

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

Laetitia D'ALOIA SCHWARTZENTRUBER<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CETU (Centre d'Etudes des Tunnels), 69500 Bron, France.

[Laetitia.daloia@developpement-durable.gouv.fr](mailto:Laetitia.daloia@developpement-durable.gouv.fr)

**RESUME** Cet article aborde la question de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) appliquée aux ouvrages souterrains creusés. Les considérations d'ordre méthodologique y sont présentées et les résultats de quelques études illustrés : impacts de la construction des tunnels, de la gestion et de l'emploi des matériaux excavés, de l'éclairage et de la ventilation en phase d'exploitation ... Ces études permettent de mettre en évidence et de préciser les enjeux que revêtent les ouvrages souterrains en termes d'impacts sur l'environnement, ainsi que les sujets à approfondir. L'ACV peut être appliquée aux ouvrages souterrains de deux façons différentes selon le stade d'avancement du projet. Dans les deux cas, il s'agit bien d'outils d'aide à la décision et/ou d'écoconception. Cet article présente également les travaux menés dans le cadre du GT41 de l'AFTES (Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain). Ces travaux visent à développer et promouvoir une méthodologie ACV commune pour l'ensemble de la profession des travaux souterrains. Ce qui constitue une condition sine qua non pour développer et s'approprier les outils et enfin, conduire des évaluations objectives et pertinentes tout en évitant certains écueils.

**Mots-clefs** ACV, impacts environnementaux, tunnels, ouvrages souterrains

## I. INTRODUCTION

Les ouvrages souterrains creusés en méthode conventionnelle (à l'explosif et au Brise Roche Hydraulique (BRH)) ou en méthode mécanisée (i.e. au tunnelier), peuvent être considérés à la fois comme des ouvrages géotechniques et des ouvrages de génie civil<sup>1</sup>. De nos jours et à l'échelle de l'infrastructure, les linéaires des sections souterraines sont relativement importants dans nombre de projets quel que soit le mode de transport : routier, ferroviaire ou guidé. Il n'est pas rare de constater qu'ils représentent souvent 30 à 90% du linéaire (cf. Tableau 1). Les tunnels permettent soit de s'affranchir de la topographie, soit de trouver des solutions d'implantation en contexte urbain très contraint.

---

<sup>1</sup> Seuls les tunnels creusés sont abordés dans cet article. Les tranchées couvertes s'apparentent à d'autres techniques de construction et sont exclues du propos.

**TABLEAU 1. Les linéaires des principaux projets et chantiers de tunnel en France.**

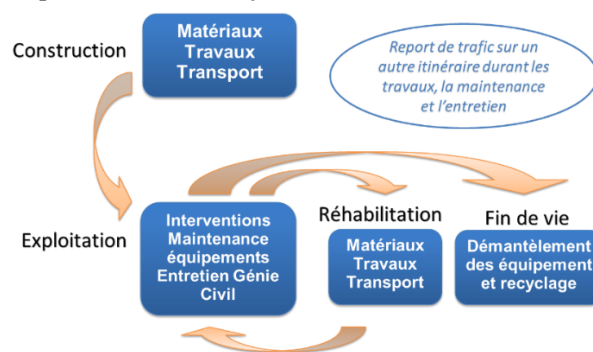
Nom du projet	Grand Paris Express (GPE)	Tunnel Euralpin Lyon-Turin (TELT)		Ligne Nouvelle Provence Côte d'Azur (LNPCA)	Ligne 3 Toulouse	Cigéo	Gare Lyon Part Dieu
		Tunnel de base	Ouvrages d'accès				
Nature du projet	Transport guidé	Ferroviaire		Ferroviaire (Phases 1 et 2 : $\approx 2030$ )	Méto (2028)	Stockage de déchets nucléaires (2020-2030 Phase 1)	Ferroviaire (à l'étude)
Linéaire	180 km sur 200 + 68 gares	57 km	86 km sur 140 (61%)	Gare souterraine de Marseille + accès ( $\approx 8$ km)	$\approx 21$ km sur 27 (78%)	A terme 270 km de Galeries (y.c. alvéoles)	Gare souterraine

Les études ACV des ouvrages souterrains sont généralement pénalisantes pour ce type de structure qui nécessite bien souvent des quantités importantes d'aciers et de bétons. Ces dernières dépendent de la géologie et sont à l'origine de 80 à 95% des impacts « matériaux » de la phase construction [D'Aloia, Deffayet 2014]. Cette dernière peut être considérée comme subie, car elle dépend elle-même du lieu d'implantation de l'ouvrage. Cependant, les ouvrages souterrains permettent de répondre à des enjeux de mobilité, de préserver le cadre de vie à proximité des ouvrages (diminution des nuisances vis-à-vis des riverains), de limiter les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) par une diminution de la longueur et du dénivelé des itinéraires et enfin, de restituer la surface à d'autres usages. Des approches « Développement Durable » ont été proposées pour prendre en compte les bénéfices des tunnels et plus généralement des espaces souterrains ; ce que l'ACV seule ne permet pas toujours de faire correctement (Y. Audi 2016). Quoiqu'il en soit, un bilan environnemental, demeure nécessaire pour maîtriser les impacts potentiels sur l'environnement et rester cohérent avec le respect des engagements de l'Etat et les objectifs communautaires. La mise en œuvre de l'ACV en tant qu'outil d'écoconception reste effectivement pertinente dans la mesure où elle vise à réduire les impacts à l'échelle du projet considéré.

La question de la gestion des matériaux excavés lors du creusement des tunnels constitue un enjeu important pour les projets souterrains en cours et à venir. Il est indispensable de prendre en compte le contexte actuel de transition vers une économie circulaire, de prévention et de valorisation des déchets du BTP, de préservation des ressources naturelles, mais également de limitation des impacts liés au transport sur de longues distances (tout du moins pour certains modes de transport). La méthode de construction est, quant à elle, actuellement essentiellement choisie au regard de la géologie rencontrée. Mais il est également nécessaire de considérer le coût, les délais de réalisation, l'accessibilité au site pour le montage du tunnelier ... Quoiqu'il en soit, s'il existe une ou plusieurs alternatives, la prise en compte d'un critère environnemental complémentaire peut s'avérer intéressante. On soulignera également qu'une réglementation incitative peut orienter vers des solutions plus favorables d'un point de vue environnemental, et qui, dans un autre cadre, n'auraient pas été retenues. Enfin, le tunnel constitue un élément de l'infrastructure. C'est ainsi que certaines questions relatives à la prise en compte du Développement Durable et en particulier de l'environnement, apparaissent plus pertinentes à l'échelle de l'infrastructure qu'à celle de l'ouvrage souterrain.

#### A. Le cycle de vie d'un tunnel

La Figure 1 propose une représentation du Cycle de Vie d'un tunnel.



**FIGURE 1.** Représentation schématique du Cycle de Vie d'un tunnel.

Cette représentation permet de mettre en évidence un certain nombre de spécificités des ouvrages souterrains. En effet, les tunnels présentent une « durée de vie » longue. Les structures de génie civil sont généralement dimensionnées pour 100 ans, voire 120 ans. Pour autant, il n'y a pas de réelle fin de vie, éventuellement une fin d'exploitation dans certains cas. Par ailleurs, la phase d'exploitation est fortement marquée par la consommation électrique et la maintenance des équipements (en particulier pour les tunnels routiers) : éclairage, ventilation, gestion technique centralisée (GTC)... Elle revêt également des enjeux majeurs à travers la nécessité d'anticiper les sauts technologiques et la prise en compte de l'évolution du mix énergétique sur une période de 100 ou 120 ans retenue comme période d'observation. Cependant, les résultats des premières études, ont montré que les impacts de la phase de construction, i.e. le chantier lui-même et les matériaux de construction du génie civil restent significatifs par rapport à ceux de la phase d'exploitation [D'Aloia, Rival, Koté 2010]. Enfin, s'il n'y a pas de réelle fin de vie, la phase d'exploitation peut être entrecoupée de réhabilitations lourdes (génie civil et équipements).

#### *B. Contexte normatif relatif à l'ACV appliquée aux ouvrages de génie civil*

L'ACV s'appuie sur le cadrage normatif fourni par les instances internationales de l'ISO (normes NF EN ISO 14040 et 14044) et le CEN (norme « produit » NF EN 15804+A1 et son complément national NF EN 15804/CN). Un cadrage méthodologique spécifique aux ouvrages de génie civil a été publié fin 2017 et révisé en 2021 [NF EN 15643, 2021]. Il existe également un projet de norme Pr NF EN 17472 [Pr NF EN 17472, 2020] sur les méthodes de calculs des indicateurs d'impact permettant d'évaluer la contribution des ouvrages de génie civil au Développement Durable. Ces deux dernières normes traitent en effet de l'ensemble des dimensions du Développement Durable et pas uniquement de la dimension environnementale. Des travaux normatifs sont toujours en cours. On notera en particulier l'amendement A2 de la norme « produit » NF EN 15804, déjà publié et qui sera seul en vigueur à compter d'octobre 2022, ainsi que la mise à jour du complément national (CN) suite au nouvel amendement A2 [NF EN 15804+A2, 2019].

#### *C. Contexte réglementaire relatif à l'environnement*

En matière de réglementation environnementale, on notera essentiellement le décret n°2017-725 du 3 mai et publié le 5 mai 2017. Ce décret est relatif aux principes et modalités de calcul des émissions

de Gaz à Effet de Serre (GES) des projets publics [Décret 2017-725 2017]. Il rend obligatoire la réalisation d'un bilan des émissions de GES pour : « ...

- *tout projet public soumis, en application de l'article L. 122-1 du code de l'environnement, à une étude d'impact,*
- *tout projet public de construction ou de rénovation de bâtiments d'un montant d'investissement supérieur à 20 000 000 euros hors taxes ou d'une surface de plancher supérieure à 10000 m<sup>2</sup>. »*

Le décret s'applique « ... aux projets publics dont la décision de financement est signée à compter du 1er octobre 2017 » et donc en particulier aux projets d'infrastructures linéaires incluant des sections souterraines.

De manière plus générale, le cadre législatif qui se veut aujourd'hui plus incitatif, évolue à un rythme soutenu depuis plusieurs années. Plusieurs lois en lien avec la transition écologique, son volet énergétique, l'environnement et le développement durable ont été promulguées depuis 2015. On peut y trouver des orientations diverses pouvant s'appliquer aux ouvrages de génie civil. On notera en particulier : la loi de transition énergétique pour la croissance verte (17 août 2015) et la Loi relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire (10 février 2020). A ces lois qui bien souvent se traduisent par des modifications des codes de l'environnement, de l'urbanisme, de l'énergie ... viennent s'ajouter des stratégies nationales puis des plans nationaux.

## II. APPLICATION DE L'ACV AUX OUVRAGES SOUTERRAINS – LES TRAVAUX DU GT41

L'ACV peut être appliquée aux ouvrages souterrains de deux façons différentes selon le stade d'avancement d'un projet. Dans les deux cas, il s'agit bien d'outils d'aide à la décision et d'écoconception. Au stade amont, l'ACV permet de donner au maître d'ouvrage un éclairage « environnemental » qui peut être pris en compte dans ses choix en plus des faisabilités technique et économique (comparaison de fuseaux ou bien de variantes au sein d'un même fuseau, choix d'une solution à l'air libre ou souterraine...). Au stade aval, l'ACV est mise en œuvre sur des données plus détaillées et permet d'orienter des choix constructifs. Il est également possible d'évaluer et de comparer des offres dans le cadre d'un marché en intégrant un critère spécifique. Cela va de pair avec une évaluation de la solution proposée, a posteriori (sur la base de ce qui a effectivement été réalisé). Ce qui permet alors de s'assurer du respect des engagements pris par l'entreprise lors de l'attribution du marché.

Les éléments détaillés ci-après constituent le fruit des réflexions et du travail menés au sein du GT41 de l'AFTES « Travaux souterrains et développement durable ». Le projet de recommandation (publication prévue en 2022), porte sur « L'ACV appliquée aux ouvrages souterrains ». Le fascicule 1 en présente le « Cadrage méthodologique ». La réalisation d'études ACV selon ces recommandations est tronquée car elle ne considère qu'une partie du cycle de vie de l'ouvrage : pré-construction, fabrication des matériaux et autres produits de construction, transport sur chantier et réalisation de l'ouvrage (modules A0-A5 selon la norme NF EN 15643). Néanmoins, certains des exemples d'études présentés au paragraphe III, ciblent également d'autres phases du cycle de vie d'un tunnel.

### A. Objectifs et champs de l'étude

La norme NF EN 15643 précise que l'objet de l'évaluation est l'ouvrage de construction, les ouvrages extérieurs et les ouvrages provisoires et si nécessaire, la « zone d'influence ». La frontière du système doit ainsi inclure la frontière spatiale et la période de référence pour l'évaluation. Les études ACV peuvent revêtir des objectifs ciblés qui conduisant à restreindre parfois le périmètre des postes à prendre en compte. Des exemples d'objectifs ciblés sont listés ci-après :

- Influence de la géologie : implantation de l'ouvrage ;
- Influence des techniques de construction et des solutions constructives (nature et quantités des matériaux mis en œuvre) ;
- Organisation du chantier ;
- Construction d'un ouvrage neuf ou réhabilitation d'un ouvrage existant...

### B. Définition d'équivalent fonctionnelle

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. Dans le cas général d'un tunnel, il peut être décrit de la manière suivante :

*« Assurer la continuité d'un itinéraire entre deux points A et B, par une traversée souterraine, pour un trafic donné et pour une période donnée »*

Il s'agit en l'occurrence du tunnel lui-même, placé dans son environnement géologique. Les hypothèses de trafic en déterminent la géométrie et le gabarit fonctionnel. La période d'exploitation correspond ici à la période de référence pour l'évaluation et sera donc fixée à 100 ans en référence au dimensionnement des structures de génie civil.

### C. Modélisation ACV complexe

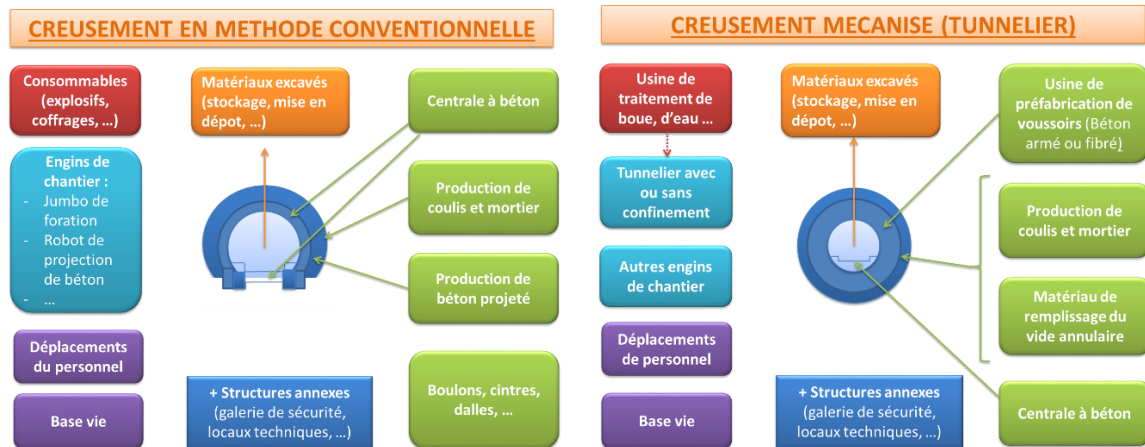
La modélisation ACV peut se révéler relativement complexe. Pour commencer, on distingue deux grandes familles de méthodes de construction (cf. Figure 2) :

- La méthode conventionnelle (machine à attaque ponctuelle, pelle mécanique, Brise Roche Hydraulique (BRH) et/ou recours à l'explosif) ;
- La méthode mécanisée (creusement au tunnelier).



**FIGURE 2.** Les différentes méthodes de creusement des tunnels : conventionnelle à droite (Tunnel de Talant, LiNo (Liaison Nord de l'agglomération dijonnaise)) et mécanisée à gauche – tunnelier (TEL).

La description des différents postes et donc des processus élémentaires à prendre en compte dans le périmètre d'une étude ACV appliquée à la construction d'un tunnel, dépend essentiellement de la méthode de construction (cf. Figure 3).



**FIGURE 3.** Postes à prendre en compte dans le périmètre d'études ACV : creusement en méthode conventionnelle à gauche, au tunnelier à droite.

L'étape de réalisation de la chaussée routière ou de plateforme ferroviaire n'est pas prise en compte ici dans la mesure où elle relève le plus souvent d'un marché distinct de celui du tunnel. Des outils ACV de type écomparateur ont déjà été développés pour les sections à l'air libre. Ils peuvent être utilisés pour la chaussée en tunnel en adaptant les scénarios d'entretien au cas des tunnels.

#### D. Collecte des données, données environnementales et indicateurs d'impacts

La collecte et le choix des données constituent une étape clef dans la réalisation d'une étude ACV. On distingue deux types de données :

- Les données « physiques » ;
- Les données « environnementales ».

Les données physiques comprennent les types et quantités de béton, d'armatures, de cintres, de boulons, les consommations horaires de gasoil et d'électricité... Selon le stade d'avancement du projet, elles peuvent être issues des études de conception, d'exécution, du suivi des travaux ou bien encore du dossier d'ouvrage exécuté, et accompagnées, si nécessaire, d'hypothèses complémentaires. Les indicateurs d'impacts sont ceux préconisés par la norme Pr NF EN 17472 qui intègrent ceux de la norme NF EN 15804+A1.

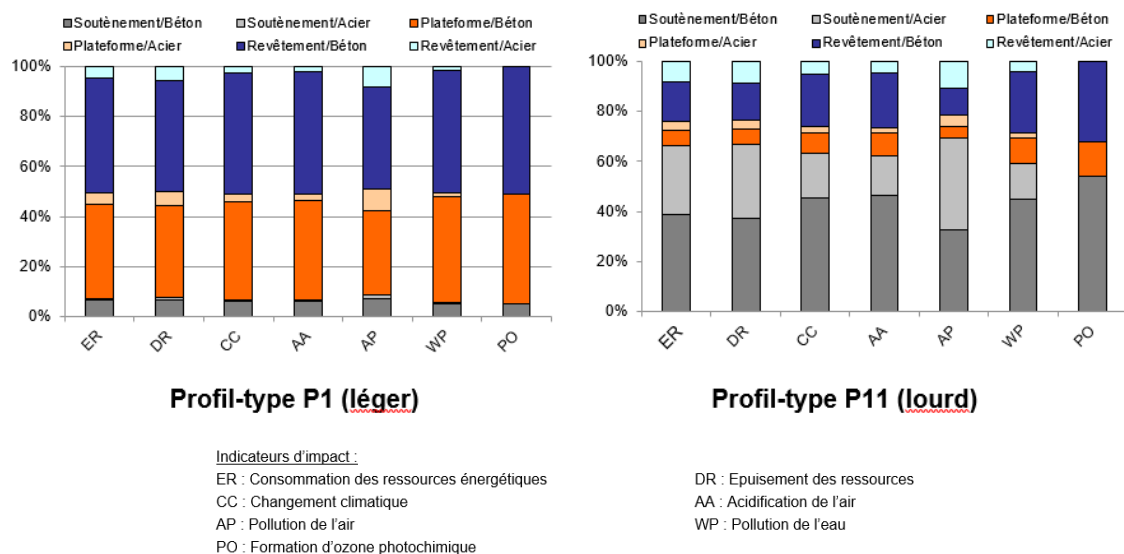
Le réemploi et la valorisation des matériaux excavés constituant un enjeu majeur en travaux souterrains, des indicateurs complémentaires ont été proposés par le GT41.

### III. Quelques exemples d'études sur la phase de construction

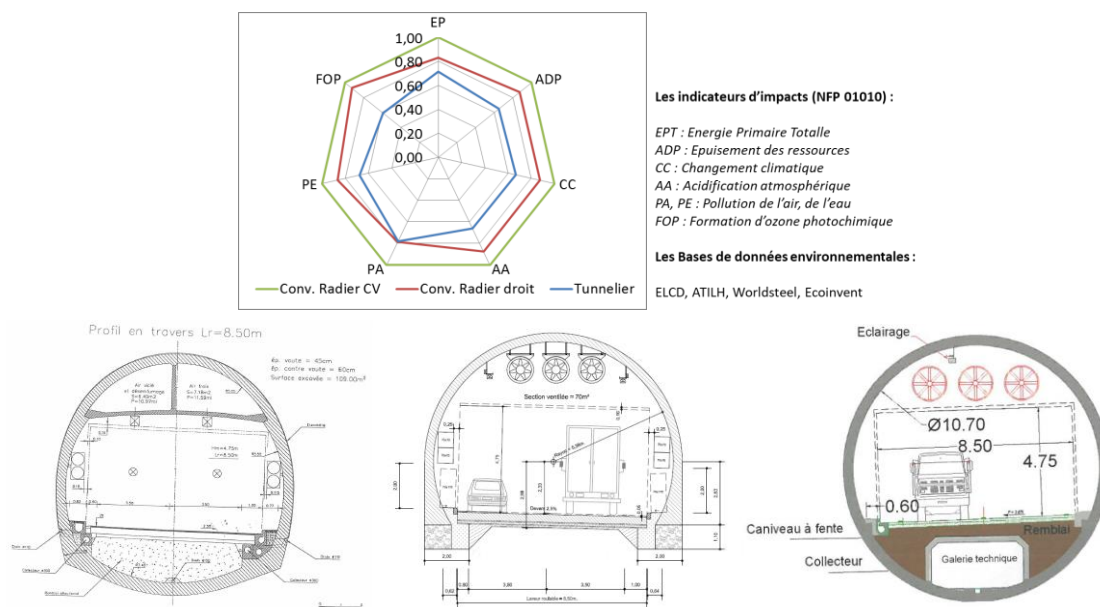
Plusieurs études ont été réalisées par le CETU depuis 2010. Elles ont été partagées au sein du GT41, parfois enrichies et menées conjointement avec des membres du groupe de travail ou des partenaires extérieurs au groupe. Dans tous les cas, elles ont permis d'alimenter la réflexion et le travail d'élaboration et de rédaction des recommandations.

Les toutes premières études ont porté sur les impacts des « matériaux de construction » en méthode conventionnelle [D'Aloia, Rival, Kote 2010]. Les suivantes ont porté sur la prise en compte de la phase chantier à travers le cas du tunnel de Talant sur la LiNo (Liaison Nord de l'agglomération dijonnaise) [D'Aloia, Deffayet 2014]. Ces résultats ont été généralisés l'année suivante à une bibliothèque de sections types. Parallèlement, des études ont été menées sur les bétons en tunnel en prenant en compte les classes d'exposition de ces derniers suivant l'implantation de l'ouvrage [D'Aloia, Rabier, Cabut, Gasser 2012], sur la chaussée routière en tunnel en adaptant le dimensionnement et les scénarios d'entretien à partir de ceux des sections à l'air libre et en comparant les solutions « béton hydraulique » et « béton bitumineux » [Vitrac, Petit 2012]. Une étude spécifique a été menée a posteriori sur le tunnel du Mont Sion sur l'A41 afin de comparer les creusements en méthode conventionnelle et au tunnelier [D'Aloia, Humbert, Bonnet, Dumoulin 2015]. On relèvera également le travail de thèse de Yaarob Audi sur les espaces souterrains [Audi 2016], la première tentative de comparaison de variantes de tracé ferroviaire sur des données issues des études amont du Projet de Ligne Nouvelle Provence Cote d'Azur (LNPCA), l'application au chantier de la galerie de sécurité du Siaix [D'Aloia, Cabut, Massonnat, Leymary 2021] avec une formalisation de la collecte des données, la réalisation d'une ACV screening et la prise en compte de l'exploitation de la galerie (étude réalisée par EVEA). Enfin, les toutes dernières études ACV ont porté sur les impacts de scénarios de gestion et d'emploi des matériaux excavés avec deux cas d'étude : le cas du tunnel de Saint Bât (scénario revisité) et le prolongement du métro B de Lyon [Rodrigues 2021]. Quelques-unes de ces études sont illustrées ci-après.

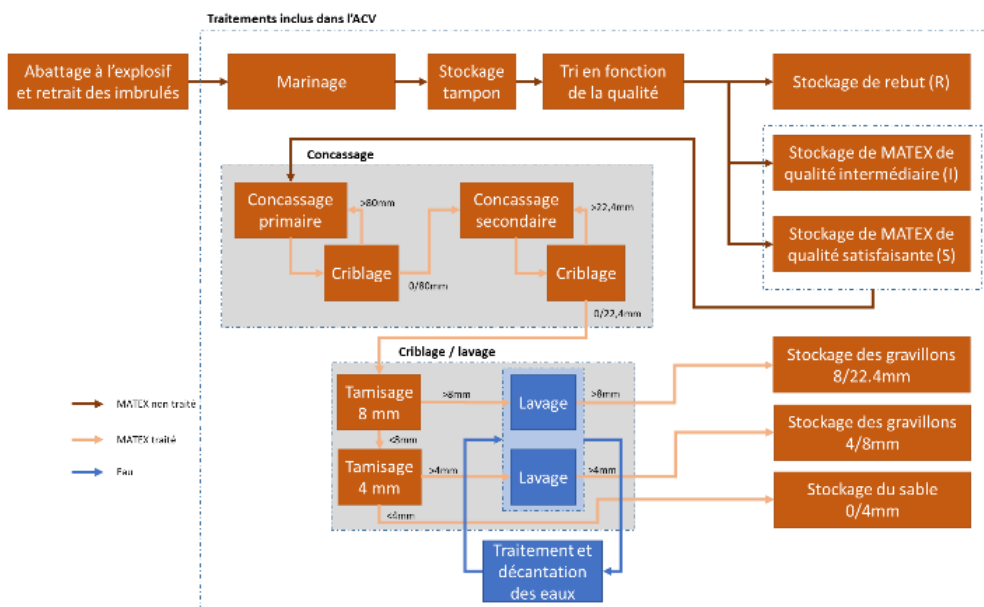
Les travaux actuels visent à mettre à jour les résultats obtenus pour la bibliothèque de sections types en méthode conventionnelle afin de les rendre conformes aux dernières évolutions normatives. Ces résultats seront intégrés au fascicule 2 des recommandations du GT41 qui ciblera la méthode conventionnelle et fournira des ordres de grandeur des impacts de sections types. Un fascicule 3 est en projet sur le creusement au tunnelier, mais des données font encore cruellement défaut.



**FIGURE 4.** Contributions relatives des impacts des aciers et des bétons pour les trois principales étapes du Génie Civil (Soutènement/Revêtement/Plateforme sous chaussée) [D'Aloia, Deffayet 2014].

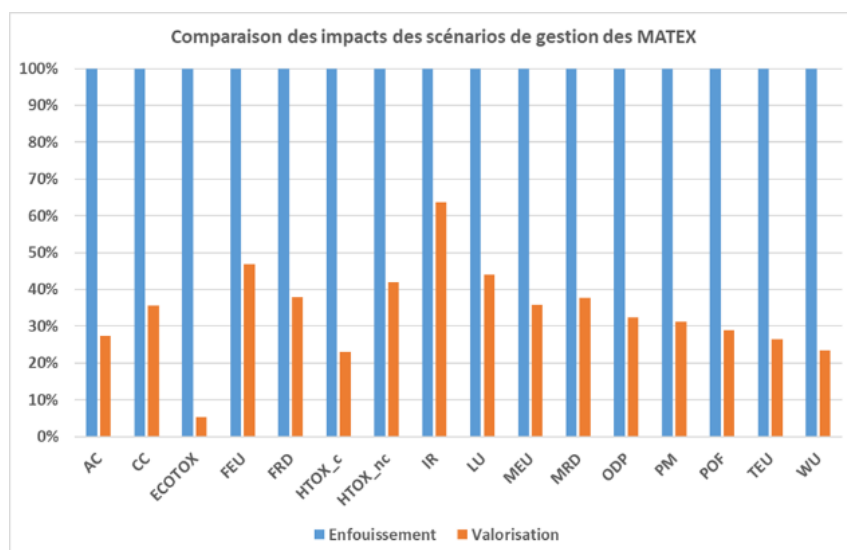


**FIGURE 5.** Impacts des solutions : Méthode conventionnelle radier contre-vouté et droit et méthode au tunnelier - Tunnel du Mont Sion (A41) [D'Aloia, Humbert, Bonnet, Dumoulin 2015].



**FIGURE 6.** Schéma de principe de traitement et d'emploi des matériaux excavés sur le tunnel de Saint Bât (scénario fictif « revisité ») [Rodrigues 2021].





Abbréviation	Catégorie d'impact	Unité	LU	Usage des sols	point
AC	Acidification	mol H <sup>+</sup> -Eq			
CC	Changement climatique	kg CO2-Eq			
ECOTOX	Ecotoxicité	CTU			
FEU	Eutrophisation des eaux douces	kg P-Eq			
FRD	Épuisement des ressources fossiles	MJ			
HTOX_c	Santé humaine (cancers)	CTUh			
HTOX_nc	Santé humaine (hors cancers)	CTUh			
IR	Substances ionisantes sur l'Homme	kg U235-Eq			
			LU	Usage des sols	point
			MEU	Eutrophisation des eaux marines	kg N-Eq
			MRD	Épuisement des ressources minérales	kg Sb-Eq
			ODP	Destruction de la couche d'ozone	kg CFC-11-Eq
			PM	Particules fines	disease incidence
			POF	Formation d'ozone photochimique	kg NMVOC-Eq
			TEU	Eutrophisation terrestre	mol N-Eq
			WU	Ressource en eau	m <sup>3</sup> water-Eq

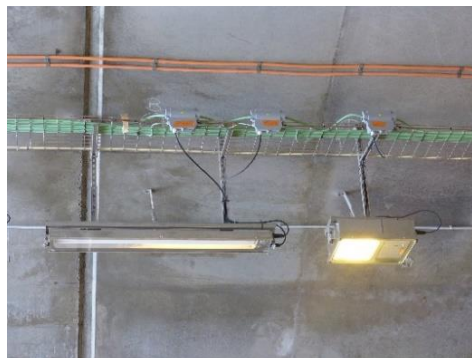
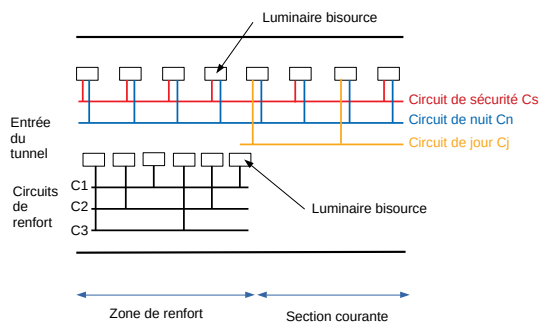
**FIGURE 7.** Comparaison des impacts du scénario de traitement et d'emploi des matériaux excavés sur le tunnel de Saint Béat (scénario fictif « revisité ») avec une variante « enfouissement » [Rodrigues 2021].

#### IV. Focus sur une étude récente en phase exploitation : le cas des tunnels routiers

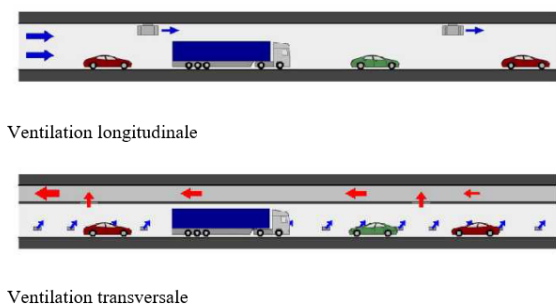
##### A. Les équipements en tunnel routier

En tunnel routier, les familles d'équipements d'éclairage et de ventilation sont importantes tant sur le plan des quantités de matériaux mobilisés que des consommations électriques. Dans un premier temps, les impacts potentiels sur l'environnement de ces 2 familles d'équipements ont donc été étudiés. La période de référence pour l'évaluation de la phase de « vie en œuvre » a été fixée à 100 ans en cohérence avec le dimensionnement des structures de génie civil.

L'installation d'éclairage comprend plusieurs circuits avec un éclairage de renfort aux têtes et un éclairage de niveau constant en section courante. La ventilation comprend quant à elle, une ventilation sanitaire et une ventilation de désenfumage en cas d'incendie.



**FIGURE 8.** Schéma de principe d'une installation d'éclairage (différents circuits) et principaux équipements [Charles, Yaghzar, D'Aloia 2020].



**FIGURE 9.** Principes des différents systèmes de ventilation, à gauche, et accélérateurs avant installation, à droite [Charles, Yaghzar, D'Aloia 2020].

Les paramètres de dimensionnement de l'éclairage et de la ventilation étant différents, ces deux familles d'équipements ont été modélisées séparément et des scénarios ont été définis : 15 pour l'éclairage et 12 pour la ventilation.

*B. Le cas de l'éclairage*

Quinze scénarios conduisant à 15 configurations de tunnels ont été construits pour réaliser les ACV des équipements d'éclairage. Les paramètres des 15 scénarios sont récapitulés dans le tableau 2. Chaque scénario est décrit par une consommation électrique et une quantité d'équipements bien définie (nombre de luminaires, de sources, de boîtes de dérivation...).

**TABLEAU 2.** Les 15 scénarios de l'ACV de l'éclairage.

Paramètres dimensionnant	Tunnel					
	Bidirectionnel					
	Urbain			Non urbain		
Vitesse de référence (km/h)	50	70	90	50	70	90
Niveau de voile <sup>a</sup>	m	m	m	f	m	m
Scénario	1	2	3	4	5	6

Paramètres dimensionnant	Tunnel									
	Unidirectionnel									
	Urbain					Non urbain				
Vitesse de Référence (km/h)	50	70	90	110	50	70	90	110	110	110
Niveau de voile <sup>a</sup>	f	F	m	m	m	m	m	m	F	F
Scénario	7	8	9	10	11	12	13	14	15	15

<sup>a</sup>. Niveau de voile : f : faible, m : moyen, F : Fort

### C. Le cas de la ventilation

Douze scénarios conduisant à 12 configurations de tunnel ont été construits pour réaliser les ACV des équipements de ventilation (cf. Tableau 3). Chaque scénario est décrit par une consommation électrique et une quantité d'équipements (nombre d'accélérateurs, masse de câble...).

**TABLEAU 3.** Les 12 scénarios de l'ACV de la ventilation.

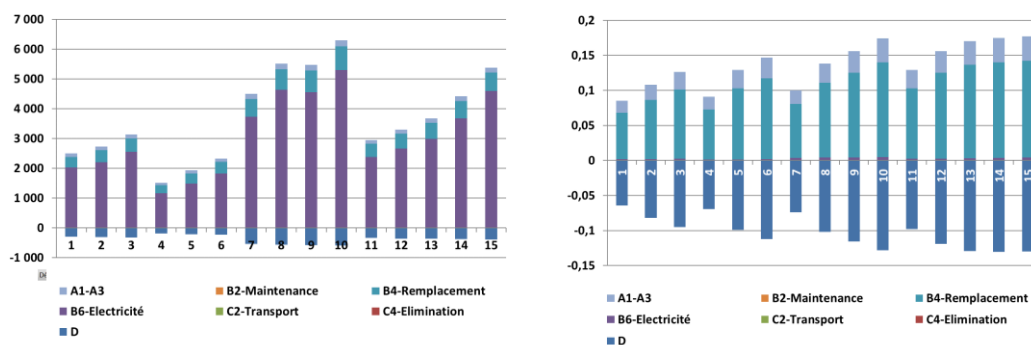
Scénario N°	Système de ventilation <sup>a</sup>	Nb de voie	Section (m <sup>2</sup> )	Pente	L (m)	Urbain ou non urbain <sup>b</sup>	TMD <sup>c</sup>
1	L	2	60	2%	500	NU	oui
2	L	2	60	2%	500	NU	non
3	L	2	60	2%	1500	NU	oui
4	L	2	60	2%	1500	NU	non
5	L	2	60	5%	1500	NU	oui
6	L	2	60	5%	1500	NU	non
7	LEM	2	60	2%	1400	U	non
8	LEM	3	60	2%	1400	U	non
9	LEM	3	110	2%	1400	U	non
10	T	2	60	2%	1400	U	non
11	T	3	60	2%	1400	U	non
12	T	3	110	2%	1400	U	non

<sup>a</sup> L : Longitudinale – LEM : Longitudinale avec extraction massive - T : Transversale - U : Urbain – NU : Non Urbain

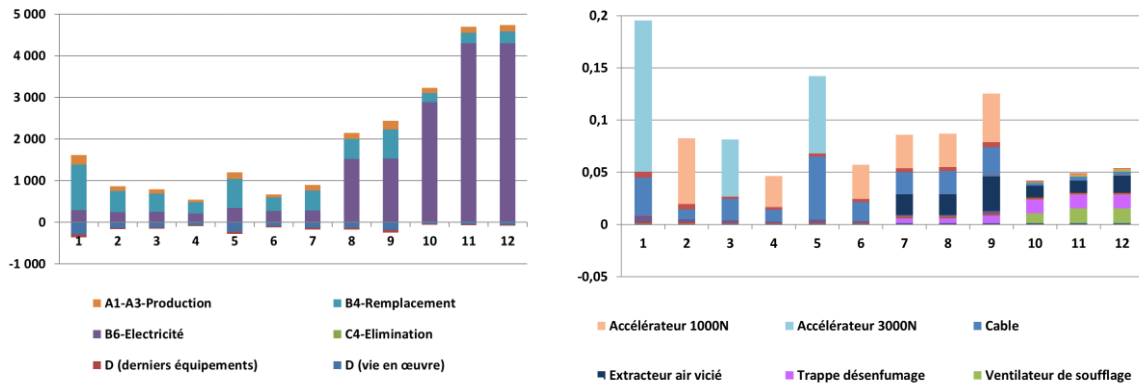
<sup>b, c</sup> Présence de TMD ou non

### D. Résultats et analyse

Les modèles ACV ont été développés sous le logiciel GaBi. Les résultats des calculs sont présentés en figures 10 et 11.



**FIGURE 10.** Eclairage : « réchauffement climatique » à gauche (en kg CO<sub>2</sub> eq.) et « épuisement des ressources (élément) » (en g Sb eq.) à droite pour les 15 scénarios [Charles, Yaghzar, D'Aloia 2020].



**FIGURE 11.** Ventilation : « réchauffement climatique » à gauche (en kg CO<sub>2</sub> eq.) et « épuisement des ressources (élément) » par équipement (y.c. impacts évités) (en g Sb eq.) à droite pour les 12 scénarios [Charles, Yaghzar, D'Aloia 2020].

On gardera en tête que l'optimisation des impacts environnementaux ne peut se faire que sur la base des solutions techniquement envisageables. Concernant le réchauffement climatique, plus de 80 % des impacts sont imputables à la consommation électrique des équipements en phase d'exploitation, sauf dans le cas de la ventilation longitudinale où c'est le remplacement des équipements qui est le plus impactant. Quant à l'épuisement des ressources, les efforts de réduction de la consommation des matières premières doivent porter principalement sur la fabrication des équipements. Ainsi, une augmentation de la durée de vie des équipements pourrait conduire à une réduction significative de cet impact. En parallèle, une attention particulière doit être portée à la recyclabilité de ces équipements dans la mesure où cette étude a été conduite sur la base de taux moyens de recyclage par « famille » de matériau. L'ACV peut néanmoins permettre d'orienter les efforts à faire sur la fabrication des équipements les plus impactants en fonction du scénario choisi.

#### IV. CONCLUSION

On retiendra que l'ACV appliquée aux ouvrages souterrains reste relativement complexe. Si les questions relatives à la construction ont été largement abordées (et surtout en méthode conventionnelle), des points d'attention ont pu être mis en avant :

Pour la phase de construction, il apparaît indispensable de prendre en compte de manière satisfaisante les impacts des engins de chantiers propres à la réalisation des ouvrages souterrains et les installations implantées parfois sur le chantier ou à proximité (usine de préfabrication des voussoirs, usine de traitement de l'eau et/ou des boues, installation de traitement des matériaux excavés ...). Par ailleurs, les quantités importantes de matériaux de construction - essentiellement des aciers et du béton - imposent une prise en compte correcte de leur formulation, tout comme la logistique de chantier : transport des matériaux, approvisionnement en énergie, stockage et traitement et transport des matériaux excavés ...

Concernant les équipements, les études doivent être poursuivies sur les autres familles et l'ensemble des modes de transport doit être analysé. Il restera ensuite à définir un modèle unifié tenant compte de paramètres de dimensionnement distincts.

Enfin, le cadrage méthodologique proposé par les recommandations du GT41 de l'AFTES s'appuyant sur l'ACV et s'appliquant aux ouvrages et travaux souterrains, peut largement inspirer la mise au point de méthodologie/d'outil de type GES, répondant aux obligations soulevées par le décret de 2017.

## REFERENCES

L. D'Aloia Schwartzenruber, F. Rival, H. Kote (2010). "LCA for evaluating underground infrastructures like tunnels: potential environmental impacts of "Materials", Proceeding of the Second International Symposium on Service Life design for Infrastructure, 4-6th October 2010, Delft, The Netherlands, Vol. 1, p. 453 – 460.

J.L. Vitrac, G. Petit (2012). « ACV de différentes structures de chaussée en tunnel ». Rapport d'étude du CETE de Lyon. 103p.

L. D'Aloia Schwartzenruber, M. Rabier, C. Cabut, A.C. Gasser (2012). LCA applied to the Evaluation of potential environmental Impacts of Tunnels. FIB Symposium, Concrete Structures for Sustainable Community. 11-14 June 2012, Stockholm, Sweden.

L. D'Aloia Schwartzenruber, M. Deffayet (2014). Comment les enjeux de développement durable peuvent-ils être pris en compte dans le processus de décision des projets ? Congrès International AFTES 2014 – Lyon, les 13, 14 et 15 octobre 2014.

L. D'Aloia Schwartzenruber, E. Humbert, R. Bonnet, C. Dumoulin (2015). Evaluation des impacts sur l'environnement des tunnels creusés au tunnelier par une méthode de type analyse du cycle de vie (ACV). Journées Techniques AFGC 2015 « Le génie civil en transition ». GC'2015. 18 - 19 2015, Cachan.

Y. Audi (2016). Développement d'une méthodologie d'évaluation au sens du développement durable des aménagements souterrains. Thèse de l'Ecole Centrale de Nantes, Ecole doctorale SPIGA, sous la Direction d'Agnès JULIEN (IFSTTAR).

Ministère de la transition écologique et solidaire (2017). Décret n°2017-725 du 3 mai 2017, publié le 5 mai 2017. Principes et modalités de calcul des émissions de gaz à effet de serre des projets publics.

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. Octobre 2019. 81p.

E. Charles, M. Yaghzar, L. D'Aloia Schwartzenruber, S. Besson, J.F. Burkhart (2020). Life Cycle Assessment of lighting and ventilation in road tunnel modelling, results and how to reduce environmental impacts and energy consumption. 22ième Congrès de Maîtrise des Risques et Sécurité de Fonctionnement λμ22. IMDR (Institut pour la Maîtrise des Risques). Le Havre, France, 12-15 octobre 2020, 7pp.

L. D'Aloia, C. Cabut, M. Massonnat, G. Leymary (2021). Bilan environnemental de la galerie de sécurité du tunnel du Siaix. Journées GC'2021 « Le génie civil face au défi de la croissance verte », 8 et 9 juin 2021.

J. Rodrigues (2021). Gestion des matériaux excavés (MATEX) lors du creusement d'ouvrages souterrains : Analyse du Cycle de Vie (ACV) appliquée à l'évaluation des impacts sur l'environnement des scénarios de gestion des MATEX. Postdoctorat Ecole des Mines de Saint Etienne, CETU, ADEME.

NF EN 15643 (2021). Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Cadre pour l'évaluation des bâtiments et des ouvrages de génie civil. Juin 2021. 46p.