

Conception écoresponsable des fondations : retour d'expérience et outil décisionnel

Sustainable Foundation Design: Case Study Insights and Decision-Making Tool

Nicolle GAZZOLI NUNES¹, Rasool MEHDIZADEH², Umur SALIH OKYAY¹

1 INFRANEO, Pantin, France

2 École des Mines de Nancy - Université de Lorraine, Nancy, France

RESUME : La réduction de l'empreinte carbone des ouvrages impose d'intégrer l'ACV dès l'amont des projets. En géotechnique, les fondations profondes présentent des impacts élevés, alors que des techniques d'amélioration/renforcement des sols peuvent offrir de meilleurs compromis. Nous présentons une méthodologie d'aide à la décision en deux temps : (i) un logigramme qui présélectionne les techniques applicables selon les conditions de site (nature et profondeur des sols, nappe, voisinage sensible, contraintes d'exécution) ; (ii) un écoscore basé sur l'AHP (Analytic Hierarchy Process) hiérarchisant les alternatives avec des critères environnementaux priorités. Conformément au cadre ACV du secteur, l'évaluation préliminaire porte sur A1–A3 (matériaux) et A5 (énergie de chantier), permettant une comparaison robuste en phase pré-projet. La démarche est illustrée par un cas académique réel (bassin circulaire sur remblai sableux saturé sur argiles molles) où la solution exécutée, inclusions rigides, est confrontée aux scénarios présélectionnés. L'écoscore met en évidence que, sous conditions de granularité et faible teneur en fines, la vibrocompaction peut constituer une alternative moins carbonée, sous réserve de maîtriser les vibrations vis-à-vis des avoisinants. La méthode ne remplace pas une ACV quantifiée complète; elle fournit un classement comparatif traçable pour orienter les choix, avant dimensionnement détaillé et intégration d'éléments sensibles (A4 transports, coûts, délais, nuisances).

ABSTRACT: Reducing the carbon footprint of structures requires integrating Life Cycle Assessment (LCA) from the early stages of a project. In geotechnical engineering, deep foundations have significant environmental impacts, whereas soil improvement or reinforcement techniques can offer more balanced solutions. We propose a two-step decision-making methodology: (i) a flowchart that preselects applicable techniques according to site conditions (soil type and depth, groundwater table, sensitive surroundings, execution constraints); (ii) an *eco-score* based on the Analytic Hierarchy Process (AHP), ranking the alternatives according to prioritized environmental criteria. In line with the sector's LCA framework, the preliminary assessment focuses on stages A1–A3 (materials) and A5 (construction energy), allowing for a robust comparison during the pre-design phase. The approach is illustrated through a real academic case study (a circular basin on a sandy embankment over soft clay) where the implemented solution—rigid inclusions—is compared with preselected alternatives. The eco-score highlights that, under granular and low-fines conditions, vibrocompaction can represent a lower-carbon alternative, provided vibration impacts on nearby structures are properly managed. While this method does not replace a full quantified LCA, it provides a traceable comparative ranking to guide design choices prior to detailed sizing and integration of sensitive factors (A4 transport, cost, schedule, and nuisance considerations).

Mots-clés : Fondations ; Amélioration du sol ; ACV ; Évaluation environnementale ; Outil décisionnel.

1 INTRODUCTION

La conception géotechnique s'inscrit progressivement dans une logique de réduction des émissions de gaz à effet de serre, conformément à la Stratégie Nationale Bas-Carbone visant la neutralité carbone à l'horizon 2050 (Halfon et al., 2026 ; MTEs, 2020). Les fondations profondes constituent l'un des postes les plus émissifs du secteur, principalement liés à la production des matériaux cimentaires et métalliques. Dans de nombreux contextes géotechniques, les

techniques d'amélioration ou de renforcement des sols peuvent constituer des alternatives moins carbonées.

Le présent article propose une méthodologie intégrée pour guider la sélection des techniques, combinant :

- un logigramme d'aide à la décision pour présélectionner les techniques adaptées au contexte du site,
- une analyse environnementale intégrée dans une approche multicritère (AHP), produisant un

écoscore pour hiérarchiser des techniques présélectionnées.

Le développement de l'outil a été réalisé intégralement sous Excel, à l'aide du langage de programmation VBA (Visual Basic for Applications).

La méthodologie est ensuite testée sur un cas réel documenté par Okyay et Briançon (2012), issu du projet national ASIRI, relatif à un bassin circulaire fondé sur inclusions rigides à Pont-Audemer. Ce cas d'étude permet d'illustrer concrètement le fonctionnement de l'outil et de comparer les résultats obtenus avec la solution effectivement mise en œuvre, tant en termes de performance technique que d'impact environnemental.

Cet outil est destiné à la phase de pré-projet afin d'orienter vers un choix plus responsable, à la fois sur le plan technique et écologique.

2 CADRE THEORIQUE

2.1 Analyse du Cycle de Vie (ACV)

L'évaluation environnementale menée dans ce travail vise à intégrer l'impact climatique des techniques d'amélioration et de renforcement des sols dans le processus de décision, en utilisant les émissions de gaz à effet de serre (GES), exprimées en équivalent CO₂, comme indicateur principal.

Cette évaluation repose sur l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) selon la norme EN 15978, qui permet de quantifier les impacts environnementaux sur l'ensemble du cycle de vie, structuré en modules : A1–A3 (production des matériaux), A4–A5 (transport et

mise en œuvre), ainsi que B, C et D (phase d'usage, fin de vie et bénéfices hors système).

Selon la norme EN 15978, l'inclusion des modules A1–A3 est obligatoire dans toute ACV de bâtiments ou composants. Des simplifications ou règles de coupure sont autorisées, notamment dans le cadre d'études comparatives, à condition d'être documentées et justifiées.

Dans le domaine géotechnique, certaines spécificités permettent de réduire encore le périmètre des émissions considérées. Les structures étant généralement permanentes, peu modifiées en phase d'exploitation, très peu entretenues et non retirées en fin de vie, les phases B, C et D sont donc considérées comme négligeables (Antoinet, Saadé et Sarelli, 2024).

Comme l'illustre la Figure 1, les émissions de gaz à effet de serre liées aux matériaux et à l'énergie consommée sur chantier représentent la part très largement majoritaire dans l'ensemble des techniques étudiées (souvent plus de 80–90 % du total). Ce constat justifie que, dans le cadre de cet outil préliminaire d'aide à la décision, l'évaluation environnementale soit limitée aux critères :

- C1 : Fabrication des matériaux (A1 à A3);
- C2 : Énergie consommée sur chantier (carburants et électricité pour la mise en œuvre).

Le module A4 (transport) n'est pas intégré comme un critère en raison de sa forte variabilité. Il devra néanmoins être pris en compte lors des étapes suivantes du projet, notamment pour les techniques nécessitant de grands volumes de matériaux.

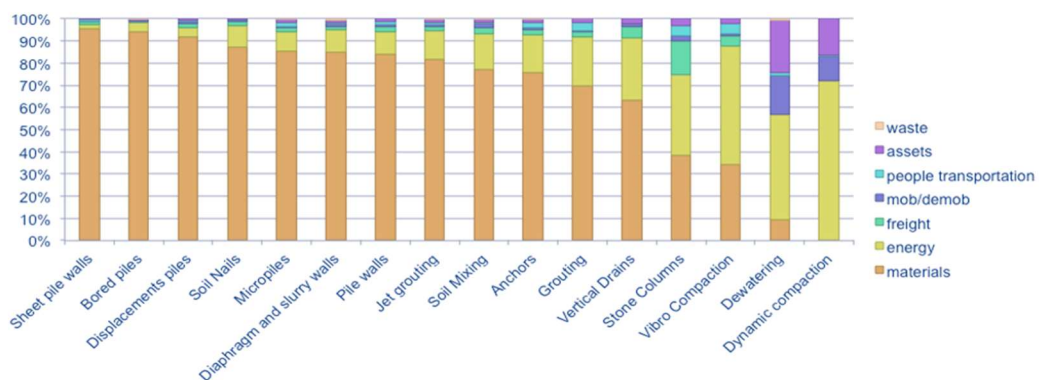


Figure 1 . Répartition moyenne des émissions selon les techniques géotechniques. (EFFC/DFI, 2023)

2.2 Méthode AHP

L'Analytic Hierarchy Process (AHP), développé par Saaty, est une méthode multicritère pour structurer des décisions complexes. Elle suit cinq étapes principales (Liang, 2003) :

- **Hierarchie** : définir l'objectif global et les critères (ex. choisir la technique émettant le moins de CO₂ avec la fabrication de matériaux et énergie de chantier comme critères).
- **Comparaisons par paires (binaire)** : comparer les critères et les alternatives deux à deux en

utilisant l'échelle de Saaty (2004), présentée dans le Tableau 1).

- **Vecteurs propres** : calculer les poids relatifs à partir des matrices de comparaison.
- Calculer l'indice de cohérence (CR)
- **Priorités finales** : combiner les poids des critères et les scores des alternatives pour obtenir le score global.

Tableau 1. Échelle proposée par SAATY (2004)

| Degrés d'importance | Explication |
|---------------------|--------------------------|
| 1 | Importance égale. |
| 3 | Faible importance |
| 5 | Importance forte |
| 7 | Importance très forte |
| 9 | Importance absolue |
| 2, 4, 6, 8 | Jugements intermédiaires |

Dans ce travail, le processus hiérarchique analytique (AHP) a été mobilisé pour intégrer la dimension environnementale dans le processus de décision. Il permet d'établir une hiérarchisation en comparant les alternatives selon des critères environnementaux pondérés. Cette méthode fournit ainsi un *écoscore* pour chaque technique, rendant possible une comparaison des options.

3 METHODOLOGIE

3.1 Techniques d'amélioration et renforcement

Une revue bibliographique fondée sur les ouvrages de référence (Briançon et al., 2018a, 2018b ; Queyroi et al., 1985 ; Schlosser et al., 1983) a permis d'identifier les principales techniques d'amélioration et de renforcement des sols : compactage dynamique, vibrocompactage, substitution dynamique, compactage à l'explosif, préchargement avec ou sans drains, consolidation atmosphérique, remplacement de sols, allègement, colonnes ballastées, colonnes confinées, inclusions rigides, injections de coulis, jet grouting, injections biologiques, résines expansives et Deep Mixing Method (DSM). Les caractéristiques essentielles de chaque technique ont été synthétisées afin d'alimenter le logigramme de présélection des méthodes adaptées au contexte du site.

3.2 Aide à la décision : logigramme

Le logigramme constitue une approche déterministe par filtres successifs, initiés après l'analyse de la sensibilité de l'ouvrage vis-à-vis des tassements admissibles, permettant d'écarter les méthodes incompatibles avec :

- La nature du sol (granulaire, fin, très compressible) ;
- La profondeur de traitement ;
- La présence d'une nappe phréatique ;
- La présence d'obstacles ou d'une couche résistante ;
- Les contraintes vibratoires en voisinage sensible.

L'objectif est d'obtenir une liste restreinte de techniques envisageables dès la phase AVP. Par exemple, des méthodes telles que le compactage dynamique sont adaptées aux sols granulaires, mais inefficaces sur des sols fins.

Cette présélection ne constitue pas un dimensionnement mais une aide préliminaire permettant d'éviter des analyses détaillées injustifiées. La structure du logigramme repose sur l'état de l'art et les retours d'expérience consolidés dans la littérature. Il ne constitue cependant pas un outil fermé ou normatif. Sa conception est évolutive et permet l'intégration progressive de nouvelles techniques ou variantes innovantes à mesure qu'elles sont documentées et validées.

3.3 Évaluation environnementale :

L'évaluation environnementale vise à comparer les techniques présélectionnées en termes d'émissions de gaz à effet de serre (GES). Conformément au Cadre Théorique, seule une ACV simplifiée a été utilisée, centrée sur les postes majoritaires du cycle de vie.

Avec les critères et l'objectif définis, la méthode AHP a été appliquée pour hiérarchiser les alternatives.

La première étape consiste à comparer l'importance relative des critères. La littérature (Kendall et al., 2017) indique que les émissions sont généralement dominées par la fabrication des matériaux cimentaires et métalliques. Sur cette base, une importance légèrement prépondérante a été attribuée au critère C1 par rapport à C2, correspondant à la valeur 3 selon l'échelle de Saaty (Tableau 2).

Tableau 2. Matrice de comparaison entre les critères

| | C1 | C2 | Poids |
|----|------|----|-------------|
| C1 | 1 | 3 | 0,75 |
| C2 | 0,33 | 1 | 0,25 |

Ensuite, des comparaisons par paires entre les techniques ont été réalisées : pour chaque critère, les alternatives sont comparées deux à deux selon l'échelle de Saaty, en évaluant leur impact relatif.

- Pour C1, la comparaison repose sur l'intensité carbone des matériaux usuels (ciment, béton, acier), estimée à partir de bases de données

reconnues, comme ADEME, INIES, OMEGA TP (Tableau 3).

- Pour C2, l'analyse qualitative considère les puissances typiques des machines nécessaires à chaque méthode, en s'appuyant sur la littérature technique et les catalogues industriels.

Enfin, les scores relatifs et l'écoscore global sont calculés. Les matrices de comparaison permettent

d'obtenir des poids par vecteur propre pour chaque technique et chaque critère. Les scores sont ensuite pondérés selon l'importance attribuée aux critères afin de produire un écoscore global classant les alternatives.

Tableau 3: Ordres de grandeur des facteurs d'émission

| | Étape de production (A1-A3) | Étape du processus de construction | Unité | Source |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|-----------------------|----------------|
| Acier issu de matière primaire « vierge » | 2211,00 | - | kgCO2e/t | ADEME,2025 |
| Acier issu de la filière recyclage. | 938,00 | - | kgCO2e/t | ADEME,2025 |
| Ciment Portland | 866,00 | - | kgCO2e/t | ADEME,2025 |
| Chaux hydraulique | 335-568 | - | kgCO2e/t | ADEME,2025 |
| Béton non armée (UNIVERSEL ECO - CERMIX) | 366,09 | 190,63 | kgCO2e/m ³ | INIES,2025 |
| Béton de propreté (HOFFMANN GREEN CEMENT TECHNOLOGIES) | 66,50 | 12,80 | kgCO2e/m ³ | INIES,2025 |
| Fondation en béton MCC1 - C25/30 - HORS ARMATURE | 558,36 | 13,74 | kgCO2e/m ³ | INIES,2025 |
| Inclusions Rigides remplissage béton [A4 = 0 km] | 1150,00 | 145,00 | kgCO2e/m ³ | INIES,2024 |
| Remblais légers de granulats d'argile expansée | 186,00 | 44,50 | kgCO2e/m ³ | INIES,2022 |
| Panneau de polystyrène expansé (PSE) réalisant une fonction de remblai léger sur 1 m ² | 6,06 | 0,79 | kgCO2e/m ² | INIES,2023 |
| Remblais légers de verre cellulaires concassé | 50,36 | 17,33 | kgCO2e/m ³ | INIES,2025 |
| Granulats « vierges » | 4,00 | - | kgCO2e/t | ADEME,2025 |
| Granulats issus de la filière recyclage | 3,00 | - | kgCO2e/t | ADEME,2025 |
| Dynamite | 3,37 | - | kgCO2e/kg | OMEGA TP, 2024 |

4 OUTIL DECISIONNEL

L'utilisateur renseigne les paramètres du projet dans l'onglet *Entrée* (Figure 2). Le code VBA de l'outil interroge et exploite ensuite la base de connaissances (onglet *Base_Données*), composée d'une table associant chaque méthode aux types de sols appropriés et d'une autre regroupant les méthodes d'amélioration et de renforcement avec leurs conditions spécifiques de mise en œuvre (nappe

phréatique, blocs, voisinage, etc.) ainsi que leur *écoscore*. Cette double structuration permet de croiser la compatibilité sol-méthode avec les contraintes spécifiques du projet, garantissant ainsi une sélection plus pertinente.

Par ailleurs, dans certains cas, la base de données signale un avertissement ("Attention") : la méthode n'est pas strictement exclue, mais elle nécessite des conditions particulières (par exemple un préforage en cas de couche résistante superficielle).

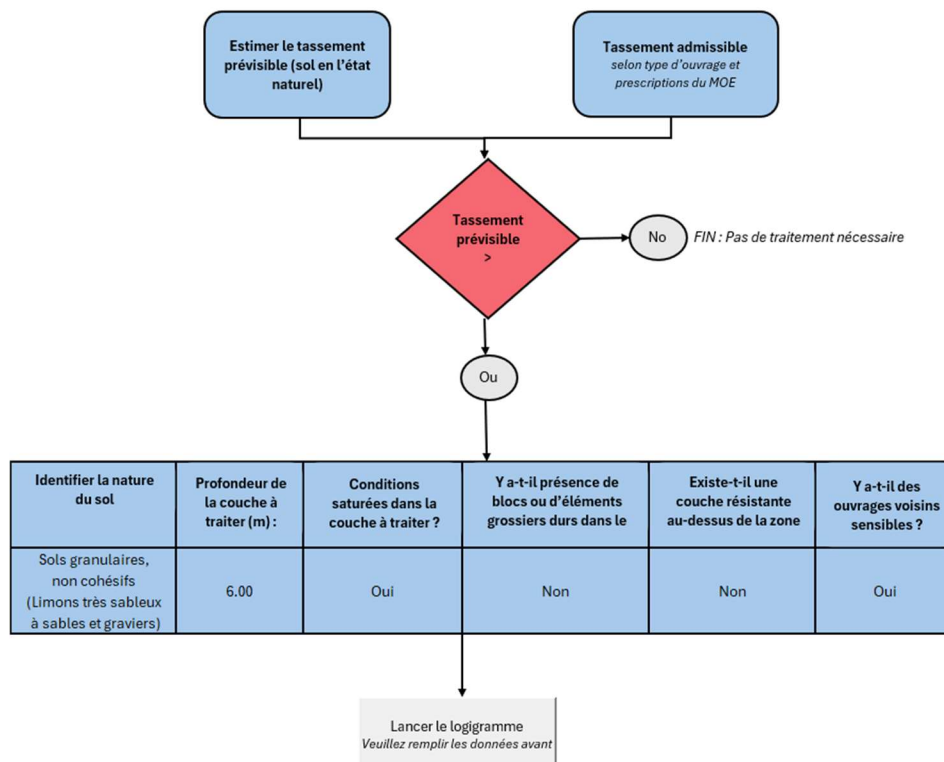


Figure 2 . Entrée du logigramme

Les résultats apparaissent dans l'onglet *Résultat* sous forme d'une liste hiérarchisée (Figure 3). Chaque méthode est accompagnée de son écoscore, converti en classe ECO, avec une mise en forme colorée facilitant la lecture du niveau de performance environnementale.

Les conditions particulières sont automatiquement reportées dans la colonne *Observations*, afin de guider l'utilisateur vers le choix le plus pertinent d'un point de vue technique et environnemental.

| Méthodes retenues | Option ECO | Observation |
|----------------------------------|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Vibrocompactage | A | • Avec des vibrations plus faibles que le compactage dynamique, l'emploi de la méthode est possible à proximité d'ouvrages existants. Un suivi des vibrations sur les ouvrages voisins reste toutefois nécessaire. • Sol adapté si <12 % de fins et <2 % d'argile ; efficace pour $q_c < 5$ MPa, inefficace si $q_c > 10$ MPa. » |
| Colonnes ballastées | B | • L'emploi de la méthode est possible à proximité d'ouvrages existants. Un suivi des vibrations sur les ouvrages voisins reste toutefois nécessaire. • Déconseillée en sols tourbeux (CMO > 5 %) ou fortement compressibles (vases, argiles molles > 0,5 m ; $c_u < 20$ kPa ou $q_c < 300$ kPa), surtout si ouvrages sensibles à la distorsion. |
| Injections - ciment et chimiques | C | |
| Injection solide | D | • Pour les sols fins (limons, argiles), la technique est applicable juste à des sols non saturés • Sols granulaires (au-dessus/sous nappe) privilégiés. Applicable à sols fins non saturés et de faible épaisseur. Limite : $p_l \leq 0,8$ MPa (sable), $\leq 0,5$ MPa (limon) ; $q_c \leq 8$ MPa (sable), ≤ 2 MPa (limon). |
| Deep mixing method | E | |
| Inclusions rigides verticales | F | |
| Jet grouting | G | |

Remarques :

- 1) Après sélection d'une technique, il est indispensable de vérifier les exigences de performance.
- 2) Cette première analyse prend uniquement en compte les impacts primaires identifiés comme prépondérants, à savoir la fabrication des matériaux et l'énergie de chantier.
- 3) Cet outil ne calcule pas d'émissions absolues de CO₂. Il applique la méthode AHP pour comparer qualitativement les techniques sur la base d'ordres de grandeur environnementaux. Les matrices de comparaison par critère sont disponibles dans l'onglet Ecoscore.
- 4) Le transport peut représenter une contribution majeure dans certains cas (matériaux granulaires, longues distances). Après la présélection et le premier prédimensionnement, il sera essentiel d'intégrer ce critère ainsi que d'autres contraintes (déchets, transport du personnel, etc.) pour aboutir à une évaluation complète et

Figure 3 . Résultat de l'application du logigramme

5 APPLICATION : CAS D'ETUDE

L'objectif de cette partie est de tester l'outil développé sur un cas académique réel et de porter, à l'aide de la méthodologie créée, un regard critique sur le projet déjà réalisé. L'application de l'outil permet de vérifier la cohérence des résultats avec les solutions effectivement mises en œuvre, tout en mettant en évidence des alternatives potentiellement plus durables et respectueuses de l'environnement.

Le projet étudié concerne un bassin circulaire en béton armé sur le site de la station d'épuration de Pont-Audemer (Okay & Briançon, 2012), d'un diamètre de 26 m et hauteur de 5 m, fondé sur un radier de 0,3 m soumis à une surcharge de 50 kPa. Le sol est constitué d'un remblai sableux lâche saturé d'environ 6 m reposant sur des argiles quasi-incompressibles (Figures 5 et 6). Afin de limiter les tassements (**tolérance inférieure à 2 cm**), une solution de renforcement par inclusions rigides a été retenue.

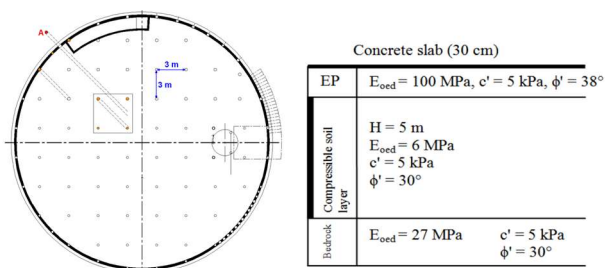


Figure 5. Plan de répartition des inclusions rigides et profil géotechnique simplifié (Okay et Briançon, 2012)

En appliquant le cas d'étude dans l'outil, la première étape du logigramme consiste à estimer le tassement prévisible du sol naturel, sous l'action des charges transmises par le radier du bassin. Le calcul du tassement a été réalisé conformément à la norme française PR NF P 94-261 (2013).

Pour les radiers de grandes dimensions fondés sur des sols stratifiés, la norme recommande l'utilisation de l'approche unidimensionnelle pour l'évaluation des tassements, puisque la déformation axiale des sols est prépondérante. Cette approche consiste à intégrer l'accroissement de contrainte verticale dû au chargement de la fondation, pondéré par la rigidité du sol en fonction de la profondeur :

$$s = q \int \frac{I_z}{D(z)} dz \quad (1)$$

où :

- s est le tassement vertical total au centre du radier,
- q est la contrainte appliquée par la fondation à la surface du sol,
- $I_z(z)$ est le coefficient d'influence de Boussinesq,
- $D(z)$ est le module de déformation du sol à la profondeur z .

Dans le cas d'un calcul à long terme, la norme recommande de prendre $D(z) = M(z)$, c'est-à-dire le module œdométrique M .

Le coefficient d'influence $I_z(z)$ est obtenu à partir de la solution classique de Boussinesq pour une surface circulaire uniformément chargée. D'après Poulos et Davis (2006), l'expression au centre du radier est donnée par :

$$I_z(z) = \frac{\Delta\sigma_v(z)}{q} = 1 - \left(1 + \frac{a^2}{z^2}\right)^{-\frac{3}{2}} \quad (2)$$

où a est le rayon du radier circulaire et z la profondeur.

Comme simplification, seul le tassement de la couche compressible a été pris en compte, en négligeant l'apport des couches de forme et des sols considérés comme quasi-incompressibles. Pour l'évaluation du coefficient d'influence moyen, on a retenu la valeur de I_z calculée au milieu de la couche compressible, ce qui permet d'obtenir une approximation représentative de la contrainte transmise en profondeur. Avec ces hypothèses, le tassement obtenu est de l'ordre de 4 cm au centre du radier.

En suivant le logigramme, les paramètres du projet ont été mis dans l'outil (Figure 2), permettant de filtrer les techniques selon les conditions de faisabilité. Sur cette base, la présélection des techniques applicables a conduit au classement présenté dans la Figure 3.

Un premier constat réside dans le fait que la solution effectivement mise en œuvre sur le site, à savoir le recours aux inclusions rigides, ressort également parmi les résultats obtenus avec la méthodologie appliquée. Cette concordance, qui reproduit par un raisonnement indépendant la décision technique du projet réel, constitue un indicateur positif de la pertinence de l'approche.

Cependant, comme l'illustre la Figure 3, la solution adoptée (*inclusions rigides*) n'est pas la plus favorable d'un point de vue environnemental selon l'outil développé. La première alternative à faible impact identifiée est le vibrocompactage (Option ECO A). Toutefois, si le vibrocompactage se révélait inadapté (par exemple en cas de teneur trop élevée en fines ou de présence d'argiles), la seconde solution proposée par l'outil serait les colonnes ballastées (Option ECO B).

Comme l'a souligné l'outil, les vibrations constituent un point de vigilance, d'autant plus que la

zone d'implantation du bassin se situe à seulement 22 m d'une structure existante de la station d'épuration. Briançon et al. (2018a) indiquent que « les vibrations générées par le vibrocompactage étant moins fortes que celles produites par le compactage dynamique » et que, pour cette raison, « il est possible d'utiliser cette méthode à proximité d'ouvrages existants là où le pilonnage ne serait pas possible ». Néanmoins, il demeure indispensable de mesurer et de contrôler les vibrations transmises aux structures voisines, à l'aide d'une instrumentation appropriée.

La prochaine étape consiste à sélectionner l'une des alternatives proposées par l'outil et à vérifier si sa performance est d'accord avec les exigences (par exemple le tassement admissible de 2 cm). Les colonnes ballastées ont été choisies pour l'analyse détaillée car elles s'appliquent à une gamme de sols plus large que le vibrocompactage, ce qui les rend plus représentatives, et leur pré-dimensionnement analytique, basé sur la méthode de Priebe, est plus simple à présenter de manière concise, facilitant la vérification de la viabilité de la solution.

La méthode de Priebe (1995) consiste à déterminer un facteur d'amélioration des tassements, β_0 , défini comme le rapport entre le tassement initial du sol et celui après traitement. Ce facteur dépend du taux d'incorporation α et de l'angle de frottement interne φ des colonnes, permettant ensuite de calculer le tassement final $S = S_0/\beta_0$.

$$\beta_0 = 1 + \alpha \left[\frac{5-\alpha}{(4K_{col}(1-\alpha))} \right] \quad (3)$$

$$a = \frac{Ac}{A} \quad (4)$$

$$Ka_{col} = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (5)$$

Dans l'exemple étudié, avec des colonnes de 0,8 m de diamètre disposées sur une maille de 1,8 m et un angle de frottement de 38°, le tassement obtenu est d'environ 2 cm, ce qui respecte le critère admissible. En pratique, une validation in situ (planche d'essais, essais CPT/pressiométriques) serait indispensable, et un maillage plus resserré ou un diamètre de colonne plus grand pourrait apporter une marge de sécurité supplémentaire.

Pour vérifier l'analyse environnementale de l'outil, une comparaison de l'empreinte environnementale de la technique retenue avec celle utilisée dans le cas d'étude a également été réalisée, en introduisant les données nécessaires dans la base EFFC-DFI Carbon Calculator (v5.7).

Pour le cas d'étude, 80 inclusions rigides (\varnothing 0,28 m, L = 5 m) ont été considérées, correspondant à 31 m³ de béton après application du facteur d'efficacité. Pour les colonnes ballastées, un maillage de 1,8 × 1,8 m a été adopté, ce qui a abouti à 164 colonnes (\varnothing 0,8 m), équivalant à 875 t de granulats.

Dans l'outil d'aide à la décision, le module A4 (transport) n'est pas intégré dans le calcul de l'écoposte. Toutefois, comme indiqué précédemment, ce paramètre devra être pris en compte aux étapes ultérieures du projet. Dans le cadre du cas d'étude, une distance d'approvisionnement de 6 km a donc été retenue, correspondant à des fournisseurs localisés à proximité du site et identifiés via une recherche cartographique.

Pour les émissions d'énergie du chantier (A5), les consommations de carburant ont été évaluées à partir des rendements et des données techniques des machines. Pour les inclusions rigides, la consommation d'une foreuse (16,5 L/h) et d'une pompe à béton (10,2 L/h) sur environ 28 h a été intégrée dans la calculatrice. Pour les colonnes ballastées, le calcul repose sur la consommation du vibrofonneur, estimée à partir de sa puissance nominale, ainsi que sur celle d'une pelle mécanique, pour un total d'environ 38 h d'exécution.

Les résultats détaillés du bilan global (A1–A5) sont présentés dans le Tableau 5. Ce bilan montre que les inclusions génèrent environ 14000 kgCO_{2e}, tandis que les colonnes totalisent approximativement 9000 kgCO_{2e}. Ainsi, dans le périmètre des phases avant-projet, les colonnes ballastées présentent une empreinte carbone nettement inférieure, confirmant la hiérarchie environnementale indiquée par l'outil, même en tenant compte de l'impact du transport.

Tableau 5. Résultat de l'estimation des émissions

| | Inclusions Rigides | Colonnes Ballastées |
|--------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Matériaux | fabrication : 10926 | fabrication : 3500 |
| kgCO_{2e} | transport (6km) : 58 | transport (6km) : 603 |
| Énergie | foreuse : 1511 | vibrofonneur : 2719 |
| kgCO_{2e} | pompe à béton : 952 | pelle mécanique : 1897 |
| Total | ≈ 14 000 kgCO _{2e} | ≈ 9 000 kgCO _{2e} |

6 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'outil développé propose une approche simple et opérationnelle pour intégrer, dès la phase pré-projet, une présélection technique et une première comparaison environnementale des méthodes d'amélioration et de renforcement des sols. Son application au cas d'étude a confirmé la cohérence de la démarche, dans la mesure où l'option effectivement mise en œuvre fait partie des solutions préconisées. L'application a également mis en évidence des alternatives potentiellement moins émissives que la

solution réalisée, ce qui a été confirmé par une analyse environnementale comparative entre une option identifiée comme moins émissive par l'outil et la technique effectivement mise en œuvre.

Ce travail constitue toutefois une première étape. Plusieurs améliorations sont envisageables :

- Élargir l'analyse environnementale en intégrant d'autres critères pertinents tels que le transport, les coûts, les délais d'exécution, la disponibilité de matériaux recyclés ou encore des indicateurs complémentaires d'ACV ;
- Tester d'autres méthodes multicritères, permettant de mieux représenter les incertitudes et d'améliorer la sensibilité des résultats par rapport aux jugements établis avec l'échelle de Saaty ;
- Laisser la pondération des critères au choix du maître d'ouvrage ou de l'utilisateur, afin d'adapter l'évaluation aux priorités du projet ;
- Enrichir l'interface, notamment en permettant l'intégration des caractéristiques géomécaniques du site pour un filtrage automatique plus précis des techniques applicables.

L'outil, simplifié à ce stade, constitue ainsi une base évolutive pour le développement d'un support décisionnel plus complet, combinant contraintes opérationnelles et performance environnementale.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADEME (2025). *Base Carbone®*. Agence de la transition écologique. Disponible en ligne : <https://www.bilans-ges.ademe.fr/fr/basecarbone> (consulté le 31/08/2025).
- AFNOR (2013). *NF P 94-261 – Fondations superficielles – Règles de calcul*. Association Française de Normalisation, Paris.
- Antoinet, E., Saadé, M. et Sarelli, A. (2024). *L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) appliquée aux ouvrages géotechniques*. In : Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur (JNGG 2024), Poitiers.
- Briançon L. et al. (2018a). *Amélioration et renforcement des sols : AMSOL . Tome 1*. Editions le Moniteur. Antony. Print.
- Briançon L. et al. (2018b). *Amélioration et renforcement des sols : AMSOL . Tome 2*. Editions le Moniteur. Antony. Print.
- CEN (2011). *EN 15978 – Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method*. Comité Européen de Normalisation.
- EFFC/DFI (2023). *Carbon calculator*. European Federation of Foundation Contractors, 2023.
- Disponible en ligne : <https://www.effc.org/how-we-operate/eco%e2%82%82-foundations/>(consulté le 28/08/2025)
- FNTF (2024). *OMEGA TP – Base de données : Facteurs d'émissions*. Annexe méthodologique. Fédération Nationale des Travaux Publics.
- FNTF (2025). *Calculatrice OMEGA TP – Outil de Modélisation Environnementale pour les Grands Aménagements de Travaux Publics*. Fédération Nationale des Travaux Publics. Disponible en ligne : <https://omegatp.axionable.fntp.fr/>(consulté le 31/08/2025)
- Halfon, I. et al. (2026). *French working group “geotechnics and climate change” – Carbon footprint of geotechnical structures: assessment and integration into design*. In: Proceedings of the 21st International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Vienna.
- INIES (2025). *Base de données environnementales et sanitaires de référence*. Disponible en ligne : <https://www.inies.fr/> (consulté le 31/08/2025).
- Liang, Wen-Yau. 2003. *The analytic hierarchy process in project evaluation: An RD case study in Taiwan*. Benchmarking, vol. 10, n° 5, p. 445-456.
- MTES (2020). *France's National Low Carbon Strategy – Synthesis*. Ministère de la transition écologique et solidaire, France, 2020.
- Okyay, U. S. Et Briançon, L. (2012). *Monitoring and numerical investigations of rigid inclusion reinforced concrete water tanks*. In: Proceedings of the 3rd International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Near East University, Nicosia, North Cyprus.
- Poulos H.G. et Davis E.H. (2006). *Elastic solutions for soil and rock mechanics*. Centre for Geotechnical Research, The University of Sydney, NSW, Australia.
- Priebe H.J. (1995). *The design of vibro replacement*. Ground Engineering, vol. 28, n°10, p. 31-37, 1995.
- Queyroi, D., Chaput, D. Et Pilot, G. (1985). *Amélioration des sols de fondation : choix des méthodes d'exécution*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), Paris. ISBN 2-7208-6660-1
- Saaty, T. (2004). *Decision making - the Analytic Hierarchy and Network Processes (AHP/ANP)*. Journal of Systems Science and Systems Engineering.
- Schlosser, F., Jacobsen, H. M. Et Juran, I. (1983). *Le renforcement des sols*. Compte rendu du 8e Congrès européen de mécanique des sols et des travaux de fondation, Helsinki, 23–26 mai 1983.