

VERS UNE NECESSITE D'EVALUER L'EMPREINTE CARBONE EN GEOTECHNIQUE

TOWARDS CARBON FOOTPRINT ASSESSMENT IN GEOTECHNICS

Grégory MEYER¹

Jocelyn BOUCHUT²

¹ Géotechnicien, EGIS, Paris, France

² Géotechnicien, EGIS, Grenoble, France

RÉSUMÉ – La sobriété carbone va devenir une nécessité dans notre métier de géotechnicien. La part liée au secteur du BTP représente une part significative des émissions nationales de CO₂ équivalent. En lien avec sa représentation au groupe de travail du CFMS « Géotechnique, changement climatique et développement durable », EGIS est en mesure de réaliser l'empreinte carbone des principales méthodes de construction géotechnique, que ce soit les fondations, les soutènements, les terrassements, ou encore les améliorations de sols. En se basant sur les résultats du projet TERCO2 « empreinte carbone des stratégies de terrassement », mais aussi sur un outil de calculs interne, nous présenterons un comparatif de différentes solutions techniques autour d'un même projet ferroviaire, mais aussi une analyse de l'empreinte carbone du puits d'essais d'Aulnay sous congélation et jet grouting ainsi que l'application à un projet ferroviaire de tramway.

ABSTRACT – Carbon restraint will become a necessity in our profession as geotechnicians. The construction sector accounts for almost a quarter of national CO₂ equivalent emissions. In connection with its representation on the CFMS working group on "Geotechnics, climate change and sustainable development", EGIS is in a position to carry out the carbon footprint of the main geotechnical construction methods, whether foundations, supports, earthworks or soil improvement. Based on the results of the TERCO2 project "carbon footprint of earthworks strategies", and on the carbon calculator of the European Federation of Special Foundations (EFFC-DFI), we will present a comparison of different technical solutions for the same railway project, as well as some typical ratios for each geotechnical structure.

1. Introduction

Le responsable de l'Organisation des Nations Unies, M. António Guterres, a déclaré en septembre 2023 que « l'effondrement climatique de notre planète avait commencé ». Derrière ces mots forts se cache une réalité d'urgence climatique. Depuis l'époque préindustrielle, la concentration en dioxyde de carbone (CO₂) a atteint un niveau jamais vu depuis 2 millions d'années (420 ppm), l'élévation accélérée du niveau marin (jusqu'à 4 mm par an) et le réchauffement des océans (à une vitesse supérieure à celle des 11 000 dernières années), la fonte des calottes glaciaires ou encore l'augmentation des températures moyennes de la planète de plus de 1 degré rappelle que les modifications climatiques sont une réalité. C'est dans ce cadre qu'EGIS se positionne en ingénierie motrice dans le développement durable. Cette transition passe par une quantification des émissions carbonées dans le monde de la géotechnique.

2. Principe d'un bilan carbone

Un bilan ou empreinte carbone peut paraître assez simple en première approche (Figure 1), puisqu'il est simplement constitué d'une somme de produits entre un facteur d'émission lié à un élément donnée et sa quantité (par exemple, l'acier ou le béton). La réalité est plus complexe car il existe une multitude de facteurs d'émission associés à un même matériau, fonction de sa composition, de sa destination, ou de son taux de recyclage. Par exemple, suivant le type de ciment utilisé, les émissions d'un béton peuvent varier d'un facteur 3,5. Sur l'acier, un ratio de plus de 2 existe entre un matériau issu du minerai et un provenant à 100 % d'une filière de recyclage.

Par ailleurs, de nombreuses sources de données de facteurs d'émission existent (ADEME, ATILH, ECOINVENT, INIES, OMEGA TP, etc.), qui ne fournissent pas les mêmes valeurs, ne serait-ce qu'un ordre de grandeur car les hypothèses, les périmètres de l'évaluation, la date ou les caractéristiques des produits ne sont pas les mêmes.

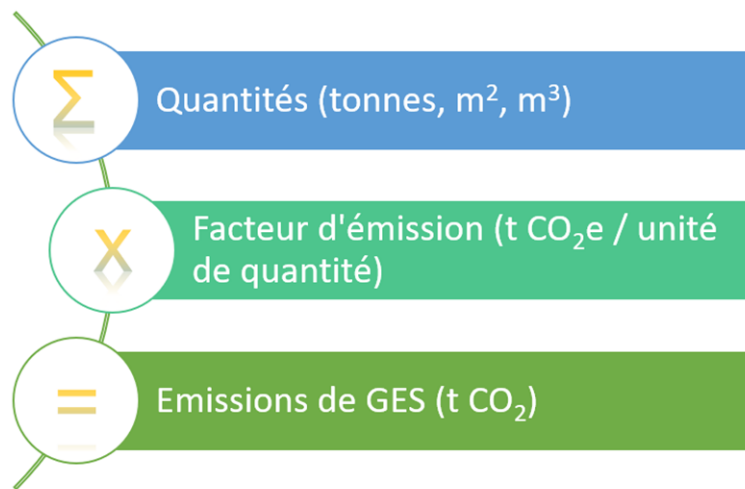


Figure 1 : Principe du calcul d'un bilan d'émissions de GES (EGIS ©).

Afin de simplifier les calculs, les données de sortie sont toutes exprimées en poids de CO₂ équivalent (kg ou tonnes). Cela signifie que les différents gaz à effet de serre (dans l'ordre de concentration dans l'atmosphère : vapeur d'eau H₂O, dioxyde de carbone CO₂, méthane CH₄, protoxyde d'azote N₂O et tétrafluorure de carbone CF₄) sont normalisés par rapport à leur potentiel de réchauffement global (PRG) individuel, ramené à celui du dioxyde de carbone. Sur une période de retour de 20 ans, le PRG du méthane est de 84, celui du protoxyde d'azote de 264, quand celui du CO₂ est unitaire par définition.

La prise en compte de l'empreinte carbone dans la conception d'un ouvrage est relativement récente et loin d'être systématique. En effet, les critères habituels de choix techniques sont généralement le coût, le planning, la faisabilité technique et les risques résiduels. Intégrer l'empreinte carbone dans les critères de décision amène bien souvent à changer de perspective. L'écoconception nécessite d'introduire l'empreinte carbone dans les critères décisionnels, tout au long de la vie du projet. Mais pour y parvenir, il est indispensable d'être en mesure d'établir de façon fiable le bilan des émissions de gaz à effet de serre (GES) des solutions possibles.

C'est dans cet optique que le comité français de mécanique des sols (CFMS) a lancé en 2022 un groupe de travail intitulé « géotechnique, changement climatique et développement

durable ». C'est également dans cet optique qu'EGIS, comme de nombreux confrères, a décidé de déployer un outil de calcul de l'empreinte carbone des ouvrages géotechniques. C'est en réalisant ces calculs que l'on peut dans une deuxième étape proposer une meilleure sobriété des ouvrages voire une modification technique en cas de bilan carbone excessif. Les ouvrages traités par l'outil de calculs sont les parois moulées, les fondations (profondes et superficielles), les renforcements de sol (colonnes ballastées, inclusions rigides, jet grouting), les murs de soutènement, les écrans composites, la congélation artificielle des sols, les murs en sols renforcés, les terrassements et les traitements de sols.

L'empreinte carbone d'un ouvrage géotechnique est fortement liée à la production des matières premières et à l'énergie dépensée pour leur mise en œuvre. C'est ce que reflète l'étude engagée par le regroupement de fondeur européen EFFC-DFI. Les retours d'expérience sur ces calculs montrent que les émissions secondaires en géotechnique (transport, immobilisations, déchets) ne représentent qu'une fraction de l'empreinte carbone totale (généralement comprise entre 5 et 15 % selon les techniques). Trois exemples vont être présentés dans cet article : le premier est issu du projet national TERCO2, le second du puits d'essai d'Aulnay-sous-Bois de la ligne 16 et le dernier traite du tram-train T13 phase 2. Les calculs ont été réalisés sur la base d'une feuille de calculs développée en interne, qui permet de traiter tous les aspects géotechniques des travaux de manière polyvalente (tout type de fondations, de renforcement de sols et de soutènements).

3. TERCO2 – Empreinte carbone des terrassements

Le projet TERCO2 – Empreinte carbone des stratégies de terrassement est un projet de recherche appliqué mené par Egis en 2022, en partenariat avec les Entreprises Valérian (Groupe Spie Batignolles) et Forézienne (Groupe Eiffage), avec le co-financement de la fondation FEREC. Son but était d'une part d'établir des facteurs d'émissions pour chaque activité de terrassement et d'autre part de comparer l'empreinte carbone de solutions techniques classiques de terrassement et de traitement des sols, sujet qui sera développé dans cet article.

Dans un premier temps, on s'intéresse au scénario le plus classique pour un chantier de terrassement avec les opérations de déblai en terrain meuble, transport de matériaux par tombereau sur chantier et mise en remblai, sans traitement. La Figure 2 présente les résultats obtenus, pour différentes distances de transport entre déblais et remblais. Comme attendu, plus la distance de transport est grande, plus les émissions sont élevées, d'où la nécessité évidente d'optimiser les distances de transport sur un chantier. On peut garder comme référence qu'au-delà d'une distance de 1.3 km entre déblai et remblai, le transport par tombereau sur chantier représente plus de 50% de l'empreinte carbone de l'ensemble.

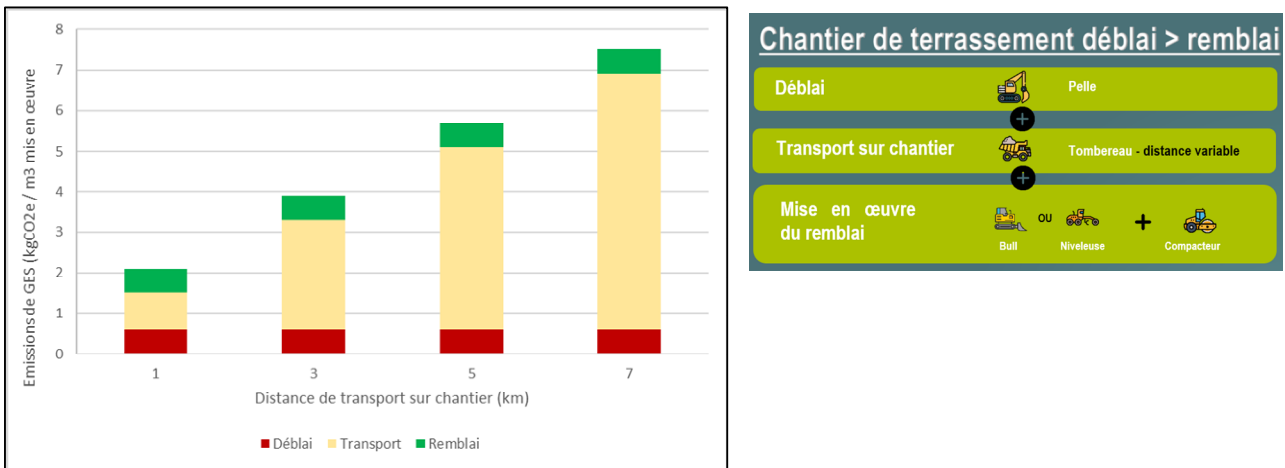


Figure 2 : Émissions de GES pour la réalisation d'un remblai à partir de matériaux de déblais sans traitement pour différentes distances de transport sur chantier (TERCO2 / EGIS ©)

Lorsqu'il est nécessaire de traiter les matériaux à la chaux pour les utiliser en remblai, l'empreinte carbone s'en trouve fortement impactée. Plusieurs scénarii de réalisation de remblai ont été modélisés, avec les opérations successives de déblai, transport des matériaux par tombereau sur chantier avec des distances variables, fourniture de chaux, traitement des matériaux avec des dosages variables et mise en remblai. Les résultats sont présentés sur la Figure 3. Ainsi, les émissions de GES sont multipliées par 10 entre un remblai non traité et un remblai traité avec 1% de chaux (pour des distances de transport de 1 km).

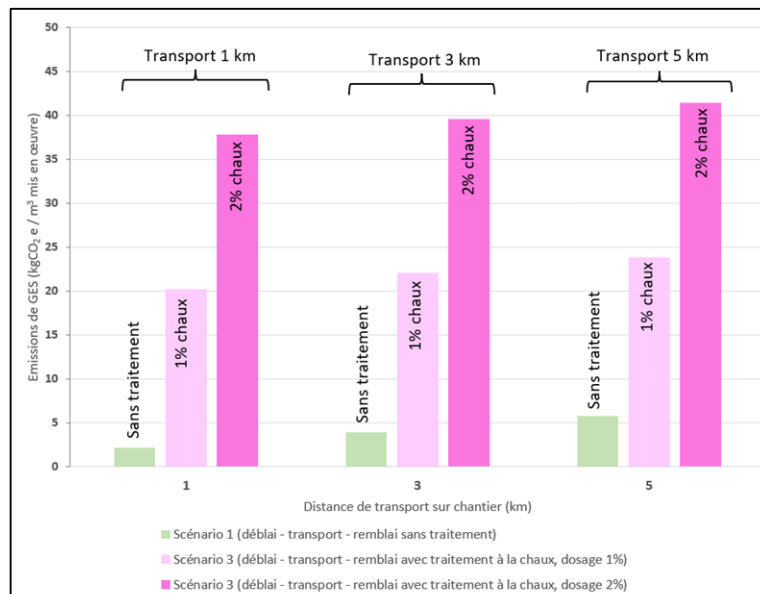


Figure 3 : Émissions de GES pour la réalisation d'un remblai à partir de matériaux de déblais non traités ou traités à la chaux à 1 ou 2 % et différentes distances de transport (TERCO2 / EGIS ©)

Dans les cas où les matériaux ne sont pas réutilisables à l'état naturel, mais uniquement après traitement à la chaux, une des alternatives à la solution de traitement est la fourniture et la mise en œuvre de matériaux issus de carrières, tandis que les matériaux extraits sont mis en dépôt définitifs. Les résultats présentés Figure 4 montrent ainsi que l'empreinte carbone d'un remblai traité à 1% de chaux est équivalente à celle d'un remblai réalisé en matériaux granulaires issus de carrière, avec une distance de transport sur route de 75 km.

Ces résultats montrent que le traitement à la chaux, qui est une solution couramment mise en œuvre en terrassement, génère des émissions de GES élevées. Cet impact négatif sur l'empreinte carbone doit être comparé aux nombreux avantages du traitement à la chaux : augmentation de la réutilisation des sols issus des déblais, en particulier dans des conditions météorologiques défavorables, réduction du recours à des carrières (donc un impact favorable sur les paysages, la biodiversité, les nuisances liées au transport, l'épuisement des ressources naturelles), potentiellement gain planning et coût.

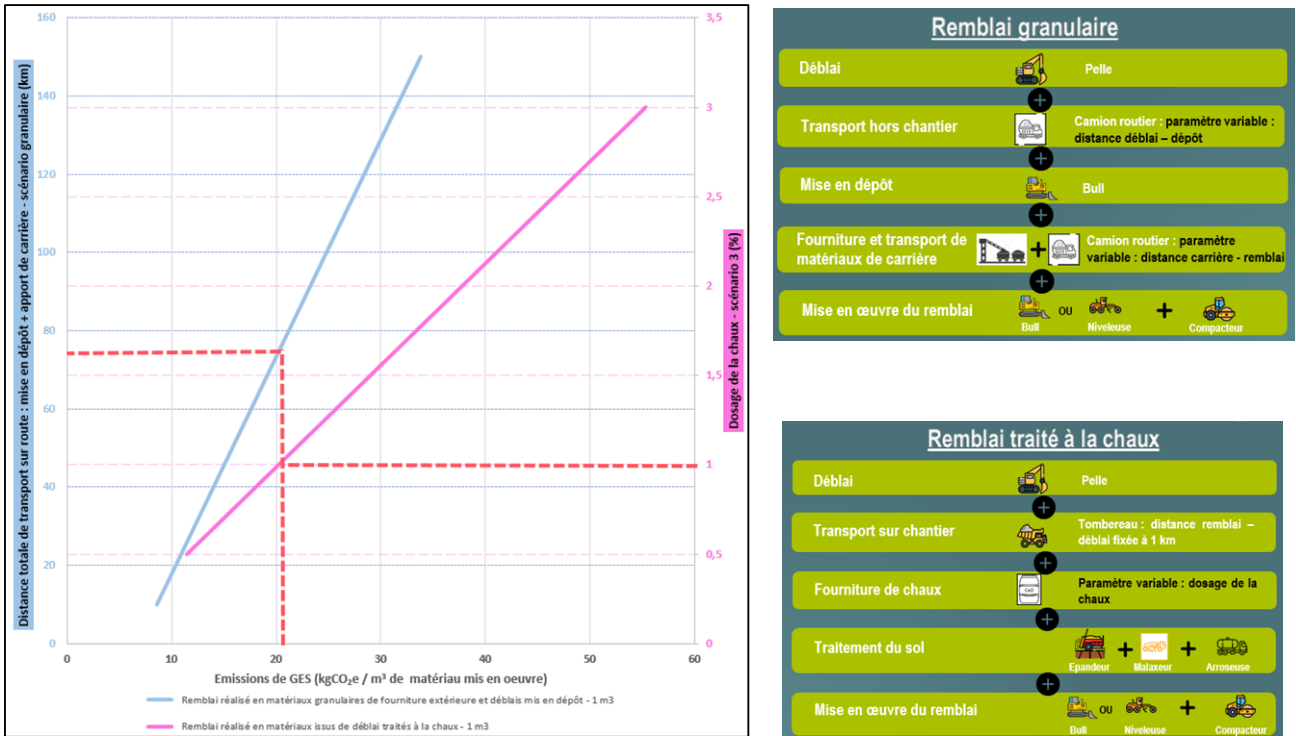


Figure 4 : Émissions de GES pour des solutions de remblai granulaire et de remblai traité à la chaux (TERCO2 / EGIS ©)

Le projet TERCO2 présente d'autres résultats sur le traitement en arase ou en couche de forme, avec différents liants (chaux, ciment, liants hydrauliques routiers). Les résultats, et plus généralement la réalisation de bilans de GES de solutions techniques en terrassement, permettent de visualiser les postes d'émissions les plus contributeurs et les leviers de réduction de l'empreinte carbone d'un projet de terrassement.

Tous les acteurs, aux différentes étapes du projet sont concernés. Dans le domaine des terrassements, des choix stratégiques en phase amont peuvent ainsi avoir de forts impacts : prévoir des emprises pour les dépôts et réduire ainsi les distances de transport, accepter un allongement de planning, afin de concentrer les terrassements en périodes météorologiques favorables et limiter ainsi le traitement à la chaux, etc. Mais également, en phase conception, DCE et travaux, il est possible d'optimiser le mouvement des terres et les dosages de chaux, de promouvoir des liants hydrauliques routiers « bas carbone », de favoriser les techniques les moins émissives en travaux, etc. Intégrer l'empreinte carbone et l'éco-conception dans nos projets nous amène à revoir en profondeur notre métier. C'est un défi, mais c'est à chacun de nous de le relever.

4. Puits d'essai d'Aulnay-sous-Bois (L16)

Lors des travaux du Grand Paris Express (GPE), un certain nombre d'ouvrages de raccordement entre les ouvrages annexes et le tunnel sont réalisés en souterrain par méthode conventionnelle. Une difficulté supplémentaire intervient lorsqu'ils s'inscrivent dans la couche des Sables de Beauchamp, sous nappe, réputés non injectables en raison de sa forte teneur en fines. C'est pourquoi il a été décidé dans le cadre du marché de la ligne 16 sous Maitrise d'Œuvre EGIS de procéder dans un puits d'essai à deux alternatives de traitement de ces sables : le jet grouting et la congélation. Ces deux méthodes sont radicalement différentes dans leur application, mais l'objectif final d'assurer la stabilité des excavations souterraines reste le même. Comme chaque méthode a été appliquée à un rameau souterrain spécifique dans le cadre de ce puits d'essais, il est possible de calculer et comparer l'impact carbone de chacune des solutions. Les travaux de creusement à proprement parlé n'ont pas été intégrés, car ils sont quasi-similaires dans les deux cas (les cadences de terrassement pouvant légèrement varier, ainsi que la gestion des eaux d'exhaure, absente dans le cas de la congélation). Seuls les traitements de terrains ont donc été regardés dans chaque situation.

Les quantités réellement exécutées ont été collectées auprès de l'entreprise en charge des travaux ou dans les dossiers des ouvrages exécutés. En ce qui concerne le jet grouting, il a été pris en compte le type de ciment mis en œuvre, à savoir du CEM III/A dosé à 450 kg/m³, impliquant une empreinte carbone de 210 kg CO₂e / m³ de coulis. Au total, 718 tonnes de ciment ont été utilisées pour une composition C/E de 0,53, impliquant avec une estimation des émissions liées à la mise en œuvre et des émissions secondaires de 18%, une empreinte carbone pour le chantier de jet grouting de 409 t CO₂e. La majorité des émissions (82%) est imputable à la production et mise en œuvre du coulis (Figure 5).

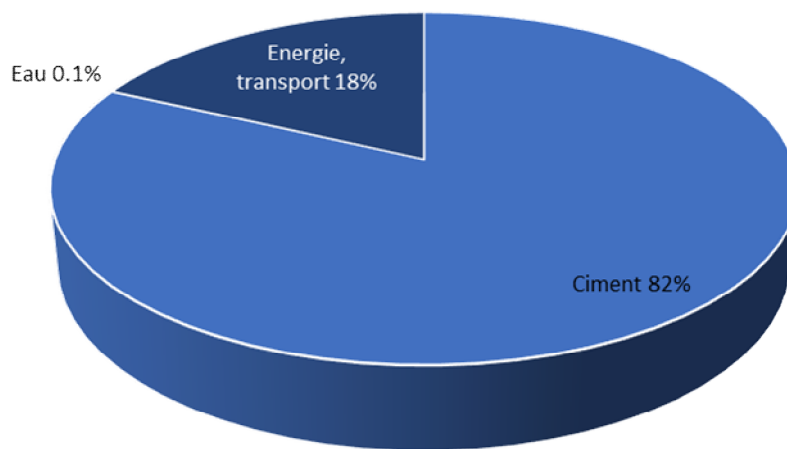


Figure 5 : Répartition des émissions lors du puits d'essai d'Aulnay (en jet grouting)

Le calcul de l'émission du chantier de congélation est plus complexe, car il nécessite de prendre en considération un nombre de paramètres importants (diamètre, matière, recyclage) sur le tubage, les tubes congélateurs extérieurs et intérieurs, les conduites d'approvisionnement et le diamètre de forage initial. L'outil calculateur carbone développé permet de considérer pour chaque tube un matériau de type acier, cuivre, PEHD ou inox, ce dernier étant 3,5 plus émissif que l'acier classique, à cubature équivalente. La quantité de coulis injectée pour les scellements du tube perdu au terrain et du tube extérieur au tubage est calculée, avec une surconsommation éventuelle pour les pertes de coulis dans le terrain. Deux phases sont ensuite calculées, pour la mise en froid du processus et la phase d'entretien, l'une ou l'autre pouvant être à base d'une saumure de calcium (CaCl₂) ou d'azote liquide. Pour ce dernier, les allers-retours sur route des camions pour

l'approvisionnement en azote sont inclus, tandis que pour la saumure, seule son volume intervient. Afin de faire fonctionner le système de congélation sur la durée du chantier, des groupes frigorifiques et pompes sont alimentés, ce qui est pris en considération en fonction de leur puissance électrique, la source d'énergie (éolien, solaire, géothermie, nucléaire ou encore énergie fossiles). Enfin, même si cela n'a pas été le cas sur le puits d'essais d'Aulnay-sous-Bois, il est possible d'intégrer la part d'émission liée à un éventuel dégel forcé (par réchauffement). L'empreinte carbone du chantier de congélation est ainsi estimée à 64 tonnes de CO₂e, soit près de 6 fois moins que pour la solution technique de jet grouting. Cela vient des quantités de matériaux bien plus importantes en jet grouting (718 tonnes de ciment) par rapport à ceux utilisés en congélation (15,4 tonnes de divers métaux et 0,3 tonnes de ciment). Là encore, la part majoritaire des émissions est attribuable aux matières premières (métal, ciment et surtout fluide frigorigène, ce dernier représentant 62% des émissions, cf. Figure 6).

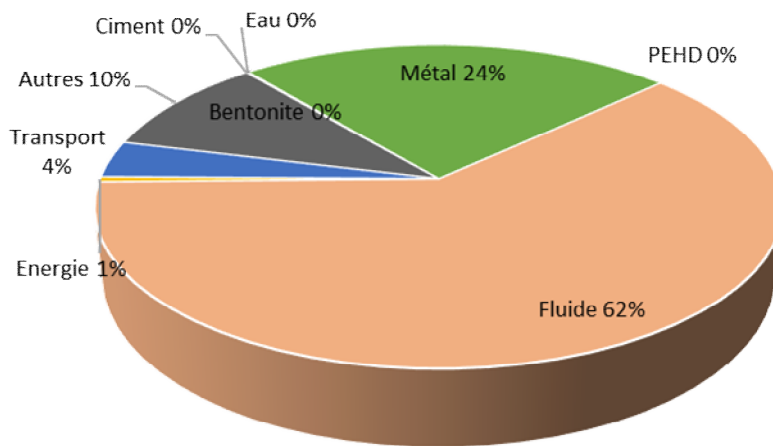


Figure 6 : Répartition des émissions lors du puits d'essai d'Aulnay (en congélation)

En regardant dans le détail, on peut apercevoir que dans la partie fluide, c'est l'azote qui est principalement responsable des émissions carbone (Figure 7), en raison de la quantité d'azote liquide nécessaire par rapport à la saumure qui permet de travailler en circuit fermé (ratio d'environ 20 sur les volumes), même si le facteur d'émission de l'azote est inférieur à celui de la saumure d'un facteur 3,5.

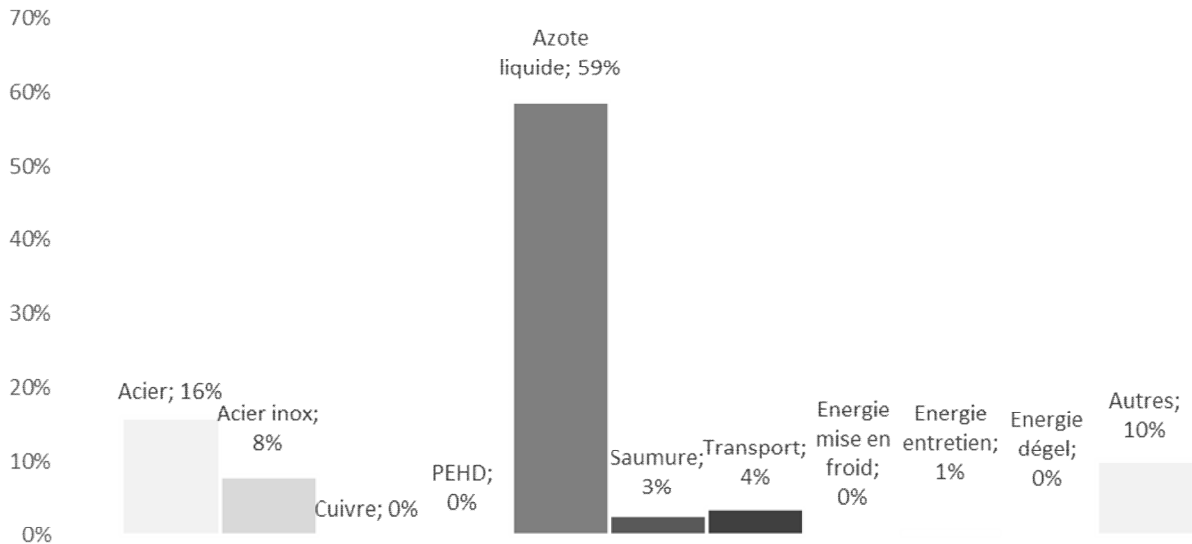


Figure 7 : Répartition des postes d'émissions du puits d'essai d'Aulnay (en congélation)

Cela implique qu'il est possible de réduire encore les émissions d'un chantier de congélation en utilisant uniquement comme fluide une saumure, si les délais et les débits de circulation de la nappe sont compatibles avec cette technique. Sur le puits d'essai, par exemple, l'utilisation de saumure à la place de l'azote liquide pour la mise en froid réduirait l'émission du chantier à seulement 20 tonnes de CO₂e, soit 3 fois moins qu'avec l'azote de première phase et 20 fois moins en comparaison avec le jet grouting.

Ces résultats mettent en évidence l'intérêt prometteur d'un point de vue empreinte carbone d'un traitement des sols par congélation en circuit fermé plutôt que par jet grouting, à objectif technique équivalent.

5. T13

Le projet du tram-train T13 phase 2 est un projet ferroviaire léger reliant Saint-Germain-en-Laye à Poissy (78) en passant par la forêt de Saint-Germain-en-Laye, et au-dessus d'anciennes exploitations souterraines de Calcaire Grossier non remblayées. Le tracé de ce projet fait 10,5 km de longueur et a pour objectif, à horizon 2026, de transporter environ 17 000 voyageurs / jour. Il réutilise la plateforme existante de la Grande Ceinture lors de son passage en déblai dans la forêt, nécessitant la création de soutènements d'une hauteur variable entre 5 et 15 m selon les solutions étudiées, de diverses natures (paroi clouée définitive, paroi coulée provisoire couplée à un mur de soutènement en béton armé, paroi moulée). Deux tracés ont également été étudiés, appelés DUP (correspondant au tracé lors de la Déclaration d'Utilité Publique) et Variante, cette dernière s'éloignant des talus ce qui permet d'optimiser les longueurs et hauteurs de soutènement. Lors des études, ces multiples solutions ont été conçues et comparées comme usuellement d'un point de vue technique, économique et de planification. Nous nous sommes intéressés plus spécifiquement à l'empreinte carbone de chacune de ces solutions, dans la zone forestière (au plus fort impact écologique). Une fois les métrés de conception compilés et agrémentés de leurs délais de réalisation, afin d'estimer les consommations en gazole non routier des engins, et les déplacements des compagnons, les bilans en consommation carbone équivalent ont été menés. Ils montrent une grande disparité des résultats, avec un bilan 4 fois plus élevé pour le tracé DUP par rapport au tracé Variante, permettant une économie équivalente aux émissions annuelles de GES d'environ 500 français. Pour un même tracé,

les solutions les plus émissives sont la paroi moulée, la combinaison paroi clouée / mur de soutènement puis la paroi clouée seule. La part prépondérante imputée aux émissions provient dans tous les cas des matériaux en premier lieu, puis dans une moindre mesure de leur transport et de leur mise en œuvre.

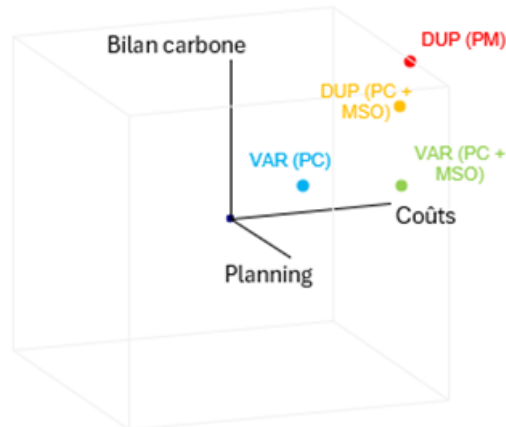


Figure 8 : Comparaison 3D des solutions techniques du T13 phase 2

6. Conclusions

À travers ces exemples, nous avons souhaité montrer l'intérêt que peuvent présenter les calculs d'empreinte carbone dans les travaux géotechniques. Même si les calculs peuvent paraître simples en première lecture, les études sont souvent confrontées à des doutes sur les valeurs des facteurs d'émissions primaires, qui sont parfois imprécises dans leur évaluation ou très différentes suivant les sources. Il conviendra donc, probablement par le biais du groupe de travail du CFMS en lien avec cette question, de fixer des valeurs pour que l'ensemble de la profession ait une même base de travail. Néanmoins, ces valeurs sont évolutives dans le temps, et chaque entité géotechnique devra par conséquent prévoir une accumulation de retours d'expérience et une veille technique afin de rendre plus précises les évaluations d'empreinte carbone et de les synchroniser avec la date et les caractéristiques des chantiers réalisés. Un autre élément intéressant de ces études a été de montrer que les résultats des calculs d'empreinte carbone ne sont pas toujours intuitifs et qu'ils peuvent orienter un projet dans des directions opposées aux conclusions classiques de délais et de coûts.

Les auteurs remercient l'entreprise Solétanche Bachy pour leur partage d'information sur le puits d'essais d'Aulnay-sous-Bois et les entreprises Valérian et Forézienne pour TERCO2.

Bibliographie

Bouchut J., Hernandez J., Robinet V., Taoussi K. EGIS (2023). Projet TERCO2 – Empreinte carbone des stratégies de terrassement. Rapport d'études. EGIS PNVGEO015-001. FEREC. 113 p.