

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) appliquée au creusement des ouvrages souterrains

Lucille BAUCAL--POYAC¹, Laetitia D'ALOIA SCHWARTZENTRUBER¹, Adélaïde FERAILLE²

¹Centres d'Etude des Tunnels (CETU), Bron.

²Ecole des Ponts Paristech (ENPC), Champs sur Marne.

RESUME

Il existe deux types de méthodes de creusement de tunnel : la méthode « conventionnelle » (machine à attaque ponctuelle et/ou explosif) et celle au tunnelier (ouverts ou à confinement (pression de terre, pression de boue)). Si l'évaluation des impacts environnementaux du creusement des tunnels en méthode conventionnelle a déjà fait l'objet d'études par le passé, il n'en est pas de même du creusement au tunnelier qui nécessite des développements méthodologiques nouveaux. Des données doivent également être collectées sur la fabrication du tunnelier, son montage, son fonctionnement, sa fin de vie ainsi que sur l'ensemble des installations susceptibles d'accompagner son usage. Un travail de thèse démarre au CETU en collaboration avec l'ENPC sur l'ACV du creusement au tunnelier. Ce travail s'inscrit dans un contexte où les tunneliers sont et seront de plus en plus utilisés sur les chantiers français et transfrontaliers (Grand Paris Express (GPE), Lyon-Turin...). Cette communication présente les premières réflexions méthodologiques menées sur l'ACV du creusement au tunnelier et situe la thèse parmi les études déjà menées sur les ouvrages souterrains. A terme, l'enjeu est de limiter les impacts sur l'environnement et notamment l'impact changement climatique, par des choix techniques appropriés, tant sur le plan des matériaux que sur celui des engins, machines et autres installations nécessaires.

Mots-clefs

Tunnel, ACV, Tunnelier

I. INTRODUCTION

A. Contexte réglementaire environnemental des ouvrages souterrains

Depuis plusieurs années, l'environnement occupe une place croissante dans la réglementation nationale et internationale. Ceci s'inscrit dans un contexte récurrent de publications abordant la thématique d'urgence climatique à laquelle nous faisons face actuellement. On peut notamment citer le premier volet du sixième rapport d'évaluation du GIEC en août 2021 consacré aux effets d'ores et déjà irrémédiables du réchauffement climatique. Il souligne notamment une réduction de la disponibilité des ressources en eau et en nourriture, un impact sur la santé ainsi qu'une baisse de moitié des aires de répartition des espèces animales et végétales, causés par les activités anthropiques (IPCC, 2021). Au regard de ces conclusions, le cadre réglementaire français se veut

davantage incitatif vis-à-vis de la transition écologique avec notamment la promulgation des lois et décrets suivants :

- Loi Grenelle 2, 2010 ;
- Loi de transition énergétique pour la croissance verte, 2015 ;
- Décret du 3 mai 2017 relatif aux principes et modalités de calcul des émissions de gaz à effet de serre des projets publics ;
- SNBC (Stratégie National Bas-Carbone), révision 2018-2019 ;
- Loi énergie-climat, 2019 ;
- Loi relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire, 2020 ;
- Loi climat-résilience, 2021.

On retiendra notamment que la SNBC impose comme objectif la neutralité carbone en 2050. La loi énergie-climat inscrit un objectif de réduction de 40% de la consommation d'énergies fossiles par rapport à 2012 d'ici 2030 et la loi climat-résilience une diminution de 40% des émissions des gaz à effet de serre (GES) d'ici 2030 par rapport à 1990 (cf. Article L100-4 du Code de l'Energie). Il est également important de souligner que le (*Décret n°2017-725, 2017*), décrivant les principes et modalités de calcul des émissions de GES des projets publics, s'applique « ... *aux projets publics soumis, en application de l'article L.122-1 du Code de l'Environnement, à une étude d'impact [...] et aux projets publics de construction et de rénovation de bâtiments* », « ... *dont la décision de financement est signée à compter du 1^{er} octobre 2017* ». Les projets incluant des sections souterraines et soumis à étude d'impact sont donc concernés par la réalisation d'un bilan des émissions de GES.

Bien que présentement aucun texte réglementaire n'oblige à effectuer une analyse du cycle de vie des ouvrages souterrains, les lois mentionnées ci-dessus peuvent inciter les maîtres d'ouvrages à évaluer et orienter leurs décisions sur l'ensemble du cycle de vie de l'ouvrage en faveur de l'environnement tant à un niveau de transition énergétique, de réduction du bilan carbone ou bien encore d'économie circulaire. En effet, les ouvrages souterrains occupent une place significative dans le bilan environnemental d'un projet de travaux publics. L'ACV des ouvrages souterrains permet d'apporter des éléments objectifs dans le processus de prise de décision, l'enjeu étant de mieux porter les projets d'ouvrages souterrains et de mieux appréhender les postes significatifs en termes d'impacts.

B. Contexte normatif de l'ACV des ouvrages souterrains

L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est un outil multicritère et holistique permettant l'évaluation des impacts environnementaux potentiels sur l'ensemble du cycle de vie d'un système, depuis l'obtention des matières premières jusqu'à sa fin de vie, en relation à une fonction particulière (Jolliet Olivier, 2017). Étant une approche fonctionnelle, elle permet une comparaison équitable entre plusieurs systèmes puisque celle-ci s'effectue sur l'équivalence des services fournis par les systèmes. La méthodologie d'ACV s'appuie sur des normes internationales qui en décrivent les principes et cadres à travers la norme (*ISO 14040, 2006*) ainsi que les exigences et lignes directrices via la norme (*ISO 14044, 2006*). Elle se décompose selon quatre phases interdépendantes, présentées et détaillées à la Figure 1, qui sont : i) La définition des objectifs et du champ de l'étude, ii)

L'inventaire du cycle de vie, iii) L'évaluation de l'impact du cycle de vie et iv) L'interprétation du cycle de vie.

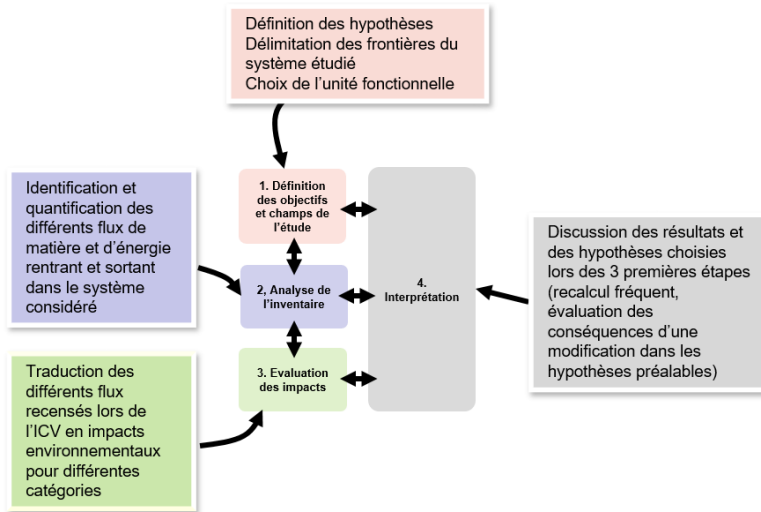


Figure 1 - Cadre méthodologique de l'ACV selon (ISO 14040, 2006)

Révisée en juin 2021, la norme (NF EN 15643, 2021) relative à la contribution des ouvrages de construction au développement présente un cadrage méthodologique de l'évaluation des performances environnementales, sociales et économiques spécifique à l'échelle des ouvrages de génie civil et aux bâtiments. La norme (NF EN 17472, 2022), décrit, quant à elle, spécifiquement les méthodes et exigences pour l'évaluation des performances en termes de développement durable d'un ouvrage de génie civil en tenant compte de l'équivalent fonctionnel de l'ouvrage. En présentant une méthode normalisée, cette norme aide à la prise de décision dans le cadre de la conception d'un ouvrage de génie civil. Elle y définit notamment une liste de catégorie d'aspects environnementaux non exhaustive mais obligatoire qui doit être en cohérence avec les indicateurs environnementaux de la norme (NF EN 15804+A2/CN, 2019). Révisée en juillet 2022, cette dernière se place à l'échelle produit. La norme NF EN 15804+A2 précise « une structure permettant de s'assurer que toutes les Déclarations Environnementales Produit (DEP) relatives aux produits, services et processus de construction sont obtenues, vérifiées et présentées de façon harmonisée ». Une DEP est un document normalisé qui présente les résultats de l'ACV du produit concerné. A travers les DEP, les professionnels de la construction peuvent s'inscrire dans une démarche de développement durable et d'écoconception du produit. Les dimensions sociales et économiques du développement durable ne sont pas présentées dans cette norme. En comparaison avec ses versions précédentes, la norme NF EN 15804+A2 se distingue par la prise en compte de la valorisation des matériaux de construction en fin de vie et s'accompagne d'une modification du tableau des unités de mesure des catégories d'impact. Un schéma récapitulant les 3 normes s'appliquant aux différentes échelles du secteur du génie civil est présenté à la Figure 2.

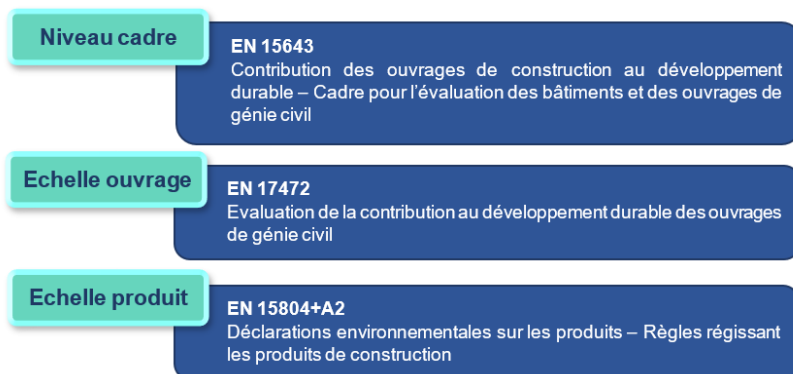


Figure 2 - Normes s'appliquant aux différentes échelles du secteur du génie civil

II. ETUDES ACV DES OUVRAGES SOUTERRAINS ET DONNEES EXISTANTES

La construction des ouvrages souterrains semble avoir d'emblée de forts impacts sur l'environnement en comparaison de celle des ouvrages à l'air libre. Pour autant, de nombreuses gares souterraines sont construites et les linéaires des sections souterraines sont importants sur les tracés d'infrastructures en projet. En effet, il s'agit de trouver une solution de passage en milieu contraint, de réduire les nuisances pour les riverains ou bien de limiter l'occupation du sol pour le réserver à d'autres usages. Ainsi l'ACV doit permettre d'aider à l'écoconception des ouvrages souterrains tandis qu'une approche plus globale de type « Développement Durable » doit permettre de mettre en avant l'ensemble des avantages de la solution souterraine. L'ACV appliquée aux ouvrages souterrains peut s'appliquer en tant qu'outil d'aide à la décision et d'écoconception et se distingue selon l'avancement du projet. Au stade amont, l'ACV permet au maître d'ouvrage de comparer, d'un point de vue environnemental, différentes possibilités de conception de l'ouvrage (ex : comparaison d'offres dans le cadre d'un marché). Au stade aval, l'ACV peut consister en l'évaluation détaillée des impacts environnementaux d'un projet (ex : s'assurer du respect des engagements environnementaux).

A. Méthodes de creusement de tunnel

Deux types de méthodes de creusement de tunnel existent et peuvent parfois être rencontrées sur un même chantier ou être concurrentes, en fonction notamment de la géologie, des conditions d'accès au site et de la longueur de l'ouvrage. On trouve ainsi la méthode dite conventionnelle (machine à attaque ponctuelle et/ou explosif (cf. Figure 3)) et celle au tunnelier également appelée méthode mécanisée (cf. Figure 4). Plusieurs types de tunneliers existent : ouverts ou à confinement (pression de terre, pression de boue...). Le choix du mode d'abattage est généralement lié à la géologie rencontrée notamment via la résistance à la compression uniaxiale du terrain et l'état de fracturation du massif¹. Les domaines géologiques d'application des méthodes de creusement de tunnel sont présentés à la Figure 5. D'autres critères tels que l'accessibilité au site (place pour le montage/démontage du tunnelier) ou bien la proximité d'ouvrages sensibles aux vibrations peuvent également intervenir dans le choix de la méthode de creusement (*Dossier pilote des tunnels génie civil*, 1998).

¹ Mesure de l'état de fracturation du massif = indice RQD - Rock Quality Designation



Figure 3 - Méthode conventionnelle (chantier TELT)

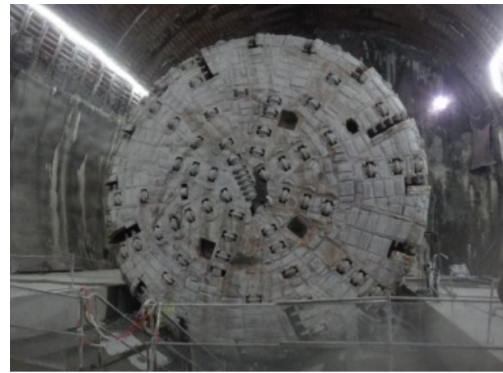


Figure 4 - Tunnelier (chantier TELT)

	Terrains meubles			Terrains rocheux	
	Graves	Sables	Limons	Argiles	Tendres Dures
Méthodes conventionnelles	Attaque ponctuelle avec trait. spéciaux			Attaque ponctuelle	
					Explosif
Méthodes mécanisées				Tunnelier à grappeurs	
			Tunnelier ouvert à voussoirs		
	Tunnelier à pression de boue				
		Tunnelier à pression terre			

Figure 5 - Domaines géologiques d'application des méthodes de creusement de tunnel (CETU, 2016)

B. Etudes ACV des ouvrages creusés en méthode conventionnelle

Il existe plusieurs études ACV appliquées aux sections souterraines creusées en méthode conventionnelle : elles se distinguent notamment à travers leurs choix de frontières de l'étude ACV. Tout d'abord, (Huang *et al.*, 2015) évaluent la méthode de creusement en elle-même : l'unité fonctionnelle² étant « l'excavation d'un tunnel rocheux de 1m avec forage et dynamitage ». Ici, les matériaux de construction ne sont pas pris en compte, les auteurs s'intéressent à la consommation d'explosif, d'électricité, de diesel et de matériaux de chaussées ainsi que les outils et machines nécessaires au creusement (chargeuse, jumbo foreur, camions...). Cette étude conclut sur le fait qu'1m de creusement de tunnel routier standard émet 0.9tonCO₂eq et que la consommation d'explosif est l'une des catégories dominantes pour les impacts environnementaux notamment en termes de destruction de la couche d'ozone.

D'autres études ACV s'attachent à évaluer les impacts environnementaux d'un tunnel sur l'ensemble de son cycle de vie. (D'Aloia *et al.*, 2010) est une des premières études évaluant les impacts environnementaux des matériaux de construction en méthode conventionnelle et ceux de la consommation électrique liées à l'exploitation. Plus tard, (D'Aloia Schwartzentruber and Deffayet, 2014) évaluera les impacts environnementaux de la construction d'un tunnel en méthode conventionnelle en l'illustrant sur le tunnel de Talant de la LiNo (Liaison Nord de l'agglomération dijonnais). On peut également citer (Guo *et al.*, 2019) dont l'étude s'attache à évaluer l'ensemble du

² Performance quantifiée d'un système de produits destinée à être utilisée comme unité de référence dans une analyse du cycle de vie » (ISO 14044, 2006)

cycle de vie de cinq sections de tunnel, de leur construction à leur « fin de vie »³ en passant par leur exploitation et leur maintenance. Ces cinq sections, notées « *section-i* », ont été définies en fonction de la qualité de la masse rocheuse présente sur le tracé du tunnel. L'unité fonctionnelle de cette étude est « *1 m de tunnel autoroutier chinois de section-i ayant une durée de vie de 100 ans* ». La phase de construction comprend entre autres les matériaux (soutènement, revêtement, étanchéité, explosif), consommation des engins, électricité de ventilation et d'éclairage... Selon les profils-types, 1m de tunnel émet 20.51 à 28.36 tCO₂eq.

Des réflexions et des travaux sur les « Travaux souterrains et développement durable » sont actuellement menés au sein du GT41 de l'AFTES. Un projet de recommandation porte sur « L'ACV appliquée aux ouvrages souterrains » et comportera 3 fascicules : - Fascicule n°1 : Cadre méthodologique ; - Fascicule n°2 : ACV des ouvrages creusés en méthode conventionnelle ; - Fascicule n°3 : ACV des ouvrages souterrains creusés au tunnelier.

C. Données environnementales existantes

En ACV, la collecte et le choix des données constituent une étape clef. On distingue deux types de données : les données primaires dites spécifiques au système et les données secondaires. Les données primaires regroupent les données collectées sur le terrain ou spécifiques à un fabricant et comprennent par exemple les types et quantités de béton, d'acier ou encore les consommations électriques et thermiques utilisés lors de la construction de l'ouvrage. Les données secondaires rassemblent les données environnementales issues de base de données génériques telles que Ecoinvent. En France, il existe également la base INIES et la base DIOGEN. La base de données INIES est une base de données nationale de référence sur les données environnementales et sanitaires des produits et équipements de la construction (bâtiments et génie civil). La base de données DIOGEN présente, quant à elle, les impacts environnementaux de la norme NF EN 15804+A1/CN pour les matériaux utilisés dans la réalisation des ouvrages de génie civil. Les impacts environnementaux sont calculés pour la phase de production des matériaux, de l'extraction des matières premières jusqu'à la sortie de l'usine. Des syndicats professionnels mettent également à disposition des informations environnementales sur la production des matériaux constitutifs du béton : l'UNPG pour les granulats, l'ATILH pour le ciment et l'EFCA pour les adjuvants.

III. PREMIERES REFLEXIONS SUR L'ACV DU CREUSEMENT AU TUNNELIER

A. Contexte de la thèse

La méthode de creusement au tunnelier, déjà largement utilisée à l'international, est et sera utilisée pour la construction de tunnels sur plusieurs grands projets français et transfrontaliers tels que le Grand Paris Express, le Tunnel Euralpin Lyon-Turin, le Futur Collisionneur Circulaire du CERN ou bien la seconde ligne de métro B de Toulouse. D'après les perspectives du CETU, les tunneliers seront très souvent utilisés pour le creusement de tunnels et ce, pendant à minima les 6 prochaines années (cf. Figure 6).

³Les structures de génie civil étant généralement dimensionnées pour 100 ans, il n'y a pas de réelle fin de vie : on parle plutôt de fin d'exploitation.

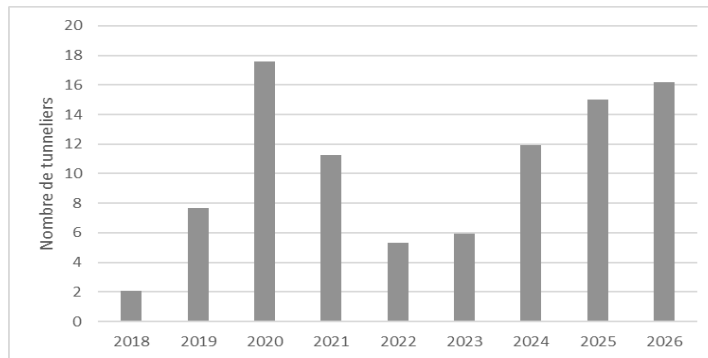


Figure 6 - Perspective du nombre de tunneliers en service en France sur 10 ans [CETU]

Si l'évaluation des impacts environnementaux du creusement des tunnels en méthode conventionnelle a déjà fait l'objet d'études par le passé (cf. §II), il n'en est pas de même du creusement au tunnelier. Parmi les études portant sur l'ACV de tunnel creusé au tunnelier, on peut notamment citer (D'Aloia *et al.*, 2015) dont l'étude porte sur l'ACV du tunnel du Mont Sion sur l'A41 et la comparaison de la méthode de creusement conventionnelle et celle au tunnelier. (Kaewunruen *et al.*, 2020) évalue les impacts environnementaux du cycle de vie et analyse le coût du cycle de vie du tunnel Xikema No. 1 creusé au tunnelier. (Arena, 2019) a développé une ACV de la construction au tunnelier du « Thames Tideway Tunnel ». Ces trois publications ne modélisent pas le tunnelier en tant que machine mais prennent plutôt en compte la quantité de matériaux de construction mis en œuvre lors d'un creusement au tunnelier. C'est dans ce contexte qu'un travail de thèse démarre au CETU en collaboration avec l'ENPC et en partenariat avec le Tunnel Euralpin Lyon-Turin sur l'évaluation des impacts environnementaux du creusement au tunnelier des ouvrages souterrains par l'ACV.

B. Scope de l'ACV du creusement au tunnelier

Equivalent fonctionnel

Dans le cas des ouvrages de Génie Civil, la norme NF EN 15643 introduit le terme d'« *équivalent fonctionnel* » qui inclut, mais sans s'y limiter, le type d'ouvrage de construction, la fonction primaire, les exigences techniques et fonctionnelles pertinentes et la période de référence pour l'évaluation. Pour le creusement au tunnelier, l'équivalent fonctionnel peut être décrit comme suit :

« Assurer la construction du tunnel, i.e. successivement ou simultanément l'abattage du front de taille, la stabilisation des parois de l'excavation, le marinage des déblais et dans certains cas la pose du soutènement et/ou du revêtement »

Frontières du système

Les frontières des systèmes servent à identifier les étapes, processus et flux considérés dans l'ACV. Elles incluent toutes les activités pertinentes à l'atteinte des objectifs de l'étude et donc, nécessaires à la réalisation de la fonction étudiée. L'analyse du cycle de vie pour le creusement au tunnelier est composée du cycle de vie du tunnelier et des infrastructures accompagnant son usage lors du creusement (usines de préfabrication de voussoirs, station de traitement de boue, centrale à béton...). La Figure 7 présente les frontières du système associées au cycle de vie du tunnelier. Le

cycle de vie du tunnelier peut s'apparenter aux étapes suivantes : i) la production de ses pièces, ii) sa construction, iii) son utilisation et iv) sa fin de vie⁴.

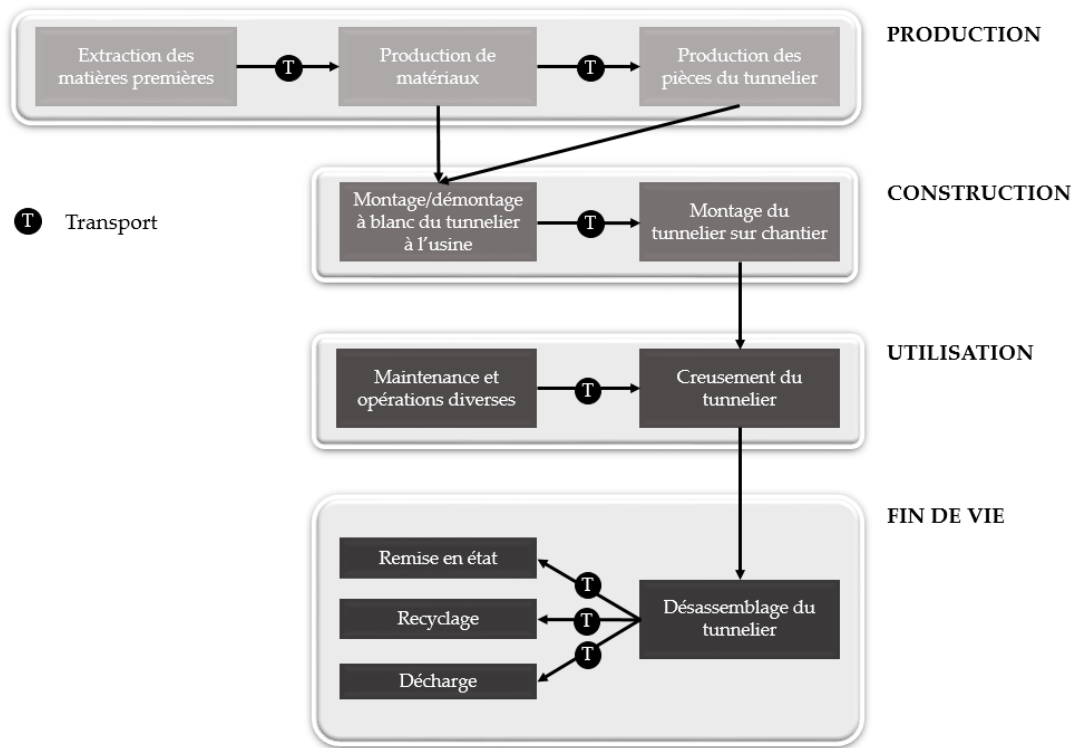


Figure 7 - Frontières du système « tunnelier »

Des questions d'ordre méthodologique concernant la gestion en fin de vie du tunnelier se posent. Il est constaté dans la profession des ouvrages souterrains que la fin de vie du tunnelier varie selon son diamètre :

- Jusqu'à 5 m de diamètre : les tunneliers sont généralement standardisés et réutilisés après une remise en état des éléments défectueux ;
- Au-delà de 5 m : les projets sont rarement au même diamètre et différents scénarios de fin de vie du tunnelier existent : i) remise en état totale par l'entreprise, ii) remise en état totale par le fabricant du tunnelier, iii) seuls les éléments nobles du tunnelier (moteurs, vérins hydrauliques, armoires électriques, sas...) sont conservés et la partie métallique est recyclée.

La remise en état du tunnelier ou la réutilisation de certains éléments du tunnelier sur d'autres chantiers engendrent un problème de multifonctionnalité qu'il faut traiter méthodologiquement. Il faut également intégrer l'ensemble des installations susceptibles d'accompagner l'usage du tunnelier comme l'usine de préfabrication des voussoirs ou bien l'usine de traitement des boues de forage pour les tunneliers à pression de boue. Une généralisation de l'approche pour les différents

⁴ Par « fin de vie du tunnelier », on entend « fin de creusement du tunnelier ».

types de tunneliers (tunneliers ouverts et fermés, tunnelier de « montagne » et tunnelier urbain ») est donc envisagée.

Collectes des données primaires et choix des données secondaires

D’une part, dans le cadre de l’ACV du creusement au tunnelier, des données primaires fiables doivent être collectées sur :

- La fabrication des pièces du tunnelier (organes de creusement, d’avancement, d’assemblage des voussoirs, d’évacuation des déblais...);
- Son montage/démontage : durée, moyens mis en œuvre ;
- Son fonctionnement : consommation d’électricité, d’eau, d’huile... ;
- Sa fin de vie : reconditionnement, remise en état... ;
- Sur l’ensemble des installations susceptibles d’accompagner son usage.

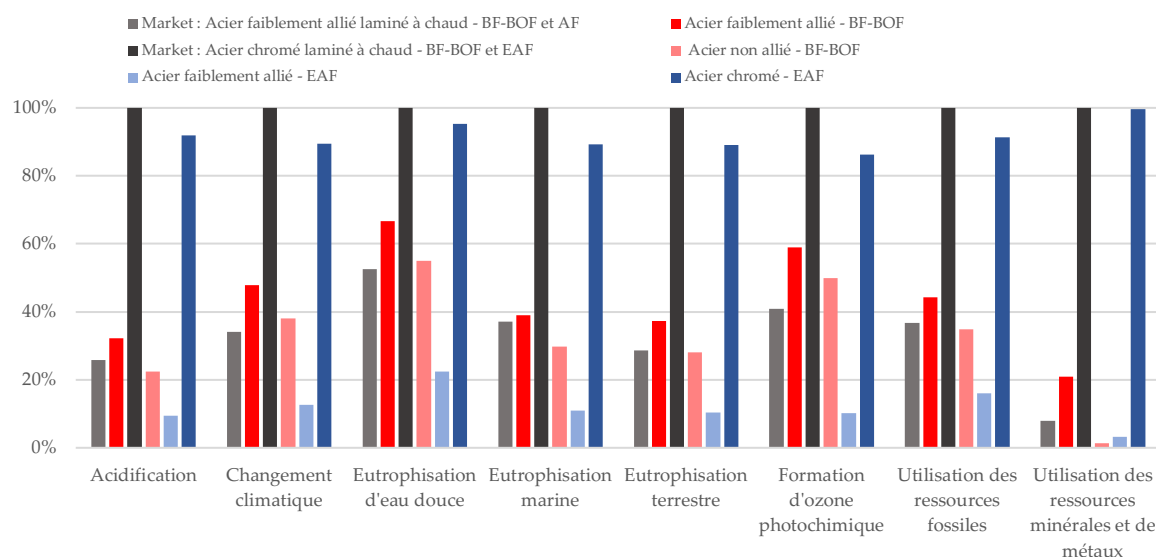


Figure 8 - Comparaison des impacts environnementaux des processus d’acier Ecoinvent relativement au processus « market » d’acier chromé laminé à chaud RER par EN15804+A2

D’autre part, suivant les catégories d’impacts environnementaux, les impacts des types d’acier présents dans la base de données Ecoinvent cut-off 3.7 varient très fortement. La Figure 8 présente les impacts environnementaux selon la méthode EN 15804+A2⁵ des différents processus d’acier présent dans la base de données Ecoinvent et ayant une localisation géographique européenne. Ces impacts sont exprimés relativement au processus « market »⁶ représentatif de la production d’1kg d’acier chromé laminé à chaud. On remarque que : i) pour une même filière de production, les impacts environnementaux croissent avec le taux d’alliage dans l’acier, ii) pour un même taux d’alliage, les impacts environnementaux de la filière BF-BOF (hauts-fourneaux) sont plus élevés que ceux de la filière EAF (four à arc électrique), iii) l’acier faiblement allié produit par EAF s’avère

⁵ Afin de relier l’inventaire du cycle de vie aux impacts environnementaux potentiels, des méthodes d’évaluation des impacts sont utilisées. EN 15804+A2 est une méthode européenne utilisant un horizon temporel de 100 ans pour le réchauffement climatique et fournissant les résultats pour 28 catégories d’impacts.

⁶ Le terme « market » réfère à une activité de marché. Contrairement aux autres processus, les processus « market » prennent en compte le transport jusqu’au consommateur et les pertes subies au cours de ce processus.

être le moins impactant pour 11 des 16 catégories d'impacts (jusqu'à 96.8% de moins pour l'indicateur « Utilisation des ressources minérales et de métaux ») et iv) l'acier non allié par BF-BOF est le moins impactant pour les 5 catégories restantes. Un tunnelier étant composé d'une quantité importante d'aciers très spécifiques aux taux d'alliage très variables, le choix des données secondaires s'avère essentiel : il est important de collecter des données à la fois cohérentes et pertinentes.

IV. CONCLUSIONS

Une première réflexion sur l'analyse du cycle de vie du creusement au tunnelier est actuellement menée. Elle permet de souligner des questions à la fois d'ordre méthodologique vis-à-vis de la fin de vie mais aussi d'ordre pratique avec la pertinence de la collecte de données primaires et le choix des données secondaires. Ces thématiques nécessitent des investigations en termes de capitalisation de connaissances et de développements méthodologiques afin de mieux appréhender les impacts sur l'environnement des travaux souterrains.

Dans la continuité des ACV de tunnel creusé à l'explosif présentes dans la littérature, une ACV complète d'un tunnel creusé au tunnelier pourrait être envisagée. Celle-ci regrouperait toutes les phases du cycle de vie de l'ouvrage, c'est-à-dire à la fois la phase de construction, d'utilisation et de maintenance du tunnel. L'ACV du creusement au tunnelier apparaît donc comme une sous-partie du système « tunnel ».

L'enjeu à terme est d'une part de mener des ACV au stade amont des projets afin de comparer des variantes, et d'autre part de conduire des ACV sur des périmètres plus restreints afin de limiter les impacts sur l'environnement et notamment l'impact carbone, par des choix techniques appropriés, tant sur le plan des matériaux que sur celui des engins, machines et autres installations nécessaires.

REFERENCES

- Arena, N., 2019. Life-cycle assessment applied to construction of Thames Tideway east tunnel, London, UK. Proc. Inst. Civ. Eng. - Eng. Sustain. 172, 416–423. <https://doi.org/10.1680/jensu.18.00012>.
- CETU, 2016. Matériaux géologiques naturels excavés en travaux souterrains: spécificités, scénarios de gestion et rôle des acteurs.
- D'Aloia, L., Humbert, E., Bonnet, R., 2015. Evaluation of environmental impacts TBM tunnels dug by LCA method.
- D'Aloia, L., Rival, F., Kote, H., 2010. LCA for evaluating underground infrastructures like tunnels: potential environmental impacts of "materials". Presented at the 2nd International Symposium on Service Life Design for Infrastructures, RILEM Publications SARL, pp. 453–460.
- D'Aloia Schwartzentruber, L., Deffayet, M., 2014. Comment les enjeux de développement durable peuvent-ils être pris en compte dans le processus de décision des projets? Presented at the Congrès International AFTES 2014, Lyon.
- Décret n°2017-725, 2017. , Relatif aux principes et modalités de calcul des émissions de gaz à effet de serre des projets publics.
- Dossier pilote des tunnels génie civil, 1998. , Section 4 - Procédés de creusement et de soutènement.

- Guo, C., Xu, J., Yang, L., Guo, X., Liao, J., Zheng, X., Zhang, Z., Chen, X., Yang, K., Wang, M., 2019. Life cycle evaluation of greenhouse gas emissions of a highway tunnel: A case study in China. *J. Clean. Prod.* 211, 972–980. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.249>.
- Huang, L., Bohne, R.A., Bruland, A., Jakobsen, P.D., Lohne, J., 2015. Environmental impact of drill and blast tunnelling: life cycle assessment. *J. Clean. Prod.* 86, 110–117. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.083>.
- IPCC, 2021. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability.* »,.
- ISO 14040, 2006. , *Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Principes et cadre.*
- ISO 14044, 2006. , *Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Exigences et lignes directrices.*
- Jolliet Olivier, 2017. *Analyse du cycle de vie : comprendre et réaliser un écobilan / Olivier Jolliet, Myriam Saadé-Sbeih, Pierre Crettaz... [et al.]*, 3e édition mise à jour et augmentée. ed, Science & ingénierie de l'environnement. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne.
- Kaewunruen, S., Sresakoolchai, J., Yu, S., 2020. Global Warming Potentials Due to Railway Tunnel Construction and Maintenance. *Appl. Sci.* 10. <https://doi.org/10.3390/app10186459>.
- NF EN 15643, 2021. , *Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Cadre pour l'évaluation des bâtiments et des ouvrages de génie civil.*
- NF EN 15804+A2/CN, 2019. , *Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction.*
- NF EN 17472, 2022. , *Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Évaluation de la contribution au développement durable des ouvrages de génie civil - Méthodes de calcul.*