

Approche paramétrique de l'évaluation des impacts environnementaux du creusement au tunnelier par l'Analyse du Cycle de Vie

Autrice : Lucille BAUCAL--POYAC

Date : Le 17 Décembre 2025

Lieu : Amphithéâtre Cauchy
Bâtiment Carnot
6 et 8 avenue Blaise Pascal – Champs-sur-Marne 77420

Encadrement

Adélaïde FERAILLE^(a) Directrice de thèse

Laetitia D'ALOIA SCHWARTZENTRUBER^(b) Co-encadrante de thèse

- (a) Laboratoire Navier, École des Ponts ParisTech, Université Gustave Eiffel, CNRS
6-8 av. Blaise Pascal, Cité Descartes, 77455 Champs-sur-Marne
- (b) Centre d'Études des Tunnels
25 avenue François Mitterrand, 69500, Bron



Résumé [*English below*]

Titre : Approche paramétrique de l'évaluation des impacts environnementaux du creusement au tunnelier par l'Analyse du Cycle de Vie

Les tunnels occupent une place croissante dans les projets d'infrastructures en raison des avantages qu'ils offrent par rapport aux solutions de surface. En milieu urbain dense, ils libèrent de l'espace, réduisent les nuisances sonores et visuelles et renforcent l'interconnexion des réseaux de transport. En zone montagneuse, ils limitent les pentes, réduisent les distances et favorisent les transferts modaux à l'image du tunnel de base de Mont-Cenis, élément central de la section transfrontalière de la ligne ferroviaire Lyon-Turin (Tunnel Euralpin Lyon-Turin - TELT). Parmi les méthodes de creusement de tunnel, le tunnelier s'impose comme la méthode la plus efficace pour les ouvrages de grande longueur grâce à son adaptabilité à divers contextes géotechniques et son environnement de travail plus sûr.

Toutefois, les impacts environnementaux liés à la construction de tunnels sont importants en raison des grandes quantités d'énergie et de matériaux mobilisés. Si les méthodes conventionnelles de creusement ont déjà fait l'objet d'évaluations de type empreinte carbone et Analyse du Cycle de Vie (ACV), le creusement au tunnelier a été étudié plus partiellement, la machine n'étant pas intégrée de manière détaillée aux frontières du système. Par ailleurs, chaque projet étant unique par ses dimensions, les terrains rencontrés et son contexte géographique, les résultats existants sont difficiles à généraliser.

Dans ce contexte, cette thèse poursuit deux objectifs : i) développer un modèle paramétrique d'ACV intégrant l'ensemble du cycle de vie du tunnelier, de sa fabrication à sa fin de vie, en passant par la phase opérationnelle, ii) proposer des modèles prédictifs des impacts environnementaux en fonction des caractéristiques clés des projets. Le projet TELT a servi de cas d'étude.

Un premier modèle statique d'ACV a été établi. Deux modèles d'allocation ont été étudiés afin de quantifier les impacts environnementaux ainsi que les bénéfices associés à la réutilisation de composants et au recyclage de matériaux, tant en amont qu'en aval du cycle de vie. Des analyses d'incertitude et de sensibilité ont également été menées sur les données d'entrée.

Une approche paramétrique a ensuite été développée à partir d'une base de données de plus de 500 tunneliers, fournie par le fabricant de tunneliers Herrenknecht. Un modèle d'estimation de la consommation électrique d'excavation et un modèle de remplacement des outils de coupe, tous deux liés aux paramètres de pilotage du tunnelier et aux conditions géotechniques, ont été intégrés à l'approche. Les paramètres d'incertitude et de variabilité du modèle ont été échantillonés à l'aide des suites de Sobol', générant un plan d'expériences numériques qui évalue les impacts environnementaux de chaque creusement tout en optimisant le nombre de simulations nécessaires. L'analyse de sensibilité par indices de Sobol' a permis de hiérarchiser l'influence des paramètres sur la variance des indicateurs environnementaux.

La sélection des paramètres les plus influents a conduit à un jeu de données réduit, utilisé pour élaborer des modèles prédictifs des impacts environnementaux. Deux modèles de régression ont été étudiés : la régression linéaire à multiples paramètres et l'algorithme XGBoost. Leurs performances ont été évaluées via des indicateurs statistiques dont l'erreur quadratique moyenne et l'erreur absolue moyenne en pourcentage.

Les perspectives de ce travail concernent l'élargissement des frontières du système au cycle de vie complet du tunnel, l'intégration d'autres types de tunneliers (pression de boue, pression de terre, etc.) ainsi que la prise en compte des incertitudes liées aux bases de données environnementales. Deux axes méthodologiques s'ouvrent également : i) le couplage des modèles prédictifs avec des approches d'optimisation multicritère (changement climatique et ressources abiotiques), ii) l'intégration de dimensions économiques et sociales dans une perspective de développement durable.

Mots clés : Tunnelier ; Analyse du Cycle de Vie (ACV) ; Ouvrages souterrains ; Approche paramétrique ; Impacts environnementaux ; Modèle prédictif.

Abstract

Title : Parametric Life Cycle Assessment approach for evaluating the environmental impacts of TBM tunnelling

Tunnels are playing an increasingly important role in infrastructure projects due to the benefits they offer in comparison to surface solutions. In dense urban areas, they free up space, reduce noise and visual pollution, and enhance the interconnection of transport networks, as demonstrated by the Grand Paris Express. In mountainous regions, they reduce gradients, shorten distances and facilitate modal shifts, as illustrated by the Mont-Cenis Base Tunnel project, a key component of the cross-border section of the Lyon-Turin railway line (TELT). Among the various tunnelling methods, Tunnel Boring Machines (TBMs) are the most effective for long structures thanks to their adaptability to diverse geotechnical and hydrogeological conditions and the safer working environment they provide.

However, tunnel construction has significant environmental impacts due to the large amounts of energy and materials required. While conventional excavation methods have already been assessed through carbon footprint and life cycle assessment (LCA) studies, TBM tunnelling has only been partially assessed, since the machine itself is not fully included within system boundaries. Moreover, as each project has its own design characteristics as well as geological and geographical context, the generalisation of existing results remains limited.

In this context, this thesis pursues two objectives : i) to develop a parametric LCA model covering the entire life cycle of a TBM, from manufacturing to end-of-life, including the operational phase; ii) to propose predictive models of environmental impacts based on key project characteristics. The TELT project served as the main case study.

An initial static LCA model was established. Two allocation methods were studied in order to quantify the environmental impacts and benefits associated with components reuse and material recycling, both at upstream and downstream levels of the life cycle. Uncertainty and sensitivity analyses were also performed on the input data.

From this, a parametric approach was developed using a database of more than 500 TBMs provided by the TBM manufacturer Herrenknecht. A model for estimating the electricity consumption of excavation and another for assessing the replacement rate of TBM disc cutters - both linked to the TBM control parameters and the geotechnical conditions - were integrated into the framework. Uncertainty and variability parameters were sampled using Sobol' sequences, generating a numerical design of experiments to evaluate the environmental impacts of each tunnelling scenario. Sensitivity analysis with Sobol's indices was then applied to rank the parameter influence on the variance of environmental indicators.

Identifying the most influential parameters enables the creation of a reduced dataset, which was used to develop predictive models of environmental impacts. Two regression models

were explored : the multiple linear regression and the XGBoost algorithm. Their performance was evaluated using statistical indicators based on mean squared error and mean absolute percentage error.

Future work could extend the system boundaries to the full life cycle of the tunnels, integrate other TBM types (*slurry, Earth Pressure Balance, etc.*), and address uncertainties related to environmental databases. Two additional methodological directions are also emerging : i) coupling predictive models with multi-criteria optimisation approaches (e.g., climate change and abiotic resources depletion), and ii) integrating economic and social dimensions with the aim of sustainable development.

KEYWORDS : Tunnel Boring Machine; Life Cycle Assessment (LCA); Underground structures; Parametric approach; Environmental impacts; Predictive model.