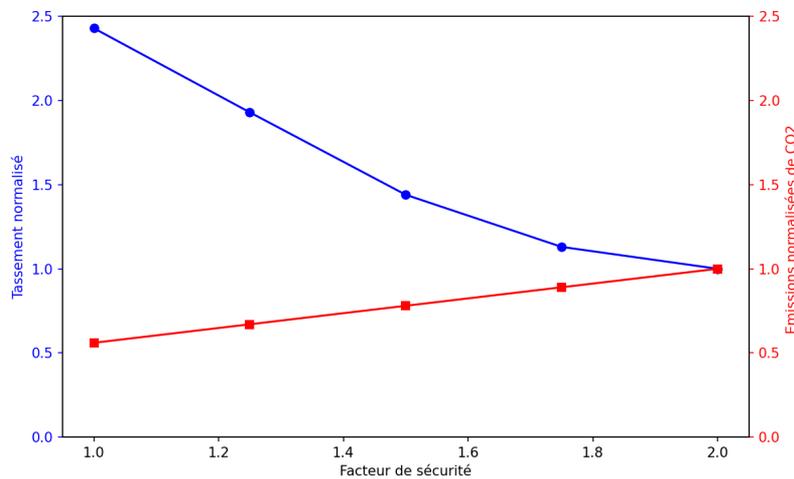


Figure 5. Tassement normalisé et émissions normalisées de GES en fonction du facteur de sécurité sur la portance à l'ELS caractéristique

Il n'est évidemment pas question de supprimer les sécurités dans le dimensionnement, mais le cas d'étude permet d'illustrer l'intérêt d'optimiser les marges de sécurité en s'interrogeant sur l'acceptabilité des déformations. Une réduction du facteur de sécurité jusqu'à 25% entraîne une diminution des émissions de GES de l'ordre de 20 à 25%, tout en générant une augmentation de tassement très limitée. Les abattements normatifs actuels sont en effet calés pour rester dans le domaine élastique, et il reste une marge avant de passer dans le domaine de plasticité. Cette conclusion illustre l'intérêt de développer des approches calculatoires moins conventionnelles, en réinterrogeant les coefficients de sécurité pris en compte dans certaines combinaisons et en affinant la façon dont les déplacements des ouvrages sont estimés au cours du temps en fonction des différents chargements auxquels ils sont soumis. Le développement de telles approches ouvrirait des perspectives intéressantes pour les projets neufs mais aussi projets de réhabilitation, en offrant un meilleur taux de travail. La réduction des facteurs de sécurité ne peut néanmoins être envisagée sans une bonne connaissance des terrains et de leurs caractéristiques, ce qui va de pair avec une campagne de reconnaissance fournie et adaptée.

Les résultats obtenus apparaissent cohérents et peuvent s'expliquer par le fait que pour un monocouche, la longueur d'un micropieu varie de manière directe avec le coefficient de sécurité. L'absence de tubage et la mise en place de l'armature sur toute la hauteur du micropieu entraînent une proportionnalité des quantités de matériaux (coulis, acier et bentonite) avec le facteur de sécurité. En conséquence, les émissions du poste « matériaux » évoluent proportionnellement aux quantités de matériaux.

Les émissions du poste « transport » sont calculées sur la base d'un nombre de « véhicules kilomètres ». En raison des quantités limitées de matériaux utilisées, les camions ne sont pas pleinement chargés, ce qui entraîne une absence de variation de ce poste, indépendamment de la longueur des micropieux. Ces émissions représentent 8% du total. En effectuant un second calcul avec 100 micropieux au lieu de 14, les émissions de ce poste diminuent à 4% ce qui ne remet pas en cause les conclusions de l'étude.

Les émissions du poste « énergie » sont évaluées sur la base d'un ratio avec les émissions des postes « matériaux » et « transport ». Ainsi, elles sont donc pratiquement proportionnelles à la longueur des micropieux et, par extension, au facteur de sécurité.

Au global, les émissions de carbone sont donc quasi proportionnelles à la longueur des micropieux. Ainsi, la relaxation du critère de tassement permet de diminuer de façon significative les émissions.

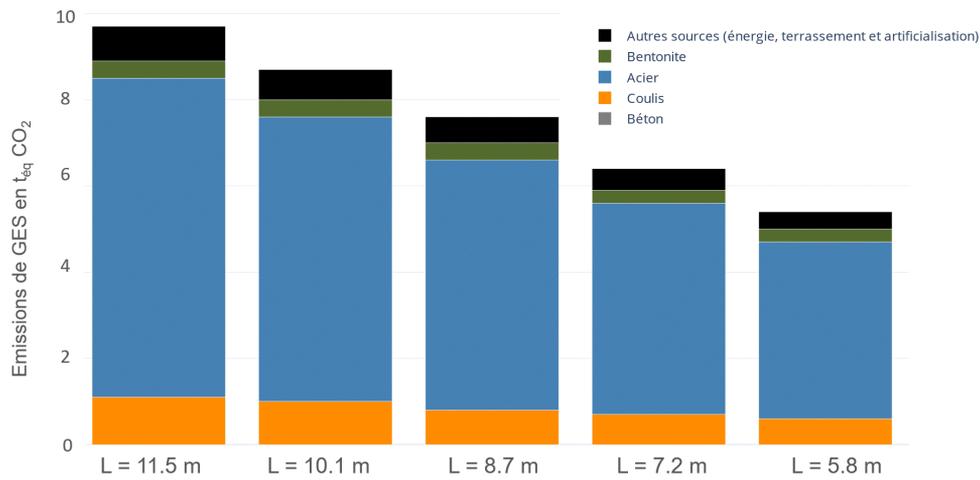


Figure 6. Comparaison des émissions de GES fourchette moyenne des 14 micropieux par matériau en fonction de leur longueur

7. Conclusion

Cet article expose la réalisation d'un calcul des émissions de GES d'un projet géotechnique. Dans une première section, l'empreinte carbone de trois variantes très différentes techniquement est comparée. Cela souligne que, outre l'optimisation des ouvrages, il peut être bénéfique de repenser leur conception. Dans une seconde section, l'influence du coefficient de sécurité sur la vérification de la portance est discutée, en analysant son impact sur le tassement vertical et les émissions de GES.

Pour aller plus loin, sur le premier volet, il serait nécessaire de calculer l'impact environnemental pour les autres indicateurs afin d'assurer la complétude de la comparaison. Concernant le second volet, il convient de repenser les règles de dimensionnement pour permettre des taux de travail plus importants des fondations.

8. Références bibliographiques

- CEREMA (2020). Recommandations pour l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre des projets routiers, 2020.
- NF EN 15804+A2 (2019). Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits – Règles régissant les catégories de produits de construction.
- NF P 94-262/A1 (2018). Justification des ouvrages géotechniques — Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 — Fondations profondes — Amendement 1