

ÉVALUATION DES IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT DES TUNNELS CREUSÉS AU TUNNELIER PAR UNE MÉTHODE DE TYPE ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV)

EVALUATION OF ENVIRONMENTAL IMPACTS OF TUNNELS (IN CASE OF MECHANIZED TUNNELLING) BY A LIFE CYCLE ASSESSMENT METHOD (LCA)

**Laetitia D'ALOIA SCHWARTZENTRUBER¹, Emmanuel HUMBERT¹, Romain BONNET²,
Claude DUMOULIN²**

¹ (CETU – Centre d'études des tunnels / MEDDE)

² (Bouygues Construction)

1. LES DIFFÉRENTES MÉTHODES DE CREUSEMENT

Les tunnels étaient jadis réalisés exclusivement par des méthodes que l'on qualifie aujourd'hui de méthodes

« conventionnelles ». Le terrain est excavé à l'aide d'engins de chantier et de terrassement assez courants après avoir été déstructuré au moyen d'explosifs, de marteaux brise-roche ou d'outils divers. Cette technique est encore très utilisée aujourd'hui, en particulier du fait des progrès importants et récents dans la maîtrise de l'utilisation des

explosifs et des techniques de pré-soutènement qui en font une méthode qui répond parfaitement aux nombreuses contraintes, exigences et spécificités de chaque site.

Dans ce cas, la géométrie de l'excavation peut être optimisée en fonction de la section à créer (section en « fer à cheval ») et la construction se déroule de manière séquentielle en réalisant successivement le creusement, le marillage (évacuation des matériaux), la mise en place du soutènement, de l'étanchéité, puis du revêtement et enfin les structures annexes (dalle de ventilation, réseaux), les équipements et les structures superficielles (chaussée, plateforme) (cf. Figure 1).

En parallèle, depuis une quarantaine d'années s'est développée l'excavation dite « mécanisée ». L'ensemble du creusement et du soutènement est réalisé à l'aide d'un tunnelier : machine de forme circulaire aux dimensions imposantes qui grignote le terrain par rotation d'une grande roue de coupe aux dimensions de la section à excaver sans utilisation d'explosifs. Les tunneliers présentent la particularité de réaliser complètement et en même temps les opérations de creusement, de mise en place du soutènement et du revêtement (ce dernier assurant également la fonction d'étanchéité lorsqu'il est constitué de voussoirs préfabriqués), ainsi que l'évacuation des déblais (le plus souvent à l'aide de bandes convoyeuses ou d'un système hydraulique). Certains types de tunneliers permettent aussi de maintenir une pression sur le front de taille afin de traverser les terrains les plus délicats.

Aujourd'hui, le spectre d'utilisation de chacune de ces méthodes s'est considérablement élargi de sorte que des solutions techniques ont pu être imaginées dans chaque cas pour faire face aux configurations géologiques les plus variées. Les considérations économiques guident principalement le choix entre l'une ou l'autre des techniques, mais d'autres critères de comparaison comme celui des impacts environnementaux, peuvent être aussi pris en considération, si l'on aborde une vision plus globale du projet.

2. L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE APPLIQUÉE À LA MÉTHODE CONVENTIONNELLE

2.1. Les études et données existantes

L'ACV appliquée au creusement en méthode conventionnelle a déjà fait l'objet de plusieurs études [D'AL 2010, D'AL 2011]. Elles se sont initialement appuyées sur des données collectées sur un chantier [MOR 2012]. L'approche a ensuite été généralisée à l'ensemble des configurations possibles [CHA 2013]. Ces études intègrent la décomposition de la construction en phases telles que décrites au paragraphe 1 et prennent en compte notamment les postes suivants : les matériaux (y compris certains « consommables » comme le coffrage du revêtement et les explosifs), les engins de chantier (consommations, amortissement et entretien), le déplacement du personnel.

La méthodologie de prise en compte de l'amortissement et de l'entretien des engins de chantier a été discutée au sein du GT41 de l'AFTES (groupe de travail de l'Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain dédié à la prise en compte du Développement Durable dans les travaux souterrains) sur la base d'une proposition du groupe VINCI. On notera que des postes tels que le transport (approvisionnement en matériaux, amené et repli des engins de chantier, évacuation des déblais) dépendent fortement des conditions de site et de la logistique de l'entreprise. Cependant, des ordres de grandeurs ont pu être dégagés et sont donnés ci-après au paragraphe 2.2. Pour un ouvrage réel, l'unité fonctionnelle peut être définie de la manière suivante :

« Assurer la continuité d'un itinéraire routier par une traversée souterraine pour un trafic donné et une durée d'exploitation fixée à 100 ans ».

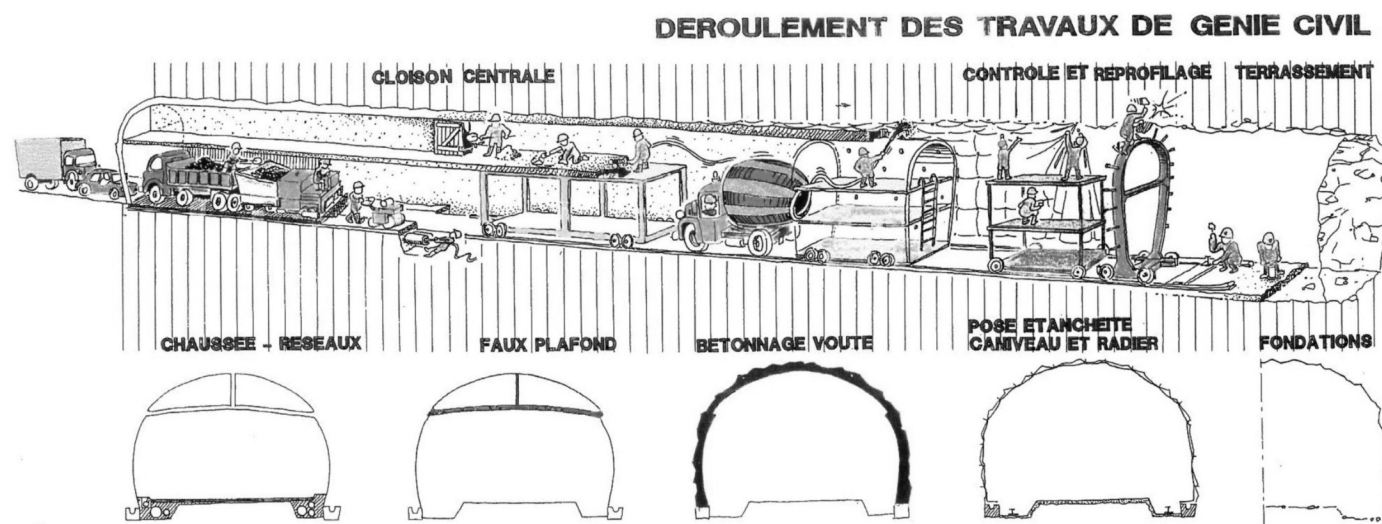


Figure 1 : Le déroulement des travaux de génie civil dans le cas d'un creusement en méthode conventionnelle.

Les données de trafic permettent de fixer la géométrie de l'ouvrage (gabarit et largeur roulable) tandis qu'une durée d'exploitation de 100 ans correspondant au dimensionnement des structures de Génie Civil, permet de prendre en compte l'absence de réelle fin de vie de ce type d'ouvrage. Dans la pratique, un tunnel est constitué sur l'ensemble de sa longueur, de plusieurs « profils-types » (ou profil de soutènement) appliqués sur des longueurs partielles qui dépendent de la nature géologique du terrain rencontré (cf. Figure 2). Le profil sera d'autant plus « lourd » que le terrain est peu favorable. Plusieurs unités fonctionnelles décrivant l'ensemble des solutions techniques, sont ainsi utilisées pour présenter les résultats et systématiser l'approche :

« 1 mètre linéaire de « profil-type » pour un trafic et un environnement géologique donnés et une durée d'exploitation de 100 ans ».

2.2. Quelques ordres de grandeur

Les résultats des études antérieures ont conduit à la répartition suivante des impacts :

- Matériaux de construction : **60% à 75%** ;
- Engins de chantier : **25% à 30%** ;
- Transport : **5% à 10%** (sauf cas particulier) ;
- Base vie : **<5%**.

Les deux derniers postes restent conditionnés par des paramètres spécifiques au chantier. Au sein des impacts

matériaux, les **bétons** et les **aciers** représentent de **80%** à **95%** des impacts ; la contribution des aciers s'échelonnant de 10% à 40% selon la lourdeur du profil type. Ces ordres de grandeurs dépendent peu de l'indicateur d'impact retenu. On signalera cependant que les impacts liés à la consommation des engins de chantier dépendent fortement de l'alimentation électrique : réseau ERDF ou groupe électrogène. En effet, ces engins se déplacent généralement sur moteur thermique et fonctionnent sur moteur électrique pour leur tâche spécifique (cas du robofore par exemple ou de la machine de projection pour les bétons). Les résultats présentés correspondent à une alimentation sur le réseau ERDF.

3. L'ACV DU CREUSEMENT AU TUNNELIER

3.1. Les spécificités du creusement au tunnelier par rapport à la méthode conventionnelle

Dans la démarche d'analyse du cycle de vie, plusieurs particularités sont à prendre en compte dans la comparaison entre un tunnel réalisé au tunnelier et un tunnel réalisé en méthode conventionnelle.

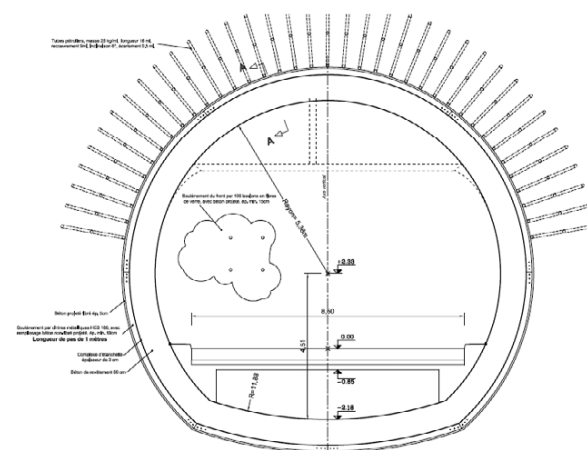
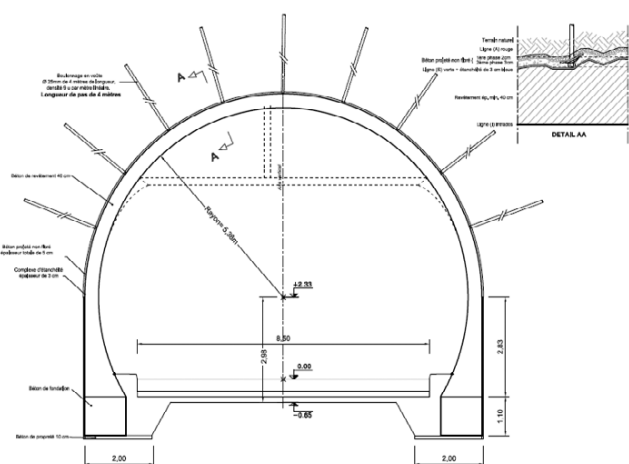


Figure 2 : Exemples de profils types : boulonné (« léger ») à gauche, avec voûte parapluie et radier contrevoûté (« lourd ») à droite.

	Impacts des matériaux du génie civil*		Impact de la construction** LR = 8,50m
	LR = 7m	LR = 11,50m	
Énergie Primaire Totale (GJ)	65 à 272	100 à 450	22 à 83
Changement climatique (t eq. CO2)	7,5 à 20,5	11 à 45	1,9 à 5,2
Épuisement des Ressources Naturelles (kg eq. Antimoine)	21 à 89	31 à 150	–

* : du profil le plus léger au plus lourd pour les différentes largeurs roulables (par mètre linéaire).

** : du profil le plus léger au plus lourd hors base vie et fin de vie (largeur roulable 8,5 mètres – par mètre linéaire)

Tableau 1 : Impacts des matériaux et engins de construction pour quelques indicateurs d'impact (Source CETU).

Géométrie de l'excavation et nature des structures de soutènement

L'ouvrage à réaliser est, pour un ouvrage creusé au tunnelier, nécessairement circulaire. Pour une même section utile (l'espace qui sera utilisable par l'utilisateur), les quantités de matériaux à excaver et la nature des structures qui confortent la voûte sont largement différentes (cf. Figure 3). Par exemple, pour un ouvrage autoroutier comprenant deux voies de circulation par tube, la **différence de section excavée** est de l'ordre de **10 %** (110 m² pour une excavation circulaire et environ 100 m² en méthode conventionnelle). La différence concerne aussi la nature des structures de soutènement et de revêtement.

En méthode conventionnelle, le soutènement est constitué de cintres métalliques, de boulons d'ancrage ou de béton projeté, auxquels s'ajoutent le complexe d'étanchéité et le revêtement définitif. **L'épaisseur totale** de la structure « soutènement-revêtement » est de l'ordre de **60 cm** à **80 cm**, la plupart du temps en béton non armé.

Au tunnelier, c'est le plus souvent un voussoir en béton armé qui se substitue à cet ensemble, mais avec une épaisseur plus faible. Pour un ouvrage de 12 m de diamètre environ, **l'épaisseur** est de l'ordre de **50 cm** au total, auquel s'ajoute un matériau de remplissage constitué de coulis de ciment ou de gravette, destiné à combler le vide entre l'anneau préfabriqué et le terrain de l'ordre d'une dizaine de centimètres.

Nature des engins de chantier et énergie nécessaire pour réaliser l'excavation et le marinage

Au tunnelier, le terrain est broyé par rotation d'une grande roue de coupe appuyée directement sur le front de taille. Cette dernière est équipée d'outils spéciaux adaptés à la qualité du massif rocheux (molettes, couteaux). Lorsque la qualité du terrain l'exige, des additifs (mousse, boue) peuvent être appliqués au front de taille pour en faciliter l'excavation ou en assurer la stabilité pendant cette phase. La roue est entraînée par des moteurs hydrauliques ou électriques. L'énergie est essentiellement électrique. Des engins spécifiques sont également utilisés pour acheminer les matériaux jusqu'à l'avant de la machine et des installations particulières peuvent être nécessaires à son fonctionnement (usine de traitement des boues par exemple). Enfin, on notera que jusqu'à présent, un tunnelier était la plupart du temps considéré comme une machine « prototype », construite et utilisée pour un chantier unique. Ce

n'est plus le cas aujourd'hui et plusieurs scénarios sont envisageables. Le tunnelier peut être **revendu** pour recyclage ou remis à niveau et **réutilisé** sur un autre chantier. En ce qui concerne le cas des engins de chantiers utilisés pour la méthode conventionnelle, ils sont généralement immobilisés et en partie amortis, le temps du chantier.

Focus sur le poste de préfabrication des voussoirs

En général, le revêtement des tunnels creusés au tunnelier est constitué de voussoirs préfabriqués, assemblés en anneau, pour permettre une pose au fur et à mesure de l'avancement de la machine. Le béton des voussoirs est le plus souvent armé, éventuellement fibré. La **préfabrication** des voussoirs, incluant généralement un traitement thermique, peut être réalisée par un **sous-traitant** disposant d'une usine de préfabrication proche du chantier. Les voussoirs peuvent aussi être réalisés directement en **part propre** dans une usine foraine érigée pour les seuls besoins du chantier. Une fois réalisés, les voussoirs sont stockés à proximité de l'entrée du tunnel, puis acheminés sur le train suiveur du tunnelier au fur et à mesure de la progression de la machine pour être mis en place à l'aide d'un érecteur installé à l'arrière de la tête de coupe.

Cette technique pose ainsi la question des impacts de l'installation de préfabrication elle-même (comme ceux de toute autre installation spécifique) : amortissement, transport, emprise, ... et du traitement thermique en particulier.

3.2. La définition du périmètre de l'ACV et la collecte des données

Quelle que soit la méthode utilisée, le processus de construction d'un tunnel peut se décomposer de manière simplifiée selon les phases suivantes :

1. La préparation du chantier (comprenant le montage du tunnelier, le cas échéant le montage de l'usine de préfabrication des voussoirs, de la station de traitement des boues, la réalisation de l'amorce ou du puits d'entrée).
2. La construction :
 - Le creusement (excavation et marinage) ;
 - La mise en place du soutènement et du revêtement ;
 - Le transport et le traitement des matériaux.
3. La fin de chantier et le réaménagement du site (comprenant notamment le démontage du tunnelier).

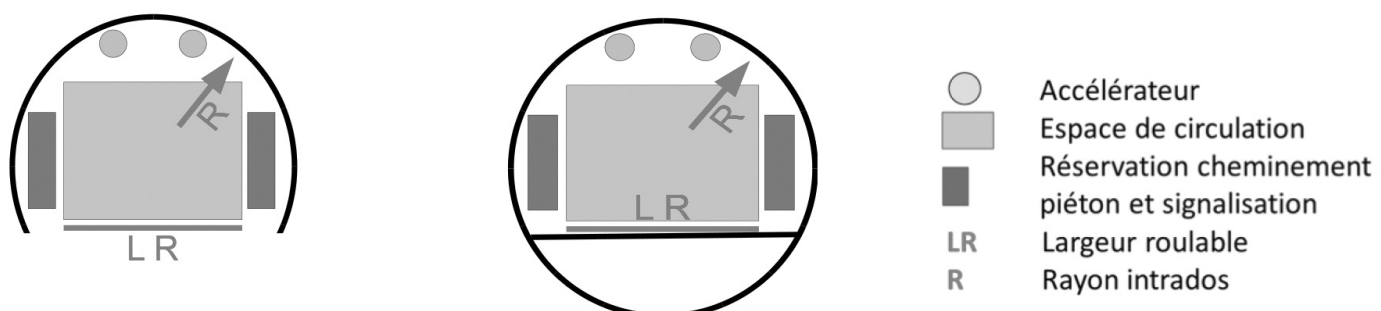


Figure 3 : Schéma de principe des sections transversales selon les deux méthodes de creusement : méthode conventionnelle à gauche et au tunnelier à droite.

Une comparaison entre la méthode conventionnelle et la méthode au tunnelier est réalisée pour chacune de ces phases, afin de mettre en évidence les différences entre les deux méthodes et d'explicitier le périmètre de l'analyse. Cette comparaison est synthétisée dans le tableau 2 du point de vue des matériaux et des techniques et le périmètre proposé pour une étude ACV du creusement au tunnelier est présenté en figure 4.

Le périmètre ainsi défini, tient compte des spécificités du creusement au tunnelier. Il intègre en particulier des installations spécifiques telles qu'une usine de préfabrication des voussoirs qui peut être installée à proximité immédiate du chantier, une usine de traitement de l'eau ou des boues, etc. La prise en compte de ces installations majeures n'est pas sans poser des questions d'ordre méthodologique quant à leur amortissement et leur fonctionnement. Il en est de même du tunnelier, qui est conçu spécifiquement pour un chantier, mais aujourd'hui le plus souvent « recyclé » sur un autre chantier (cf. Paragraphe 3.1). On signalera également que la définition de ce périmètre a conduit à la mise au point d'une grille de collecte des données sur chantier

actuellement en phase de test auprès des membres du GT41 de l'AFTES.

4. TENTATIVE D'APPLICATION AU TUNNEL DU MONT SION (A41)

4.1. Présentation du chantier

Le tunnel du Mont-Sion est situé sur l'autoroute **A41 Nord** reliant Annecy à Genève. Cet ouvrage, d'une longueur d'environ **3100 m**, est constitué de **deux tubes** parallèles comportant chacun deux voies de circulation monodirectionnelles. Il a été réalisé par Bouygues TP et livré en 2008.

Les ouvrages de tête de chaque tunnel ont été réalisés à l'air libre tandis que la partie centrale a été creusée à l'aide d'un tunnelier à mode ouvert. Afin de permettre le montage au plus tôt des principaux équipements, les locaux tech-

Phases	Étapes	Tunnelier	Méthode conventionnelle
La préparation du chantier**	Infrastructures provisoires	Spécifiques au fonctionnement du tunnelier	Standard
	Installations de chantier	Spécifiques* au tunnelier (centrale de préfabrication des voussoirs, usine de traitement de l'eau, des boues, convoyeur à bande, ...)	Standard
	Acheminement des matériels	Transport et montage du tunnelier	Standard
La construction***	Creusement	Roue de coupe, confinement au front, injection d'additifs, remplacement de molettes	Explosifs, brise roche, machine à attaque ponctuelle
	Marinage (évacuation des matériaux)	Convoyeur à bande, véhicule multi-service, usine de traitement des boues (si nécessaire)	Charge et Roule, tombereaux, pelle mécanique
	Soutènement	Voussoirs en béton armé ou fibré préfabriqués et mortier de remplissage ou gravette	Boulons, béton projeté, cintres métalliques, ...
	Étanchéité	Voussoirs et joints entre voussoirs	Géotextile, membrane PVC
	Revêtement	Voussoirs en béton armé ou fibré préfabriqués	Béton non armé coulé en place
La fin de chantier et le réaménagement du site**	Infrastructures provisoires	Démolition et réaménagement des infrastructures spécifiques	Standard
	Installations de chantier	Démontage et réaménagement des installations spécifiques	Standard
	Repli des matériels	Démontage et transport du tunnelier	Standard

* : Le nombre et la nature des installations spécifiques dépendent du type de tunnelier.

** : Ces deux phases conduisent aux mêmes éléments standards à prendre en compte pour les deux méthodes. Cependant, seuls les éléments spécifiques au tunnelier sont mentionnés dans la colonne « tunnelier ».

*** : Si seule la section courante du tunnel est présentée dans cette phase, des ouvrages annexes doivent normalement être également considérés : galerie de sécurité, galeries intertube, locaux techniques, station de ventilation, ouvrages de têtes puits d'accès, ...

Tableau 2 : Comparaison entre les deux méthodes de creusement selon les différentes phases.

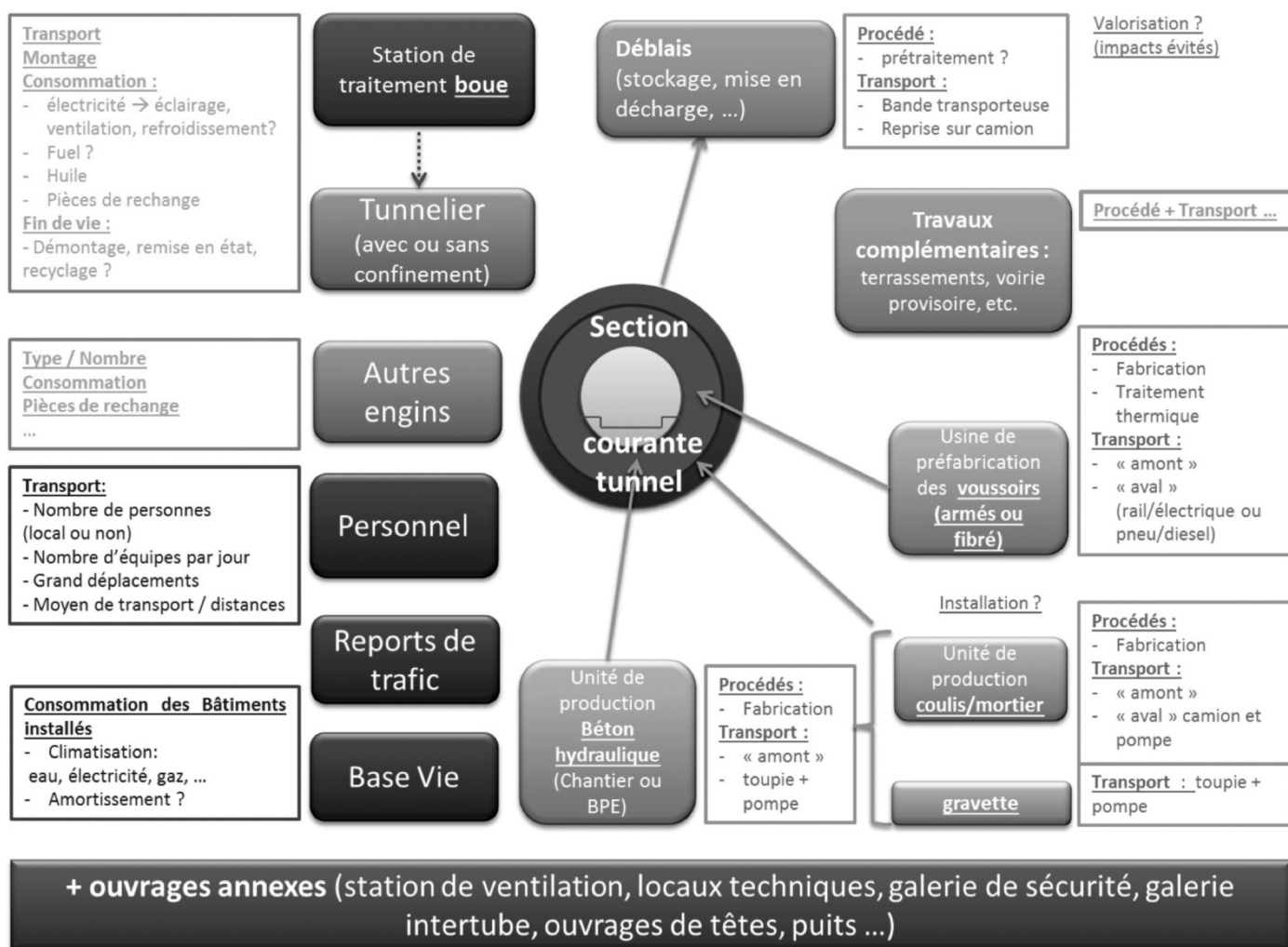


Figure 4 : Périmètre proposé pour l'étude ACV du creusement au tunnelier.

niques de tête ont été concentrés sur le premier tube creusé. Cela explique les différentes longueurs de creusement au tunnelier dans les deux tubes, respectivement de 2 914 m et 2 966 m.

Pour permettre une **largeur roulable** de **8,50 m** sur une **hauteur** de **4,75 m** correspondant à deux voies de circulation, un diamètre intérieur de 10,70 m a été retenu en section courante de chaque tunnel. Le volume laissé libre sous la chaussée est partiellement occupé par une **galerie technique préfabriquée** d'environ 4,00 m de large et 2,00 m de haut. Un remblai est mis en place de part et d'autre de la galerie technique. La prise en compte de la

règlementation concernant la sécurité en tunnel a conduit à la réalisation de galeries de communication entre tubes et de niches de sécurité.

Le revêtement est composé d'**anneaux** drainés d'une longueur de 2,00 m, chaque anneau étant composé de **six voussoirs préfabriqués** d'épaisseur 0,45 m (cf. Figure 5). Le vide annulaire est rempli de gravette pour le drainage en partie haute et de mortier en partie basse. Les voussoirs sont réalisés dans une usine de préfabrication spécifique au projet et montée à proximité du chantier. La préfabrication de la galerie technique a été sous-traitée à un prestataire local situé à 125 km du site.



Figure 5 : Quelques installations du chantier du Mont Sion (A41).

Le tunnelier est de type machine pour roche dure avec anneau de poussée. Le diamètre de coupe est de 11,93 m et son poids avoisine **2275 t**. Le front de taille est excavé par une tête de coupe équipée de 72 molettes (cf. Figure 5). Les matériaux excavés sont transportés par convoyeur jusqu'à l'entrée du tunnel, où ils sont stockés provisoirement, puis repris par camions et mis en dépôt définitif. Une partie de ces matériaux a cependant été réemployée pour le remblai technique. Les voussoirs sont approvisionnés depuis l'extérieur vers l'arrière du train suiveur du tunnelier au moyen de trains sur pneus.

4.2. Les impacts « matériaux » de la section courante

La section courante étudiée est présentée en figure 6a. Les éléments retenus pour cette première analyse sont : l'anneau composé des 6 voussoirs préfabriqués, le remplissage du vide annulaire par de la gravette et du mortier, la galerie technique préfabriquée, le remblai technique compacté, les trottoirs et le caniveau.

L'anneau composé de 6 voussoirs préfabriqués

Le béton composant les voussoirs est de type C50/60 XA2 XF4 G+S dosé à 390 kg de ciment CEM I. Un C70/85 a été utilisé pour les voussoirs spéciaux (niches et intertubes), mais n'a pas été distingué dans les calculs compte tenu du faible linéaire de ces voussoirs spéciaux (<2%). Le taux moyen de ferrailage est de 85 kg/m³.

Le vide annulaire estimé à 15cm, est supposé rempli à 85% par de la gravette 4/12 et à 15% par un mortier dosé à 125kg de ciment CEM II 32,5.

La galerie technique préfabriquée est réalisée en béton C35/45 avec un taux de ferrailage de 122 kg/m³. Le béton est supposé dosé à 350 kg de ciment CEM I.

Le remblai technique compacté : est supposé être réalisé pour moitié à l'aide de matériaux excavés réemployés et pour moitié de grave/ciment dosée à 100kg de ciment CEM II.

Les trottoirs et le caniveau sont supposés être réalisés dans un béton similaire à celui de la galerie technique préfabriquée.

Le tableau 3 récapitule l'ensemble des quantités de matériaux mis en œuvre. Les indicateurs d'impacts calculés sur

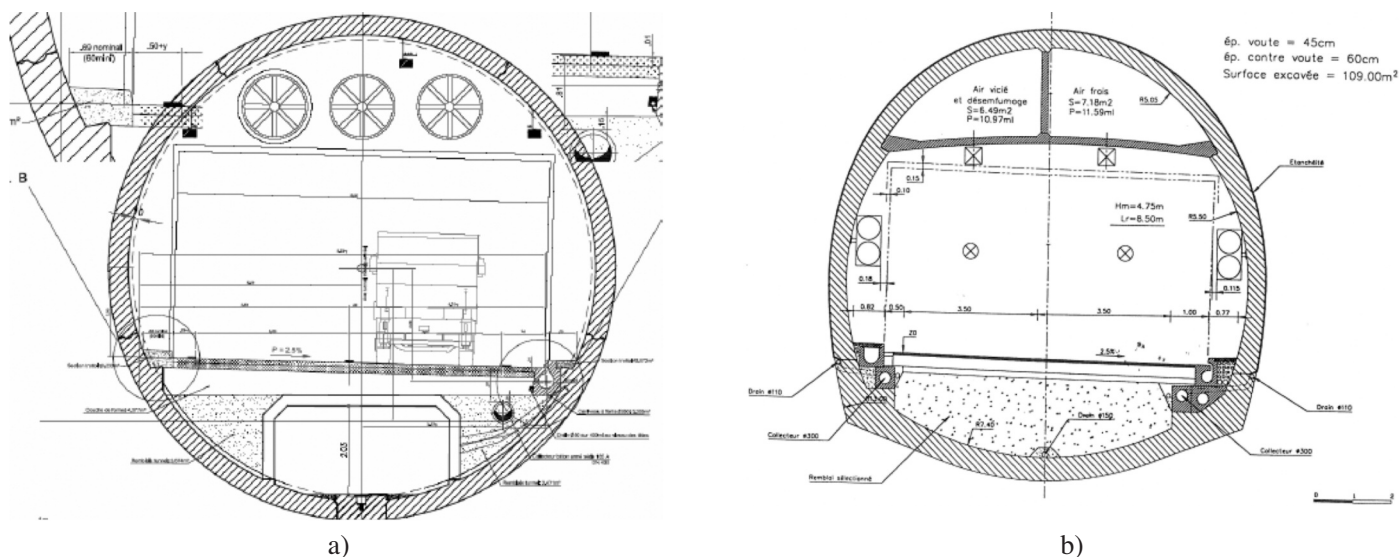


Figure 6 : La section courante au tunnelier à gauche (a) et en méthode conventionnelle à droite (b) (PRO).

	Anneau	Remplissage	Galerie technique	Remblai technique	Trottoir + Caniveau	Total
Ciment (CEM I) (kg)	6329,5		656,2		213,5	7199,2
Ciment (CEM II) (kg)		78,5		252,2		330,7
Gravillon (kg)	17852,4		2250	5675,6	732	26510
Sable (kg)	12659,0	879,6	1500		488	15526,6
Ferrailage (kg)	1379,5		228,7			1608,2
Gravette (kg)		8754,7				8754,7

Tableau 3 : Quantités de matériaux mis en œuvre dans la section transversale (pour 1ml).

cette base sont présentés dans le paragraphe suivant. Ils ne prennent pas en compte la mise en œuvre et les données environnementales utilisées proviennent de l'ATILH, Worldsteel et ELCD (données publiques).

4.3. Une alternative en méthode conventionnelle

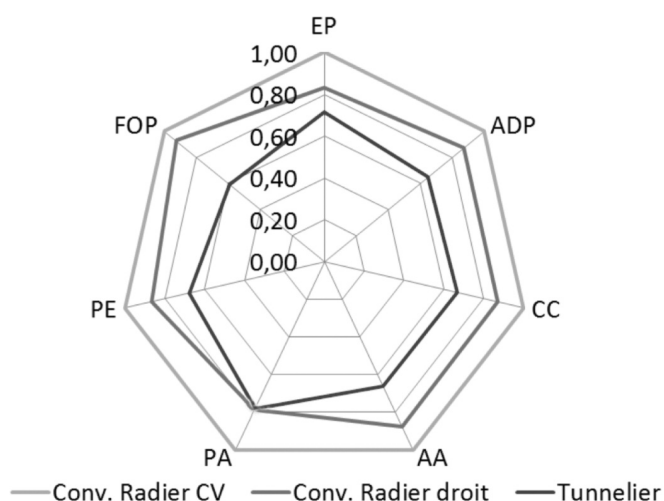
Compte tenu de la longueur de l'ouvrage, l'option d'un creusement en méthode conventionnelle avait également été étudiée lors des études d'avant-projet et de projet. Bien que les données de dimensionnement soient moins précises, il s'est révélé possible de conduire un calcul ACV similaire en méthode conventionnelle et de comparer les impacts des deux méthodes (hors mise en œuvre). La section courante de l'ouvrage est présentée en figure 6b (configuration avec radier contrevoûté). Le calcul a également été conduit en configuration radier droit, plus fréquente avec des profils plutôt « légers ». La dalle et la cloison de ventilation ne sont pas prises en compte dans le calcul, pour se ramener à la même solution de ventilation longitudinale. Enfin, 5 profils types boulonnés et cintrés, dépendant de la géologie sont utilisés sur des longueurs d'application variables. Les résultats sont présentés en figure 7 pour 1 mètre linéaire.

Ces résultats mettent en évidence les plus forts impacts des matériaux constitutifs de la section transversale dans le cas de la méthode conventionnelle. Ceci est en partie dû au fait que les profils types, en méthode conventionnelle, dépendent directement de la nature géologique du terrain rencontré (soutènement plus ou moins lourd avec du béton projeté, des boulons, voire des cintres métalliques) alors que le dimensionnement des voussoirs, néanmoins armés, ne varie pas sur la longueur de l'ouvrage. On notera que la configuration avec radier contrevoûté envisagée au Mont Sion au stade projet, est particulièrement pénalisante. Ces

premiers résultats ne tiennent cependant pas compte de la mise en œuvre. Si pour la méthode conventionnelle, on peut supposer que ces impacts représenteraient 25 à 30% des impacts totaux, pour le creusement au tunnelier, ils sont difficiles à évaluer à l'heure actuelle compte tenu des installations spécifiques présentes sur le chantier et du tunnelier lui-même. Leur évaluation reste nécessaire afin d'affiner la comparaison des deux solutions.

5. CONCLUSION

Les résultats de cette étude permettent de comparer les impacts du creusement d'un tunnel par la méthode conventionnelle et au tunnelier, du point de vue des matériaux mis en œuvre. Ils mettent en évidence des impacts environ 40% moins importants pour la méthode au tunnelier par rapport à une méthode conventionnelle avec radier contrevoûté. Ces écarts se réduisent cependant dans une configuration avec radier droit (20%). Cependant, le choix entre les deux techniques de creusement, dépend de la longueur de l'ouvrage. En dessous de 3000 mètres, le tunnelier est difficilement compétitif d'un point de vue économique. Mais les conditions géologiques, l'accès au site et les matériaux excavés, peuvent également orienter le choix entre les deux méthodes. Il est néanmoins intéressant, pour un maître d'ouvrage, de pouvoir disposer d'un éclairage complémentaire avec les critères environnementaux que propose l'ACV et qui dépassent le simple cadre de l'étude d'impacts. Cependant, pour rendre l'approche proposée plus objective, il est nécessaire de prendre en compte les aspects liés au « chantier ». Cela passe par la collecte de données sur le fonctionnement du tunnelier et des installations spécifiques comme l'usine de préfabrication des voussoirs. Enfin, certaines questions d'ordre méthodologique doivent également être traitées (amortissement des installations, du tunnelier, etc.).



EPT : Energie Primaire Totale ; ADP : Epuisement des ressources ; CC : Changement climatique
AA : Acidification atmosphérique ; PA, PE : Pollution de l'air, de l'eau ; FOP : Formation d'ozone photochimique

Figure 7 : Indicateurs d'impacts « matériaux » des sections transversales en méthode conventionnelle et au tunnelier (Tunnel du Mont Sion) – En relatif sur le graphique à gauche.

Ind.	Unité	Valeur (/1ml) tunnelier	Valeur (/1ml) conv. Radier droit	Valeur (/1ml) conv. Radier contrevoûté
EP	MJ	73925	86297	103591
ADP	kg éq. antimoine (Sb)	22,7	30,7	35,1
CC	kg éq. CO2	8661	11348	13018
AA	kg éq. SO2	23,7	31,3	35,8
PA	m3	536163	539844	687038
PE	m3	277,6	354,6	410,4
FOP	kg éq. éthylène	0,9	1,4	1,5

6. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[D'AL 2010] : D'Aloia Schwartzentruber L., Rival F., Kote H. 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.

[D'AL 2011] : D'Aloia Schwartzentruber L., Rival F., Rabier M., Kote H. L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) appliquée à l'é-

valuation des impacts potentiels sur l'environnement des Tunnels. Journées Techniques AFGC 2011 : « GC2011 », 22-23 mars 2011.

[MOR 2012] : Morel A. Évaluation des impacts environnementaux d'un chantier de construction d'un tunnel par la méthode d'analyse du cycle de vie. Mémoire de stage de TFE de l'ENTPE, 2012.

[CHA 2013] : Charlemagne S. Évaluation des impacts environnementaux de la construction (phase creusement/soutènement). Stage de 2^e année de l'ENTPE, 2013.