

PRIX DES TUNNELS



Contributeurs

Ont participé à la rédaction du présent document :

Jean-François BURKHART, CETU
Catherine CABUT, CETU
Yves CHAMEROIS, SNCF Réseau
Joël GUIVARCH, CETU
Gilles HAMAIDE, CETU, coordonnateur
Emmanuel HUMBERT, CETU

Sylvain LASSALLE, SNCF Réseau
Gilles PARADIS, SNCF Réseau
Mikaël RABIER, CETU puis DIR Sud-Ouest
Antoine RALLU, CETU
Florent ROBERT, CETU
Odile VANNIÈRE, CETU

Sont remerciés pour leur relecture :

Michel DEFFAYET, CETU
Éric LECA, expert tunnels,
membre du Conseil exécutif de l'AITES

Éric PREMAT, CETU
Alain ROBERT, CETU puis EGIS Tunnels
Didier SUBRIN, CETU

AVERTISSEMENT

Les documents d'information ont pour but de fournir une information sur une technique ou un problème nouveau ou insuffisamment traité par ailleurs. Le lecteur pourra y trouver des repères susceptibles de l'aider dans son activité. Le contenu et les éventuelles conclusions présentés ne doivent pas être considérés comme des recommandations du CETU. Bien que le maximum soit fait pour s'assurer de la fiabilité des sources utilisées, la responsabilité du CETU ou des auteurs du document ne saurait être engagée.

FASCICULE 0

Périmètre du document, données d'entrée pour l'estimation



AVERTISSEMENT

Les documents d'information ont pour but de fournir une information sur une technique ou un problème nouveau ou insuffisamment traité par ailleurs. Le lecteur pourra y trouver des repères susceptibles de l'aider dans son activité. Le contenu et les éventuelles conclusions présentés ne doivent pas être considérés comme des recommandations du CETU. Bien que le maximum soit fait pour s'assurer de la fiabilité des sources utilisées, la responsabilité du CETU ou des auteurs du document ne saurait être engagée.

TABLE DES MATIÈRES

1 PÉRIMÈTRE DU DOCUMENT	4
1.1 Introduction	4
1.2 Modes de transport concernés	5
1.3 Parties d'ouvrage considérées	5
1.4 Niveaux d'étude concernés	5
1.5 Décomposition de l'enveloppe prévisionnelle plafond de l'opération	6
1.5.1 Définition	6
1.5.2 Cadre de l'enveloppe prévisionnelle plafond de l'opération	7
1.6 Poids relatif des différents postes d'estimation	9
1.7 Ratios de prix travaux	9
1.7.1. Définition	9
1.7.2. Actualisation des estimations	10
1.8 Calendrier prévisionnel d'opération	10
2 DONNÉES D'ENTRÉE POUR L'ESTIMATION	11
2.1 Sections géométriques usuelles	11
2.2 Sections transversales représentatives retenues	12
2.3 Organisation des travaux, données d'entrée pour établir le planning	18
3 ANNEXES AU FASCICULE 0	19
3.1 Références bibliographiques	19
3.2 Abréviations et sigles	19

PÉRIMÈTRE DU DOCUMENT

1.1 INTRODUCTION

«La maîtrise du coût des opérations est un enjeu majeur du pilotage [...]. Elle doit se traduire à chacune des étapes du projet par la recherche de la meilleure solution possible pour répondre aux besoins exprimés, dans le respect des différentes contraintes et du cadrage financier et budgétaire [...].» Instruction du Gouvernement du 29 avril 2014 fixant les modalités d'élaboration des opérations d'investissement et de gestion sur le réseau routier national [1].

«L'optimisation du coût et sa maîtrise tout au long de la vie d'un projet constituent une responsabilité majeure des maîtres d'ouvrage [...]. Le coût est en effet un élément déterminant de l'acceptabilité d'un projet, notamment pour ce qui concerne l'appréciation de son utilité publique. Il doit rester dans les limites des ressources qui ont été arrêtées [...]. Les causes potentielles de dérive des coûts sont multiples : insuffisances des études nécessaires au bon chiffrage du projet, choix contestable de certaines options techniques, mauvaise appréciation des risques [...], modifications de fonctionnalités. La préoccupation constante du pilotage [...] doit donc être de mieux prévenir la tendance naturelle à l'augmentation du coût. Toute dérive du coût peut en effet conduire à une impasse financière telle que l'opération doit être modifiée, ajournée voire abandonnée.» Instruction technique relative aux modalités d'élaboration des opérations d'investissement et de gestion sur le réseau routier national, version du 6 février 2015 (IT RRN) [2].

Ces textes s'appliquent pleinement aux opérations contenant des ouvrages souterrains. Établir l'enveloppe prévisionnelle de tels ouvrages n'est pas du tout chose facile. C'est pourquoi le CETU s'est emparé de longue date de cette préoccupation en visant à se doter de moyens et méthodes permettant une appréciation la plus fiable possible du coût des ouvrages souterrains.

Ce document d'information résulte de la volonté d'apporter une aide utile à tous les acteurs des projets d'ouvrages souterrains.

Le Département des Ouvrages d'Art et Tunnels de SNCF Réseau - Direction Ingénierie & Projets s'est associé au CETU pour la validation de toutes les données et hypothèses de conception concernant les tunnels ferroviaires.

Ce Document d'Information sur le Prix des Ouvrages Souterrains est composé des six fascicules suivants :

- fascicule 0 : périmètre du document, données d'entrée pour l'estimation
- fascicule 1 : provisions et autres postes de l'enveloppe prévisionnelle plafond
- fascicule 2 : travaux de génie civil – tunnel en section courante
- fascicule 3 : travaux de génie civil – ouvrages émergents
- fascicule 4 : travaux d'équipements de sécurité et d'exploitation – ventilation et métallerie
- fascicule 5 : travaux d'équipements de sécurité et d'exploitation – autres équipements
- fascicule 6 : coûts d'exploitation

Seuls les fascicules 0 à 4 sont compris dans l'édition 2016.

• fascicule 0 : périmètre du document, données d'entrée pour l'estimation

- fascicule 1 : provisions et autres postes de l'enveloppe prévisionnelle plafond
- fascicule 2 : travaux de génie civil – tunnel en section courante
- fascicule 3 : travaux de génie civil – ouvrages émergents
- fascicule 4 : travaux d'équipements de sécurité et d'exploitation – ventilation et métallerie

Ce fascicule 0 présente le champ des projets concernés par le document et les principales composantes d'une estimation prévisionnelle d'opération.

Il propose ensuite une description des sections transversales pour lesquelles des ratios de prix sont fournis dans l'ensemble des autres fascicules.

1.2 MODES DE TRANSPORT CONCERNÉS

Pour l'évaluation du prix du génie civil des tunnels, les éléments fournis dans ce document d'information peuvent être utilisés pour les projets d'ouvrages routiers (et autoroutiers), ferroviaires (urbains et non urbains) ou de transports collectifs en site propre (métro, tramway), quelle que soit la méthode de creusement.

Il ne traite pas des tunnels immergés, des tranchées couvertes et des stations souterraines qui sont des ouvrages faisant appel à d'autres techniques de construction.

Pour l'évaluation du prix des équipements d'exploitation et de sécurité, ce document d'information est applicable à tous les tunnels routiers (et autoroutiers), quelle que soit la méthode de construction, y compris les tunnels immergés et les tranchées couvertes.

Il ne traite pas des équipements d'exploitation et de sécurité propres aux tunnels ferroviaires ou de transports collectifs en site propre.

1.3 PARTIES D'OUVRAGE CONSIDÉRÉES

Pour l'évaluation du génie civil, les ouvrages traités sont décomposés en parties d'ouvrage :

- ouvrages souterrains :
 - linéaires, en section courante (tubes principaux, galeries parallèles) ;
 - linéaires, structures internes en section courante (gainés de ventilation, dalles, etc.) ;
 - singuliers, liés à l'exploitation et à la sécurité (aménagements pour l'évacuation et la protection des usagers et l'accès des secours, aménagements destinés aux véhicules de secours, niches de sécurité et niches incendie, garages, stations souterraines, puits de ventilation, etc.) ;

- ouvrages à l'air libre associés :
 - terrassements à l'air libre et soutènements aux extrémités des tubes principaux et des galeries, ouvrages de génie civil associés (tranchées d'accès au front de creusement des ouvrages souterrains, voûtes remblayées et casquettes, ouvrages architecturaux) ;
 - locaux techniques et stations construits à l'air libre aux extrémités des tubes principaux, galeries et puits.

Pour l'évaluation des équipements de sécurité et d'exploitation, il n'y a pas de décomposition en parties d'ouvrage dans l'approche des prix proposée dans le fascicule 4.

1.4 NIVEAUX D'ÉTUDE CONCERNÉS

Ce document présente les éléments nécessaires à l'estimation du coût prévisionnel des travaux (CPT) de construction d'un tunnel neuf à l'issue des études d'avant-projet (AVP), au sens de la loi MOP [3].

Au sens de l'instruction technique (IT RRN [2]), ce coût prévisionnel des travaux doit être complété par les coûts des études et des acquisitions foncières pour constituer l'enveloppe prévisionnelle plafond de l'opération (EPP). Cette enveloppe constitue une limite fixée par la commande et tient lieu d'objectif de coût maximal du projet ; elle comporte toutes les dépenses nécessaires pour mener à terme l'opération.

Phases d'études	Études Préliminaires ou Études Préalables (à l'enquête publique)	Avant-projet	Projet	ACT Assistance pour la passation du ou des Contrats de Travaux
Loi MOP	EFP (1) enveloppe financière prévisionnelle	CPT (2) coût prévisionnel des travaux		CRT (5) Coût de réalisation des travaux
Instruction gouvernementale	EPP (3) enveloppe prévisionnelle plafond	EPP actualisée (3) enveloppe prévisionnelle plafond actualisée	CP (4) coût plafond	
(1) (3) (4) correspondent à l'ensemble de l'estimation prévisionnelle de l'opération (2) (5) correspondent uniquement à la partie travaux et sont les bases d'engagement du maître d'œuvre				

Tableau 1 : Terminologie consacrée aux estimations

Le présent document permet d'établir l'évaluation de l'EPP dès les études préliminaires (EP), au sens de la loi MOP, à l'exception des coûts d'acquisitions foncières et des frais directs de maîtrise d'ouvrage qui sont à apprécier spécifiquement pour chaque opération (cf. fascicule 1).

La méthode d'estimation proposée dans ce guide sous-entend :

- une définition de l'ouvrage suffisamment précise (cf. § 2 Données d'entrée pour l'estimation) ;
- un niveau de connaissance du contexte géologique, géotechnique et hydrogéologique suffisant pour cerner les méthodes de creusement-soutènement et apprécier le niveau d'incertitude.

Il est rappelé que des niveaux de définition de l'ouvrage et de connaissance du contexte géologique suffisants doivent être recherchés dès le stade de l'étude préliminaire de façon à permettre une estimation préalable la plus fiable possible. Ce travail nécessite une appréciation sérieuse des risques.

L'estimation établie au stade des études préliminaires (ou des études préalables à l'enquête d'utilité publique) permet au maître d'ouvrage d'arrêter l'enveloppe financière prévisionnelle (EFP) au sens de la loi MOP, ou enveloppe prévisionnelle plafond au sens de l'IT RRN [2]. Cette estimation figure dans le dossier de la solution soumise à l'enquête d'utilité publique, elle éclaire un choix qui sera ensuite presque irréversible. Pour fiabiliser cette estimation, il est indispensable d'établir pour chaque tunnel de chaque variante étudiée, une étude de faisabilité qui consiste à examiner sa faisabilité technique et économique.

1.5

DÉCOMPOSITION DE L'ENVELOPPE PRÉVISIONNELLE PLAFOND DE L'OPÉRATION

1.5.1 Définition

Dans ce document, le vocabulaire retenu est celui proposé dans le guide « le prix dans les marchés publics » [4], exception faite pour le terme « coût prévisionnel des travaux » défini par la loi MOP [3].

« On peut définir le prix comme la valeur, exprimée en termes monétaires, attribuée à une prestation pour un ouvrage, un produit ou un service ».

« Le prix est la somme du coût estimé de la prestation et de la marge du cocontractant. Le coût de la prestation comprend les charges directes résultant de l'exécution des prestations, les charges indirectes et les aléas liés à l'exécution du marché ».

Ce terme est à distinguer du coût global.

« Le coût global comprend l'ensemble des coûts engendrés pour la conception, la réalisation, l'investissement, l'exploitation et la maintenance, éventuellement l'impact social et environnemental, le démantèlement ou le recyclage et l'élimination sur une période déterminée et pour un périmètre déterminé ».

Ce document ne traite pas du coût global, il ne traite que du coût de la conception, de la réalisation et de l'exploitation et de la maintenance.

L'enveloppe prévisionnelle plafond de l'opération (EPP) est l'estimation de l'ensemble des dépenses nécessaires pour réaliser l'opération, depuis les études préliminaires jusqu'à l'achèvement de celle-ci. Elle permet de prévoir le budget d'investissement pour cette opération.

La décomposition proposée de **l'enveloppe prévisionnelle plafond de l'opération (EPP)** est proche de celle développée par réseau ferré de France (RFF) – aujourd'hui SNCF Réseau – et décrite dans le « Guide d'estimation des coûts des lignes nouvelles » [2]. Cette même décomposition est également recommandée par l'association française des tunnels et de l'espace souterrain (AFTES) et reprise dans la recommandation du GT25 « maîtrise économique et contractualisation » [6].

1/ Le coût prévisionnel des travaux (CPT) doit comprendre toutes les prestations nécessaires aux travaux pour l'exécution complète de l'ouvrage. Au stade des études, cette évaluation doit donc présenter distinctement :

- **une estimation technique des travaux** : c'est une évaluation réaliste et raisonnable des ouvrages définis à un stade d'étude donné. Elle est établie sur la base d'une appréciation la plus probable du niveau de difficulté de creusement du tunnel attendu en rapport à la connaissance géologique et géotechnique du site. Cette estimation doit faire référence à des ouvrages récents réalisés dans des conditions comparables. Elle comprend les prestations générales définies dans le fascicule 2 au § 3.3.5.b ;
- **une estimation d'une somme à valoir (SAV)** : elle couvre l'ensemble des imprécisions qui subsistent dans la définition des ouvrages et des prix unitaires, mais ne couvre pas les coûts liés aux incertitudes géotechniques et sur les avoisinants ;
- **une estimation d'une provision pour risques techniques identifiés (PRI)** : elle est établie dans le cadre de l'étude des risques identifiés, elle couvre les coûts liés aux incertitudes géotechniques et aux incertitudes sur les avoisinants.

L'évaluation du coût prévisionnel des travaux (appelée estimation brute des travaux dans le guide RFF) est naturellement attachée à un programme ; elle ne comprend pas de provision destinée à couvrir une modification significative du programme.

2/ Pour déterminer **l'enveloppe prévisionnelle plafond de l'opération**, il convient que le maître d'ouvrage ajoute au coût prévisionnel des travaux l'estimation :

- des études et des reconnaissances ;
- de la maîtrise d'œuvre et de la maîtrise d'ouvrage ;
- de la libération des emprises et des acquisitions foncières ;
- de la provision pour risques non techniques du maître d'ouvrage ;
- de la provision pour imprévus (ou risques non identifiés PRNI).

Afin d'assurer une traçabilité des estimations d'un projet pendant toute sa durée, il est nécessaire de se conformer à un cadre de présentation.

1.5.2. Cadre de l'enveloppe prévisionnelle plafond de l'opération

Plusieurs cadres d'estimation existent dans les textes de référence ; sont donnés ici les cadres utilisés pour les projets routiers et ferroviaires.

Cadre de l'enveloppe prévisionnelle plafond de l'opération retenu dans l'instruction technique (IT RRN) [2] pour une estimation de tunnel de niveau AVP.

1. – Acquisitions foncières * (non estimé dans ce document)
2. – Estimation technique des travaux
2.1. – Dégagement des emprises, déplacement des réseaux et travaux préparatoires
2.2. – Terrassements et confortements extérieurs au tunnel
2.3. – Assainissement et eaux aux têtes
2.4. – Génie-civil
2.4.1 – Ouvrages aux têtes **
2.4.2 – Ouvrages souterrains en section courante ***
2.4.3 – Ouvrages souterrains liés à l'exploitation et à la sécurité ****
2.4.4 – Sujétions spéciales de Génie Civil ** ****
2.4.5 – Bâtiment de supervision
2.5. – Chaussées ou voies ferroviaires
2.6. – Équipements d'exploitation et de sécurité
2.7. – Aménagements architecturaux et paysagers
3. – Somme à valoir sur les travaux (SAV)
4. – Provision pour risques techniques identifiés (PRI)
5. – Études et reconnaissances
5.1. – Études et frais de maîtrise d'ouvrage
5.2. – Reconnaissances et essais géotechniques
6. – Maîtrise d'œuvre
7. – Provision pour risques non identifiés (imprévus) ****

* : outre l'acquisition des emprises en surface nécessaires à la réalisation des travaux, la construction d'un ouvrage souterrain nécessite l'acquisition du tréfonds sur l'ensemble du tracé ;

** : voûtes construites à l'air libre, tranchées couvertes, locaux techniques et stations de ventilation ;

*** : creusement, soutènement, étanchement, revêtement, réseaux d'assainissement et de drainage, réseaux divers, plate-forme, trottoirs, niches de sécurité et incendie, niches techniques ;

**** : il s'agit principalement du génie civil des issues de secours, des galeries inter-tubes le cas échéant, des locaux techniques, d'une éventuelle galerie d'évacuation parallèle ou encore de sujétions spéciales d'exploitation en phase travaux ;

**** : dispositions particulières et localisées comme des injections, de la congélation, des voûtes parapluie complexes, des colonnes de jet-grouting, ou un puits pour une attaque intermédiaire par exemple ;

**** : dans ce cadre, la provision pour imprévus comprend la provision pour risques non techniques.

Cadre d'estimation proposé par le «guide d'estimation des coûts des lignes nouvelles» - RFF [5]

Il s'agit de l'arborescence des natures de travaux proposée pour la décomposition physique d'une ligne nouvelle (dite matrice arc-en-ciel). À noter qu'il n'y a pas de décomposition pour l'ouvrage souterrain (D6).

A	Études en phase amont (jusque la contractualisation des travaux)	1	Études d'opportunité
		2	Études fonctionnelles
		3	Études préliminaires
		4	Avant projet sommaire
		5	Avant projet détaillé
		6	Déclaration d'utilité publique
		7	Projet (y/c DCE)
B	Études et direction de travaux	1	Maîtrise d'ouvrage
		2	Maîtrise d'œuvre
		3	Essais et sécurité
		4	Acquisition de données du site
		5	Etudes complémentaires
		6	Contrôle extérieur travaux
		7	Suivi - Bilan
C	Libération des emprises et réaménagement foncier	1	Maîtrise foncière
		2	Archéologie
		3	Dégagement des emprises
		4	Déviations des réseaux
		5	Réseaux particuliers
D	Génie civil	1	Terrassements
		2	Assainissement et traversées hydrauliques
		3	Ouvrages d'art courants
		4	Ouvrages d'art non courants
		5	Ouvrages exceptionnels
		6	Ouvrages souterrains A/ Tranchées couvertes (hors terrassements) B/ Tunnels
		7	Reprise d'ouvrages existants
		8	Chaussées
		9	Gares
		10	Autres travaux de génie civil
		11	Aménagements environnementaux
E	Équipements ferroviaires	1	Bases travaux
		2	Bases de maintenance
		3	Voie
		4	Contrôle commande et signalisation
		5	Transmissions - Télécommunication
		6	Énergie de traction

1.6 POIDS RELATIF DES DIFFÉRENTS POSTES D'ESTIMATION

Le poids relatif des différents postes d'une estimation d'ouvrage souterrain est variable d'un ouvrage à un autre.

L'illustration 1 propose une répartition indicative entre les différents postes d'une EPP, hors frais d'acquisitions foncières. C'est une répartition assez représentative d'un tunnel routier en milieu non urbain, la partie relative aux imprévus comprend les risques non techniques, la partie relative aux études ne comprend pas les frais directs de MOA.

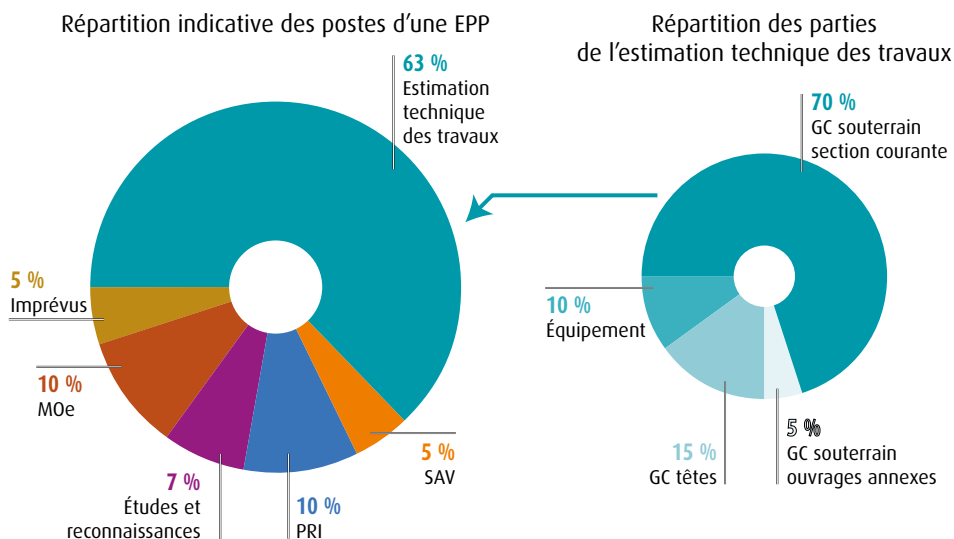


Illustration 1 : Répartition indicative des postes d'une EPP et répartition des parties de l'estimation technique des travaux – exemple pour un tunnel routier au stade AVP (hors frais directs de MOA)

1.7 RATIOS DE PRIX TRAVAUX

1.7.1 Définition

Les travaux sont estimés par l'intermédiaire de ratios de prix qui s'appliquent à des natures de travaux ou à des ensembles de natures de travaux pouvant faire l'objet d'un métrage systématique, par exemple :

- prix pour un mètre de tunnel pour le creusement-soutènement, selon une géométrie et une classe de soutènement données ;
- prix pour un mètre cube de terrain excavé pour le creusement-soutènement, selon une classe de soutènement donnée ;
- prix pour un mètre carré de surface utile de local technique, selon un mode de construction donné ;

Les ratios de prix sont donc des prix issus du regroupement de quantités et de prix unitaires (tels qu'ils figurent dans les détails estimatifs des marchés de travaux). Ces ratios de prix

comprennent les prestations générales définies dans le fascicule 2 au § 3.3.5.b.

Conformément à l'article 10.3 du CCAG travaux [7], les ratios de prix intègrent :

- les déboursés ou frais directs de l'entreprise (main d'œuvre, matériaux et matières consommables, matériel) ;
- les frais généraux (frais de chantier et de siège, d'agence, assurances, amortissement des matériels indivis, gérance et mandat, impôts et taxes) ;
- la marge de l'entreprise pour risques et bénéfices.

Les ratios de prix sont adaptés pour une estimation de niveau études préliminaires et avant-projet. Pour les études détaillées, il est recommandé d'utiliser des prix unitaires et des quantités issues d'un avant-métré détaillé.

1.7.2 Actualisation des estimations

L'ensemble des prix proposés dans ce document est donné hors taxes.

Les valeurs fournies dans les différents fascicules sont attachées aux conditions économiques lors de la rédaction du présent document, soit une date de valeur au 01/01/2015 (index publiés au JO du 18/04/2015).

Pour l'actualisation de ces valeurs, il est proposé de faire appel aux index suivants :

- Pour les frais d'études, maîtrise d'œuvre, etc. :
 - index ING – base 2010 : Ingénierie.
- Pour les reconnaissances géologiques :
 - index TP04 – base 2010 : Fondations et travaux géotechniques.

- Pour le génie civil en souterrain, selon la méthode de creusement :
 - index TP05a – base 2010 : Travaux en souterrain traditionnels;
 - index TP05b – base 2010 : Travaux en souterrain avec tunnelier.
- Pour le génie civil et les terrassements à l'air libre :
 - index TP04 – base 2010 : Fondations et travaux géotechniques.
- Pour les équipements :
 - index BT41 – base 2010 : Ventilation et conditionnement d'air;
 - index BT42 – base 2010 : Menuiserie en acier et serrurerie;
 - index BT47 – base 2010 : Électricité.

1.8 CALENDRIER PRÉVISIONNEL D'OPÉRATION

«À l'enveloppe financière prévisionnelle doit correspondre un calendrier prévisionnel d'opération [...] La sous-estimation des différents délais d'une opération revient à sous-estimer l'EFP» guide «Évaluer l'enveloppe financière prévisionnelle d'un ouvrage de bâtiment» [8].

C'est évidemment particulièrement vrai pour un ouvrage d'infrastructure, qui plus est un ouvrage souterrain.

Le CETU propose dans ce document une approche complètement intégrée prix-délais. En effet, en travaux souterrains, la part des coûts liée au temps représente généralement plus de la moitié de l'ensemble des coûts. Cette proportion est même supérieure pour les ouvrages creusés en méthode conventionnelle, pour lesquels l'ensemble des coûts de main d'œuvre et matériel pour le seul poste de creusement-soutènement peut atteindre les deux tiers (2/3) du coût.

Les éléments de prix fournis pour les classes de soutènement sont donc associés aux cadences de creusement.

L'estimation prévisionnelle de l'opération doit être accompagnée d'un calendrier prévisionnel d'opération. Celui-ci doit présenter les grands postes de l'opération, en similitude à l'estimation prévisionnelle :

- délais des études pré-opérationnelles et des principales procédures, notamment environnementales, de la programmation budgétaire;
- délais de contractualisation;
- délais des études et des reconnaissances;
- délais de libération des emprises;
- **délai prévisionnel de réalisation des travaux**, y compris une provision pour risques planning.

Le délai prévisionnel de réalisation des travaux doit être établi de façon réaliste sur la base des hypothèses retenues pour l'estimation technique des travaux (appréciation la plus probable du niveau de difficulté attendu, allotissement des travaux, contraintes organisationnelles).

La provision pour risques planning doit être déterminée dans le cadre de l'étude des risques identifiés; cette provision est un délai qui doit couvrir le même périmètre que l'estimation financière de la PRI.

DONNÉES D'ENTRÉE POUR L'ESTIMATION

Le présent chapitre rappelle quelques éléments fondamentaux de définition indispensables pour mener à bien l'estimation.

Un préalable à l'estimation est la définition géométrique de l'ouvrage à réaliser. Le positionnement en plan et en profil en long du tunnel à creuser va directement impacter le contexte géologique et donc les méthodes de creusement et soutènement à prévoir.

De son côté, la détermination de la section transversale résulte d'un compromis entre :

- les exigences fonctionnelles et de sécurité (ventilation notamment) ;
- les exigences des règlements de dimensionnement du profil en travers (routier, ferroviaire, TCSP) ;
- l'optimisation de la géométrie de l'excavation et de la structure en regard des conditions géologiques, géotechniques et hydrogéologiques ;
- les méthodes de construction et les règles de l'art issues de l'expérience ;
- l'optimisation du coût de construction.

Ces éléments de détermination de la section transversale font partie intégrante du programme.

2.1 SECTIONS GÉOMÉTRIQUES USUELLES

La section transversale des tunnels et galeries en service varie selon les fonctionnalités attendues.

Il est d'usage de caractériser cette section transversale par le diamètre intrados de la voûte lorsque l'ouvrage est composé d'une géométrie circulaire à un seul centre, ou par la largeur entre piédroits dans les cas contraires.

L'illustration 2 présente une répartition des largeurs des tunnels à partir d'une liste de plus de 100 tunnels en service ou en construction, situés sur le territoire national ou frontaliers, et aux fonctionnalités diverses : galeries de sécurité, tunnels de tramway et métro, tunnels ferroviaires sur ligne à grande vitesse et urbains (RER), tunnels routiers et autoroutiers. Ce sont tous des ouvrages construits depuis moins de 30 ans.

Ce graphique montre la dispersion des largeurs de tunnels, par exemple :

- de 4,60 m à 8,60 m pour les métros selon qu'ils sont à 1 ou 2 voies et selon leur époque de conception (les plus récents étant plus grands) ;
- de 6,20 m à 9,80 m pour les RER selon qu'ils sont à 1 ou 2 voies et selon leur époque de conception (les plus récents étant plus grands) ;
- de 7,60 m à 12,60 m pour les tunnels ferroviaires construits sur ligne à grande vitesse, selon qu'ils sont à 1 ou 2 voies et selon la vitesse d'exploitation (de 160 km/h pour le tunnel sous la Manche à 300 km/h pour le tunnel de Saverne) ;
- de 9,00 m à 13,80 m pour les tunnels routiers (hors exception de quelques petits tunnels départementaux de montagne), selon le nombre de voies, le trafic attendu et la hauteur libre ;
- de 9,20 m à 14,00 m pour les tunnels autoroutiers selon le nombre de voies, le trafic attendu et la hauteur libre.

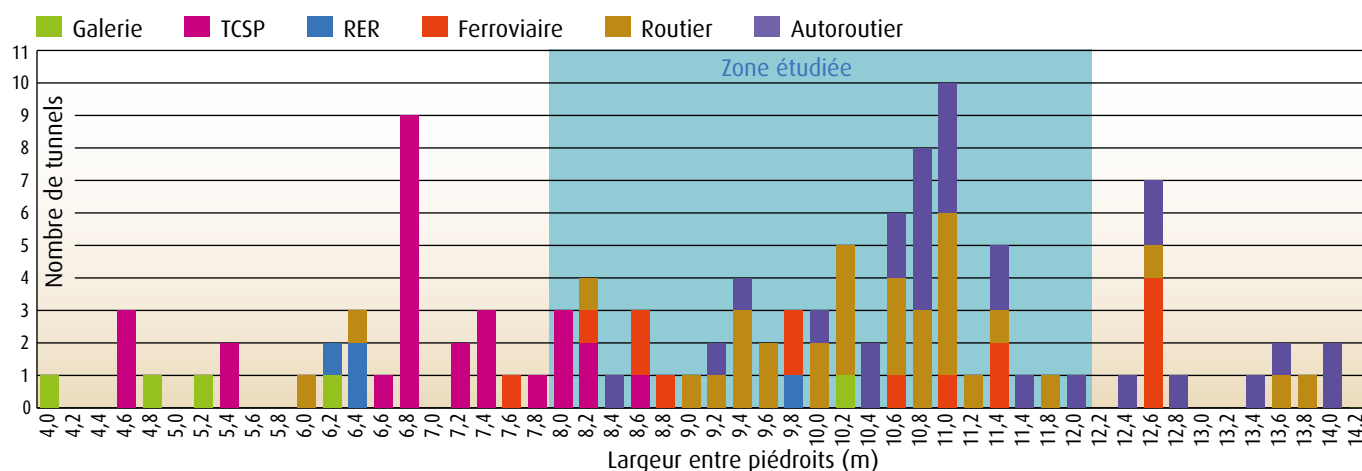


Illustration 2 : Largeurs des tunnels construits depuis 20 ans

Pour chacune des sections de D8 à D12, les illustrations présentées ci-après montrent 3 dessins qui représentent les trois principaux types de structures rencontrées en ouvrage souterrain :

a) tunnel creusé en méthode conventionnelle, sans radier pour un ouvrage routier, avec un simple radier contre-voûté pour le tunnel ferroviaire ;

b) tunnel creusé en méthode conventionnelle avec radier contre-voûté structurel ;

c) tunnel creusé en méthode mécanisée.

Le diamètre intrados de 8,20 m (D8) convient pour :

- un tunnel métro bidirectionnel à 2 voies ; non illustré ;
- un tunnel ferroviaire unidirectionnel à 1 voie pour une ligne voyageurs à vitesse d'exploitation < 220 km/h ; cf. illustration 4.

Le diamètre intrados de 9,20 m (D9) convient pour :

- un tunnel ferroviaire urbain de type RER bidirectionnel à 2 voies ; non illustré ;
- un tunnel ferroviaire unidirectionnel à 1 voie pour une ligne voyageurs à vitesse d'exploitation < 300 km/h ; cf. illustration 4.

Le diamètre intrados de 10,20 m (D10) convient pour :

- un tunnel routier bidirectionnel à 2 voies à faible trafic ; cf. illustration 5 ;
- un tunnel ferroviaire urbain de type RER bidirectionnel à 2 voies ; non illustré ;
- un tunnel ferroviaire bidirectionnel à 2 voies pour une ligne voyageurs à vitesse d'exploitation < 170 km/h ; cf. illustration 5.

Le diamètre intrados de 11,20 m (D11) convient pour :

- un tunnel routier bidirectionnel ou autoroutier unidirectionnel à 2 voies ; cf. illustration 6 ;
- un tunnel ferroviaire bidirectionnel à 2 voies pour une ligne voyageurs à vitesse d'exploitation < 270 km/h ; cf. illustration 6.

Le diamètre intrados de 12,20 m (D12) convient pour :

- un tunnel routier bidirectionnel ou autoroutier unidirectionnel à 2 voies et BAU ou 3 voies ; cf. illustration 7 ;
- un tunnel ferroviaire bidirectionnel à 2 voies pour une ligne voyageurs à vitesse d'exploitation > 270 km/h ; cf. illustration 7.

D8 ferroviaire

D9 ferroviaire

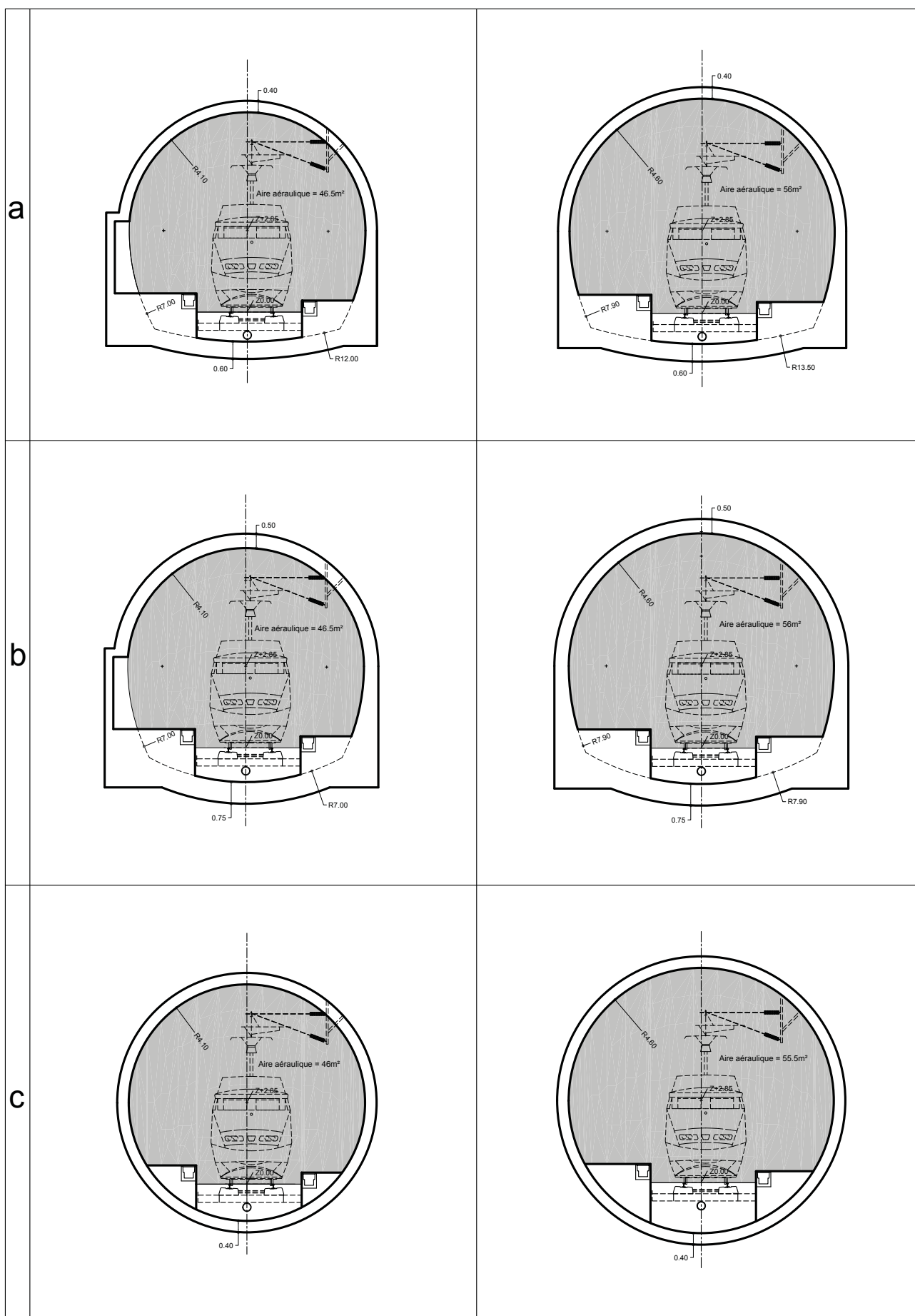


Illustration 4 : Sections transversales pour les géométries D8 (à gauche) et D9 (à droite)

D10 ferroviaire

D10 routier

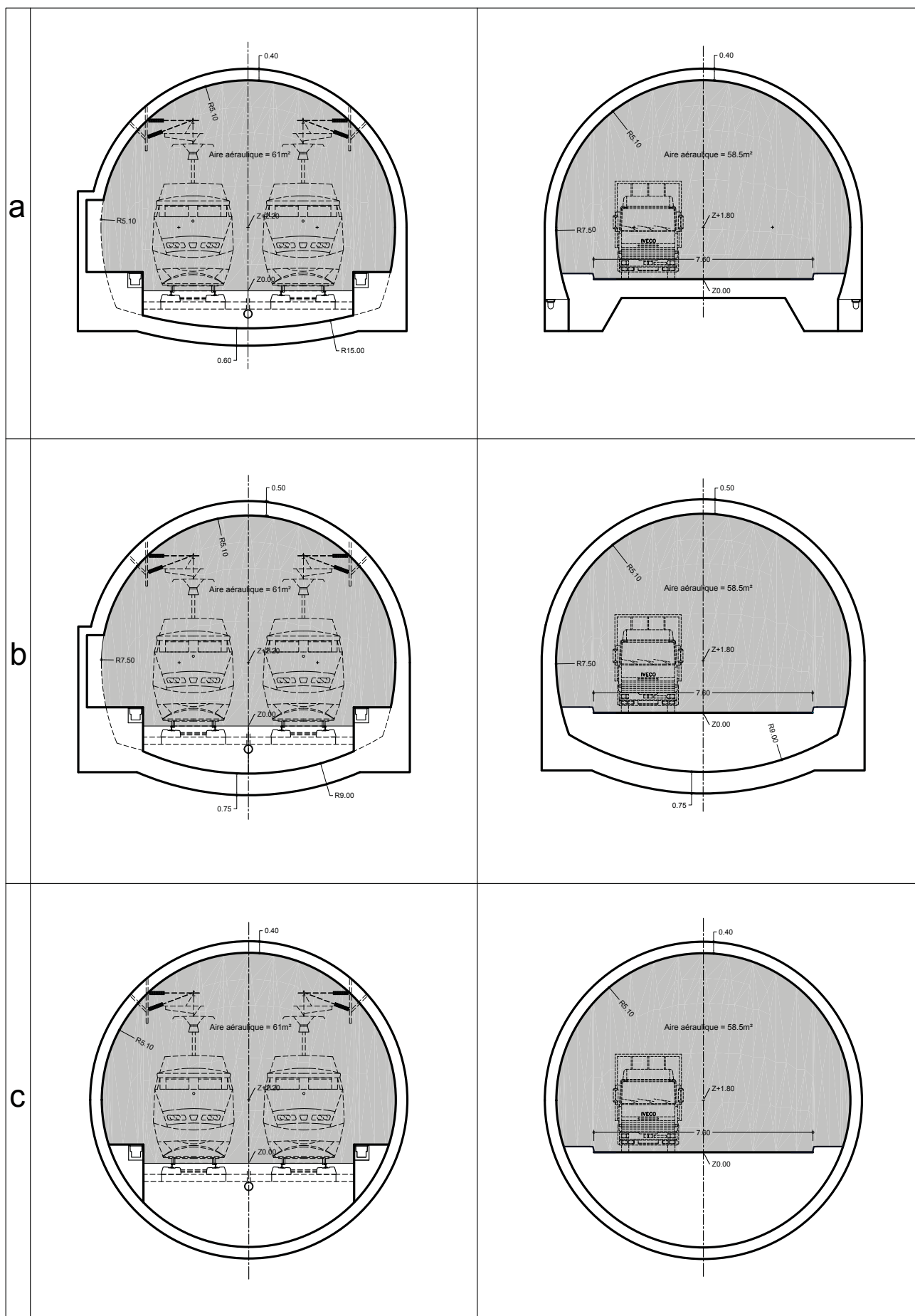


Illustration 5 : Sections transversales pour la géométrie D10 (à gauche : tunnels ferroviaires, à droite : tunnels routiers)

D11 ferroviaire

D11 routier

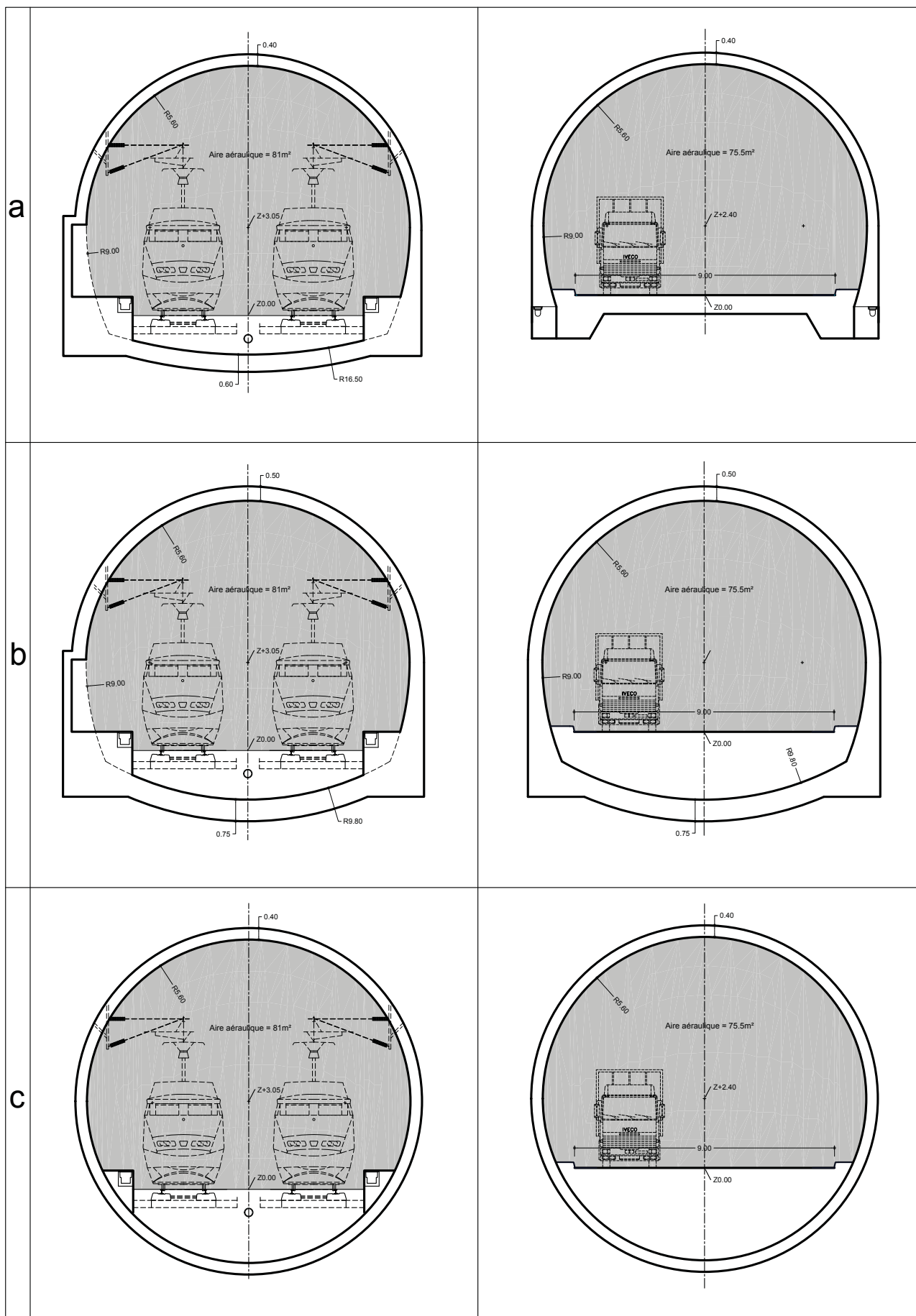


Illustration 6 : Sections transversales pour la géométrie D11 (à gauche : tunnels ferroviaires, à droite : tunnels routiers)

D12 ferroviaire

D12 routier

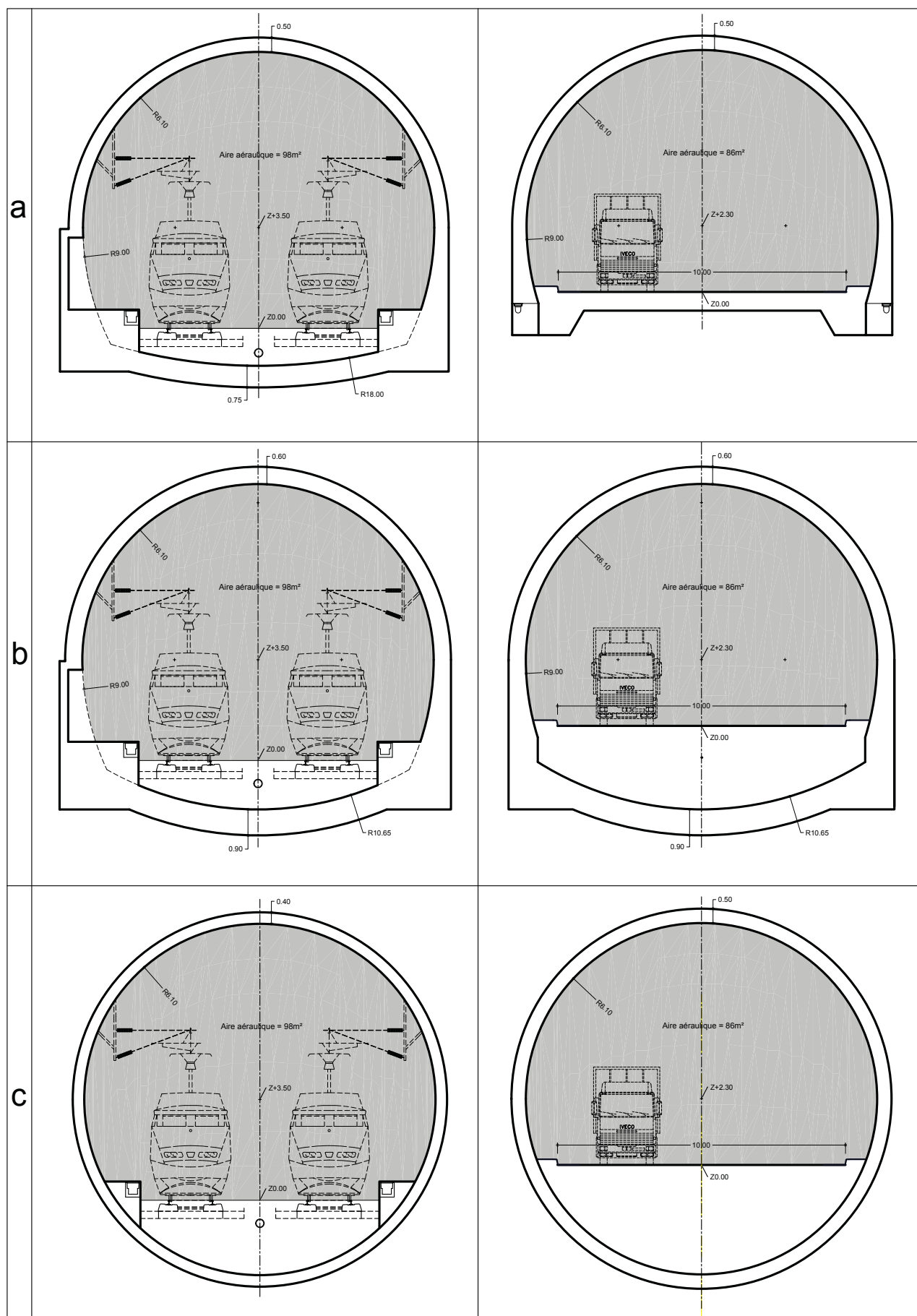


Illustration 7 : Sections transversales pour la géométrie D12 (à gauche : tunnels ferroviaires, à droite : tunnels routiers)

ORGANISATION DES TRAVAUX, DONNÉES D'ENTRÉE POUR ÉTABLIR LE PLANNING

Les conditions de réalisation des travaux sont généralement contraintes par l'environnement du site du projet. Les travaux souterrains nécessitent des sites d'installation de chantier importants, l'optimisation des coûts privilégie les travaux en 3 x 8 mais l'excavation et le marinage sont sources de bruits importants, etc. Les contraintes d'évacuation des déblais en site urbain peuvent également affecter les cadences de creusement en cas d'impossibilité de stocker temporairement les déblais à proximité du chantier. Les cadences dépendront alors des capacités d'évacuation de ces déblais.

La recherche de fiabilité du calendrier prévisionnel et de l'enveloppe prévisionnelle de l'opération impose qu'une réflexion sur les possibilités d'organisation des travaux soit menée dès les études amont.

Dans le cadre du processus de management du risque, il conviendra de proposer à chaque étape de la conception et de la réalisation une évaluation de la provision pour risques planning, en prenant en compte les variations de cadences possibles, l'organisation du chantier, et les conséquences liées à l'enclenchement d'un risque identifié dans le plan de management des risques (PMR).

ANNEXES AU FASCICULE 0

3.1 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Instruction du Gouvernement du 29 avril 2014 fixant les modalités d'élaboration des opérations d'investissement et de gestion sur le réseau routier national.
- [2] Instruction technique relative aux modalités d'élaboration des opérations d'investissement et de gestion sur le réseau routier national, version du 6 février 2015 (IT RRN).
- [3] Loi 85-704 du 12 juillet 1985 relative à la maîtrise d'ouvrage publique et à ses rapports avec la maîtrise d'œuvre privée dite « loi MOP » et ses décrets d'application.
- [4] Guide *Le prix dans les marchés publics* du ministère de l'Économie et des Finances (DAJ), mars 2013.
- [5] *Guide d'estimation des coûts des lignes nouvelles RFF*, 7 décembre 2007.
- [6] Recommandation AFTES GT25R3F1 *Maîtrise économique et contractualisation*, TES 249, mai/juin 2015.
- [7] CCAG travaux.
- [8] Guide *Évaluer l'enveloppe financière prévisionnelle d'un ouvrage de bâtiment*, MIQCP, juin 2008.
- [9] *Guide à l'intention des maîtres d'ouvrage publics pour la négociation des rémunérations de maîtrise d'œuvre*, réédité en 2011 par la Mission Interministérielle pour la Qualité des Constructions Publiques (MIQCP).
- [10] Fascicule 69 du CCTG *Travaux en souterrain*, 30 mai 2012.
- [11] Norme SIA 198-2004, *Constructions souterraines, exécution*.
- [12] AFTES GT4, article TES n° 240, nov-déc 2013.
- [13] CETU dossier pilote ventilation, novembre 2003.
- [14] AFTES recommandation GT32R2F1, *Caractérisation des incertitudes et des risques géologiques-hydrogéologiques-géotechniques*, 2012.
- [15] *Manuel de maîtrise des risques des opérations en maîtrise d'ouvrage directe*, RFF, avril 2006.

3.2 ABRÉVIATIONS ET SIGLES

AFTES : Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain

ACT : assistance pour la passation du contrat de travaux

AVP : avant-projet

CETU : Centre d'Études des Tunnels

CP : coût plafond

CPT : coût prévisionnel des travaux

CRT : coût de réalisation des travaux

DCE : dossier de consultation des entreprises

EPP : enveloppe prévisionnelle plafond

EFP : enveloppe financière prévisionnelle

ETT : estimation technique des travaux

LGV : ligne à grande vitesse

MIQCP : Mission Interministérielle pour la Qualité des Constructions Publiques

MOE : maître d'œuvre

PMR : plan de management des risques

PRI : provision pour risques identifiés

PRNI : provision pour risque non identifié

RFF : Réseau Ferré de France

SAV : somme à valoir

TCSP : transport collectif en site propre

TMD : transport de marchandises dangereuses

[illegible]

This image shows a single sheet of white paper with horizontal blue ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

[illegible]



Centre d'Études des Tunnels
25 avenue François Mitterrand
Case n°1
69674 BRON - FRANCE
Tél. 33 (0)4 72 14 34 00
Fax. 33 (0)4 72 14 34 30
cetu@developpement-durable.gouv.fr



FASCICULE 1

Provisions et autres postes de l'enveloppe prévisionnelle plafond



AVERTISSEMENT

Les documents d'information ont pour but de fournir une information sur une technique ou un problème nouveau ou insuffisamment traité par ailleurs. Le lecteur pourra y trouver des repères susceptibles de l'aider dans son activité. Le contenu et les éventuelles conclusions présentés ne doivent pas être considérés comme des recommandations du CETU. Bien que le maximum soit fait pour s'assurer de la fiabilité des sources utilisées, la responsabilité du CETU ou des auteurs du document ne saurait être engagée.

TABLE DES MATIÈRES

1 PRÉAMBULE	4
2 PROVISIONS ATTACHÉES À L'ESTIMATION TECHNIQUE DES TRAVAUX	5
2.1 Somme à valoir (SAV)	5
2.2 Provision pour risques techniques identifiés (PRI)	6
2.3 Objectifs de précision du coût prévisionnel des travaux (CPT)	6
2.4 Méthodes d'estimation de la PRI	8
2.4.1 Mise en œuvre du processus de management du risque	8
2.4.2 Calcul de la PRI comme un niveau de risque aggloméré	8
2.4.3 Calcul de la PRI basé sur une simulation probabiliste	9
3 PROVISION POUR RISQUES NON TECHNIQUES	11
4 PROVISION POUR IMPRÉVUS TECHNIQUES ET NON TECHNIQUES	12
5 AUTRES POSTES DE L'ENVELOPPE PRÉVISIONNELLE PLAFOND DE L'OPÉRATION	13
5.1 Frais de maîtrise d'ouvrage	13
5.1.1 Frais directs de maîtrise d'ouvrage	13
5.1.2 Études thématiques	13
5.1.3 Missions d'accompagnement	13
5.2 Investigations géotechniques et autres acquisitions de données	13
5.2.1 Données géologiques, hydrogéologiques et géotechniques	14
5.2.2 Retour d'expérience	14
5.2.3 Coût des reconnaissances	15
5.2.4 Progressivité des reconnaissances et traitement du risque géologique	15
5.3 Maîtrise d'œuvre	17
5.3.1 Définition des éléments de mission de maîtrise d'œuvre	17
5.3.2 Rémunération du maître d'œuvre	17
5.3.3 Retour d'expérience pour la phase de travaux	19
5.4 Acquisitions foncières	19

PRÉAMBULE

Le fascicule 1 s'inscrit dans une série de fascicules constituant le document d'information sur le prix des tunnels :

- fascicule 0 : périmètre du document, données d'entrée pour l'estimation
- **fascicule 1 : provisions et autres postes de l'enveloppe prévisionnelle plafond**
- fascicule 2 : travaux de génie civil – tunnel en section courante
- fascicule 3 : travaux de génie civil – ouvrages émergents
- fascicule 4 : travaux d'équipements de sécurité et d'exploitation – ventilation et métallerie

Comme précisé dans le fascicule 0, l'**enveloppe prévisionnelle plafond** de l'opération comprend en plus de l'estimation technique des travaux, plusieurs autres postes couvrant d'une part les imprécisions et incertitudes du projet (somme à valoir, provision pour risques techniques identifiés, provision pour risques non techniques, provision pour imprévus) et d'autres part les autres dépenses de maîtrise d'ouvrage (frais d'études et de maîtrise d'ouvrage, investigations géotechniques et acquisitions de données, frais de maîtrise d'œuvre, acquisitions foncières).

Le présent fascicule 1 va détailler les différentes composantes qui s'ajoutent à l'estimation technique des travaux.

Le tableau suivant résume cette décomposition, dans l'ordre de présentation dans le fascicule.

Enveloppe prévisionnelle plafond	Coût prévisionnel des travaux (CPT)	Estimation technique des travaux (ETT)	cf. Fascicules 2,3,4
		Somme à valoir (SAV)	cf. Fascicule 1
		Provision pour risques techniques identifiés (PRI)	
	Autres postes	Provision pour risques non techniques du maître d'ouvrage	
		Provision pour imprévus (ou risques non identifiés PRNI)	
		Études et frais de maîtrise d'ouvrage	
		Investigations géotechniques et autres acquisitions de données	
		Frais de maîtrise d'œuvre	
		Libération des emprises et acquisitions foncières	

Tableau 1 : Décomposition de l'estimation prévisionnelle de l'opération

Bien que l'estimation technique des travaux représente la plus grande partie de l'enveloppe prévisionnelle plafond, les autres postes complémentaires peuvent peser tout de même plus du tiers de ce coût global (cf. art. 1.6 fascicule 0).

Enfin il est important de noter que le **coût prévisionnel des travaux (CPT) est nécessairement attaché à un programme** ; il ne comprend donc pas de provision destinée à couvrir une modification significative du programme qui justifie alors une nouvelle évaluation du projet.

PROVISIONS ATTACHÉES À L'ESTIMATION TECHNIQUE DES TRAVAUX

L'estimation technique des travaux est une évaluation réaliste et raisonnable du prix de toutes les parties d'ouvrages décrites dans les dossiers d'étude (cf. fascicules 2, 3, 4). Elle est établie à partir des éléments connus du programme et seulement de ceux-ci, et est basée sur l'appréciation la plus probable du niveau de difficulté de creusement du tunnel en rapport à la connaissance géologique et géotechnique du site. Elle ne couvre donc pas la rencontre de conditions jugées peu probables (cf. 2.2) au moment des études (par exemple pour le contexte géologique).

À cette estimation technique des travaux est associée :

- une **somme à valoir** qui est l'appréciation des imprécisions du projet à un stade donné de l'étude (selon le niveau de détail de la description du projet et des prix correspondants) ;
- une **provision pour risques techniques identifiés** qui est une réserve budgétaire destinée à couvrir les incertitudes du projet. Cette provision reflète la sensibilité de la conception à des conditions d'exécution différentes de celles retenues, qu'il est possible (mais peu probable) de rencontrer, mais qui ne peuvent pas être totalement écartées.

L'ensemble de ces deux postes complémentaires renseigne sur le niveau de fiabilité du coût prévisionnel des travaux.

2.1

SOMME À VALOIR (SAV)

La somme à valoir couvre l'ensemble des imprécisions qui subsistent dans la définition fonctionnelle, géométrique et technique des ouvrages, dans les prix unitaires et les quantités. Elle ne couvre pas les incertitudes liées à la rencontre de conditions de réalisation différentes de celles décrites pour établir l'estimation technique (incertitudes sur le contexte géotechnique et sur l'impact du projet sur les avoisinants).

Les imprécisions à intégrer dans la SAV sont par exemple (liste non exhaustive) :

- celles qui résultent de la définition géométrique de la section transversale à partir d'une liste arrêtée de sections utiles qui, bien qu'elle comprenne une très large majorité des cas courants, peut nécessiter des ajustements dans certains cas particuliers ;
- celles qui peuvent résulter d'un positionnement non définitif des têtes et du tracé et donc d'une variation de la longueur de l'ouvrage, par exemple en fonction de la précision des données topographiques disponibles, tant pour la section principale que pour les ouvrages annexes de sécurité ;

- celles qui résultent de choix non définitifs sur les réseaux en plates-formes, voire même sur le nombre et la dimension d'ouvrages annexes ;
- celles qui résultent de l'imprécision des coûts unitaires ou forfaitaires utilisés pour l'estimation des différentes parties d'ouvrages.

La somme à valoir diminue nécessairement au fur et à mesure que les études progressent puisque le niveau de détail de la conception augmente (les ouvrages sont décrits avec de plus en plus de précision). Lors des études préliminaires, le montant de la SAV à atteindre est de l'ordre de 20 % pour diminuer à quelques pour cent seulement à l'issue de la conception, une fois que celle-ci est complètement aboutie.

À chaque étape de l'étude, il faut indiquer le plus précisément possible la nature des imprécisions comprises dans la SAV.

La SAV peut par exemple être déterminée au moyen d'une étude de sensibilité qui porte sur les quantités et prix unitaires retenus pour établir l'estimation technique des travaux.

2.2 PROVISION POUR RISQUES TECHNIQUES IDENTIFIÉS (PRI)

La provision pour risques techniques identifiés (PRI) caractérise la sensibilité de la conception à la rencontre de conditions de réalisation différentes des conditions les plus probables retenues pour établir l'estimation technique des travaux.

Il s'agirait par exemple de la rencontre d'une importante zone de faille dont la vraisemblance est faible, raison pour laquelle cette hypothèse n'est pas retenue dans les conditions les plus probables. Ainsi, la conséquence financière correspondante n'est pas comprise dans l'estimation technique des travaux mais fait partie de la provision pour risques techniques identifiés.

Il faut rappeler que la connaissance du site ne peut jamais être complète et comporte toujours une part d'incertitude : on ne peut ainsi jamais exclure que les terrains réellement traversés soient ponctuellement différents de ceux que les études ont retenus. De tels événements, s'ils se réalisent peuvent avoir des conséquences financières lourdes, aussi bien pour l'entreprise qui réalise les travaux que pour le maître d'ouvrage qui les finance.

Il est nécessaire de quantifier le plus précisément possible le niveau de risque lié à l'incertitude, qui porte sur la survenance de conditions de réalisation différentes et redoutées (mais non avérées), pour ensuite pouvoir déterminer la réserve budgétaire destinée à les couvrir. Il est recommandé d'avoir recours à une démarche d'identification et d'analyse des risques (cf. § 2.4.) qui garantit la traçabilité et la fiabilité de l'estimation.

Les risques dont l'origine est géologique, hydrogéologique et géotechnique correspondent à une part importante de l'ensemble des risques techniques identifiés propres à la conception mais ils ne sont pas les seuls.

D'autres catégories doivent également être prises en compte, par exemple :

- les risques liés à l'impact du projet sur les avoisinants (réseaux, autres ouvrages, bâtis, etc.);
- les risques environnementaux (gêne des riverains, pollution du milieu naturel, gestion des matériaux excavés, etc.).

2.3 OBJECTIFS DE PRÉCISION DU COÛT PRÉVISIONNEL DES TRAVAUX (CPT)

Les moyens mobilisés pour les études doivent être adaptés aux objectifs de fiabilité fixés par le maître d'ouvrage. Selon le niveau d'étude, les niveaux de précision du CPT figurant dans le tableau 2 suivant sont recommandés.

Niveaux d'étude	Niveau de précision recommandé pour le CPT (en pourcentage par rapport à l'estimation technique des travaux)		
	SAV	PRI	SAV+PRI
Études préliminaires	20 %	< 30 %	30 à 50 %
Avant-projet	10 %	< 15 %	20 à 25 %
Projet	< 5 %	< 10 %	5 à 10 %

Tableau 2 : Niveau de précision du CPT recommandé

Le retour d'expérience montre que les objectifs de précision recommandés ci-avant sont réalistes mais peuvent nécessiter un niveau d'approfondissement de l'étude relativement conséquent dès la phase des études préliminaires.

Concernant tout d'abord la somme à valoir :

- au stade des études préliminaires : les études doivent permettre de s'assurer de la possibilité de réaliser l'ouvrage dans des conditions économiques raisonnables. Cela peut se traduire par une imprécision de la conception fonctionnelle, géométrique et technique (SAV) limitée à 20 % du montant de l'estimation technique des travaux, valeur qui peut être majorée dans les cas d'ouvrages particulièrement complexes et difficiles à définir avant d'atteindre une bonne connaissance de l'ensemble des éléments du programme (mode d'exploitation, niveau d'équipements et d'ouvrages annexes, etc.);

- au stade des études d'avant-projet : les études ont pour objectif de définir les principes de la solution retenue et de déterminer un coût prévisionnel des travaux fiable. Elles doivent apporter des éléments de conception précis au fur et à mesure de la maturation du programme dont la finalisation se fait pendant l'AVP. Ainsi, le niveau d'étude de chaque partie d'ouvrage doit permettre de limiter l'imprécision de la conception fonctionnelle, géométrique et technique (SAV) à une valeur de 10 % de l'estimation technique des travaux;
- à l'achèvement des études en fin de phase projet, la SAV est en pratique très faible, voire quasiment nulle, car toutes les études nécessaires pour lever les imprécisions de définition technique, géométrique et fonctionnelle de l'ouvrage doivent avoir été conduites.

Il en résulte que c'est l'objectif de précision de l'estimation financière qui pilote le degré d'approfondissement de l'étude. Les études devraient donc être complétées tant que ces niveaux de précision ne sont pas atteints, ceci par itérations successives.

Concernant ensuite l'estimation de la provision pour risques techniques identifiés (PRI) :

- au stade des études préliminaires : le niveau d'études doit permettre d'assurer la faisabilité des solutions envisagées notamment au regard du niveau de risque lié au contexte géologique, de la sensibilité du milieu naturel et de la compatibilité du projet avec la présence éventuelle de constructions sensibles au sein de la zone d'influence géotechnique. Le niveau de connaissance du contexte doit permettre d'identifier, dès cette étape, les zones de

difficultés particulières (géologique, lié à l'environnement ou à la présence d'avoisinants sensibles). Pour celles qui peuvent remettre en cause la faisabilité, le niveau d'étude doit être approfondi dès cette étape ;

- au stade des études d'AVP, il est recommandé de traiter absolument les risques identifiés les plus importants lorsque l'étendue de la fourchette SAV + PRI dépasse 20 % du montant de l'estimation technique des travaux. Dans la plupart des cas, une grande partie de l'incertitude qui en est à l'origine est liée à la méconnaissance du contexte géologique. Cela signifie que l'effort d'acquisition des données (reconnaitances géologiques en particulier) à engager pendant les études d'AVP (ou avant) pour atteindre cet objectif peut être important en fonction du contexte ;
- à l'achèvement des études en fin de phase Projet : le niveau de risque résiduel doit être réduit à un niveau aussi bas que raisonnablement possible, c'est-à-dire que tous les moyens raisonnables, adaptés au site et choisis en suivant les règles de l'art, doivent avoir été mis en œuvre pour lever complètement l'ensemble des incertitudes identifiées. Il en résulte que le montant de la PRI doit être inférieur à 10 % du montant de l'estimation technique des travaux.

De manière générale, au fur et à mesure de l'acquisition de nouvelles données (reconnaitances notamment), le niveau de connaissance des conditions de réalisation s'accroît et en corollaire le niveau d'incertitude diminue. Ainsi, la marge d'incertitude qui est représentée par la provision pour risques techniques identifiés (PRI) diminue (cf. illustration 1 ci-après). Inversement, l'estimation technique des travaux peut parfois se retrouver réévaluée à la hausse, si par exemple, à la faveur de données complémentaires, les conditions de réalisation se révèlent plus difficiles que ne le laissait supposer la synthèse faite lors de la phase précédente (ces nouvelles conditions deviendraient alors les conditions les plus probables).

En **conclusion**, on peut retenir les points suivants :

- **la provision retenue pour couvrir les risques techniques identifiés est une variable qui évolue en fonction du temps et du niveau d'étude**, normalement toujours à la baisse. A contrario, l'estimation technique des travaux peut parfois être évaluée à la hausse ;
- **la démarche d'analyse des risques et le calcul correspondant de la PRI doivent être reconduits à chaque nouvelle étape de l'étude** et à la faveur de nouvelles données ;
- **la réalisation d'une analyse des risques objective et complète est une condition nécessaire pour assurer la maîtrise des coûts de l'opération.**

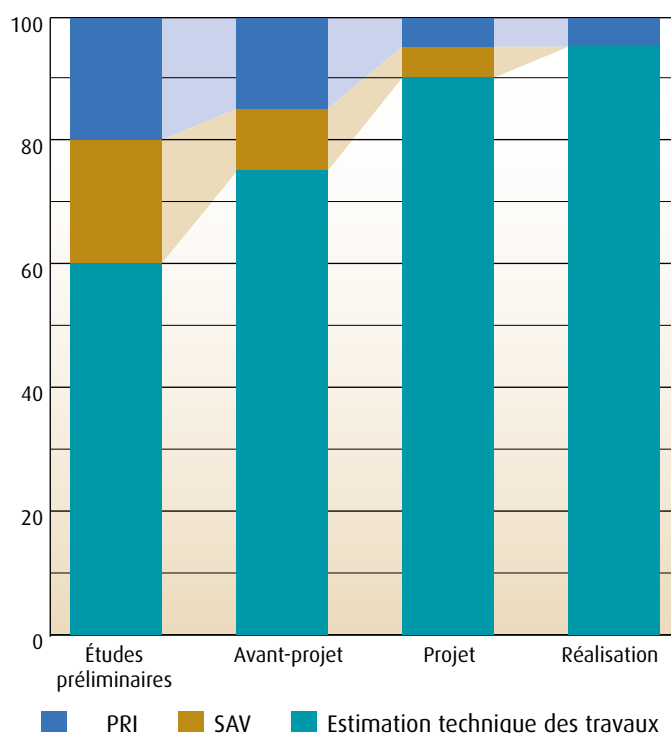


Illustration 1 : Principe d'évolution théorique du coût prévisionnel des travaux et des reconnaissances selon le niveau d'études

2.4 MÉTHODES D'ESTIMATION DE LA PRI

Le calcul de la provision pour risques techniques identifiés doit toujours se baser sur une analyse des risques qui permet d'identifier et de caractériser individuellement chacun des risques susceptibles d'être rencontrés. Cette analyse est reconduite à chaque phase du projet.

Dans la pratique, la provision pour risques techniques identifiés, qui est une réserve budgétaire destinée à couvrir l'ensemble des risques, peut se déterminer de plusieurs façons, selon la nature et la complexité du projet. On distingue :

- le recours à des barèmes types ou à des jugements d'experts ;
Nota : la détermination de la provision pour risques techniques identifiés comme un pourcentage global « à dire d'expert » du montant total des travaux ne permet pas dans la plupart des cas d'explicitier le raisonnement qui a conduit à l'établir. L'utilisation de barèmes types ne permet pas de prendre en compte la spécificité du contexte de réalisation du tunnel. Ces pratiques sont donc à bannir même aux phases d'études préliminaires.
- le calcul d'un niveau de risque aggloméré établi en sommant les résultats de l'analyse des risques (cf. § 2.4.2) ;
- le calcul d'un niveau de risque utilisant des méthodes probabilistes combinatoires (cf. § 2.4.3).

- le niveau de risque (NR) traduit l'importance du risque. Il est déterminé par la combinaison de la conséquence et de la vraisemblance.

Ainsi, les événements redoutés sont chacun associés à une vraisemblance, une conséquence et un niveau de risque.

Pour plus de clarté, prenons l'exemple simple d'un risque lié à la rencontre peu probable d'une zone de faille.

Considérons un projet de tunnel réalisé dans un massif rocheux peu fracturé. La conception technique la plus probable fait l'hypothèse qu'il n'y a pas de faille. Des indices géologiques incitent toutefois à ne pas en exclure la présence, avec une probabilité faible d'occurrence (vraisemblance).

→ l'estimation technique se base donc sur une conception qui ne tient pas compte de la présence d'une zone de faille car elle est jugée peu probable ;

→ si le risque qui est la rencontre d'une zone de faille se produit pendant la construction, les méthodes devront probablement être adaptées. Les conséquences de ce risque que sont les ralentissements et changements de méthode, sont exprimées dans les surcoûts et les « surdélais » calculés. Le niveau de risque correspondant est donc la combinaison de la vraisemblance (peu probable) et des conséquences.

2.4.1 Mise en œuvre du processus de management du risque

Préalablement au calcul de la PRI, il est préconisé de toujours réaliser une appréciation des risques, dont l'objectif est d'identifier le plus exhaustivement possible l'ensemble des risques techniques pouvant affecter le projet, et de proposer ensuite une caractérisation de chacun de ces risques en terme de conséquence et de vraisemblance afin de déterminer le niveau de risque.

À ce titre, il est recommandé d'utiliser le formalisme proposé par la norme ISO 31000:2009 qui est également celui retenu par les recommandations de l'AFTES relatives à la caractérisation des incertitudes et des risques géologiques, hydrogéologiques et géotechniques dont elles s'inspirent largement (GT32R2F1 [14]).

Rappelons quelques éléments de définition du vocabulaire du risque (ISO 31000) :

- le risque est défini comme l'effet de l'incertitude sur l'atteinte des objectifs du maître d'ouvrage (maîtrise du coût, du délai de l'opération, sécurité des tiers et des usagers, etc.) ;
- la vraisemblance (V) est la probabilité que survienne (occurrence) un événement redouté ;
- la conséquence (C) est l'effet induit par l'occurrence de cet événement redouté ;

Les conditions d'exécution et la conception associée sont ainsi passées au crible de la démarche de management du risque selon les étapes suivantes :

1. bilan des connaissances et des incertitudes ;
2. identification des risques et des événements redoutés ;
3. analyse du risque par la quantification des conséquences, de la vraisemblance et donc du niveau de risque.

Lors du processus, chaque risque est analysé indépendamment et l'ensemble des risques est regroupé dans un registre des risques qui est mis à jour à chaque étape des études¹.

1. Cf. l'exemple de registre des risques proposé par le GT32R2F1 de l'AFTES [14].

2.4.2 Calcul de la PRI comme un niveau de risque aggloméré

Cette méthode s'appuie sur la valorisation des conséquences de chaque risque pris individuellement (coût et délai pour l'événement redouté) en y appliquant la vraisemblance du risque correspondant. Une combinaison (simple somme dans la plupart des cas²) de l'ensemble des risques ainsi pondérés est ensuite choisie et constitue le montant global de la PRI.

$$PRI = \sum C_i \cdot V_i$$

Cette méthode de calcul très simplifiée peut nécessiter d'importants ajustements à l'issue du calcul (coefficient correcteur) en raison des fortes limites qu'il faut garder à l'esprit, car cette méthode :

- ne prend pas en compte la simultanéité ou l'interdépendance de certains risques ;
- donne un poids équivalent à tous les risques et en particulier aux risques ayant une conséquence forte associée à une vraisemblance faible et ceux ayant une conséquence faible associée à une vraisemblance forte ;
- assimile la vraisemblance de chaque risque à une probabilité d'occurrence, difficile à déterminer dans la pratique car les lois de probabilités sont dans la plupart des cas inapplicables ;
- la somme totale calculée peut être insuffisante pour couvrir complètement un seul événement redouté, si le nombre de risques considéré au total est faible ou que les vraisemblances associées sont toutes faibles.

2.4.3 Calcul de la PRI basé sur une simulation probabiliste

La simulation probabiliste consiste à appliquer la démarche suivante :

- a) recenser les paramètres significatifs ayant un impact sur le coût et le délai du projet : longueur d'application des profils types, survenance et impact d'événements redoutés majeurs, coûts unitaires des profils types, cadences de réalisation, etc. ;
- b) estimer une distribution de probabilité pour chaque paramètre variable ;
- c) modéliser le coût de réalisation à partir de l'ensemble des paramètres ;
- d) réaliser, à l'aide d'un logiciel spécialisé, un grand nombre de simulations basées sur le tirage aléatoire du jeu de valeurs des paramètres (méthode de Monte-Carlo) ;
- e) produire la distribution statistique des résultats ;
- f) analyser les résultats et arrêter un montant de la PRI en fonction des exigences de couverture du risque du maître d'ouvrage.

Cette méthode ne peut s'appliquer que si les risques sont clairement identifiés et elle nécessite donc au préalable de réaliser une identification et une analyse complète des risques. Elle permet ainsi de tracer une courbe indiquant le montant de la PRI pour obtenir une couverture des risques donnée.

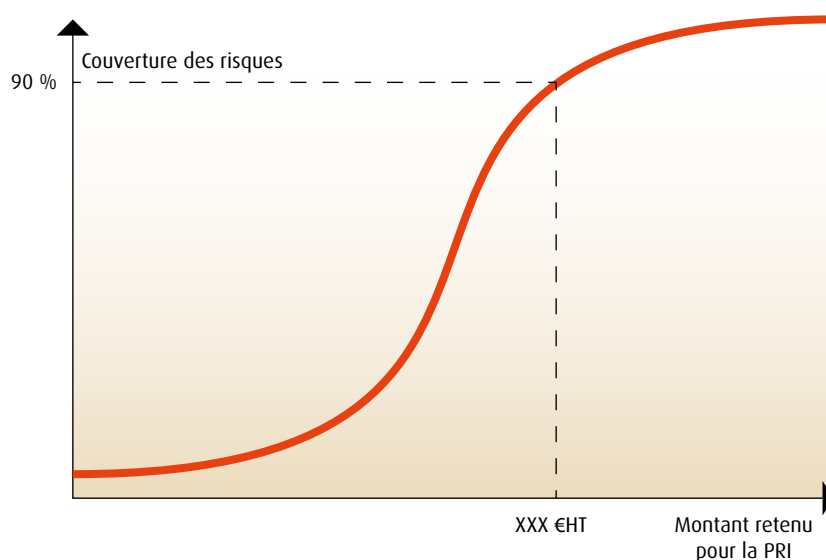


Illustration 2 : Courbe de couverture du risque obtenue à partir des méthodes probabilistes

2. Il existe aussi d'autres formules d'agglomération comme par exemple $\sqrt{(\sum PRI_i^2)}$.

Par exemple, si l'on considère un tunnel de 1000 m de longueur. En supposant que l'étude définit les conditions les plus probables suivantes :

- profil type P3 : longueur d'application probable 650 m ;
- profil type P6 : longueur d'application probable 300 m ;
- profil type P8 : longueur d'application probable 50 m.

Ces hypothèses permettent d'établir l'estimation technique des travaux en sommant le prix de chaque profil par la longueur d'application correspondante.

En intégrant dans le calcul du prix des travaux les imprécisions liées aux prix unitaires retenus pour déterminer le prix de chaque profil type et l'imprécision dans la détermination des quantités unitaires (variations limitées des longueurs d'application des profils types), on obtient, par application d'une simulation de Monte Carlo, une répartition probabiliste caractéristique de l'estimation technique et de la SAV (histogramme en bleu).

Ensuite, en considérant dans un second scénario plusieurs risques identifiés de vraisemblance faible :

1. la rencontre d'une ou plusieurs zones de faille nécessitant des traitements de terrains et la mise en œuvre de techniques spécifiques ;
 2. la rencontre d'un ou plusieurs karsts de dimensions variables nécessitant des dispositions particulières ;
 3. une répartition sensiblement différente des soutènements résultant d'une mauvaise appréciation des conditions géotechniques.
- On obtient alors la répartition indiquée sur l'histogramme jaune. La courbe en rouge indique le pourcentage cumulé des scénarios couverts pour un montant donné pour ce second scénario. Dans l'exemple retenu, on peut considérer que 90 % des scénarios simulés sont couverts par un montant des travaux de 31,2 M€. Ce montant représente donc la somme : estimation technique des travaux + SAV + PRI pour une couverture des risques de 90 %.

Ce montant est à comparer à 27,1 M€ qui est le montant le plus probable du scénario de base hors risques, c'est à dire le montant de l'estimation technique des travaux (histogramme en bleu).

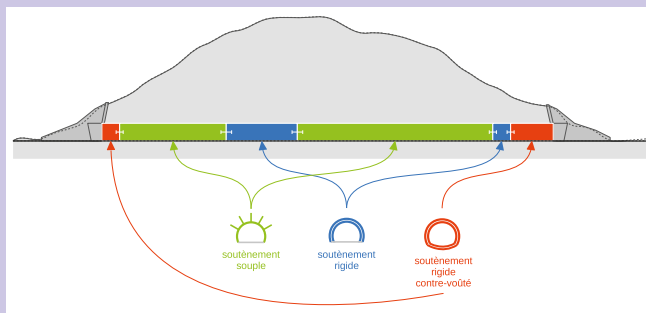


Illustration 3 : Distribution du prix total de l'ouvrage à l'issue des simulations de Monte-Carlo pour deux scénarios

PROVISION POUR RISQUES NON TECHNIQUES

La complexité croissante des projets nécessite une analyse des risques au-delà du seul champ des risques techniques (cf. §2.2), afin de consolider la maîtrise des coûts et des délais ainsi que la sécurité administrative et juridique des opérations.

La démarche d'identification et d'analyse des risques est similaire à celle préconisée pour les risques techniques (cf. §2.4), en la déclinant pour les autres types de risques identifiés.

Pour les différents risques non techniques identifiés, la détermination de la réserve budgétaire à prendre en compte se fera principalement sur la base de l'expérience des acteurs impliqués, c'est-à-dire « à dire d'expert ».

Une typologie possible des risques non techniques est la suivante (liste non exhaustive³), accompagnée de quelques exemples de points de vigilance particuliers :

- **Organisation** : équipe de direction de projet sous dimensionnée, manque de compétences dans le domaine des travaux souterrains, contrat de maîtrise d'œuvre non approprié au projet en souterrain, sous évaluation des contraintes dans le planning travaux, etc.
- **Programme de l'opération** : modification des fonctionnalités entre deux étapes décisionnelles, demande « politique » venant modifier un des éléments du programme, manque de précision sur les contraintes et les exigences du futur exploitant de l'ouvrage, manque de visibilité sur les contraintes et exigences en phase chantier comme les plages horaires de travail en particulier pour les tirs de mines et l'évacuation des marins, etc.
- **Concertation et implication des acteurs externes** : il s'agit là de nouvelles demandes de la population locale ou de retard de travaux gérés par d'autres maîtres d'ouvrages (par exemple déplacement des réseaux, d'une ligne aérienne dans l'emprise des têtes, etc.).
- **Contexte réglementaire** : changement des lois, des décrets, des normes, etc. pris en compte dans les hypothèses initiales d'élaboration du projet (sécurité, environnement, etc.) et qui pourrait être identifié.

- **Financement** : programmation budgétaire contraignante pouvant modifier le planning, le délai, le phasage, l'allotissement de l'opération.
- **Sécurité juridique** : l'ensemble des risques liés aux contrats (recours, appels d'offres infructueux, etc.).
- **En phase Travaux** :
 - le foncier : non possession au démarrage des travaux des terrains aux têtes de l'ouvrage ou du tréfonds, etc. ;
 - l'environnement : non possession au démarrage des travaux des autorisations administratives vis-à-vis du rejet des eaux de chantier, de la mise en dépôt des matériaux excavés, de l'autorisation de défrichement, de l'arrêté préfectoral nécessaire au transport de l'explosif, de l'autorisation d'installation d'une centrale à béton, gêne des riverains, perturbation de la faune, etc. ;
 - la sécurité de l'usager de la route pendant les travaux, en particulier dans le cas d'une zone à circulation mixte ;
 - non-acceptation des nuisances générées par les travaux (bruit, poussière, etc.).
- **Mise en service et gestion ultérieure** : il s'agit des risques liés à la non autorisation préfectorale pour la mise en service (absence de dossier de sécurité validé par exemple, etc.).

3. D'autres documents de référence proposent une typologie différente, par exemple le « Manuel de maîtrise des risques des opérations en maîtrise d'ouvrage directe », RFF, avril 2006 [15].

PROVISION POUR IMPRÉVUS TECHNIQUES ET NON TECHNIQUES

Pour les opérations complexes ou les grands projets, une provision pour imprévus peut être incluse dans l'ensemble de l'estimation prévisionnelle de l'opération.

Cette provision est destinée à couvrir des événements qui ne pourraient pas être identifiés à la date de l'estimation tels que la rencontre de conditions géologiques totalement imprévues, l'évolution du contexte réglementaire ou normatif (lié à l'environnement, à la sécurité, aux conditions de travail, etc.) ou encore une décision politique venant perturber le programme (évolution du programme, volonté de différer ou de phaser le projet, etc.). Cette provision couvre donc à la fois des risques techniques et des risques non techniques.

S'agissant par définition d'événements inconnus, les risques non identifiés ne peuvent être évalués objectivement. La détermination de la provision correspondante ne peut donc être qu'arbitraire.

Ainsi, pour couvrir les imprévus techniques et non techniques, on peut proposer de retenir un ordre de grandeur de 5 à 10 % du coût prévisionnel des travaux selon la complexité, le contexte particulier du projet et le niveau d'étude.

AUTRES POSTES DE L'ENVELOPPE PRÉVISIONNELLE PLAFOND DE L'OPÉRATION

5.1 FRAIS DE MAÎTRISE D'OUVRAGE

5.1.1 Frais directs de maîtrise d'ouvrage

Ce poste prend en compte les frais directs de l'équipe de maîtrise d'ouvrage (salaires, fonctionnement, etc.), il n'a pas vocation à être renseigné systématiquement.

5.1.2 Études thématiques

Ce poste de dépenses prend en compte l'ensemble des études hors maîtrise d'œuvre prises en charge par le maître d'ouvrage. Il comprend notamment :

- avant la déclaration d'utilité publique :
 - les études de faisabilité préalables au dossier nécessaire à l'enquête publique et nécessaires pour définir le programme ;
 - les études thématiques « techniques et environnementales » à mener en phase amont, en lien avec les procédures réglementaires en vigueur (concertation, enquête publique, loi sur l'eau, défrichement, archéologie préventive, etc.) ;
- après la déclaration d'utilité publique :
 - les études nécessaires pour déterminer la sensibilité des constructions existantes au droit des ouvrages à construire (vulnérabilité du bâti aux tassements, aux vibrations, etc.) ;

- les études nécessaires pour déterminer la sensibilité au bruit ;
- les études nécessaires à la mise en service de l'ouvrage, comme le dossier de sécurité et les missions associées.

5.1.3 Missions d'accompagnement

Ce poste de dépenses prend en compte l'ensemble des missions d'assistance à la maîtrise d'ouvrage pour les phases études et travaux, il comprend notamment les frais :

- des coordonnateurs SPS et environnement ;
- des missions de contrôles extérieurs ;
- de conduite d'opération, d'ordonnancement ;
- de communication et concertation ;
- d'expertises juridique, technique et financière.

Certaines de ces missions peuvent être réalisées au sein de la structure de maîtrise d'ouvrage. Dans ce cas, les dépenses correspondantes sont incluses dans les frais directs de maîtrise d'ouvrage.

Le coût des études thématiques et des missions d'accompagnement est généralement compris entre 5 % et 10 % de l'estimation technique des travaux, selon la complexité du projet.

5.2 INVESTIGATIONS GÉOTECHNIQUES ET AUTRES ACQUISITIONS DE DONNÉES

La fiabilité de l'enveloppe prévisionnelle plafond de l'opération dépend en particulier de la connaissance la plus complète possible des conditions et des contraintes d'exécution. Ainsi un effort particulier doit être produit pour acquérir des données complètes concernant :

- la connaissance géographique et topographique du site (levés topographiques, photos aériennes, etc.) ;
- la connaissance des avoisinants et leur sensibilité (enquêtes caves et fondations, etc.) ;
- la connaissance du milieu naturel et humain (inventaire écologique, recensement des contraintes réglementaires, etc.) ;
- la connaissance du contexte géologique, hydrogéologique et géotechnique.

Dans la plupart des cas, les moyens à mobiliser pour la connaissance du contexte géologique, hydrogéologique et géotechnique représentent la part la plus importante des frais financiers correspondant à l'acquisition de données, en raison du coût des travaux des reconnaissances. Ainsi, dans la suite du document seuls sont traités les coûts correspondant à l'acquisition des données géologiques, hydrogéologiques et géotechniques.

5.2.1 Données géologiques, hydrogéologiques et géotechniques

Les données géologiques, hydrogéologiques et géotechniques peuvent être de trois natures : les données bibliographiques, les données issues d'une étude de terrain et les données issues de travaux de reconnaissances.

- **Données bibliographiques** : il s'agit des informations et documents existants relatifs à la géologie et à la géomorphologie régionales, ainsi qu'aux travaux réalisés à proximité (cartes géologiques et photographies aériennes ou satellitaires, données issues de la banque du sous-sol, documents issus de travaux universitaires de recherche, compte rendus de travaux, études d'ouvrages dans des sites analogues, recensement des captages, inventaire des circulations souterraines, etc.).
- **Données issues d'une étude de terrain** : il s'agit d'un travail de terrain d'analyse et de synthèse de tous les éléments nécessaires à la compréhension du site (levé des affleurements, mesure de l'orientation des discontinuités, recensement des éléments relatifs à la structure tectonique, inventaire des indices hydrogéologiques, etc.). Ce travail conduit à l'établissement de cartes géologiques détaillées, de coupes géologiques spécifiques au projet, etc.
- **Données issues de travaux de reconnaissance** : il s'agit des méthodes géophysiques, essais in-situ, sondages, galeries de reconnaissance, caractérisation des matériaux par des essais de laboratoire.

La plupart du temps, les deux premiers types ne représentent pas un effort financier très important (souvent largement inférieur à 1 % du montant de l'estimation technique des travaux). Il est toutefois primordial de mettre en œuvre ces moyens le plus tôt possible car l'analyse préalable de ces données

permet d'optimiser largement la quantité et l'implantation des sondages et autres travaux de reconnaissances qui seront réalisés ensuite.

5.2.2 Retour d'expérience

Le coût des investigations géotechniques (travaux de reconnaissances) est très dépendant des conditions rencontrées, pouvant aller d'une fourchette de 2 % à plus de 10 % (voire encore davantage) du montant de l'estimation technique des travaux de construction.

Deux indicateurs sont principalement utilisés pour quantifier la quantité des reconnaissances (sondages) réalisée pendant l'ensemble des études :

- le ratio de longueur cumulée de forages de reconnaissance par rapport à la longueur du tunnel ;
- les sommes totales dépensées pour les reconnaissances (forages) par rapport au montant de l'estimation technique des travaux.

Le tableau 3 suivant présente le retour d'expérience des coûts de ces reconnaissances pour des ouvrages récents déjà construits ou dont les études sont terminées. Ces ouvrages sont principalement situés en France ou en Europe (longs tunnels alpins). Il s'agit d'un panel varié d'ouvrages, urbains ou non, de profondeur limitée à quelques dizaines de mètres ou plus profonds, de longueurs variées.

Pour chacun de ces ouvrages, il est admis que la quantité des reconnaissances réalisées a permis d'aboutir à un niveau de connaissance fiable du contexte géologique, hydrogéologique et géotechnique. Toutefois, il faut remarquer que ce niveau de connaissance a parfois nécessité la réalisation de galerie(s) de reconnaissance, aussi bien pour des ouvrages courts que pour des ouvrages très longs.

Tunnel	Démarrage des travaux	Type	Longueur totale	Linéaire cumulé de sondages	Coût des sondages/coût des travaux du tunnel	Ratio longueur de sondages/ longueur de tunnel	Méthode de construction Conv. = conventionnel Tun. = tunnelier
Saint-Vallier (26)	2002	Routier	178 m	225 m	2,6 %	1,26	Conv.
Schirmeck (67)	2003	Routier	550 + 150 m	704 m	3,7 %	1,01	Conv.
Lioran (03)	2003	Routier	1 635 m	1 345 m	2,42 %	0,82	Conv.
Bois de Peu (25)	2004	Routier	2 x 600 + 90 m	885 m	2,2 % (non compris galerie de reconnaissance)	1,09 (sondages seuls)	Conv.
Peute Combe (21)	2009	Routier	2 x 600 + 120 m	1 219 m	3,85 %	0,95	Conv.
Saint-Béat (31)	2010	Routier	110 + 310 m	1 586 m	2,1 %	1,12	Conv.
Tramway C2V (78)	2010	Tramway	1 500 + 90 m	1 902 m	/	1,20	Tun. « EPB »
Paris Ligne 4 (75)	2007	Metro	460 m	380 m	/	0,83	Conv.
Lyon ligne B (69)	2010	Metro	1 470 m	2 078 m	/	1,42	Tun. « Slurry »
Lötschberg (Suisse)	1994	Train	34,6 km	/	2,8 %	/	Tun. « Gripper »
Gothard (Suisse)	1998	Train	53,9 km	/	1,4 %	/	/
Brenner (Italie-Autriche)	2011	Train	57,0 km	/	8,7 % (y compris galeries de reconnaissance)	/	/
LTF (France-Italie)	Projet définitif	Train	57,1 km	≈ 62 km	8,9 % (y compris galeries de reconnaissance)	1,08 (sondages seuls)	/

Tableau 3 : Retour d'expérience de la quantité de sondages réalisés pour les travaux de construction de tunnels

Ainsi, on constate que le ratio «longueur de forages par rapport à la longueur du tunnel» est de l'ordre de 0,8 à 1,4 si l'on exclut la réalisation des galeries de reconnaissances. Le nombre de sondages à déduire de ce ratio est bien entendu à nuancer en fonction de la profondeur des tunnels et de la sensibilité des avoisinants du site (par exemple, pour un tunnel urbain, le nombre de points de sondages est toujours élevé comparé à un tunnel à moyenne profondeur en rase campagne notamment parce que la profondeur en site urbain est généralement faible, en particulier pour les métros).

À ce ratio correspond un ordre de grandeur du coût des reconnaissances de l'ordre de 2 à 4 % de l'estimation technique des travaux. Ce pourcentage croît rapidement si des galeries de reconnaissance sont nécessaires.

5.2.3 Coût des reconnaissances

- La quantité des reconnaissances à réaliser dépend :
- de la profondeur de l'ouvrage ;
 - du contexte géologique du site ;
 - du niveau de connaissance recherché ;
 - de la nature des avoisinants (site urbain ou non urbain).

Dans la plupart des cas, lorsque les travaux de reconnaissance se limitent à des reconnaissances géophysiques ou à des sondages, l'ordre de grandeur du coût est compris entre 2 et 4 % du montant de l'estimation technique des travaux. Il s'agit par exemple des tunnels inscrits dans un contexte géologique peu complexe et dans un massif rocheux ne présentant que quelques zones singulières ne nécessitant que ponctuellement des investigations plus nombreuses (zones de failles, paléovalées, etc.).

Lorsque le contexte le justifie, par exemple pour les tunnels inscrits dans un environnement particulièrement sensible et dans le cas de structures géologiques complexes ou de matériaux de mauvaise qualité (roches broyées, déformables, présence d'eau, etc.), la quantité des reconnaissances peut être très importante, et parfois même justifier la construction d'une galerie de reconnaissance spécifique. Dans ce cas, le montant peut atteindre 10 % du montant de l'estimation technique des travaux, voire davantage.

Le Tableau 4 résume ces considérations issues du retour d'expérience.

	Campagne usuelle (géophysique, sondages)	Campagne lourde (géophysique, nombreux sondages, galeries de reconnaissance)
Ordre de grandeur du coût des travaux de reconnaissance en fonction de l'estimation technique des travaux	2 à 4 %	5 à 10 % y compris en cas de réalisation d'une galerie de reconnaissance

Tableau 4 : Montant des reconnaissances en fonction de l'estimation technique des travaux de génie civil à l'issue de l'ensemble des études

Les ordres de grandeurs indiqués ci-avant ne préjugent pas de la définition des reconnaissances à réaliser qui, dans tous les cas, doit être établie en appliquant un processus rigoureux et complet d'identification et d'analyse des risques géologiques.

5.2.4. Progressivité des reconnaissances et traitement du risque géologique

Les reconnaissances sont réalisées pour diminuer le niveau de risque du projet vis-à-vis des incertitudes qui portent sur le contexte géologique, hydrogéologique et géotechnique.

La réalisation des reconnaissances est nécessairement itérative, et doit s'appuyer sur le résultat d'une analyse des risques.

En effet, lors des phases de conception, l'essentiel des actions de traitement du risque géologique consiste soit en des reconnaissances visant à réduire les incertitudes, soit en des adaptations du projet lui-même, visant à le rendre plus robuste vis-à-vis des conséquences de ces incertitudes. À chaque fois que des reconnaissances sont réalisées, il doit être procédé à une nouvelle évaluation de chaque risque. Si, en dépit des mesures de traitement, le risque demeure toujours inacceptable, une nouvelle itération de traitement du risque est lancée.

La réalisation des reconnaissances doit être progressive car elle répond à des objectifs propres à chaque phase d'études :

- Au cours des études préliminaires et d'avant-projet, les études doivent permettre d'assurer la faisabilité des solutions envisagées dans des conditions économiques raisonnables notamment au regard du niveau de risque lié au contexte géologique, à la sensibilité du milieu naturel et à la compatibilité du projet avec la présence éventuelle d'avoisinants sensibles. Ainsi, les reconnaissances sont implantées au droit des zones présentant les difficultés potentielles et les incertitudes les plus importantes. Ceci justifie qu'une partie importante de l'ensemble des reconnaissances doit être réalisée dès les études préliminaires, pour pouvoir d'une part identifier les difficultés susceptibles de remettre en cause cette faisabilité et d'autre part pouvoir proposer un coût de réalisation fiable dès l'AVP.
- Au cours des études de projet, les reconnaissances doivent permettre de réduire le niveau de risque à un niveau aussi bas que raisonnablement possible. L'ensemble des incertitudes doit avoir été levé à la fin de cette étape, ce qui explique qu'une part importante de reconnaissance soit conduite au cours de cette phase.

Le tableau 5 suivant présente une répartition théorique et indicative de l'ensemble des sommes dépensées en reconnaissances en fonction de la phase d'étude.

Phase	Rappel du niveau de précision (SAV + PRI) de l'estimation technique des travaux	Fraction des reconnaissances à réaliser à chaque phase
Études préliminaires	30 à 50 %	1/10 à 1/5
Avant-projet	20 à 25 %	1/3 à 1/2
Projet	10 %	1/3 à 1/2
Réalisation	/	0 à 1/10

Tableau 5 : Fraction des dépenses en reconnaissances par phase d'étude en rapport à l'ensemble des reconnaissances

L'illustration 4 ci-après illustre la progressivité des reconnaissances tout au long des études.

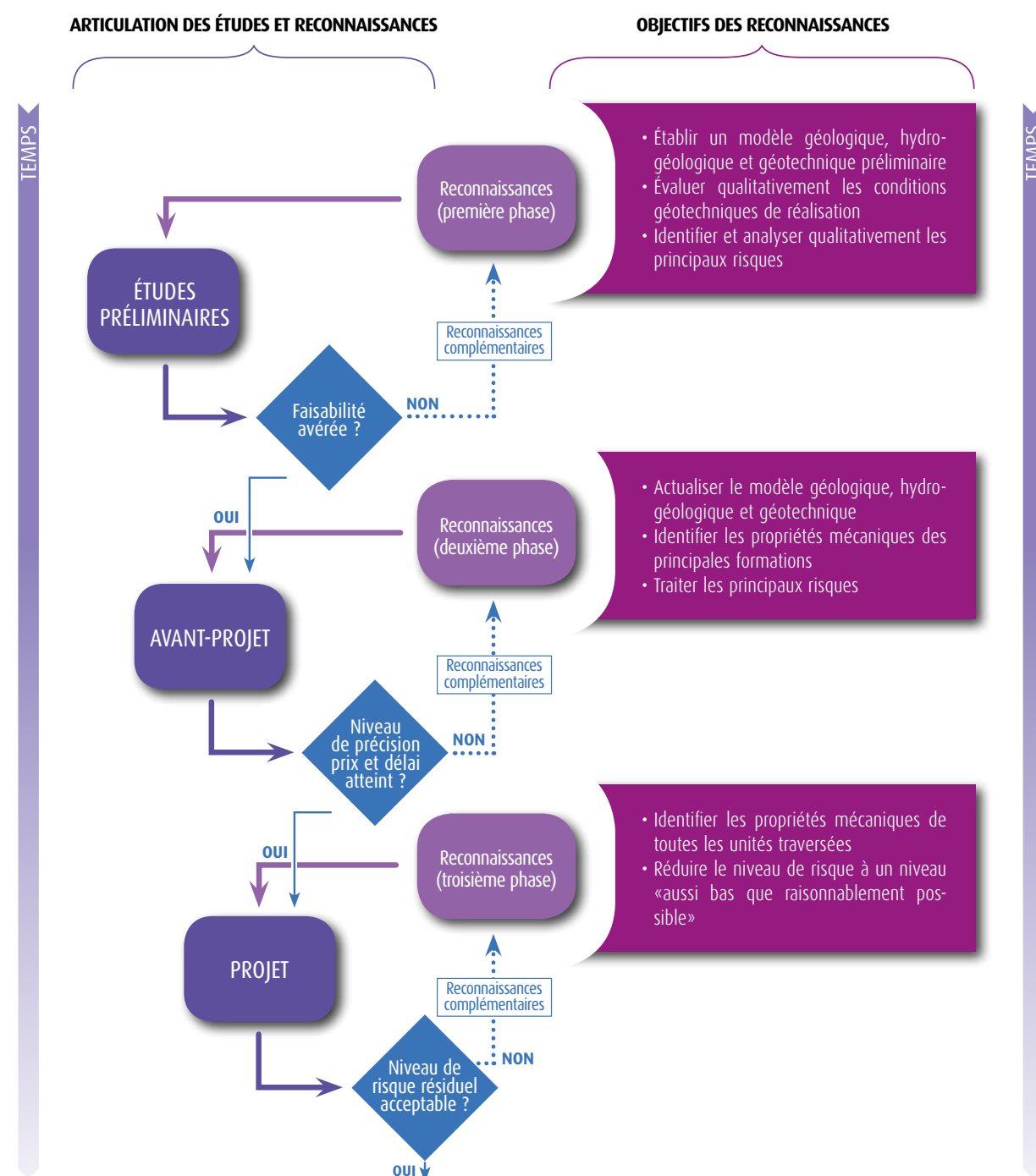


Illustration 4 : Objectifs et articulation des reconnaissances

5.3.1 Définition des éléments de mission de maîtrise d'œuvre

Les éléments de mission de maîtrise d'œuvre qu'un maître d'ouvrage public peut confier à une personne de droit privé sont définis dans la loi MOP [3], et ses textes d'application.

Dans le cadre du présent document d'information, les études préliminaires ne sont pas considérées comme une mission de maîtrise d'œuvre ; elles entrent dans le cadre des études thématiques conduites par la maîtrise d'ouvrage, assistée ou non par un bureau d'études, avant la déclaration d'utilité publique du projet (cf. §5.1.2).

La loi MOP s'applique à la fois aux ouvrages de bâtiment et d'infrastructures. Une mission de base est définie pour les ouvrages de bâtiment⁴ ; elle comprend la conception et le suivi de la réalisation jusqu'à la réception de l'ouvrage. Cette mission de base fait l'objet d'un contrat unique. Cette notion n'existe pas dans la loi pour les ouvrages d'infrastructures, mais il est fortement recommandé d'appliquer le même principe et de confier au même maître d'œuvre les missions de conception et de suivi de la réalisation, soit l'ensemble des éléments de mission suivants :

- phase de conception :
 - les études d'avant-projet (AVP) ;
 - les études de projet (PRO) ;
 - l'assistance apportée au maître de l'ouvrage pour la passation du contrat de travaux (ACT) ;
- phase travaux :
 - le visa des études d'exécution faites par l'entrepreneur (VISA) ;
 - la direction de l'exécution du contrat de travaux (DET) ;
 - l'assistance apportée au maître de l'ouvrage lors des opérations de réception et pendant la période de garantie de parfait achèvement (AOR).

Par ailleurs, la spécificité des ouvrages souterrains doit conduire à confier au maître d'œuvre des éléments de mission complémentaires tels que⁵ :

- une mission d'ingénierie géotechnique spécifique à ce type d'ouvrage définie à partir de la norme NF P 94-500 relative aux missions d'ingénierie géotechnique (phases conception et travaux) ;
- l'animation du processus de management du risque tout au long de l'opération ;
- l'établissement du Schéma Directeur de la Qualité ;
- la définition et le suivi des marchés de contrôle extérieur des travaux ;

- le suivi renforcé des travaux de creusement/soutènement nécessitant la présence continue du maître d'œuvre sur chantier, mission indissociable de la DET.

5.3.2 Rémunération du maître d'œuvre

L'article 9 de la loi MOP précise que « *la mission de maîtrise d'œuvre donne lieu à une rémunération forfaitaire fixée contractuellement. Le montant de cette rémunération tient compte de l'étendue de la mission, de son degré de complexité et du coût prévisionnel des travaux.* » Les articles 28 à 30 du décret n° 93-1268 développent ces principes.

Cela se traduit par un prix forfaitaire pour chacun des éléments de mission confiés contractuellement au maître d'œuvre (éléments de mission listés à l'article 7 de la loi MOP et missions complémentaires). Ces prix forfaitaires doivent couvrir les moyens mobilisés par la maîtrise d'œuvre pour répondre au contrat ; leurs montants seront donc justifiés par le nombre et la qualification des personnels affectés à chaque mission.

En phase de conception, le maître d'œuvre s'engage sur le coût prévisionnel des travaux, estimé à la fin des études d'avant-projet et arrêté au plus tard avant le lancement de la procédure de passation des contrats de travaux (art. 30 du décret n° 93-1268). Le respect de cet engagement est contrôlé à l'issue de la consultation des entreprises ; en cas de dépassement du seuil de tolérance fixé au contrat, le maître d'ouvrage peut demander au maître d'œuvre d'adapter ses études, sans rémunération supplémentaire.

En phase travaux, le maître d'œuvre s'engage sur le coût qui résulte des contrats de travaux. Le respect de cet engagement est contrôlé après exécution complète des travaux ; en cas de dépassement du seuil de tolérance associé, la rémunération du maître d'œuvre est réduite (dans la limite de 15 %, art. 30 du décret n° 93-1268).

Dans la pratique, et bien que les textes ne l'imposent pas, le montant total de la mission de maîtrise d'œuvre est souvent ramené à un taux global, exprimé en pourcentage du montant de l'estimation technique des travaux.

Le *Guide à l'intention des maîtres d'ouvrage publics pour la négociation des rémunérations de maîtrise d'œuvre* [9], réédité en 2011 par la Mission Interministérielle pour la Qualité des Constructions Publiques (MIQCP), est souvent utilisé comme référence.

4. Article 15 du décret n°93-1268 du 29 novembre 1993.

5. À ce sujet, le CETU vient de publier un document d'information relatif à la mission de maîtrise d'œuvre en travaux souterrains et ses spécificités pour le suivi des travaux de creusement. Voir www.cetu.developpement-durable.gouv.fr.

Rappelons que ce guide propose des taux indicatifs de rémunération d'une mission «témoin» en infrastructure, mission qui comprend les éléments AVP, PRO, ACT, VISA, DET et AOR (parallèle de la mission de base du bâtiment). Il s'agit de taux indicatifs en fonction du montant des travaux, auxquels doit s'appliquer un coefficient de complexité variant de 0,8 à 1,5 pour les ouvrages souterrains.

La MIQCP propose également une répartition indicative des différents éléments de mission au sein de la mission témoin, en précisant que celle-ci peut varier très sensiblement selon la nature et le volume des opérations.

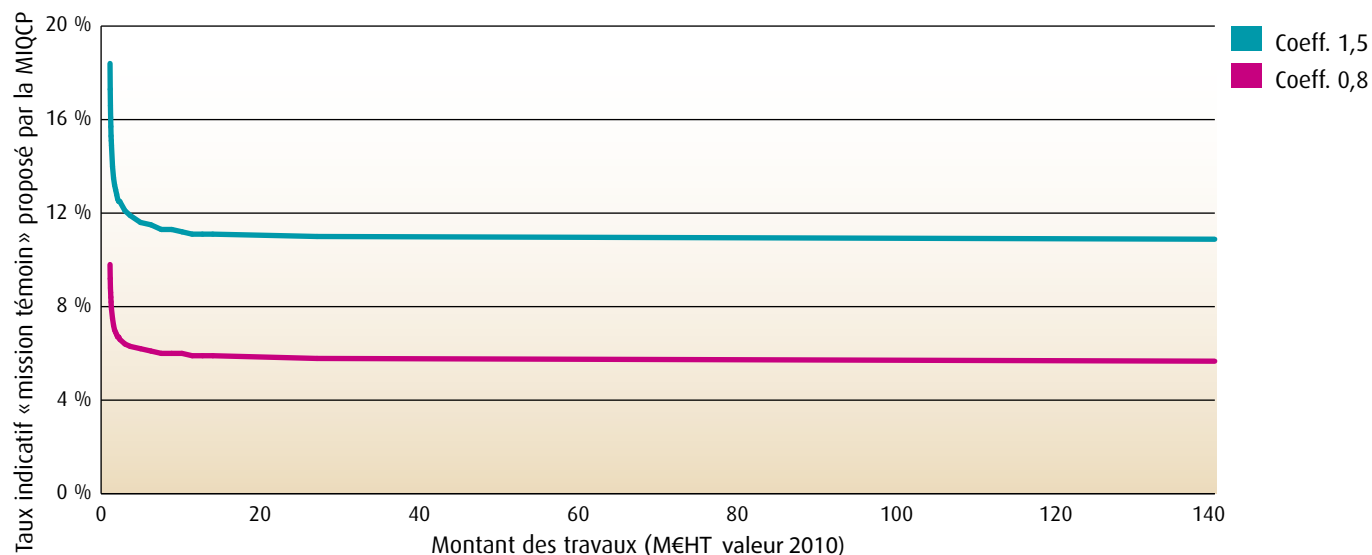


Illustration 5 : Valeurs min et max du taux indicatif proposé par la MIQCP pour une mission témoin complète : AVP, PRO, ACT, VISA, DET et AOR

5.3.3 Retour d'expérience pour la phase travaux

Le retour d'expérience s'appuie sur cinq opérations récentes de tunnels creusés en méthode conventionnelle, d'un montant estimé des travaux compris entre 2 et 140 M€. Ces cinq opérations permettent de dégager quelques tendances, notamment pour la phase travaux.

Le prix des missions en phase travaux (VISA, DET, AOR), ramené au mois de travaux, varie globalement de 20000 à plus de 100000 €/mois. On retrouve ainsi des chantiers qui mobilisent l'équivalent de 2 à 9 personnes à temps plein (toutes catégories de personnels confondues, sur site ou au siège du bureau d'études). Cette très forte variabilité s'explique par l'ampleur et les cadences de réalisation des travaux : les moyens mobilisés seront beaucoup

plus importants pour un chantier urbain à plusieurs attaques, avec un creusement en 3 postes par jour par exemple.

Le prix de ces mêmes missions (VISA, DET, AOR), ramené cette fois au montant de l'estimation technique des travaux, représente 3 à 6 %, et plus de 7 % pour une opération d'un montant de l'ordre de 2 M€. Ces taux restent dans la plage de variation des taux indicatifs proposés par la MIQCP.

En revanche, sur les trois éléments de mission de la phase travaux, la part de la DET (et des missions complémentaires indissociables) représente 74 à 85 % du prix pour quatre des cinq opérations analysées. Cette part est bien supérieure au taux indicatif de 64 % proposé par la MIQCP pour cette mission. Ce retour d'expérience s'explique encore par la spécificité des travaux souterrains, qui nécessitent la présence continue du maître d'œuvre sur chantier et de fortes compétences géotechniques pour le suivi des travaux.

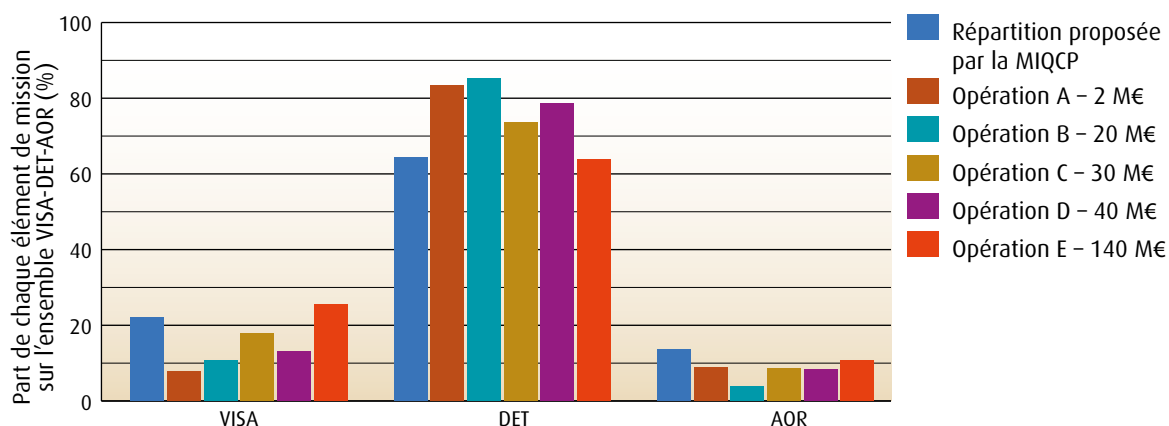


Illustration 6 : Retour d'expérience sur les missions de la phase travaux

5.4 ACQUISITIONS FONCIÈRES

Ce chapitre spécifique au contexte de chaque opération ne fait pas l'objet d'un retour d'expérience dans le cadre de ce document.

Le maître d'ouvrage devra estimer l'ensemble des acquisitions foncières y compris le tréfonds et des frais annexes.

Il s'agit de prendre en compte les frais d'acquisitions (terrains et bâtiments), les frais d'expropriations, d'occupations temporaires, de mesures compensatoires, de remembrement, etc. et l'ensemble des frais annexes topographiques, opérateur foncier, etc.

This image shows a blank sheet of lined paper, likely from a notebook or binder. At the top left, there is a purple tab-like shape containing the word "NOTES" in white capital letters. The main body of the page is white and filled with horizontal blue ruling lines. At the bottom, there is a solid purple horizontal band containing the number "20" in white. The overall design is clean and functional for note-taking.

This image shows a single sheet of white paper with horizontal blue ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

This image shows a full-page view of a notebook or worksheet. At the top left, there is a purple tab-like shape containing the word "NOTES" in white capital letters. The main body of the page is white and filled with horizontal blue ruling lines, spaced evenly apart. At the bottom of the page, there is a solid purple horizontal bar containing the number "22" in white. The overall design is clean and minimalist.



Centre d'Études des Tunnels
25 avenue François Mitterrand
Case n°1
69674 BRON - FRANCE
Tél. 33 (0)4 72 14 34 00
Fax. 33 (0)4 72 14 34 30
cetu@developpement-durable.gouv.fr



FASCICULE 2

Travaux de génie civil – tunnel en section courante



AVERTISSEMENT

Les documents d'information ont pour but de fournir une information sur une technique ou un problème nouveau ou insuffisamment traité par ailleurs. Le lecteur pourra y trouver des repères susceptibles de l'aider dans son activité. Le contenu et les éventuelles conclusions présentés ne doivent pas être considérés comme des recommandations du CETU. Bien que le maximum soit fait pour s'assurer de la fiabilité des sources utilisées, la responsabilité du CETU ou des auteurs du document ne saurait être engagée.

TABLE DES MATIÈRES

1 OBJET DU FASCICULE 2	4
2 RETOUR D'EXPÉRIENCE DU PRIX DE GÉNIE CIVIL	5
2.1 Tunnels routiers et ferroviaires	5
2.2 Tunnels de métros urbains	7
3 PRIX DU GÉNIE CIVIL DES OUVRAGES SOUTERRAINS EN SECTION COURANTE	9
3.1 Incidence du niveau de difficulté géologique, géotechnique et hydrogéologique	9
3.2 Décomposition d'un tunnel en tronçons homogènes : les profils types	11
3.3 Tunnels creusés en méthode conventionnelle	13
3.3.1 Définition du creusement-soutènement : les classes de soutènement	13
3.3.2 Prix des classes de soutènement	16
3.3.3 Conditions particulières de creusement-soutènement	20
3.3.4 Incidence des cadences sur les prix	22
3.3.5 Prix du génie civil en section courante en fonction des profils types utilisés	23
3.4. Tunnels creusés au tunnelier	27
3.4.1 Rappel sur la technologie du creusement mécanisé	27
3.4.2 Prix de creusement-soutènement-revêtement par type de tunnelier	27
4 PRIX DU GÉNIE CIVIL DES AUTRES OUVRAGES SOUTERRAINS	37
4.1 Structures internes en section courante	37
4.2 Galeries de sécurité et issues de secours en liaison directe avec l'extérieur	37
4.3 Ouvrages singuliers liés à l'exploitation et à la sécurité	38
5 ANNEXES	39
5.1 Représentation statistique des données	39
5.2 Liste des ouvrages composant le retour d'expérience	39
5.3 Excavation en méthode conventionnelle	40
5.3.1 Classes de soutènement	40
5.3.2 Données pour chaque géométrie D8 à D12 : cf. cahier séparé	42

OBJET DU FASCICULE 2

Le fascicule 2 s'inscrit dans une série de fascicules constituant le document d'information sur le prix des tunnels :

- fascicule 0 : périmètre du document, données d'entrée pour l'estimation
- fascicule 1 : provisions et autres postes de l'enveloppe prévisionnelle plafond
- **fascicule 2 : travaux de génie civil – tunnel en section courante**
- fascicule 3 : travaux de génie civil – ouvrages émergents
- fascicule 4 : travaux d'équipements de sécurité et d'exploitation – ventilation et métallerie

Le présent fascicule traite du prix des ouvrages construits en souterrain. Pour mémoire, il ne traite pas des tunnels immergés, des tranchées couvertes et des stations souterraines qui sont des ouvrages faisant appel à d'autres techniques de construction. Il ne traite pas non plus du prix des ouvrages construits à l'air libre (voûtes remblayées ou casquettes, locaux techniques et stations de ventilation, gares et puits, etc.).

Les prix fournis dans ce fascicule correspondent aux postes suivants de l'estimation technique des travaux : génie civil des ouvrages souterrains en section courante, génie civil des ouvrages souterrains liés à l'exploitation et la sécurité et sujétions spéciales de génie civil, tels qu'ils figurent dans le cadre général de présentation d'une estimation (cf. fascicule 0 – §1.5).

Ils n'intègrent ni la somme à valoir (SAV) ni la provision pour risques identifiés (PRI) qui sont présentées dans le fascicule 1.

Estimation prévisionnelle de l'opération	Coût prévisionnel des travaux (CPT)	UNE ESTIMATION TECHNIQUE DES TRAVAUX (ETT)	cf. Fascicules 2,3,4
		une estimation d'une somme à valoir (SAV)	cf. Fascicule 1
		une estimation d'une provision pour risques techniques identifiés (PRI)	
	Autres postes	des études et des reconnaissances,	
		de la maîtrise d'œuvre et de la maîtrise d'ouvrage,	
		de la libération des emprises et des acquisitions foncières,	
		de la provision pour risques non techniques du maître d'ouvrage,	
		de la provision pour imprévus (ou risques non identifiés PRNI).	

Tableau 1 : Décomposition de l'estimation prévisionnelle de l'opération

Le prix de génie civil des ouvrages souterrains dépend principalement :

- des fonctionnalités attendues pour l'ouvrage : elles déterminent la section transversale de l'ouvrage, elles sont formalisées dans le programme ;
- des exigences liées à l'exploitation et la sécurité : elles conduisent aux choix fondamentaux pour les aménagements, pour l'évacuation et la protection des usagers et l'accès des secours et aux choix des équipements principaux en section courante dont le système de ventilation ;
- du contexte géologique, géotechnique et hydrogéologique : il conduit au choix d'une méthode de creusement mécanisée ou conventionnelle et aux cadences de creusement possibles ;
- du niveau de sensibilité du site et des avoisinants : il impacte directement les conditions de creusement ;

- des contraintes d'organisation des travaux : elles conduisent à des phasages de creusement et de construction du génie civil qui conditionnent les délais ;
- des contraintes environnementales : elles conduisent à des organisations de chantier plus ou moins coûteuses.

L'estimation est menée avec un niveau de précision adapté aux données disponibles, au niveau de maturité du projet et aux exigences de fiabilité éventuellement imposées.

Ce fascicule comprend :

- la présentation d'un retour d'expérience du prix des ouvrages existants à partir des données recueillies par le CETU ;
- la présentation des prix reconstitués à partir des outils d'évaluation des prix et délais développés par le CETU.

RETOUR D'EXPÉRIENCE DU PRIX DE GÉNIE CIVIL

2.1 TUNNELS ROUTIERS ET FERROVIAIRES

Les prix moyens présentés résultent des montants des marchés initiaux¹ de génie civil de construction de tunnels, auxquels est appliquée une formule d'actualisation selon les index TP05a ou TP05b pour les ramener tous à la même date de valeur, à savoir janvier 2015. Les montants de règlement de ces marchés, qui dépendent des prix de règlement mais aussi des quantités effectivement réalisées et prises en compte dans le décompte général et définitif, ne sont pas toujours disponibles. Il n'est de toute façon pas souhaitable de mélanger des montants initiaux et des montants de règlement dans le retour d'expérience.

La base de données utilisée ici comporte des tunnels creusés en méthode conventionnelle et au tunnelier en France. Elle est établie uniquement sur des ouvrages mis en service depuis l'année 2000. Cette base de données comporte 26 tunnels routiers, 8 tunnels ferroviaires et 4 galeries de sécurité de tunnels routiers (cf. §5.2).

Le retour d'expérience est présenté selon trois indicateurs de référence :

- le prix global de génie civil des ouvrages construits en souterrain ;
- le prix global de génie civil des ouvrages construits en souterrain ramené au km de tunnel excavé ;
- le prix global de génie civil des ouvrages construits en souterrain ramené au volume total excavé.

Les résultats sont présentés à la fois sous la forme d'histogrammes représentant la distribution des valeurs de la base de données mais aussi sous la forme d'une boîte de Tukey (voir annexe, §5.1).

Les graphes suivants ne représentent que les tunnels dont la longueur creusée est inférieure à 3000 m.

Prix global de génie civil des ouvrages construits en souterrain

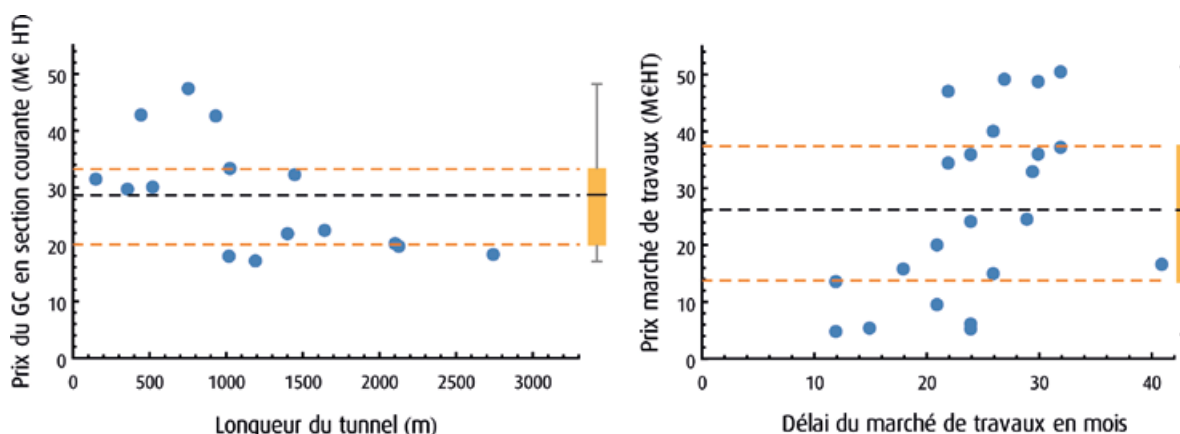


Illustration 1 : Prix global de génie civil des ouvrages construits en souterrain issus des marchés de travaux

1. Le prix initial est le prix qui résulte de la mise en concurrence ou de la négociation, à la différence du prix de règlement qui est le prix effectivement payé après application des clauses de variation des prix prévues au contrat.

Prix au km

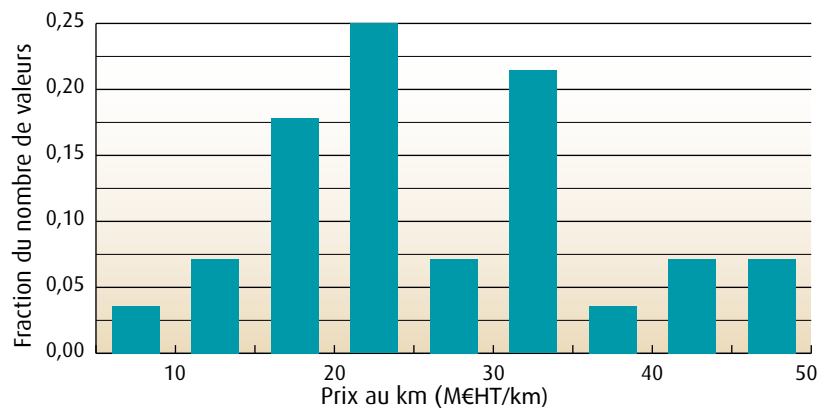


Illustration 2 : Histogramme de la répartition du prix global de génie civil des ouvrages construits en souterrain ramené au kilomètre de tunnel excavé

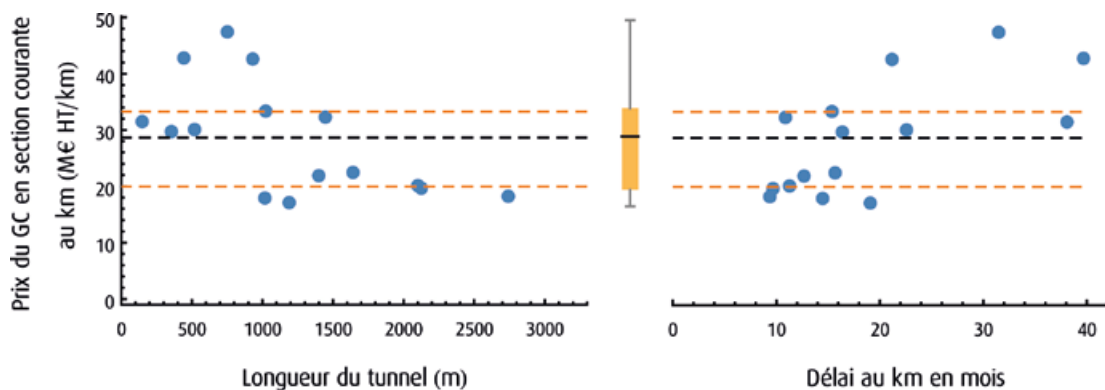


Illustration 3 : Variabilité de la répartition du prix global de génie civil des ouvrages construits en souterrain ramené au kilomètre de tunnel excavé

La variabilité des prix ramenés au kilomètre est à nuancer par rapport aux différents types d'ouvrages composant ce retour d'expérience qui est composé aussi bien d'ouvrages de section

importante (ouvrages routiers à 3 voies) que d'ouvrages de section plus réduite.

Prix au mètre cube excavé

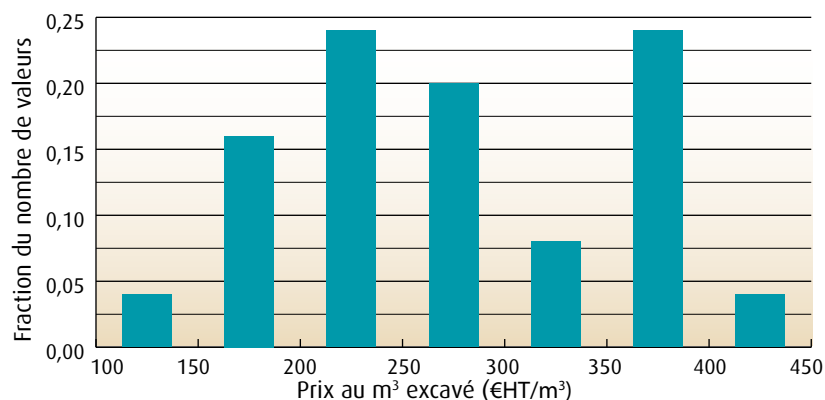


Illustration 4 : Histogramme de la répartition du prix global de génie civil des ouvrages construits en souterrain ramené au volume total excavé

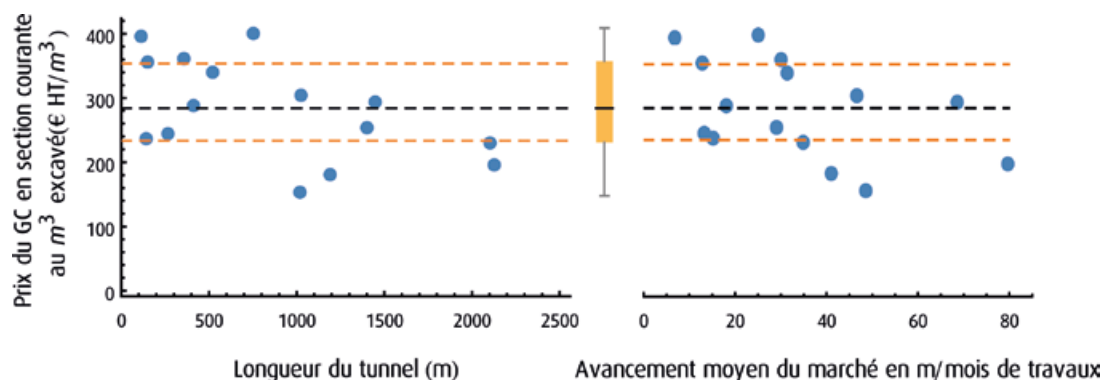


Illustration 5 : Variabilité de la répartition du prix global de génie civil des ouvrages construits en souterrain ramené au volume total excavé

Le prix au mètre cube excavé est un indicateur couramment utilisé dans le milieu des travaux souterrains. Il permet notamment de s'affranchir des différences de géométries entre les ouvrages comparés. On constate cependant une variabilité

importante de cet indicateur, grossièrement suivant une échelle de 1 à 2. Cette variabilité s'explique d'une part par la disparité du contexte géologique et d'autre part par la sensibilité du contexte de réalisation des travaux.

2.2 TUNNELS DE MÉTROS URBAINS

Pour ce qui concerne le cas particulier des tunnels de métros urbains, aucun recueil spécifique de prix n'a été réalisé dans le cadre de l'élaboration de ce document. Ce document se contente d'actualiser et de rappeler les conclusions de l'analyse des coûts des tunnels de métro français proposé en 1994 dans le cadre d'un travail de recherche piloté par l'AFTES (Étude des coûts des tunnels de métro français). Cette étude statistique portait sur 31 opérations réalisées entre les années 1975 et 1990. Elle est basée sur un travail de thèse (Chi Zhang, ENPC, 1994) et a abouti à la publication de la recommandation du groupe de travail n° 15 de l'AFTES (Etude des coûts des infrastructures de transport ferroviaire en zones urbaines et suburbaines). Les données sont reprises ci-dessous et ont été simplement actualisées aux conditions économiques de janvier 2015.

Le « gros œuvre »² représente entre 50 et 70 % du coût global, tandis que le poste « équipements » ne représente que 15 à 20 % environ. En fonction des cas, le poste « traitement de terrain » peut représenter plus de 20 % du coût de l'ouvrage, ce qui est caractéristique des ouvrages souterrains en site urbain sensible.

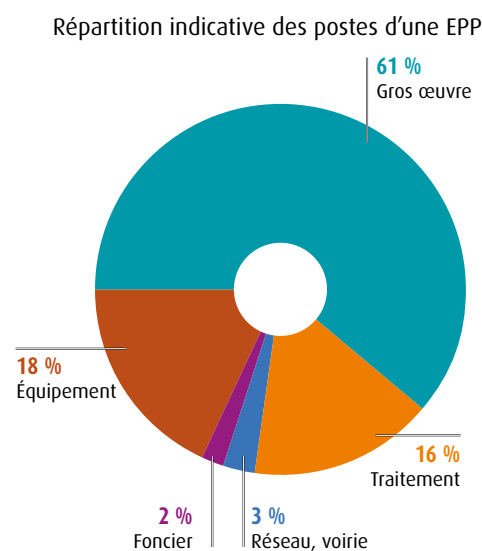


Illustration 6 : Répartition indicative des différents postes pour les tunnels de métros urbains

2. Les données ne concernent que les « ouvrages en ligne », c'est-à-dire les tronçons de voie entre stations. Le prix des stations n'est pas comptabilisé.

Prix au kilomètre

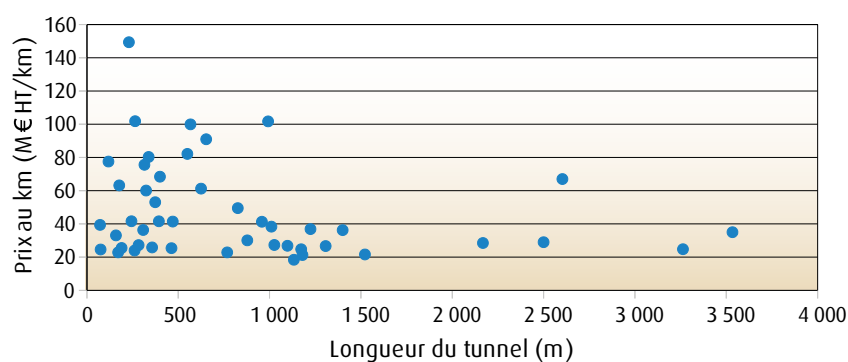


Illustration 7 : Variabilité de la répartition du prix de génie civil des métros urbains ramené au kilomètre de tunnel excavé – Prix du gros œuvre de génie civil seul hors traitement de terrain

Prix au mètre cube excavé

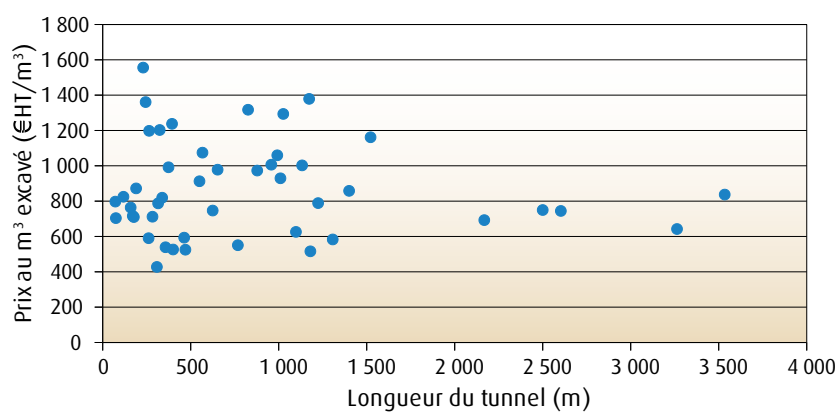


Illustration 8 : Variabilité de la répartition du prix de génie civil des métros urbains ramené au volume total excavé – Prix du gros œuvre de génie civil seul hors traitement de terrain

PRIX DU GÉNIE CIVIL DES OUVRAGES SOUTERRAINS EN SECTION COURANTE

3.1

INCIDENCE DU NIVEAU DE DIFFICULTÉ GÉOLOGIQUE, GÉOTECHNIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE

En méthode conventionnelle, différentes classes de soutènement (cf. §3.3.1) sont nécessaires pour traverser les terrains en place, en fonction de leur comportement attendu à l'excavation. Chaque tunnel peut être représenté par une succession de tronçons homogènes du point de vue des soutènements.

La répartition des classes de soutènement est dictée par les conditions géologiques. L'analyse d'ouvrages déjà réalisés permet de retenir les répartitions indicatives suivantes de classes de soutènement. Elles couvrent la plupart des tunnels creusés en méthode conventionnelle. On trouve selon un niveau de difficulté croissant :

- répartition A : classes de soutènement essentiellement à base de béton projeté et boulons (90 %) ;
- répartition B : classes de soutènement majoritairement à base de béton projeté et boulons (75 %) et partiellement de cintres ;

- répartition C : classes de soutènement à base de béton projeté et boulons (60 %) et de cintres, y compris localement avec des pré-soutènements en voûte et au front de taille ;
- répartition D : classes de soutènement essentiellement à base de cintres (80 %), y compris avec des pré-soutènements (45 %) et localement une section fermée par un radier contre-voûté ;
- répartition E³ : classes de soutènement à base de cintres (sur la totalité du linéaire) y compris avec des pré-soutènements, essentiellement en section fermée par un radier contre-voûté (75 % du linéaire).

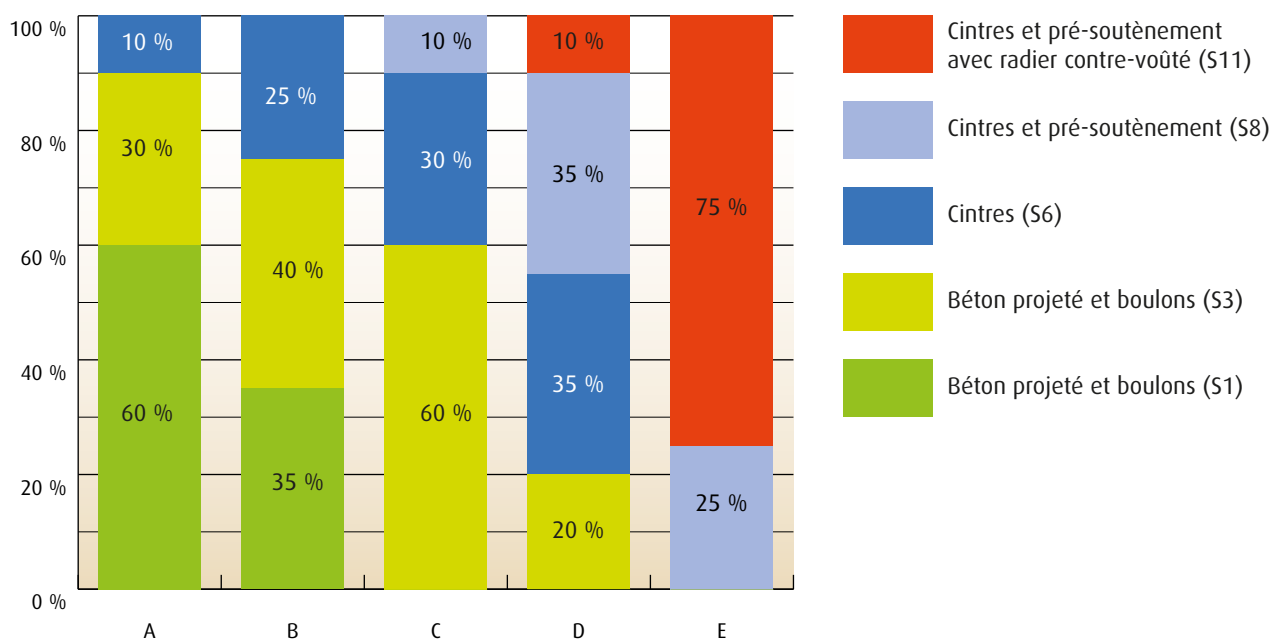


Illustration 9 : Répartitions représentatives des classes de soutènement (cf. §3.3.1)

3. La dernière répartition (E) représente les tunnels très difficiles, creusés en méthode conventionnelle en milieu urbain à faible profondeur ; ce type d'ouvrages est peu répandu en France.

Des conditions typiques de réalisation pour chacune des répartitions proposées ci-avant sont indiquées ci-dessous. Pour chaque répartition, il est proposé une qualification indicative du contexte géologique correspondant.

Répartition A

Tunnel au rocher de bonne qualité avec structure géologique simple dans des matériaux de bonne résistance mécanique. Peu ou pas de contraintes géotechniques. Pas de contraintes d'environnement.

Les phénomènes de déformations sont négligeables. Les instabilités observées se ramènent principalement à des chutes localisées de blocs isolés, sous l'effet de leur poids propre.

Les moyens mobilisés sont faibles, la stabilité lors du creusement ne cause pas de problèmes particuliers.

→ **correspond à un contexte géologique « simple ».**

Répartition B

Tunnel au rocher de bonne qualité réalisable essentiellement à l'explosif - couverture de quelques dizaines de mètres. Localement des zones instables sont rencontrées (zones de failles ou matériaux déformables).

Des instabilités globales peuvent être observées ponctuellement où le seul effet de voûte ne suffit plus à stabiliser l'excavation. Ponctuellement, il peut s'avérer nécessaire de renforcer le front de taille.

Les moyens mobilisés sont localement importants, ce qui justifie l'utilisation partielle de cintres.

→ **correspond à un contexte géologique « simple mais localement difficile ».**

Répartition C

Tunnel au rocher dans des matériaux de résistance mécanique moyenne à faible.

Les phénomènes de déformations peuvent être conséquents et rapides en particulier pour la stabilité du front de taille, pouvant rendre nécessaires des mesures spécifiques de pré-renforcement sur des longueurs significatives.

Les moyens mobilisés sont importants sur une partie du linéaire de l'ouvrage.

→ **correspond à un contexte géologique de « difficulté moyenne mais localement difficile à très difficile ».**

Répartition D

Tunnel dans des matériaux de mauvaise qualité (sol ou rocher très altéré) ; structure géologique complexe ; environnement sensible (risque de tassements) ; tunnel profond avec rencontre d'accidents géologiques ou de roches déformables ; présence d'eau.

Les déformations sont importantes. La stabilité de l'excavation est faible et induit des tassements de surface conséquents qui peuvent rendre le creusement très délicat. Afin de limiter ces deux effets, des soutènements lourds sont conjugués avec des pré-soutènements sur une grande partie du linéaire.

Les moyens mobilisés sont très conséquents sur tout le linéaire de l'ouvrage.

→ **correspond à un contexte géologique « difficile à très difficile ».**

Répartition E

Tunnel dans des matériaux de mauvaise qualité (sol ou rocher très altéré) ; structure géologique complexe ; environnement sensible (risque de tassements) ; creusement entièrement sous nappe.

Les déformations sont importantes. La stabilité de l'excavation est faible et induit des tassements de surface conséquents qui peuvent rendre le creusement très délicat. Afin de limiter ces deux effets, des soutènements lourds sont conjugués avec des pré-soutènements sur la totalité du linéaire.

Le comportement du terrain induit des efforts à long terme conséquents qui imposent un radier contre-voûté sur l'ensemble du linéaire.

Les moyens mobilisés sont très conséquents sur tout le linéaire de l'ouvrage.

→ **correspond à un contexte géologique « très difficile avec forte sensibilité des avoisinants ».**

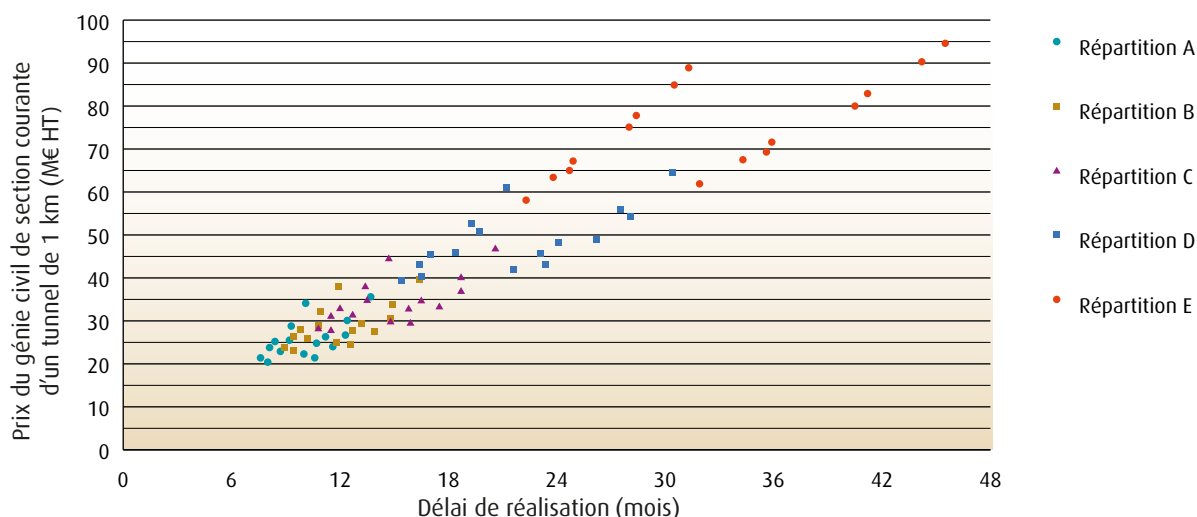


Illustration 10 : Prix du génie civil de section courante d'un tunnel de 1000 m, toutes géométries confondues, en fonction du délai de réalisation

Une étude paramétrique a été réalisée à l'aide des outils développés par le CETU. L'illustration 10 montre la dispersion des prix moyens ramenés au km de tunnel pour l'ensemble du génie civil en section courante (= creusement-soutènement + étanchéité-revêtement + plate-forme-réseaux + prestations générales) selon les répartitions proposées ci-avant, pour des diamètres de tunnels variant de 8 à 12 m.

Pour des sections allant de 8 à 12 m de diamètre intrados, le prix varie de 20 à 90 M€ HT (soit un rapport de 1 à 4,5) et le

délai varie de 8 à 45 mois (soit un rapport de 1 à 5,5), pour des terrains traversés allant du niveau de difficulté A (les meilleurs terrains) au niveau de difficulté E (les terrains les plus difficiles, hors conditions spéciales nécessitant un traitement de sol).

Cette dispersion est bien représentative de l'incidence des conditions géologiques, géotechniques et hydrogéologiques sur le prix des ouvrages souterrains.

3.2 DÉCOMPOSITION D'UN TUNNEL EN TRONÇONS HOMOGÈNES : LES PROFILS TYPES

Comme défini par le fascicule 69 du CCTG «travaux en souterrain» [10], la section courante d'un tunnel peut être représentée par la juxtaposition de profils types.

«Les profils types sont des coupes types d'un ouvrage souterrain linéaire qui s'appliquent à des parties où les caractéristiques du terrain sont sensiblement uniformes. Les profils types fixent les caractéristiques géométriques de l'excavation et de son revêtement, ainsi que les dispositions de principe du soutènement.»

Un profil type est donc défini comme l'ensemble des procédés de construction mis en œuvre sur une longueur donnée (appelée pas) pour une section d'excavation donnée. Il constitue une maille élémentaire dont l'assemblage forme le tunnel.

L'estimation technique des travaux de génie civil pour la section courante est la somme des estimations des profils types. Du fait de leur différence fondamentale, le creusement en méthode conventionnelle et le creusement au tunnelier font l'objet de deux méthodes d'évaluation des prix distinctes. Il est courant que les ouvrages creusés au tunnelier soient constitués d'un même profil type sur tout leur linéaire.

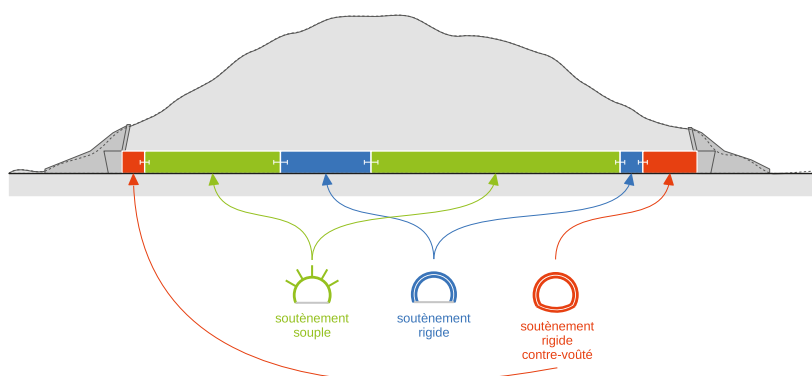


Illustration 11 : Représentation schématique de la répartition des profils types sur le profil en long

En méthode conventionnelle, il convient de distinguer dans l'évaluation des prix et des délais :

1. creusement-soutènement : on parle dans la suite de classes de soutènement, notion qui regroupe l'excavation, le drainage et l'exhaure à l'avancement, les soutènements en voûte, au front et en radier éventuellement, les pré-soutènements en voûte et au front le cas échéant.

Les prix de creusement-soutènement proposés dans ce document ne comprennent pas l'évacuation des matériaux excavés au-delà d'un périmètre de proximité des têtes de tunnel (environ 1 km) ;

2. étanchéité-revêtement : regroupe le drainage définitif, l'étanchéité en voûte et radier éventuellement, le revêtement en voûte et radier éventuellement ;

3. plate-forme-réseaux : regroupe tous les réseaux (assainissement, réseau de lutte contre l'incendie, réseaux secs, etc.), les matériaux constitutifs des trottoirs et de la structure de chaussée ou de la plate-forme ferroviaire, généralement jusqu'au radier béton habituellement compris dans le lot de génie civil.

Le prix des couches de base et de roulement des chaussées et des voies ferroviaires (ballast, traverses et rails) ne sont pas compris dans les prix plate-forme-réseaux donnés dans ce document. Ces travaux sont généralement réalisés dans le cadre de travaux qui s'étendent bien au-delà du tunnel.

Ces trois postes correspondent à trois phases de construction du tunnel, souvent successives mais quelquefois partiellement simultanées, et font appel à des métiers différents.

Le poids relatif de chacun de ces postes est le suivant (cf. §3.3.5) :

- le poste creusement-soutènement est particulièrement sensible au comportement des terrains excavés, c'est essentiellement ce poste qui justifie la grande dispersion des prix. Il représente environ de 50 à 80 % du prix du profil type. Les cadences sont également très variables ;
- le poste étanchéité-revêtement est partiellement impacté par le comportement des terrains excavés, essentiellement pour les niveaux de difficultés les plus élevés. Il représente entre 20 % et 40 % environ du prix total du profil type ;
- le poste plate-forme-réseaux représente entre 5 % et 15 % du prix total du profil type.

En méthode mécanisée, la plupart du temps la cinématique de construction comprend le creusement et la pose des voussoirs de revêtement juste derrière. On ne distingue alors pas le poste creusement-soutènement du poste étanchéité-revêtement.

Lorsque le tunnelier ne pose pas de voussoirs, la séparation des postes creusement-soutènement et étanchéité-revêtement est également retenue.

En méthode conventionnelle comme mécanisée, il est nécessaire pour certains ouvrages de construire des structures de second œuvre à l'intérieur du revêtement (dalle et cloisons pour les gaines de ventilation, dalle de support de chaussée, etc.). L'évaluation du prix de ces structures est présentée séparément (cf. §4.1).

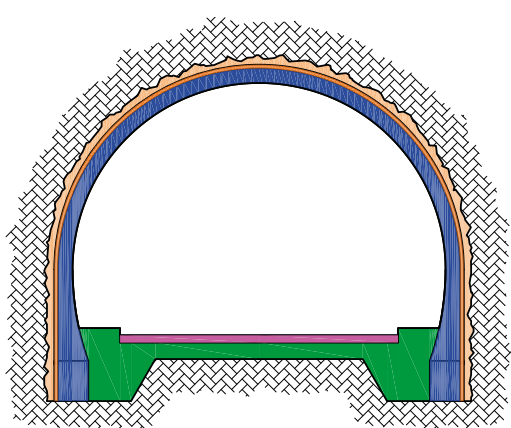
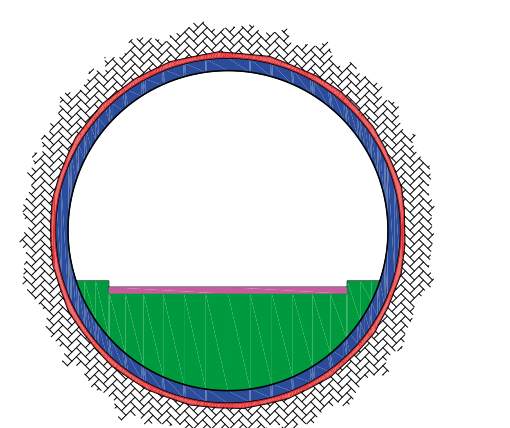







Creusement en méthode conventionnelle			Creusement au tunnelier avec voussoirs		
					
Postes considérés pour l'évaluation du prix					
Profil type	Creusement-soutènement		Creusement-soutènement-étanchéité-revêtement		
	Étanchéité-revêtement				
	Plate-forme-réseaux		Plate-forme-réseaux		
	Chaussée ou voie ferroviaire		Chaussée ou voie ferroviaire		

Tableau 2 : Décomposition des profils types

3.3 TUNNELS CREUSÉS EN MÉTHODE CONVENTIONNELLE

3.3.1 Définition du creusement-soutènement : les classes de soutènement

Les classes de soutènement ne vont concerner que la partie « creusement-soutènement » du profil type.

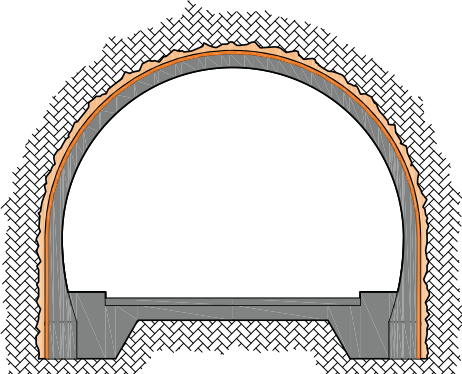
Postes considérés pour l'évaluation du prix			Creusement en méthode conventionnelle
Profil type		Prix des classes de soutènement	
	Creusement-soutènement		
	Étanchéité-revêtement	Non pris en compte ici	
	Plate-forme-réseaux	Non pris en compte ici	
Chaussée ou voie ferroviaire		Non estimé	

Tableau 3 : Décomposition des profils types - Soutènement

La définition des classes de soutènement utilisées d'un chantier à l'autre peut varier, il n'existe pas de norme pour leur définition. Chaque concepteur de tunnel a ses propres règles et habitudes.

Toutefois, le retour d'expérience permet de retenir une liste de 11 classes de soutènement qui couvre la quasi-totalité des situations usuellement rencontrées.

Deux catégories de classes de soutènement sont retenues :

- les soutènements souples associant des éléments légers de type boulons ancrés et béton projeté d'épaisseur limitée ;
- les soutènements rigides associant des cintres métalliques lourds, du béton projeté d'épaisseur plus importante, et éventuellement un renforcement à l'avant du front de taille et des pré-soutènements.

Classes de soutènement		Soutènements souples				Soutènements rigides						
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11
Pas de creusement (m)		4,00	3,00	2,50	2,00	2,00	1,50	1,50	1,25	1,50	1,25	1,00
Soutènement de la voûte	Boulons	X	X	X	X							
	Béton projeté	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Cintres					X	X	X	X	X	X	X
Renforcement du front de taille	Béton projeté			X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Boulons						X	X	X	X	X	X
Pré-soutènement	Enfilage							X			X	
	Voûte parapluie								X			X
Soutènement en contre-voûte	Béton									X	X	X
	Cintres									X	X	X

Tableau 4 : Principales caractéristiques des classes de soutènement retenues (notées S1 à S11)

Ces classes de soutènement sont identiques en tunnel routier, ferroviaire ou de TCSP.

Pour un tunnel routier (voir illustration 12, à gauche), la section excavée est le plus souvent en « fer à cheval », sans contre-voûte. Pour un tunnel ferroviaire (voir illustration 12, à droite), il est d'usage de mettre systématiquement en place une contre-voûte (ou radier) non structurale sur laquelle reposent la plate-forme et les voies ferrées.

Les sections excavées sont identiques pour ce qui concerne la partie située au-dessus de l'axe de référence des voies. Pour les tunnels ferroviaires, elles sont légèrement plus importantes sous cet axe.

Comme présenté dans le fascicule 0 (cf. §2.2), ce document présente des prix d'ouvrages pour cinq sections transversales différentes (D8 à D12 soit de 8,20 à 12,20 mètres de diamètre intrados).

Seules les données correspondantes à la section D11 pour un tunnel routier et pour un tunnel ferroviaire sont présentées dans le corps du texte. Les données correspondantes aux sections D8, D9, D10 et D12 sont présentées dans les annexes.

Une présentation détaillée de la composition des classes de soutènement 1 à 11 est donnée ci-après pour la géométrie D11.

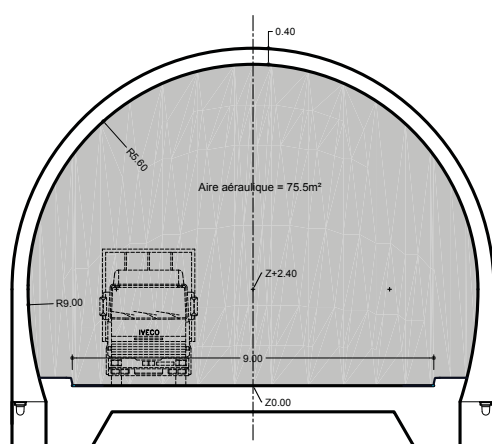
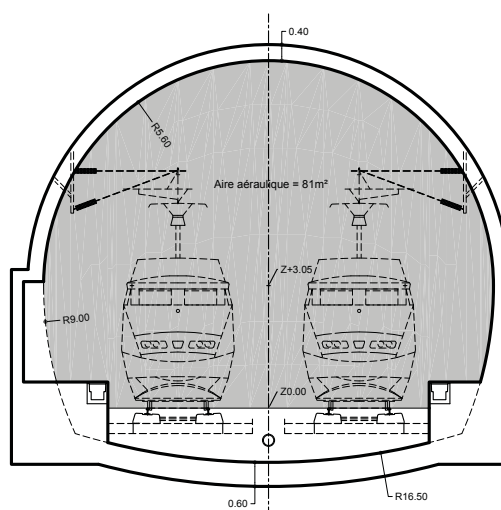


Illustration 12 : Profil routier D11



Profil ferroviaire D11

Tableau 5 : Principales caractéristiques des classes de soutènements retenues (notées S1 à S11) pour les géométries D11 routier et D11 ferroviaire

Géométrie D11 – Routier / Ferroviaire	S1		S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11
	Sans contre-voûte / Contre-voûte non entrée		Bouillons		Cintres		Cintres		Contre-voûte entrée		Cintres	
	Enfilage		Voûte parapluie		Enfilage		Voûte parapluie		Enfilage		Voûte parapluie	
Rayon intrados : 5,6 m												
Pas de creusement (longueur de référence)	4,00 m		2,00 m		1,50 m		1,25 m		1,50 m		1,00 m	
Variations possibles de la longueur du pas	± 0,50 m		± 0,50 m		± 0,50 m		± 0,50 m		± 0,25 m		=	
Section excavée (cf. schéma)												
Section min. (ligne A + 0,15 m)	102,9 / 124,1 m²		104,2 / 125,7 m²		107 / 129,4 m²		107,8 / 130,4 m²		107,8 / 130,4 m²		140,8 m²	
Section max. (ligne A + 0,15 m)												
Rayon de la voûte (ligne A)	6,1 m		6,2 m		6,2 m		6,3 m		6,3 m		6,4 m	
Périmètre de la voûte (voûte + piédroits ; ligne S)	24,9 / 25,1 m		24,9 / 25,1 m		24,9 / 25,1 m		24,4 / 25,1 m		24,4 / 25,1 m		24 / 25,4 m	
Largeur en base de piédroits (valeur approximative ls ou la)	12,1 m		12,3 m		12,4 m		12,5 m		12,5 m		17,3 / 15,9 m	
Soutènements												
En voûte												
Épaisseur de béton projeté	0,06 m		0,11 m		0,22 m		0,25 m¹		0,25 m¹		0,25 m¹	
Nombre de bouillons par pas	10 u/pas		17 u/pas		20 u/pas							
Nombre de bouillons par mètre	2,5 u/m		5,7 u/m		8,0 u/m							
Longueur des bouillons	3,00 m		3,00 m		3,00 m							
Type de cintre (1 u/pas)												
En contre-voûte												
Épaisseur de béton projeté	- / 0,05 m		- / 0,05 m		- / 0,05 m		- / 0,05 m		- / 0,05 m			
Type de cintre (1 u/pas)												
Au front												
Épaisseur de béton projeté	- / 0,05 m		0,05 m		0,10 m		0,10 m		0,10 m		0,10 m	
Pré-soutènements												
Bouillons de front												
Nombre de bouillons												
Longueur des bouillons												
Mis en œuvre tous les ...												
Mis en œuvre tous les ...												
Nombre total des bouillons visibles au front												
Répartition des bouillons au front (sur S _{mur} hors contre-voûte)												
Posés en ...												
Enfilage												
Masse linéique des barres												
Nombre de barres												
Longueur des barres												
Mises en œuvre tous les ...												
Mises en œuvre tous les ...												
Entraxe approximatif (sur 120° ; ligne A)												
Voûte parapluie												
Masse linéique des tubes												
Nombre de tubes												
Longueur des tubes												
Mis en œuvre tous les ...												
Mis en œuvre tous les ...												
Entraxe approximatif (sur 180° ; ligne A min)												
Surexcavation max théorique en voûte (α = 6°)												

- Variations de la longueur de pas autour de la longueur de référence :
Longueur de pas constante pour S7, S8, S10 et S11.
Pour les autres profils (S1 à S6 et S9) :
± 0,50 m pour Lg référence ≥ 2 m
± 0,25 m pour 1 m < Lg référence < 2 m
± 0 m pour Lg référence ≤ 1 m
- 1. – Les hors-profil sont pris en compte via un décalage de 0,15 m du gabarit d'excavation ou « ligne A » (cf. fascicule 69 du CCTG – art. II.1.1). Les 0,15 m au-delà de la ligne A sont comblés soit par du béton de revêtement (cas des profils boulonnés), soit par du béton projeté (cas des profils cintrés).
Pour les profils avec voûte parapluie (S8 et S11), il s'agit de valeurs moyennes.
- 2. – Pour les soutènements souples, les bouillons en voûte sont des bouillons à ancrage réparti, non scellés.
Pour les soutènements rigides, on considère 1 cintre par pas. L'épaisseur de béton projeté est égale à 0,05 m (1^{re} passe) + épaisseur du cintre (2^e passe : remplissage).
- 3. – Il s'agit de bouillons de front « longs », en fibre de verre.
- 4. – Il s'agit d'enfilage « court », mis en œuvre à chaque pas de creusement, de type HA32 (6,3 kg/m).
- 5. – Les tubes de voûte parapluie sont de type Ø109/127 (26,2 kg/m de tube). Ils sont mis en œuvre avec une inclinaison de 6°.

Masse linéique des profilés métalliques
HEB 180 : 51,2 kg/m – HEB 200 : 61,3 kg/m

3.3.2 Prix des classes de soutènement

3.3.2.a Analyse détaillée des classes de soutènement

Les graphiques 13 à 16 présentent les prix des 11 classes de soutènement (S1 à S11) croisés avec les cadences de creusement.

Les prix indiqués comprennent seulement les travaux de creusement-soutènement et pré-soutènement (cf. §3.3.1).

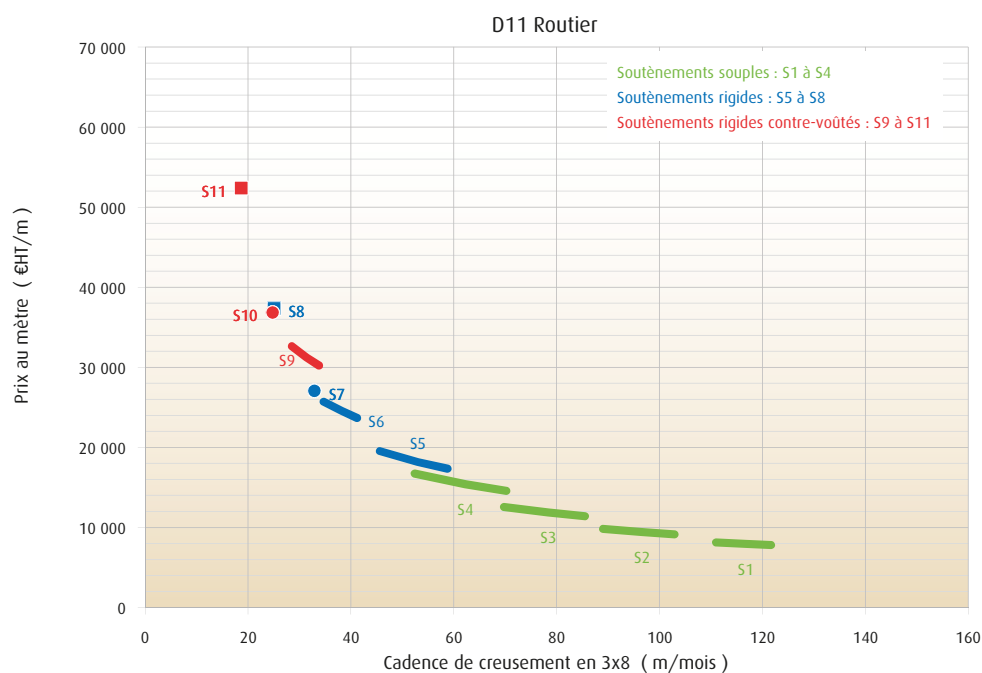


Illustration 13 : Prix des classes de soutènement au mètre en fonction des cadences de creusement – (creusement en 3 postes par jour) - Géométrie D11 routier (voir illustration 12)

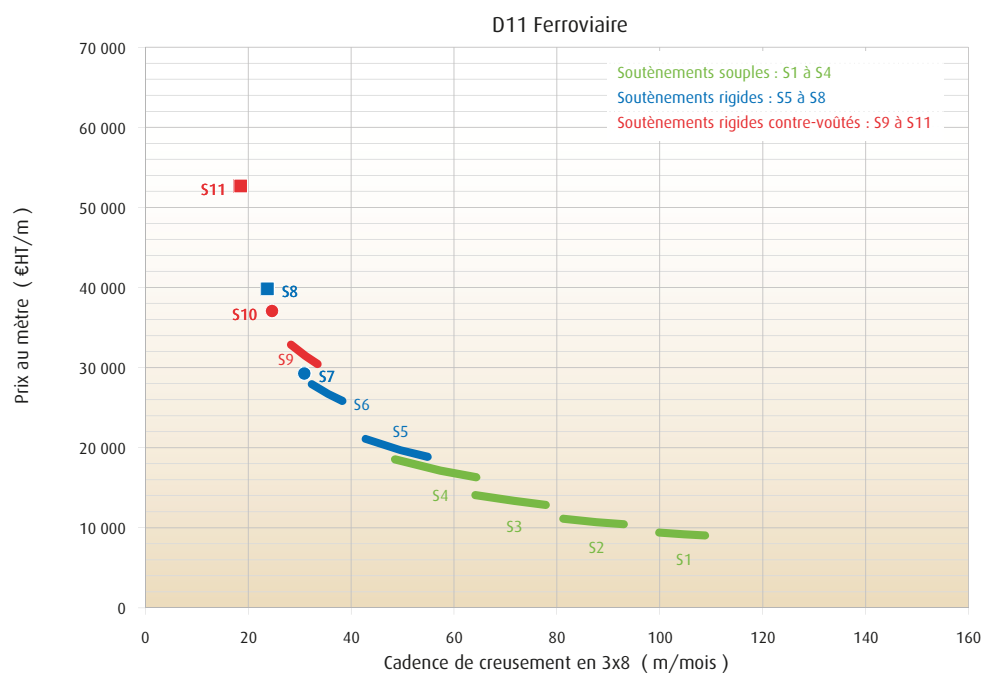


Illustration 14 : Prix des classes de soutènement au mètre en fonction des cadences de creusement – (creusement en 3 postes par jour) - Géométrie D11 ferroviaire (voir illustration 12)

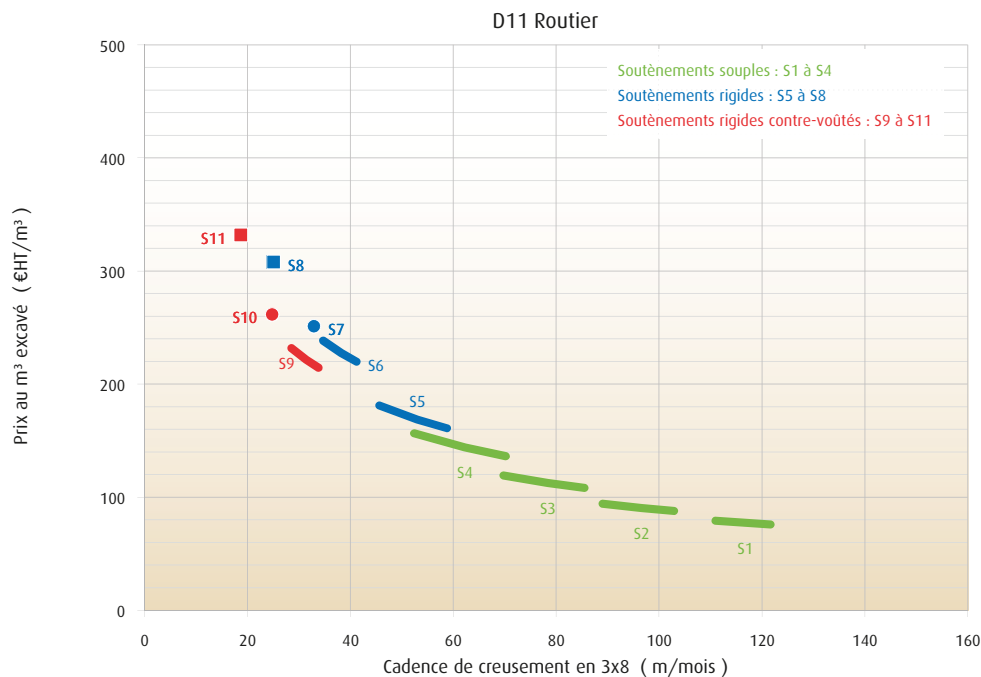


Illustration 15 : Prix des classes de soutènement au mètre cube excavé en fonction des cadences de creusement – (creusement en 3 postes par jour) - Géométrie D11 routier (voir illustration 12)

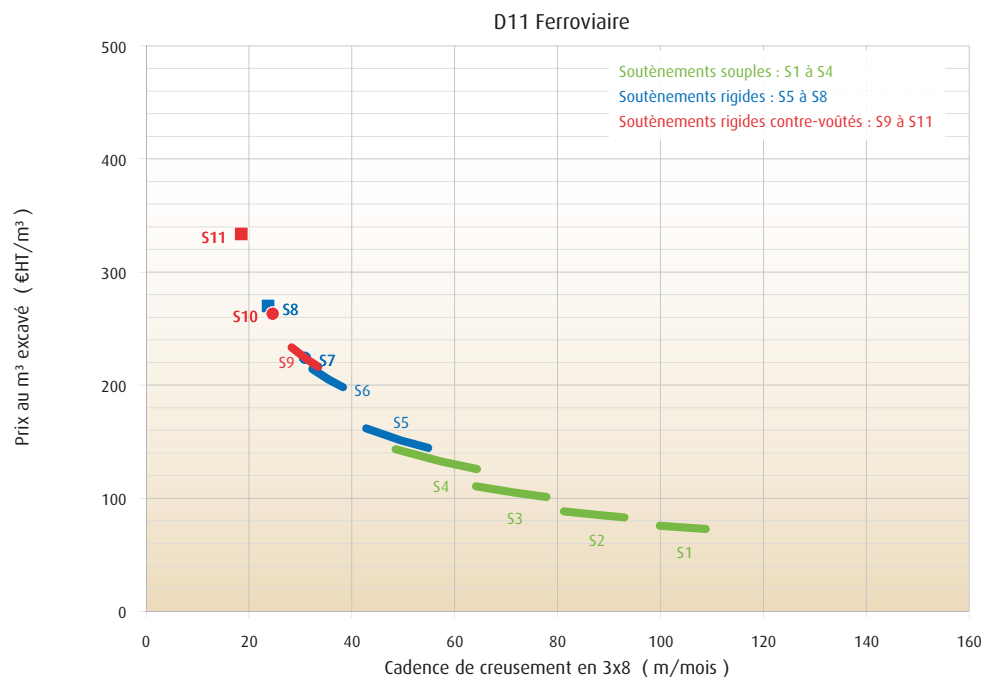


Illustration 16 : Prix des classes de soutènement au mètre cube excavé en fonction des cadences de creusement – (creusement en 3 postes par jour) - Géométrie D11 ferroviaire (voir illustration 12)

Pour les classes S1 à S6 et la classe S9, l'intervalle donné correspond à une variation de la longueur du pas d'excavation à partir du pas de référence issue du tableau 5 selon la règle suivante : la longueur du pas d'excavation varie de plus ou moins 0,50 m si le pas de référence est supérieur ou égal à 2 m, et de plus ou moins 0,25 m si le pas de référence est inférieur à 2 m.

Pour les classes S7, S8, S10 et S11, il n'y a aucune variation de longueur du pas d'excavation du fait de la nécessité d'un pré-soutènement à renouveler régulièrement, soit par enfilage, soit par voûte parapluie.

3.3.2.b Analyse des répartitions représentatives A à E

Les illustrations 17 à 20 présentent les prix des 5 répartitions indicatives de classes de soutènement A à E (cf. §3.1) croisées avec les cadences de creusement pour la géométrie D11. Les

données pour les géométries D8, D9, D10 et D12 figurent en annexes.

Les prix indiqués comprennent seulement les travaux de creusement-soutènement et pré-soutènement.

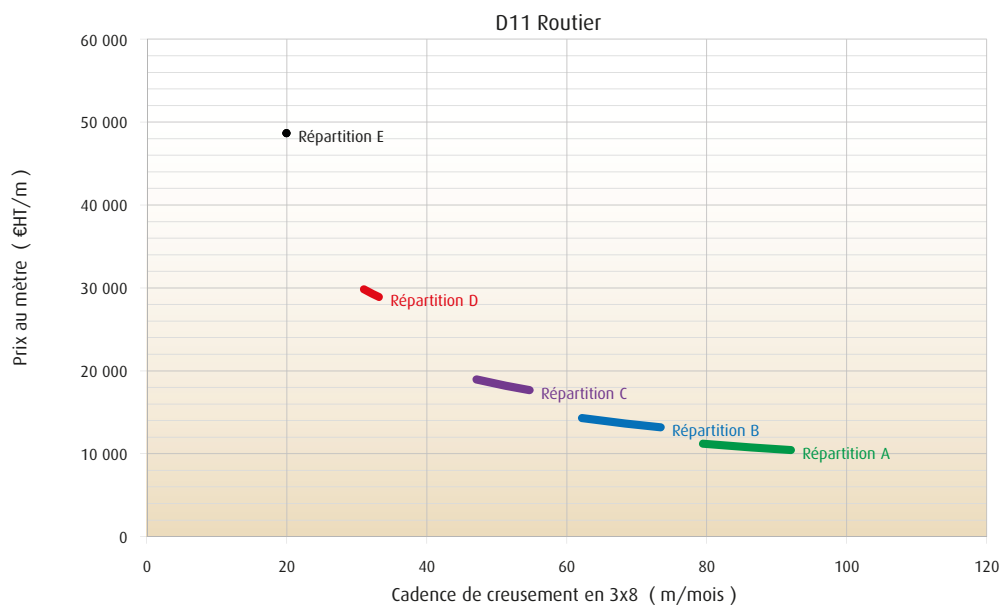


Illustration 17 : Prix des répartitions des classes de soutènement au mètre en fonction des cadences de creusement (creusement en 3 postes par jour) - Géométrie D11 routier

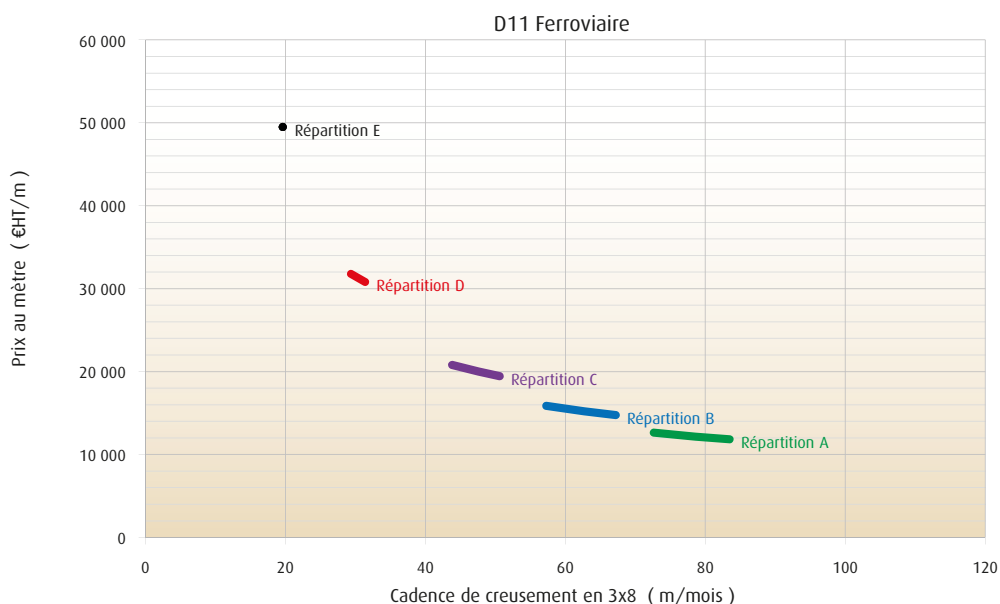


Illustration 18 : Prix des répartitions des classes de soutènement au mètre en fonction des cadences de creusement (creusement en 3 postes par jour) - Géométrie D11 ferroviaire

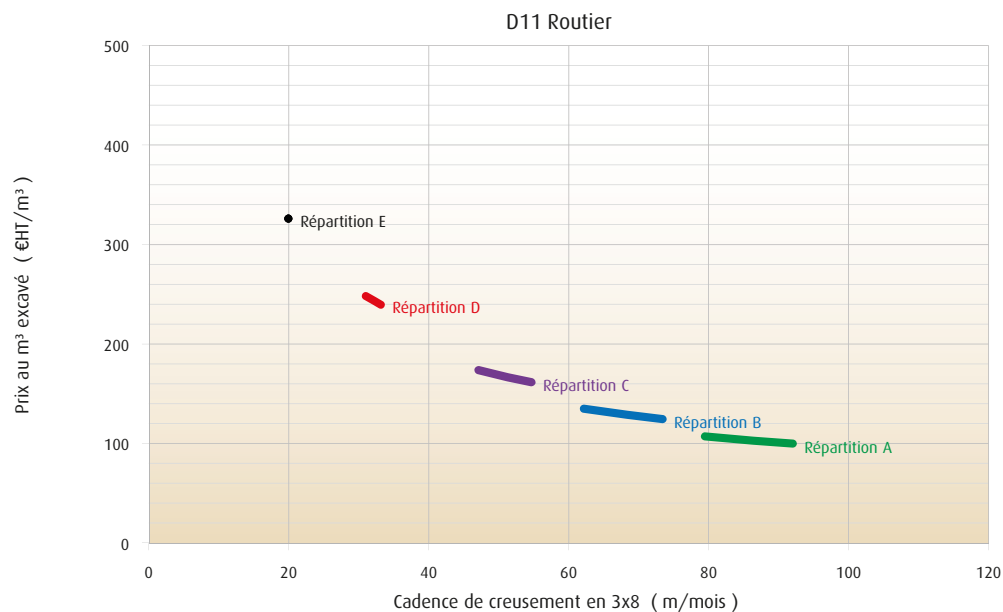


Illustration 19 : Prix des répartitions des classes de soutènement au mètre cube excavé en fonction des cadences de creusement (creusement en 3 postes par jour) - Géométrie D11 routier

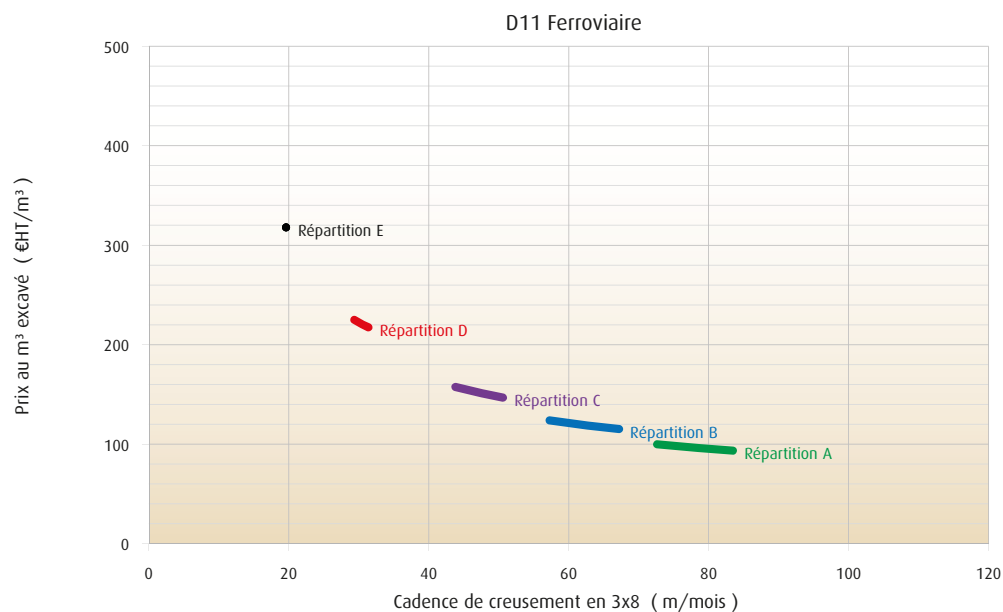


Illustration 20 : Prix des répartitions des classes de soutènement au mètre cube excavé en fonction des cadences de creusement (creusement en 3 postes par jour) - Géométrie D11 ferroviaire

Sur l'illustration 20, on constate que dans le cas de la répartition A, le prix au mètre cube excavé varie peu en fonction de la cadence de creusement (qui oscille entre 72 et 84 m/mois) et se situe entre 94 et 100 € HT/m³. Pour la répartition E, la cadence est estimée à 20 m/mois pour un coût de 320 € HT/m³.

3.3.3 Conditions particulières de creusement-soutènement

Les ratios de prix des classes de soutènement correspondent aux conditions de réalisation les plus courantes. Des conditions particulières liées à la configuration spécifique d'un site peuvent justifier l'application de majorations de ces ratios sur tout ou partie du linéaire à creuser.

Ces conditions particulières peuvent être :

- des venues d'eau particulièrement importantes lors de l'excavation ;
- la nécessité d'une excavation en section divisée ;
- la réalisation de traitements de terrain avant excavation.

3.3.3.a Majoration du prix des classes de soutènement pour venues d'eau importantes

Les prix des classes de soutènement proposés ci-avant sont applicables pour des venues d'eau attendues limitées à 10 litres par seconde, dans la zone du front de taille. Au-delà, des majorations sont à appliquer pour tenir compte des sujétions d'exécution particulières lors du creusement. Des dispositions doivent également être mises en œuvre en cas d'attaque

descendante, qui induit des moyens spécifiques pour l'exhaure de l'eau présente au front de taille.

Lorsque le creusement s'effectue sous le niveau de la nappe, nécessitant un système de pompage spécifique, le prix de fourniture, d'installation et de maintenance du matériel de pompage dépend de la capacité dudit matériel et peut varier entre 50 000 et 150 000 € pour une unité de pompage. À ce prix, il convient d'ajouter le prix de fonctionnement lié à la consommation d'électricité, exprimée en kWh.

3.3.3.b Majoration du prix des classes de soutènement pour excavation en section divisée

Dans ce document, on considère que l'excavation en pleine section ou en deux demi sections a assez peu d'incidence sur le prix et les cadences de creusement-soutènement. Il en est de même pour une excavation avec radier contre-voûté décalé (cf. illustration 21).

Par contre, lorsqu'il est nécessaire d'excaver la section du tunnel en plusieurs parties, à savoir une ou deux premières galeries de section réduites, puis l'abattage des calottes suivi du stross et du radier (cf. illustration 22), l'excavation est fortement impactée par les chantiers successifs de ces sous-sections.

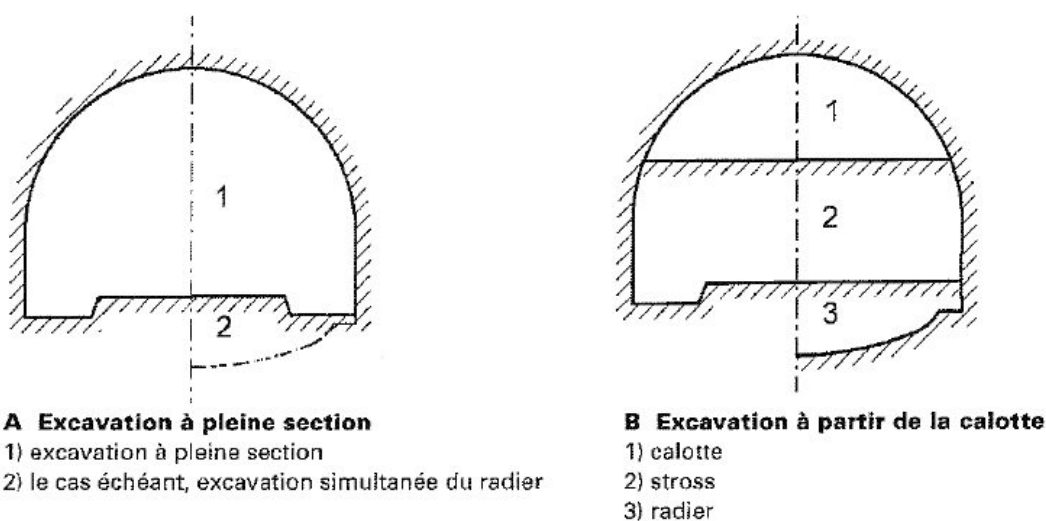
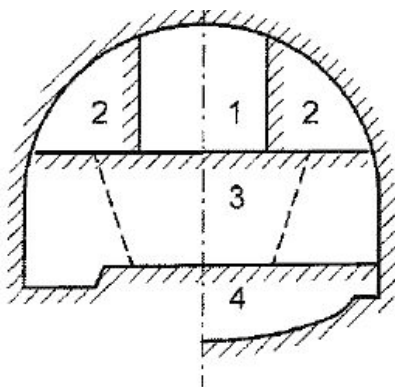


Illustration 21 : Dessins extraits de la norme SIA 198 - Constructions souterraines, exécution - de 2004 [11]

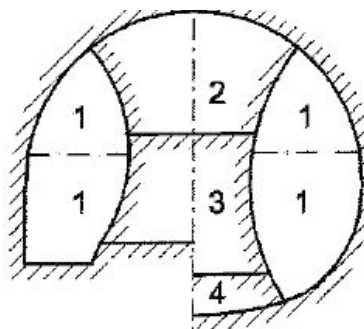
Venues d'eau	Majoration du prix des classes de soutènement (€HT/m de tunnel)
Débit d'eau prévisible compris entre 10 et 60 l/s	800
Débit d'eau prévisible au-delà de 60 l/s	Étude spécifique à mener
Creusement en attaque descendante	500

Tableau 6 : Majorations liées aux venues d'eau lors du creusement



C Excavation subdivisée à partir de la calotte

- 1) galerie de faite
- 2) abattage en calotte
- 3) stross
- 4) radier



D Excavation à partir de galeries latérales

- 1) galeries latérales
- 2) calotte
- 3) noyau (stross)
- 4) radier

Illustration 22 : Dessins extraits de la norme SIA 198 - Constructions souterraines, exécution - de 2004 [11]

Il est alors nécessaire de majorer le prix des classes de soutènement d'un coefficient au moins équivalent à la réduction de cadence résultant de ce mode d'excavation.

Aujourd'hui, sauf exception, seules les grandes sections supérieures aux diamètres traités dans ce document sont excavées avec un tel phasage.

Le retour d'expérience est très limité, il sera donc nécessaire d'effectuer une étude spécifique à chaque configuration nécessitant ce type de division de la section excavée.

3.3.3.c Majoration du prix des classes de soutènement pour traitements de terrains

Injections de terrain

Les injections peuvent avoir pour fonction l'étanchement du terrain et/ou l'amélioration de ses caractéristiques mécaniques ou le comblement de cavités. Les injections de terrain peuvent

être réalisées depuis la surface au-dessus du tunnel ou depuis le tunnel en cours d'excavation.

Lorsqu'elles sont réalisées depuis la surface, les injections se font avant l'excavation du tunnel. Elles ont alors assez peu d'incidence sur les cadences de creusement-soutènement.

Lorsqu'elles sont réalisées depuis le tunnel, elles se font en avant du front, sur des linéaires de tunnel limités. Ces injections vont avoir une forte incidence sur les cadences de creusement-soutènement.

Les éléments de prix donnés ici comprennent les prestations générales (installations particulières, études, contrôles), la réalisation des forages, la fourniture des coulis injectés et la réalisation des injections. Ils correspondent au traitement pour un tunnel de géométrie D11.

Ces éléments de prix sont issus du retour d'expérience d'injections réalisées à base de ciment, ciment surmoulu et bentonite, essentiellement destinées à l'étanchement des terrains.

Désignation	Prix en €HT par mètre de tunnel traité	Incidence sur les cadences
Traitement du terrain par injection depuis la surface - profondeur de forage limitée (soit environ 100 m de forage par mètre de tunnel traité)	12 000	faible
Traitement du terrain par injection depuis la surface - profondeur de forage importante (soit environ 200 m de forage par mètre de tunnel traité)	25 000	faible

Tableau 7 : Prix des injections sub-verticales ou inclinées réalisées depuis la surface

Désignation	Prix en €HT par mètre de tunnel traité	Incidence sur les cadences
Traitement du terrain par injection depuis le tunnel (sur la base d'environ 100 m de forage sub-horizontaux par mètre de tunnel traité)	25 000	Cadence réduite de 50 % pour une classe de soutènement de type S11

Tableau 8 : Prix des injections sub-horizontales réalisées depuis le tunnel

Jet-grouting

L'amélioration des caractéristiques mécaniques des terrains peut être réalisée par colonnes de jet-grouting. Ces colonnes peuvent être réalisées depuis la surface au-dessus du tunnel ou depuis le tunnel en cours d'excavation.

Lorsqu'il est réalisé depuis la surface, le jet-grouting se fait avant l'excavation du tunnel, il a assez peu d'incidence sur les cadences de creusement-soutènement.

Lorsqu'il est réalisé depuis le tunnel, il se fait en avant du front, sur des linéaires de tunnel limités, le jet-grouting a alors une forte incidence sur les cadences de creusement-soutènement.

Les éléments de prix donnés ici comprennent les prestations générales (installations particulières, études, contrôles), la réalisation des forages, la fourniture des liants et la réalisation des colonnes de jet-grouting. Ils correspondent au traitement pour un tunnel de géométrie D11.

Ces éléments de prix sont issus du retour d'expérience de jet réalisé en colonnes de 0,80 m de diamètre, chaque tir ayant 12 m de longueur, en très forte densité dans la section du tunnel et en renforcement d'assise sous le niveau du radier.

Désignation	Prix en €HT par mètre de tunnel traité	Incidence sur les cadences
Longueur de traitement pour 150 m de colonne de jet par mètre de tunnel traité	60 000	Cadence réduite de 2/3 pour une classe de soutènement de type S11

Tableau 9 : Prix de jet-grouting sub-horizontal réalisé depuis le tunnel

3.3.4 Incidence des cadences sur les prix

Les prix des classes de soutènement proposés ci-avant s'appliquent à des ouvrages dont le creusement-soutènement s'effectue en 3 postes par jour, 5 jours par semaine. Ils intègrent le coût des moyens mobilisés en personnel et matériel correspondant à cette hypothèse.

Il n'est pas toujours possible de réaliser 3 postes de travail par jour, du fait de contraintes interdisant par exemple les tirs de nuit ou la circulation des engins de chantier à certains moments de la journée.

Dans l'hypothèse où le creusement-soutènement s'effectue en 2 postes par jour, 5 jours par semaine, le prix des classes de soutènement est impacté du fait du changement de cadence.

L'illustration 23 présente le prix des répartitions de classes de soutènement A, B, C et D en 2 x 8 et en 3 x 8. Les prix sont assez proches mais les cadences sont évidemment très différentes.

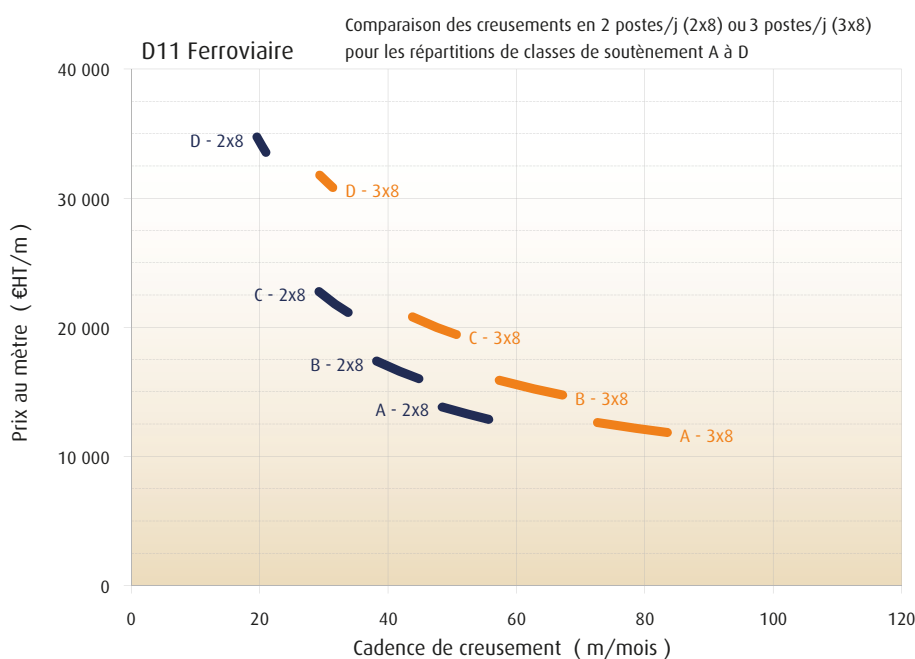


Illustration 23 : Prix des répartitions A, B, C et D en 2 et 3 postes

Ces éléments de prix ne reflètent que les différences du poste creusement-soutènement. Il va de soit que le délai global du chantier sera fortement majoré par un creusement en deux postes, et que le prix de l'ensemble des prestations générales du chantier sera également nettement majoré.

Les prix du revêtement et de l'étanchéité, ainsi que ceux de la plate-forme et des réseaux ne sont généralement pas impactés par le changement de cadence du creusement-soutènement. Ces travaux sont d'ailleurs rarement réalisés en 3 x 8.

3.3.5 Prix du génie civil en section courante en fonction des profils types utilisés

3.3.5.a Contenu des prix

- Le prix de génie civil en section courante comprend :
- le prix des classes de soutènement correspondantes ;
 - le prix du dispositif d'étanchéité et du revêtement ;
 - le prix de la plate-forme et des réseaux.

L'ensemble de ces 3 prix constitue le prix du profil type (cf. tableau 1 : Décomposition des profils types).

- À ces prix s'ajoute un poste pour :
- les frais de prestations générales (installation de chantier, études, etc.), voir §3.3.5.b.

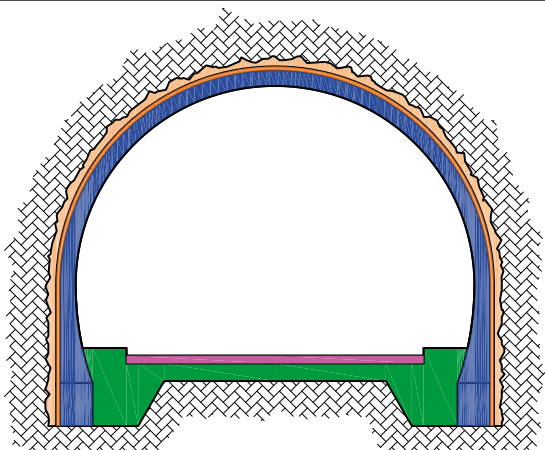
Postes considérés pour l'évaluation du prix de génie civil en section courante			Creusement en méthode conventionnelle
Profil type	Creusement-soutènement	Prix des classes de soutènement	
	Étanchéité-revêtement	Prix ramené au mètre de tunnel	
	Plate-forme-réseaux	Prix ramené au mètre de tunnel	
Chaussée ou voie ferroviaire		Non estimé	
Prestations générales		15 % du montant de l'estimation technique des travaux	

Tableau 10 : Décomposition du prix de génie civil en section courante, creusement en méthode conventionnelle

3.3.5.b Prestations générales

Le montant des prestations générales comprend les installations de chantier, les études, auscultations et contrôles réglés forfaitairement dans les marchés. Ce montant est ramené au prix de travaux et s'ajoute à ceux-ci.

Les graphiques suivants présentent les taux constatés pour les ouvrages issus du retour d'expérience proposé au §2.1.

Les ratios observés sont très variables, de 5 % à plus de 20 % du montant de l'estimation technique des travaux.

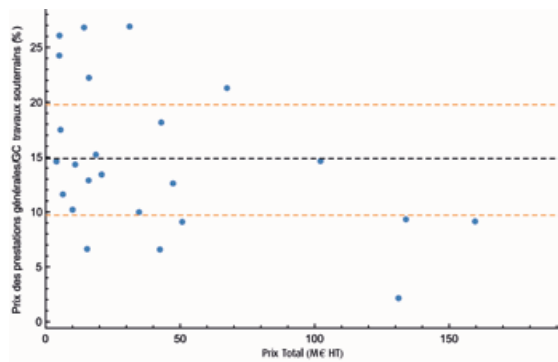
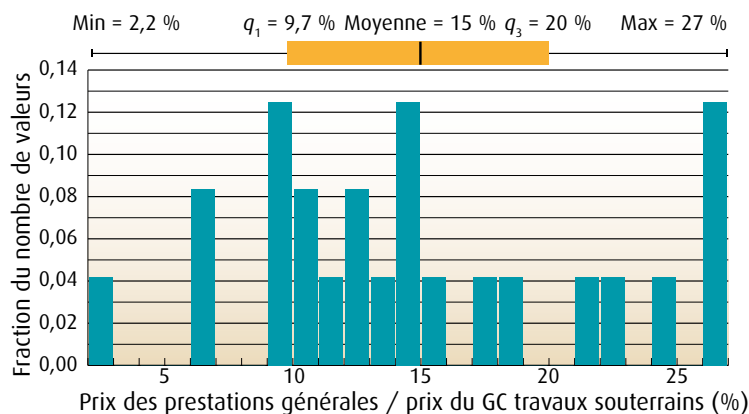


Illustration 24 (à gauche) : Répartition du prix des prestations générales rapporté au prix du génie civil des travaux souterrains

Illustration 25 (à droite) : Prix des prestations générales rapporté au prix du génie civil des travaux souterrains en fonction du prix total de l'ouvrage

Un ratio forfaitaire de 15 % est retenu dans les prix des profils types pour tenir compte des prestations correspondantes.

3.3.5.c Ratios de prix du génie civil en section courante

Les histogrammes suivants présentent pour un tunnel de 11 m de diamètre routier puis ferroviaire, le prix des profils types et sa décomposition pour P1 à P11 correspondant aux classes de soutènement S1 à S11.

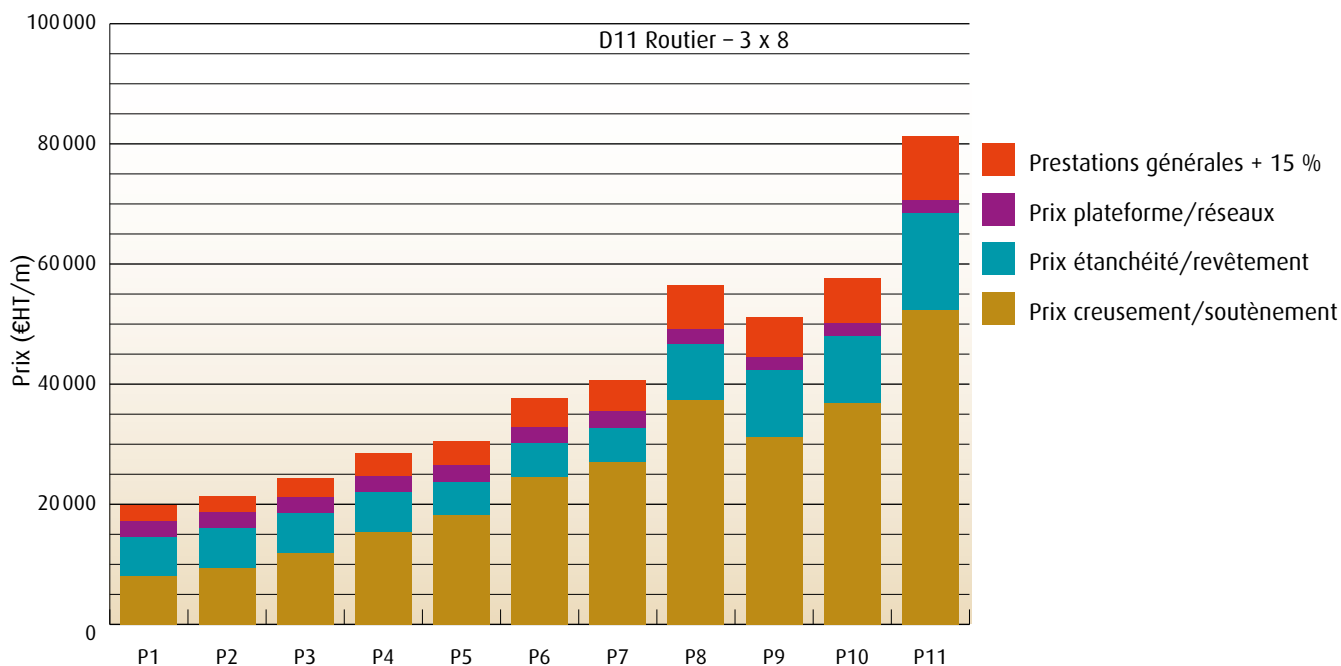


Illustration 26 : Prix étanchéité/revêtement, plate-forme/réseaux et frais de prestations générales (installation de chantier, études, etc.) pour les 11 profils types retenus

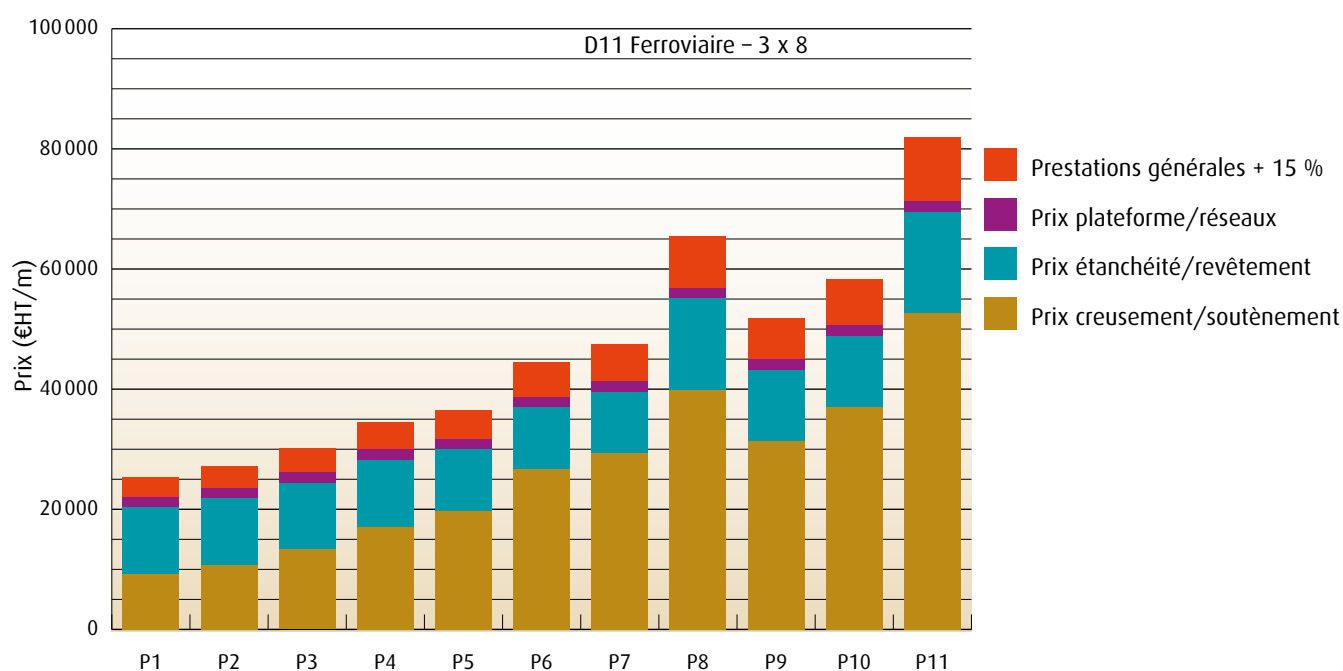
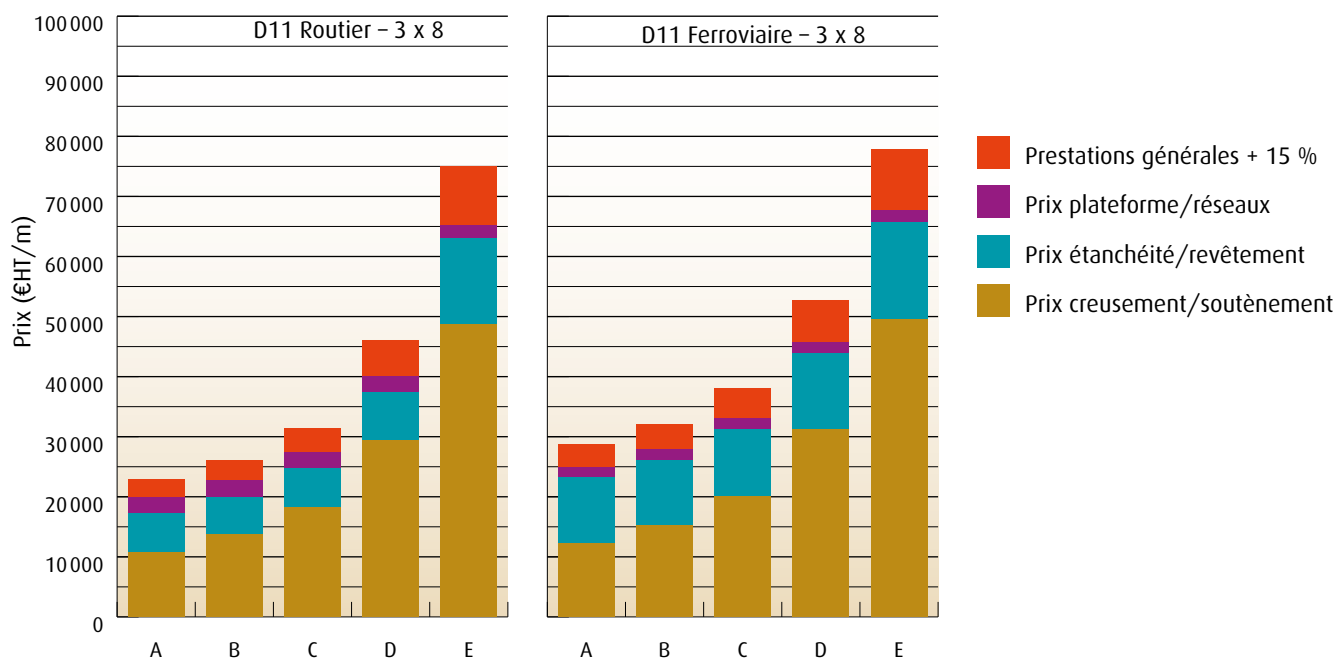


Illustration 27 : Prix étanchéité/revêtement, plate-forme/réseaux et frais de prestations générales (installation de chantier, études, etc.) pour les 11 profils types retenus

Les histogrammes suivants présentent pour un tunnel de 11 m de diamètre routier puis ferroviaire, le prix des profils types et sa décomposition pour les répartitions A à E.



Illustrations 28 et 29 : Prix étanchéité/revêtement, plate-forme/réseaux et frais de prestations générales (installation de chantier, études, etc.) pour les répartitions de profils types A à E

En annexe (cf. §5.3.2) sont présentés les prix de construction des autres configurations géométriques. Ils couvrent l'ensemble des opérations : creusement, soutènement, pré-soutènement, drainage, étanchéité, revêtement, assainissement, réseaux

divers, plate-forme (hors chaussée) et trottoirs, le tout ramené à un prix au mètre.

3.3.5.d Précision du prix des profils types

La consistance des prestations et les quantités associées qui composent chaque profil type permettent d'en calculer le prix total en sommant les résultats des produits quantité-prix unitaire. Ces prix unitaires sont issus d'une base de données qui rassemble des prix provenant de nombreux ouvrages. Une imprécision peut être attachée à chaque prix proposé pour chaque profil type, elle dépend des imprécisions qui portent sur les quantités et les prix unitaires retenus.

Une étude de sensibilité du prix, menée par la méthode de Monte-Carlo, permet de déterminer l'imprécision qui affecte le prix proposé pour chaque profil type. Pour ce faire, prix unitaires et quantités sont modélisés par des variables aléatoires calées sur des lois statistiques simplifiées qui permettent de reproduire la variabilité observée.

L'illustration 30 présente le résultat de l'analyse d'imprécision pour chaque profil type en faisant figurer :

- le prix moyen retenu tel qu'il figure dans les données de prix fournies par ce fascicule ;
- les quartiles à 25 % et 75 % calculés à partir de l'étude de sensibilité ;
- les valeurs minimum et maximum calculées à partir de l'étude de sensibilité.

Ainsi, il faut retenir que les valeurs indiquées dans les chapitres précédents sont les valeurs considérées comme les plus probables et non comme des valeurs prudentes par excès. L'imprécision sur le prix proposé est variable, en fonction de la précision des données disponibles. En moyenne, les prix sont donnés avec une précision de l'ordre de $\pm 10\%$.

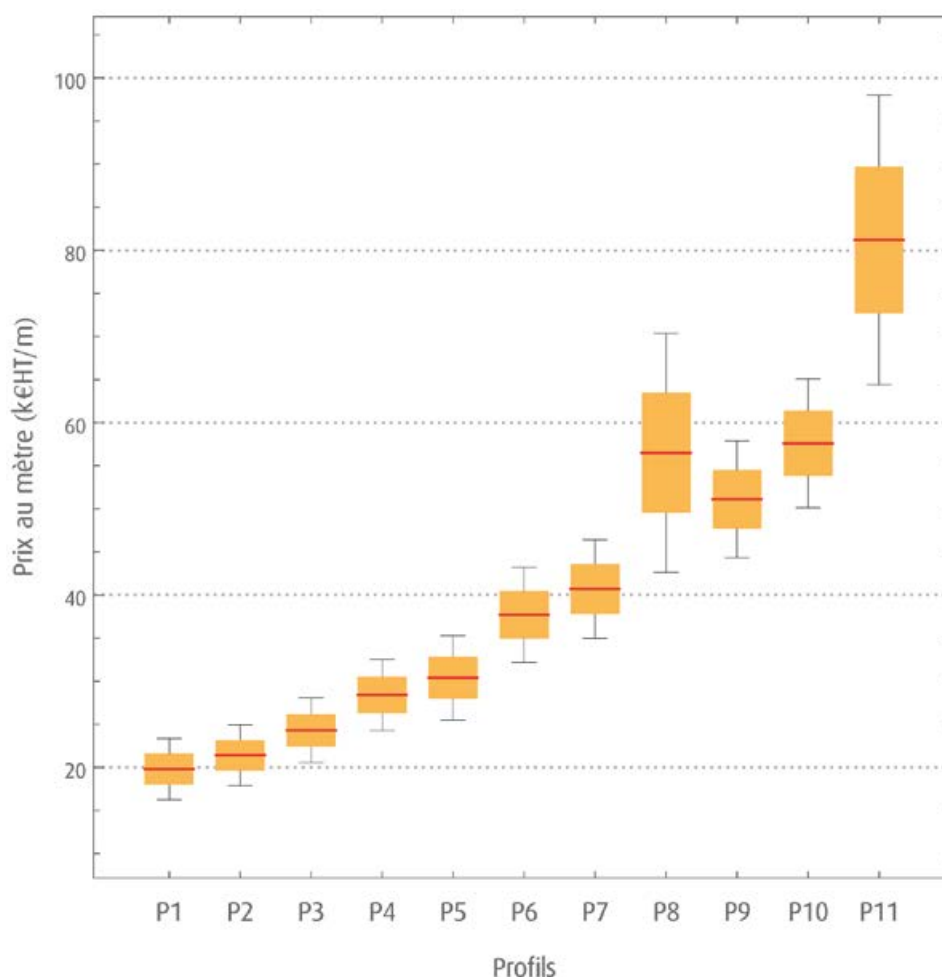


Illustration 30 : Imprécision du prix pour chaque profil type (le trait rouge représente le prix médian, cf. annexe §5.1) - D11 routier

3.4 TUNNELS CREUSÉS AU TUNNELIER

3.4.1 Rappel sur la technologie du creusement mécanisé⁵

Un tunnelier est un moyen d'excavation mécanisé qui se substitue aux méthodes conventionnelles de creusement des tunnels. Ces machines permettent à la fois d'excaver les terrains en pleine section, de soutenir le front (confinement) et la paroi latérale (soutènement ou voussoirs), d'évacuer les déblais et de progresser dans le terrain.

D'une manière très générale, les différentes technologies de creusement mécanisé se distinguent :

- par la possibilité d'exercer un confinement sur le front de taille (pression de terre, pression de boue ou air comprimé) ;
- par la nature du revêtement mis en place (coulé en place ou voussoirs) ;
- par la nature des appuis permettant l'avancement (appuis radiaux par gripeurs ou appuis longitudinaux directement sur les voussoirs).

Selon la nomenclature simplifiée proposée par le GT4 de l'AFTES (TES n° 240, nov-déc 2013) [12], les tunneliers peuvent être classés en 4 catégories :

Tunnelier	Type de revêtement		OUVERT : sans confinement	FERMÉ : avec confinement			MULTI-MODE
				EPB : pression de terre	SLURRY : pression de boue	AIR : pression d'air	
Tunnelier « Bouclier Simple Jupe » (TBM Single Shield)	Revêtement préfabriqué (voussoirs)	Ne permet pas la pose du revêtement pendant le creusement	Possible	Possible	Possible	Possible	Possible
Tunnelier « Bouclier Double Jupe » (TBM Double Shield)	Revêtement préfabriqué (voussoirs)	Permet la pose du revêtement pendant le creusement	Possible	—	—	—	—
Tunnelier « Roche dure à Grippeurs » (Hard Rock TBM)	Ne pose pas de revêtement préfabriqué	Peut permettre de poser du soutènement (boulonnage, béton projeté, cintres...)	Possible	—	—	—	—
Tunnelier « à bras d'abattage » (TBM with backhoe)	Revêtement préfabriqué (voussoirs)	Ne permet pas la pose du revêtement pendant le creusement	Possible	—	—	Possible	—

Tableau 11 : Caractéristiques des différents types de tunneliers (en bleu les principaux types de tunneliers utilisés pour les ouvrages d'infrastructure)

Le prix d'un ouvrage creusé au tunnelier dépend en particulier de la technologie retenue. Il convient toutefois de préciser que ce sont d'abord les conditions géologiques et géotechniques qui déterminent ce choix.

En effet, les tunneliers qui ne permettent pas d'exercer un confinement du front (par air comprimé, boue ou terre) ne peuvent être utilisés que dans des sols cohérents ou terrains rocheux et en l'absence de charge hydrostatique.

Ainsi, les tunneliers « boucliers à confinement » (pression de boue ou pression de terre) sont des technologies aujourd'hui courantes et adaptées aux terrains meubles et aquifères généralement rencontrés dans les formations alluvionnaires et sédimentaires des vallées. Ces technologies permettent de s'affranchir des méthodes de traitement des terrains par congélation ou injection qui s'avéraient hier nécessaires dans les formations très difficiles.

3.4.2 Prix de creusement-soutènement-étanchéité-revêtement par type de tunnelier

3.4.2.a Préambule

Les prix ne sont proposés que pour quatre configurations qui couvrent les principaux types de tunneliers utilisés pour les ouvrages d'infrastructure et pour les configurations géométriques retenues (cf. fascicule 0 §2.2) :

- Avec confinement :
 - Bouclier simple jupe Pression de boue (SLURRY) → Bouclier simple jupe, marinage hydraulique, pose de voussoirs préfabriqués ;
 - Bouclier simple jupe Pression de terre (EPB) → Bouclier simple jupe, marinage par convoyeur à bande, pose de voussoirs préfabriqués.

5. Les machines à attaque ponctuelle ainsi que les tunneliers aléseurs ne sont pas considérés ici.

- Sans confinement :
 - Bouclier simple jupe en mode ouvert → Bouclier simple jupe, marinage par convoyeur à bande, pose de voussoirs préfabriqués ;
 - Roche dure à Grippeurs → marinage par convoyeur à bande, mise en œuvre d'un soutènement type méthode conventionnelle.

Pour les quatre configurations considérées, le tableau 12 suivant rappelle quelques références d'ouvrages réalisés en France après 2000.

Désignation usuelle	Avancement	Revêtement	Confinement	Marinage	Référence récente	< 8 m	D8	D9	D10	D11	D12
Tunnelier Bouclier simple jupe (fermé à pression de boue)	Appui longitudinal	Voussoirs	Oui Pression de boue	Hydraulique	Métro de Lyon (extension ligne B vers Oullins) - Ø = 9,50 m (8,35 intrados) Métro de Toulouse (ligne B - Lot 4) Ø = 7,77 m (6,80 intrados)	X	X				
Tunnelier Bouclier simple jupe (fermé à pression de terre)	Appui longitudinal	Voussoirs	Oui Pression de terre	Bande transporteuse	Métro de Marseille (prolongement Ligne 1) - Ø = 9,80 (8,60 m intrados) Métro Paris Ligne 12 - Ø = 9,17 m Tramway T6 « C2V » - Ø = 9,17 m Métro de Toulouse (Ligne B) - Ø = 7,77 m (6,80 intrados) Métro de Paris (Ligne 14) (7,75 intrados)	X	X	X			
Tunnelier Bouclier simple jupe (ouvert)	Appui longitudinal	Voussoirs	Non	Bande transporteuse	Galerie de sécurité tunnel routier du Fréjus - Ø = 9,40 m Tunnel de Saverne - Ø = 10,07 m Tunnel du Mont Sion Ø = 12 m (10,70 intrados)		X	X		X	
Tunnelier roche dure à grippeurs (ou tunnelier à appui radial)	Grippeurs (appui radial)	Revêtement conventionnel coulé en place	Non	Bande transporteuse	Galerie de sécurité tunnel Maurice Lemaire - Ø = 6,00 m Tunnel du Rizzanese - Ø = 3,50 m Aménagement hydraulique Romanche Gavet - Ø = 4,60 m	X	X				

Tableau 12 : Retour d'expérience des types de tunneliers

Les prix de creusement-soutènement-étanchéité-revêtement indiqués dans les graphes qui suivent comprennent l'ensemble des postes suivants :

- la fourniture et le montage-démontage du tunnelier, toutes les installations associées en souterrain et à l'extérieur ;
- le creusement et tous les consommables ;
- la fourniture des voussoirs préfabriqués ;
- les frais de personnel pour le chantier pour assurer un creusement 7 jours / 7, en y intégrant la maintenance ;
- les prestations générales (installations de chantier, encadrement, contrôles, auscultations).

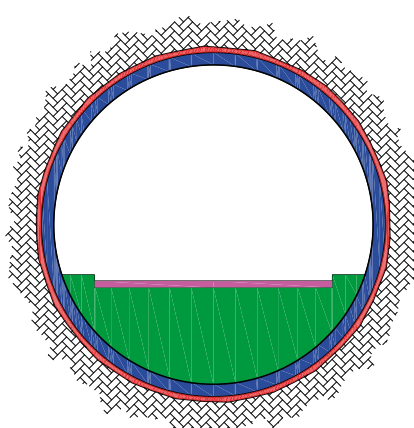
Postes considérés pour l'évaluation du prix de génie civil en section courante du creusement au tunnelier			Creusement au tunnelier
Profil type	Creusement	Tunneliers à voussoirs : cf. illustrations 35 à 41 Tunneliers Roche dure à Grippeurs : cf. illustrations 42 à 44	
	Soutènement-étanchéité-revêtement		
	Plate-forme-réseaux	Non estimé	
Chaussée ou voie ferroviaire		Non estimé	
Prestations générales		15 % du montant de l'estimation technique des travaux	

Tableau 13 : Décomposition du prix de génie civil en section courante, creusement au tunnelier

Pour les tunneliers qui posent directement les voussoirs, il n'y a pas lieu de distinguer le soutènement et le revêtement. Cette distinction n'est pertinente que pour les tunneliers à grippeurs dans la mesure où le revêtement est posé postérieurement au creusement-soutènement proprement dit réalisé par la machine.

Le prix des ouvrages réalisés au tunnelier dépend principalement :

- de la géométrie de l'ouvrage : diamètre excavé et longueur creusée ;
- du type de tunnelier employé : mode ouvert ou mode confiné (pression de boue ou pression de terre) ;
- du type de revêtement : avec voussoirs préfabriqués ou avec revêtement coulé en place pour certains tunneliers en mode ouvert ;
- de la cadence attendue de l'excavation.

Pour tenir compte de ces spécificités, les prix proposés sont reconstitués en considérant que le coût de réalisation du creusement-soutènement-étanchéité-revêtement est décomposé en 4 postes :

<ul style="list-style-type: none"> • Tunnelier • Soutènement/revêtement (type voussoirs⁶ ou conventionnel) • Divers consommables 	
<ul style="list-style-type: none"> • Personnel en poste 	

À diamètre d'excavation déterminé, le poids des différents postes est très variable.

Le tunnelier peut représenter une part très importante du coût selon la longueur totale creusée. En effet la machine étant spécifique à chaque tunnel, elle est amortie sur la seule longueur de l'ouvrage et son coût est très important, de 10 à 30 M€ selon le diamètre et ses caractéristiques spécifiques. Son poids relatif dans le coût de creusement-soutènement-étanchéité-revêtement décroît donc avec l'allongement du tunnel. En deçà

de 3000 m de creusement, c'est dans la plupart des cas le poste «tunnelier» qui représente la part la plus importante du coût de génie civil de l'ouvrage en section courante.

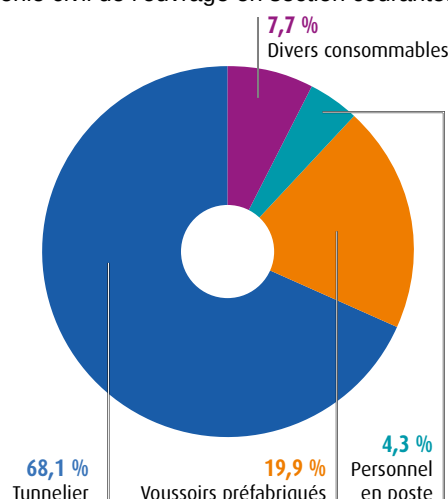


Illustration 31 : Exemple de répartition des différents postes de dépenses – Tunnel de 1 000 m

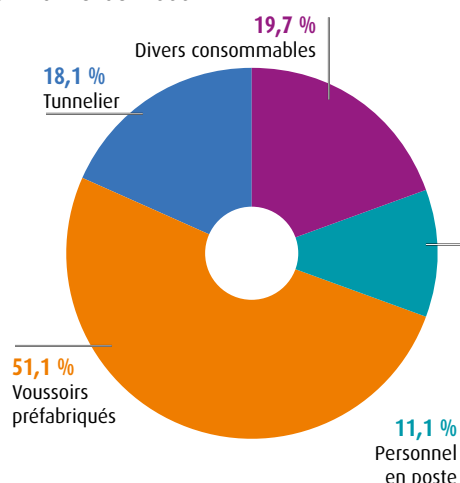


Illustration 32 : Exemple de répartition des différents postes de dépenses – Tunnel de 10 000 m

6. Les voussoirs jouent également un rôle d'étanchéité et de revêtement de l'ouvrage.

En second lieu, concernant la part variable, pour un diamètre donné et une longueur d'excavation donnée, l'incidence de la variation de la cadence sur le prix est faible, le poste « personnel » pesant peu même dans les cas extrêmes.

En effet, pour un tunnel de 5000 m, la part variable pèse entre 10 et 30 % du coût selon la cadence.

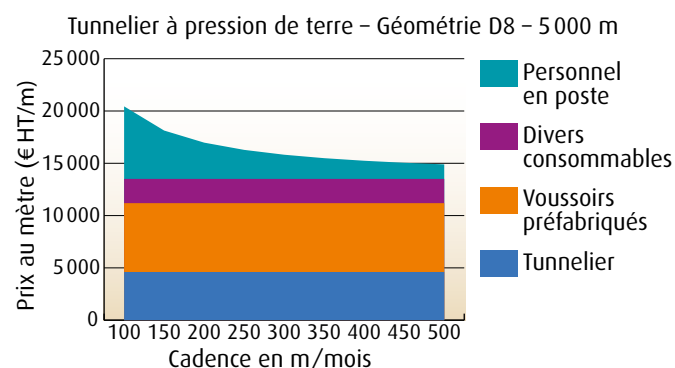


Illustration 33 : Évolution de la part des différents postes en fonction de la cadence d'avancement

Ainsi, ramené à un coût global au mètre cube excavé, on observe une variabilité très importante en fonction :

- du diamètre de l'ouvrage ;
- de la technologie utilisée ;
- de la cadence ;
- de la longueur.

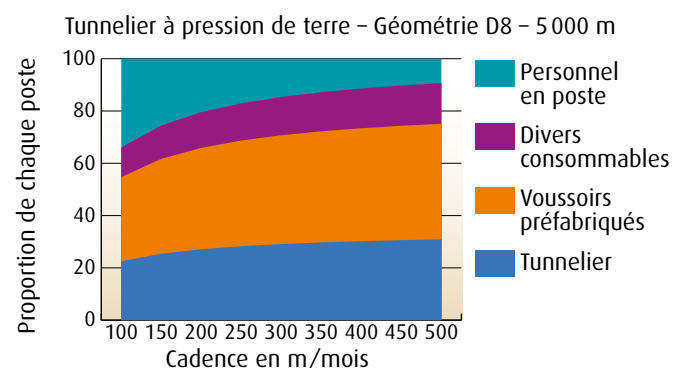


Illustration 34 : Évolution de la part des différents postes en fonction de la cadence d'avancement

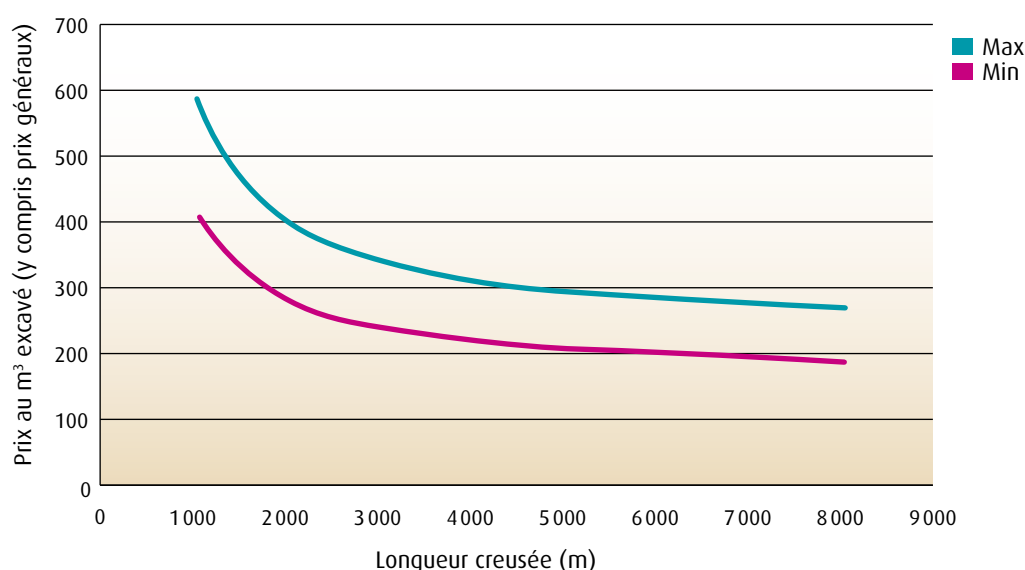


Illustration 35 : Prix au mètre cube excavé en fonction de la longueur creusée - Tunnelier D8 à D12

L'illustration 35 présente la dispersion des prix au mètre cube excavé. Les prix présentés comprennent tous les postes de l'estimation de la section courante à l'exception des plateformes et structures internes. Dans ce graphe figurent tous les prix des ouvrages de diamètre D8 à D12, réalisés au tunnelier à bouclier simple jupe (avec confinement ou non) pour des longueurs variant de 1000 à 8000 m et des fourchettes de cadences représentatives de chaque technologie.

On constate par exemple que le prix maximum au mètre cube excavé pour un tunnel de 3000 m reste inférieur au prix minimum pour un tunnel de 1000 m. La longueur est donc un critère déterminant sur le prix d'un ouvrage construit au tunnelier ; l'amortissement du matériel ne se fait vraiment qu'à partir d'une longueur située autour de 3000 m.

Les paragraphes suivants proposent des ratios de prix par type de tunnelier. Les prix sont présentés soit au mètre d'ouvrage pour un diamètre donné, soit au mètre cube excavé. Les prix ne comprennent jamais les plateformes et structures internes. En revanche, ils comprennent les prix des prestations générales.

3.4.2.b Tunnelier à bouclier simple jupe avec confinement

Le tunnelier à bouclier est le type de machine le plus couramment rencontré aujourd'hui pour les projets d'infrastructures. En France, les projets de métro sont quasi-exclusivement tous réalisés par des tunneliers à bouclier simple jupe à pression de boue ou pression de terre.

En effet, les tunnels de métro sont le plus souvent inscrits dans des terrains meubles et aquifères des vallées alluvionnaires et sédimentaires où le recours à un confinement est nécessaire pour garantir l'excavation et prévenir les dommages liés à la déformation du terrain pendant le creusement sur les avoisinants.

Les graphes donnés dans le corps du texte concernent la géométrie D8. Les ratios de prix pour les autres géométries sont fournis en annexe.

Les illustrations 36 et 37 proposent par mètre de tunnel puis par mètre cube excavé des ratios de prix pour un tunnelier à pression de boue pour une cadence moyenne de 250 m/mois et pour un tunnelier à pression de terre pour une cadence moyenne de 350 m/mois.

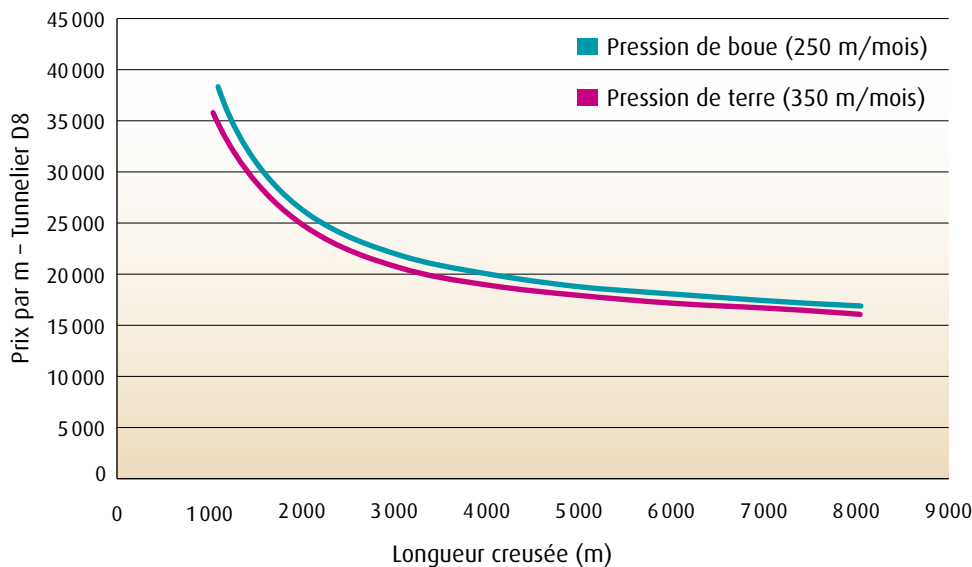


Illustration 36 : Prix ramené au m de tunnel en fonction de la longueur creusée - Tunnelier EPB/Slurry - D8

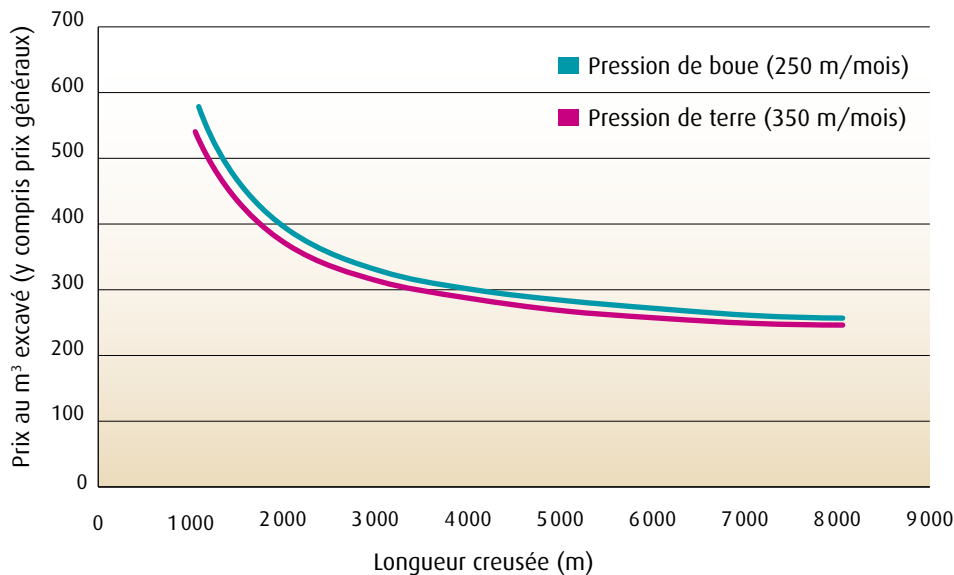


Illustration 37 : Prix ramené au volume excavé en fonction de la longueur creusée - Tunnelier EPB/Slurry - D8

On constate sur ces graphes que les prix selon le type de confinement avec des cadences caractéristiques de chaque technologie sont très proches. Le principal écart réside dans le coût du matériel plus important pour un tunnelier à pression de boue (station de traitement, etc.) qui sera moins bien amorti sur les longueurs faibles.

Les conditions économiques ne sont pas toujours déterminantes pour le choix du type de machine, et ce sont principalement les conditions de terrain qui vont dicter le choix de l'un ou l'autre des modes de creusement.

Les illustrations 38 et 39 proposent par mètre de tunnel puis par mètre cube excavé des ratios de prix pour un tunnelier à pression de boue et pour un tunnelier à pression de terre en fonction des cadences moyennes indicatives et des longueurs creusées (1 000 m, 2 000 m, 3 000 m, 5 000 m, 8 000 m).

On constate une baisse des prix avec l'augmentation de la cadence, mais qui reste limitée à 15 % dans les cas extrêmes.

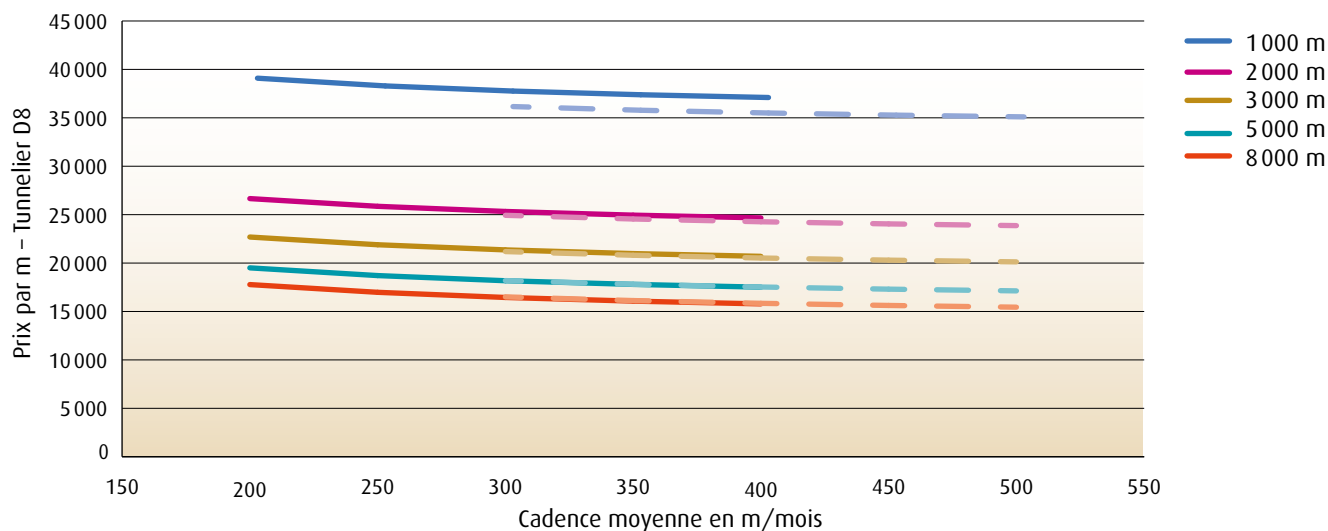


Illustration 38 : Prix ramené au mètre de tunnel en fonction de la cadence moyenne - Tunnelier EPB/Slurry – D8 (Trait plein : Slurry – Trait pointillé : EPB)

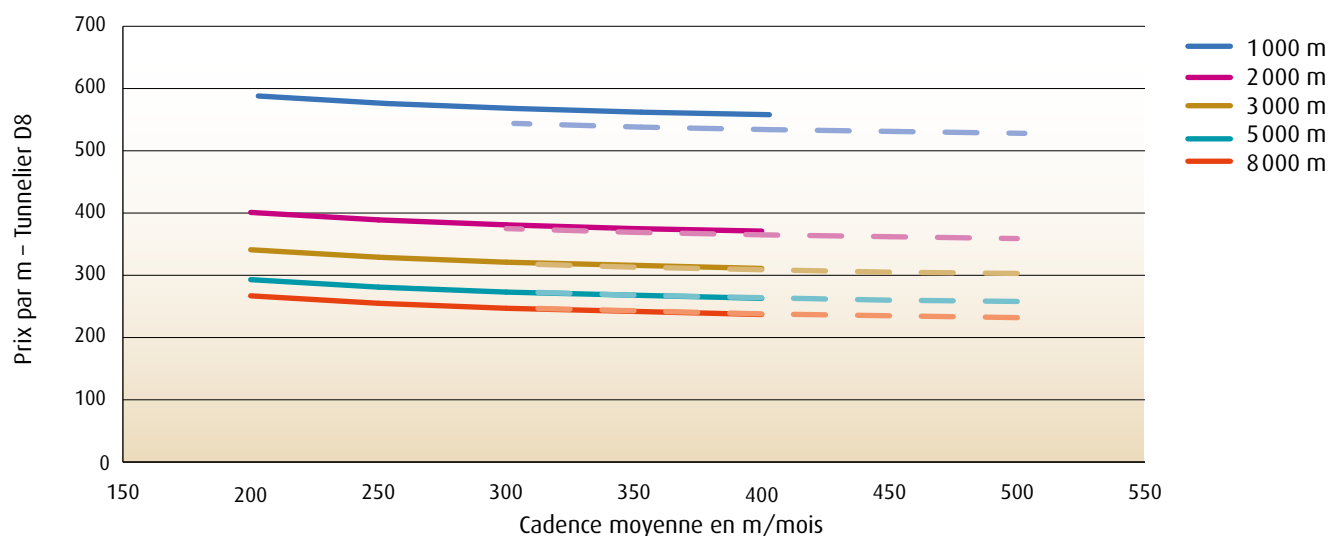


Illustration 39 : Prix ramené au volume excavé en fonction de la cadence moyenne - Tunnelier EPB/Slurry – D8 (Trait plein : Slurry – Trait pointillé : EPB)

Les illustrations 40 et 41 proposent par mètre de tunnel puis par mètre cube excavé des ratios de prix pour un tunnelier à pression de terre ou pression de boue pour des cadences

caractéristiques respectives de 350 et 250 m/mois, en fonction du diamètre intrados et pour des longueurs creusées variables (1 000 m, 2 000 m, 3 000 m, 5 000 m, 8 000 m).

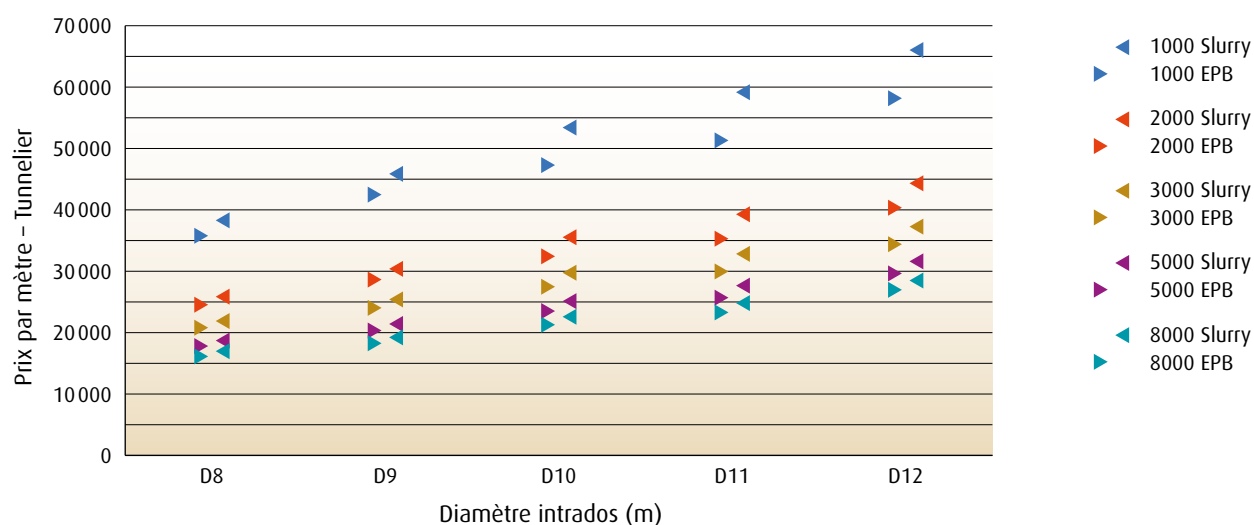


Illustration 40 : Prix ramené au m de tunnel en fonction du diamètre intrados - Tunnelier EPB/Slurry

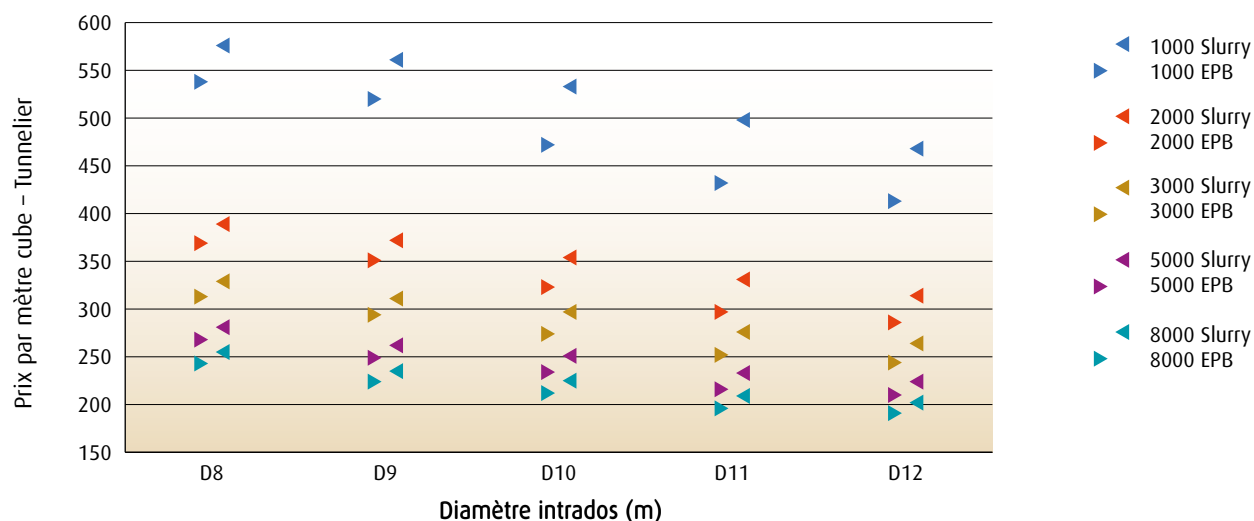


Illustration 41 : Prix ramené au volume excavé en fonction du diamètre intrados - Tunnelier EPB/Slurry

3.4.2.c Tunneliers à bouclier simple jupe sans confinement

On considère que les prix des tunnels creusés au tunnelier à bouclier simple jupe sans confinement sont comparables à ceux donnés pour une machine à pression de terre. Ce type de tunnelier peut toutefois atteindre des cadences moyennes plus élevées, le prix diminuant en conséquence (cf. illustrations 38 et 39).

3.4.2.d Tunneliers roche dure à grippeurs

Il n'y a pas à ce jour de tunnel creusé en France par un tunnelier roche dure à grippeurs de diamètre supérieur à 6 m excavé, ce qui correspond à environ 5 m intrados. Il existe toutefois de nombreux projets (ferroviaires, métro) qui prévoient ce type de géométrie au tunnelier.

Les prix proposés sont reconstitués à partir des outils d'estimation comme présentés au paragraphe 3.4.2.a.

La validité des prix repose sur l'hypothèse que les principaux postes du prix de ce type d'ouvrage sont les mêmes que pour

les tunneliers à bouclier simple jupe et que les règles de variation sont comparables.

Le prix de creusement-soutènement pour un tunnelier roche dure à gripeurs comprend les postes suivants :

- la fourniture et le montage-démontage du tunnelier, toutes les installations associées ;
- le fonctionnement du tunnelier et tous les consommables ;
- les frais de personnel pour le chantier pour assurer un creusement 7 jours / 7, en y intégrant la maintenance ;
- les soutènements et le revêtement le cas échéant qui seront réalisés en méthode comparable à la méthode conventionnelle (pas de pose de voussoirs hors voussoir de radier) ;
- les prestations générales (installations de chantier, encadrement, études, contrôles, auscultations).

Pour tenir compte des spécificités de ce type de tunnelier, les prix sont proposés en distinguant d'une part le prix du creusement (cf. illustrations 42 et 43) et d'autre part le prix du sous-ensemble soutènement-étanchéité-plateforme (cf. illustration 44). Chacun des prix de ces deux sous-ensembles comprennent les prestations générales.

Prix de creusement pour les tunneliers à gripeurs

Les illustrations 42 et 43 proposent par mètre de tunnel puis par mètre cube excavé des ratios de prix pour un tunnelier roche dure à gripeurs pour une cadence moyenne de 300 m/mois à 600 m/mois et pour des longueurs comprises entre 3000 m et 8000 m.

Les prix proposés comprennent le poste «creusement», y compris les prestations générales y afférentes.

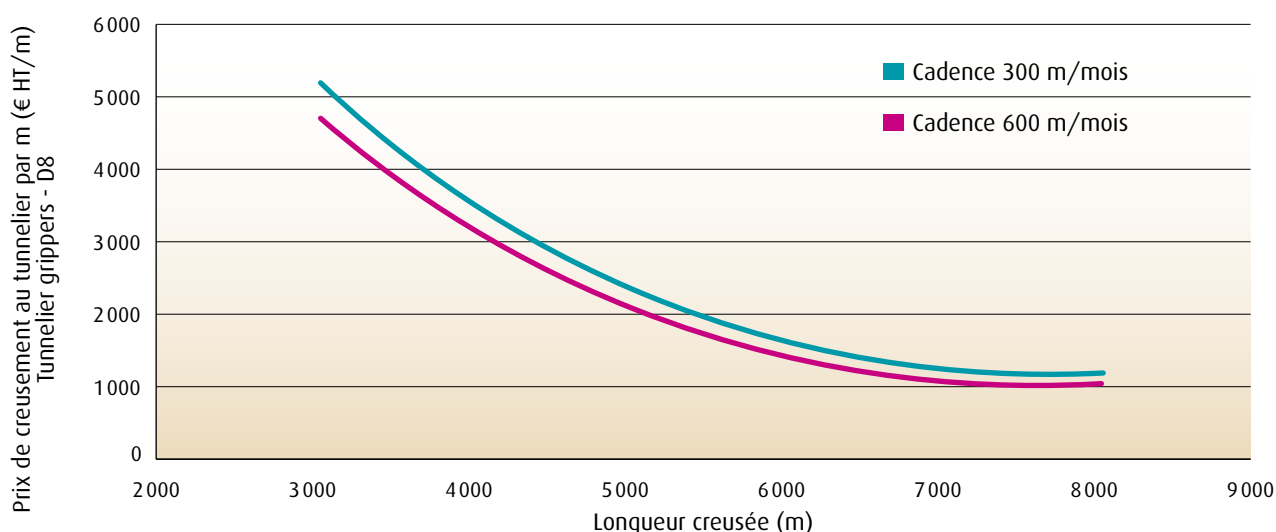


Illustration 42 : Prix de creusement (hors soutènement/revêtement) ramené au mètre de tunnel en fonction de la longueur creusée - Tunnelier à gripeurs - D8

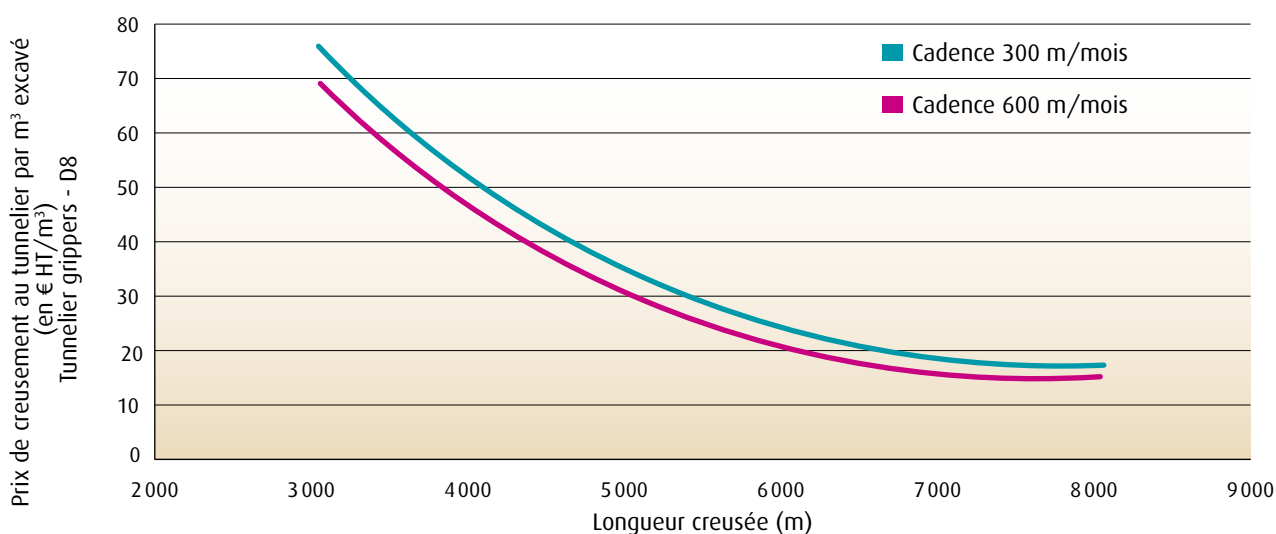


Illustration 43 : Prix de creusement (hors soutènement/revêtement) ramené au m³ excavé en fonction de la longueur creusée - Tunnelier à gripeurs - D8

Classes de soutènement pour le creusement au tunnelier à grippeurs

Géométrie D8	P1	P3	P5	P7
	Boulons		Cintres	
Rayon intrados : 4,1 m			Enfilage	
Section excavée (cf. schéma)				
Section excavée	67,93 m²	67,93 m²	67,93 m²	67,93 m²
Rayon TBM	4,65 m	4,65 m	4,65 m	4,65 m
Rayon intrados	4,10 m	4,10 m	4,10 m	4,10 m
Soutènements				
En voûte				
Épaisseur de béton projeté	0,05 m	0,15 m	0,20 m	0,20 m
Nombre de boulons par mètre	2,0 u/m	8,0 u/m		
Longueur des boulons	2,50 m	2,50 m		
Type de cintre (1u/pas)			HEB 160	HEB 680
Espacement cintres			1,50 m	1,50 m
Pré-soutènements				
Enfilage (boulons autoforeurs)				
Nombre de barres				10 u
Longueur des barres				9,00 m
Mises en œuvre tous les ...				4,50 m
Étanchéité				
Surface	28,90 m²	28,27 m²	27,96 m²	27,96 m²
Revêtement : béton non armé				
Épaisseur	0,49 m	0,39 m	0,34 m	0,34 m

Illustration 14 : Définition des profils de soutènement - Tunnelier à grippeurs - D8

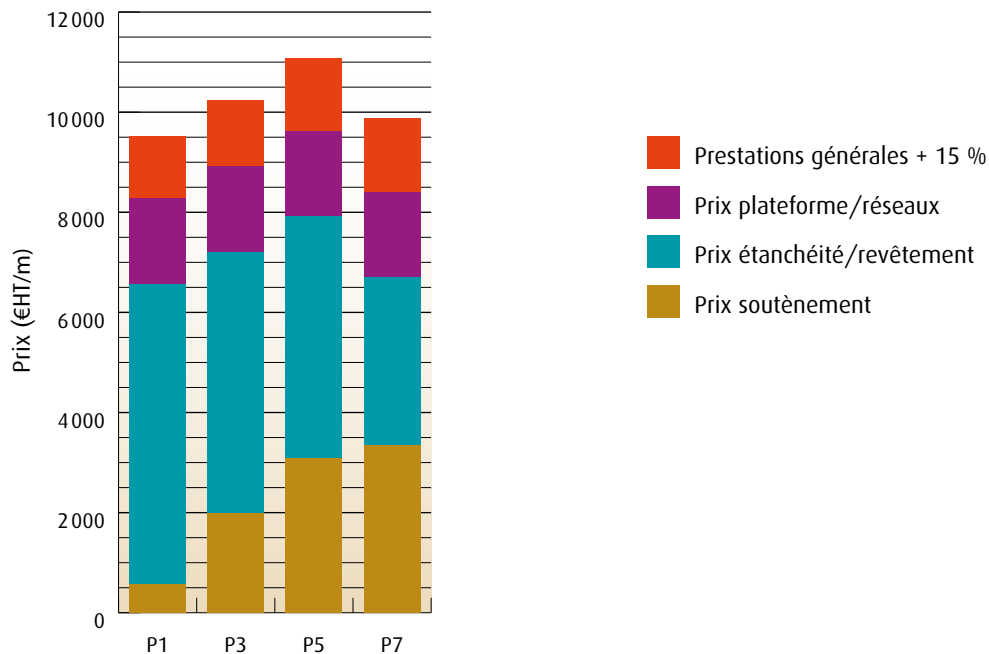


Illustration 44 : Prix de profils types (hors creusement au tunnelier)
Tunnelier à grippeurs - D8 ferroviaire

Bien que les prix de soutènement et de revêtement soient groupés, il convient de noter que la réalisation du soutènement se fait en même temps que le creusement tandis que la mise en œuvre du revêtement est différée dans le temps.

Le revêtement est réalisé par des moyens conventionnels, c'est à dire en utilisant un outil coffrant spécifique indépendant du tunnelier. La cadence de réalisation du revêtement est de l'ordre de 10 m par jour environ.

Exemple

Ainsi, par exemple, le prix du génie civil en section courante pour un ouvrage de diamètre intrados 8 m et une longueur creusée de 8 000 m (tunnelier à grippeurs) en supposant une répartition des profils type (50 % P3, 50 % P5) est le suivant :

- creusement : 1 100 €/m ;
- soutènement / revêtement : P3 : 10 000 €/m ; P5 : 11 000 €/m ;
- soit au total : 92,8 M€ HT pour le génie civil en section courante, prestations générales comprises.

PRIX DU GÉNIE CIVIL DES AUTRES OUVRAGES SOUTERRAINS

Il s'agit des autres ouvrages souterrains :

- linéaires, les structures internes en section courante (gainés de ventilation, dalles, etc.) ;
- linéaires, les galeries de sécurité parallèles à l'ouvrage principal ou en liaison directe avec l'extérieur ;
- singuliers, les ouvrages liés à l'exploitation et à la sécurité (aménagements pour l'évacuation et la protection des

usagers et l'accès des secours, aménagements destinés aux véhicules de secours, niches de sécurité et niches incendie, garages, stations souterraines, puits de ventilation, etc.).

4.1 STRUCTURES INTERNES EN SECTION COURANTE

On trouve ici trois types de structures de second œuvre construites à l'intérieur du tunnel :

a) les faux plafonds et cloisons constituant des gaines de ventilation : pour les ouvrages comprenant une ventilation transversale, la construction d'une dalle de ventilation au-dessus de l'espace circulé est nécessaire. S'il est prévu une gaine de désenfumage et une ou plusieurs gaines d'amenée d'air frais, des cloisons verticales sont construites entre la dalle et la voûte du revêtement ;

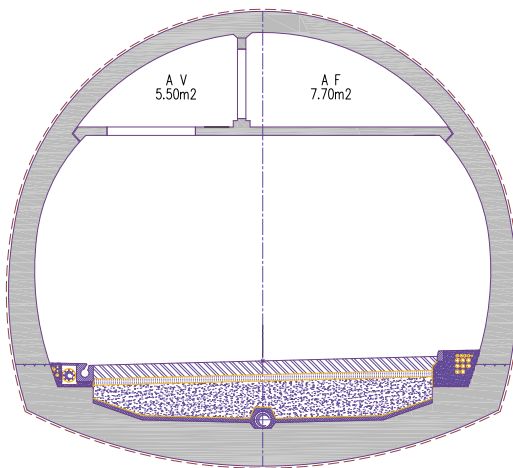


Illustration 45 : Exemple d'ouvrage comportant une gaine de ventilation

b) les dalles supportant les charges routières : dans les ouvrages creusés au tunnelier notamment, il peut être intéressant de construire une dalle qui supportera la chaussée et sous laquelle un espace peut être dédié soit à la ventilation transversale, soit à une ou plusieurs gaines techniques qui recevront les réseaux divers ;

c) les gaines techniques sous chaussée : également pour les ouvrages construits au tunnelier il peut être inséré dans les remblais nécessaires pour la couche de forme de la chaussée, une gaine en béton qui permettra le cheminement des réseaux.

Les deux derniers types sont peu répandus dans les projets d'infrastructures. Ce document ne propose de prix que pour le premier type.

Ainsi, pour un tunnel routier de géométrie D11, le prix des gaines de ventilation (1 dalle et 1 cloison) varie entre 1 800 et 2 200 € HT par mètre de tunnel.

4.2 GALERIES DE SÉCURITÉ ET ISSUES DE SECOURS EN LIAISON DIRECTE AVEC L'EXTÉRIEUR

Pour les tunnels monotube une solution consiste à créer une galerie parallèle au tube principal, raccordée à celui-ci par des rameaux, ou une ou plusieurs galeries en liaison directe avec l'extérieur.

Réglementairement, ce sont des galeries de section limitée.

Le prix de ces galeries dépend principalement des conditions géologiques comme pour les grandes sections, mais aussi des conditions propres à leur exécution qui peuvent avoir une forte

incidence sur les prix forfaitaires dits de prestations générales notamment l'importance du chantier.

Pour une galerie de section limitée aux exigences réglementaires (soit environ 11 m² excavés) le prix du profil type, y compris étanchéité, revêtement coffré et radier et prestations générales peut varier :

- de 3 000 à 8 000 € HT par mètre de galerie, pour des classes de soutènements équivalentes à S2 et S7 (cf. §3.3.1) ;
- ce qui correspond à une fourchette de 280 à 730 € HT si l'on emploie le ratio par m³ excavé pour les mêmes classes de soutènement ;

pour un chantier de faible importance, limité à cette galerie (environ 2 M€ HT).

Pour une galerie parallèle, de section de l'ordre de 20 m² excavés, le prix du profil type, y compris étanchéité, revêtement coffré et radier et prestations générales peut varier :

- de 6 000 à 12 000 € HT par mètre de galerie, pour des classes de soutènements équivalentes à S1 et S7 (cf. §3.3.1) ;
- ce qui correspond à une fourchette de 300 à 600 € HT par m³ excavé pour les mêmes classes de soutènement ;

pour un chantier de moyenne importance, limité à cette galerie (environ 20 M€ HT).

4.3 OUVRAGES SINGULIERS LIÉS À L'EXPLOITATION ET À LA SÉCURITÉ

Les ouvrages souterrains singuliers liés à l'exploitation et à la sécurité comprennent :

1. les aménagements pour l'évacuation et la protection des usagers et l'accès des secours (communications entre tubes unidirectionnels, communications entre tube bidirectionnel et galerie de sécurité), les aménagements destinés aux véhicules de secours (communications entre tubes unidirectionnels, galeries de retournement dans un tube bidirectionnel) ;

2. niches de sécurité et niches incendie ;
3. galeries et puits de ventilation ;
4. locaux techniques ou stations de ventilation, en souterrain.

Selon les dispositions de sécurité retenues et la configuration du site, le tunnel comprend tout ou partie des ouvrages indiqués.

Ouvrages singuliers liés à l'exploitation et à la sécurité		Coût
Cas général	Ratio global ⁷	5 à 7 % du poste « Ouvrages souterrains en section courante » de l'estimation technique
	<i>Dont inter-tubes</i> <i>Dont autres ouvrages</i>	<i>7 500 à 15 000 € HT/m</i> <i>1 à 2 % du poste « Ouvrages souterrains en section courante »</i>
Ouvrages complémentaires particuliers	Puits de ventilation	1 300 à 1 800 € HT / m ³ excavé si hauteur < 50 m 1 600 à 2 200 € HT / m ³ excavé si hauteur > 50 m
	Autres ouvrages souterrains tels que station souterraine par exemple	Étude spécifique

Tableau 15 : Prix de référence pour les ouvrages souterrains complémentaires liés à l'exploitation et à la sécurité (valeur 01/01/2015, actualisation TP05a)

7. Ce ratio est valable pour les tunnels courants en méthode conventionnelle ou au tunnelier sans voussoir. Il ne tient pas compte de dispositions spécifiques qui peuvent s'avérer nécessaires notamment pour le débouché des revêtements de voussoirs ou dans le cas de conditions géotechniques difficiles (sous nappe, conditions géologiques très défavorables, traitements spéciaux à prévoir).

ANNEXES

5.1 REPRÉSENTATION STATISTIQUE DES DONNÉES

Les boîtes de Tukey plus communément appelées « boîtes à moustaches », sont utilisées pour la représentation statistique des données. Les informations statistiques suivantes sont représentées pour une liste de valeurs donnée :

- son minimum, son maximum et sa moyenne arithmétique ;
- son premier quartile (q_1) et son troisième quartile (q_3), qui séparent les quarts inférieurs et supérieurs des données ;
- sa médiane (ou deuxième quartile) qui divise l'ensemble des données en deux groupes de même effectif ;
- son écart interquartile $q_3 - q_1$ (rectangle jaune), représentant l'étendue de la liste après élimination des 25 % des valeurs plus faibles et plus fortes.

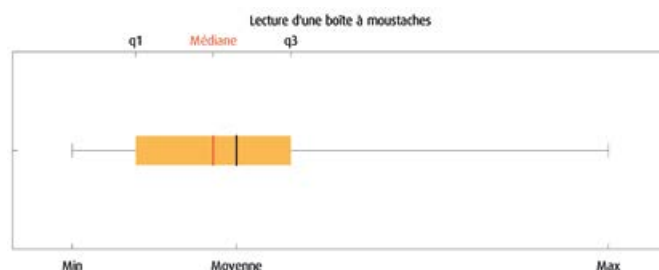


Illustration 46 : Comment lire une boîte à moustaches ?

5.2 LISTE DES OUVRAGES COMPOSANT LE RETOUR D'EXPÉRIENCE

Tunnels routiers

Nom	Voie	Département	Mise en service
Foix	RN 20	Ariège	2001
Traversée de Toulon	A 50	Var	2002
Somport	RN 134	Pyrénées-Atlantiques	2003
Pont de l'Église	RD 902	Haute-Savoie	2005
Saint-Vallier	RD 51	Drôme	2005
Saorge-Amont	RD 6204	Alpes-Maritimes	2005
Vierge	A 75	Hérault	2005
Franchet	RD 902	Savoie	2006
Lioran	RN 122	Cantal	2007
Schirmeck	RD 1420	Bas-Rhin	2007
Sinard	A 51	Isère	2007
Grands Goulets	RD 518	Drôme	2008
Osse	RN 134	Pyrénées-Atlantiques	2009
Sommand	RD 308	Haute-Savoie	2009
Bocognano	RN 193	Corse-du-Sud	2010
Bois de Peu	RN 57	Doubs	2011
Crête de Fontain	RN 57	Doubs	2011
La Bussière	A 89	Rhône	2013
Challosset	A 89	Rhône	2013
Violay	A 89	Loire	2013
Lino	RN 274	Côte-d'Or	2014
Saint-Béat	RN 125	Haute-Garonne	/
Chabrières	RN 85	Alpes-de-Haute-Provence	2015
Propriano	RN 196	Corse-du-Sud	/
Borne Romaine	A 8	Alpes-Maritimes	/
Traversée de Toulon Sud	A 50	Var	2014

Tableau 16 : Liste des tunnels routiers composant le retour d'expérience

Tunnels ferroviaires

Nom	Voie	Type de voie	Fin de construction
Pennes-Mirabeau	752000	2 voies	1997
Marseille	752000	2 voies	1997
Meyssier	752000	2 voies	1993
Galaure	752000	2 voies	1993
Lambesc	752000	2 voies	1997
Tartaiguille	752000	2 voies	1999
Chavanne	14000	2 voies	2009
Saverne	/	2 fois 1 voie	2015

Tableau 17 : Liste des tunnels ferroviaires composant le retour d'expérience

Galerie de sécurité

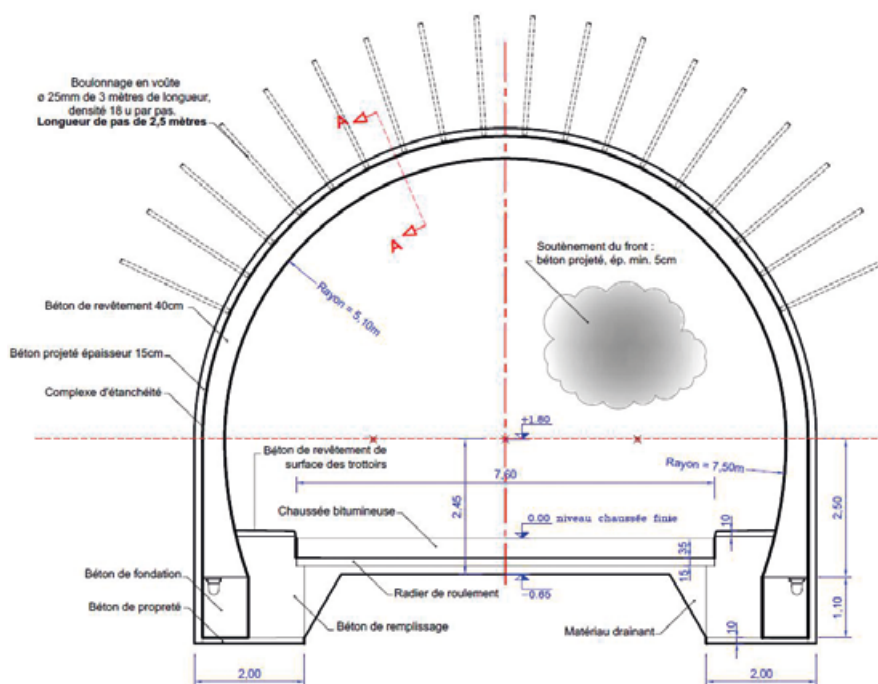
Nom	Voie	Département	Mise en service
Maurice Lemaire	RN 159	88-68	2005
Fréjus	A 43	73	/
Siaix	RN 90	73	/
Chat	RD 1504	73	/

Tableau 18 : Liste des galeries de sécurité composant le retour d'expérience

5.3 EXCAVATION EN MÉTHODE CONVENTIONNELLE

5.3.1 Classes de soutènement

Routier – D10 - S3



Routier – D10 - S5

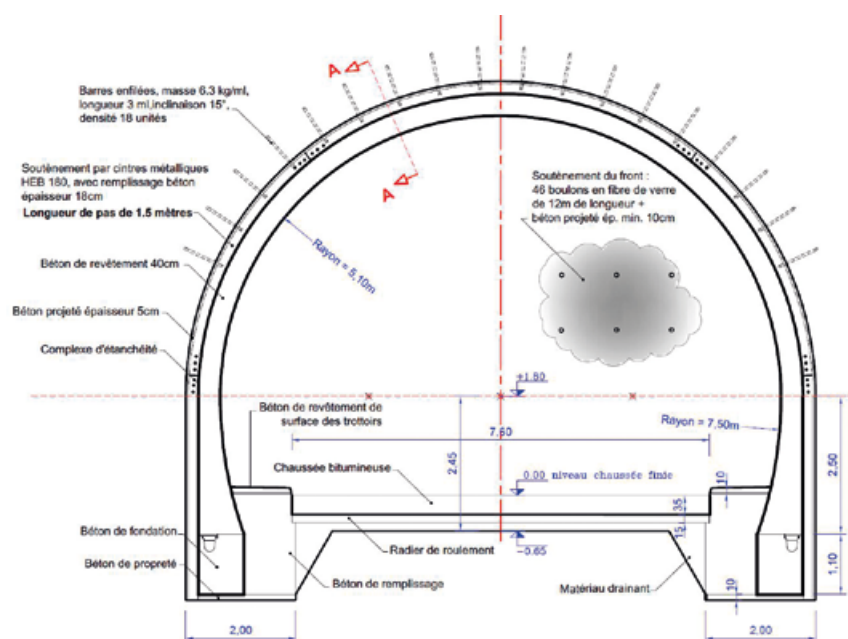
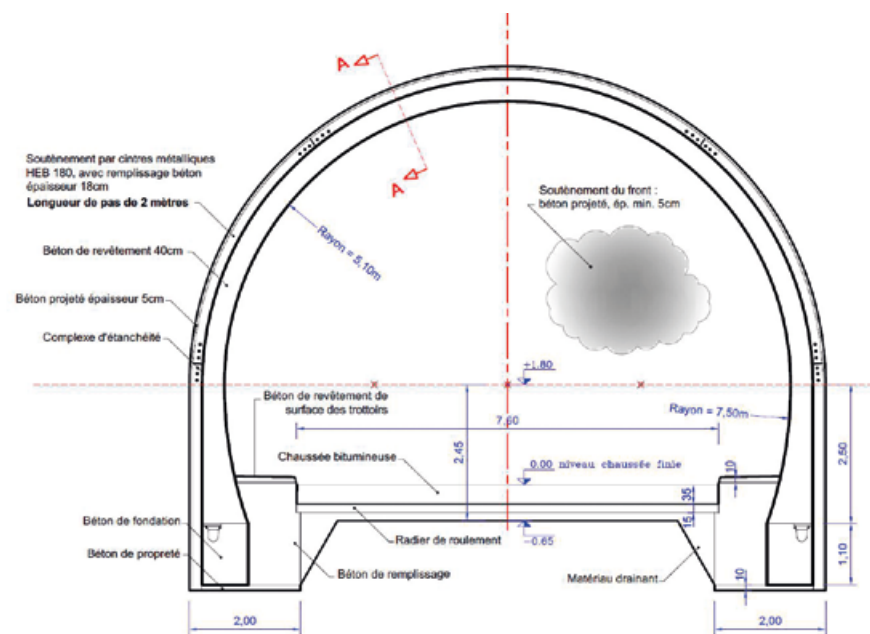
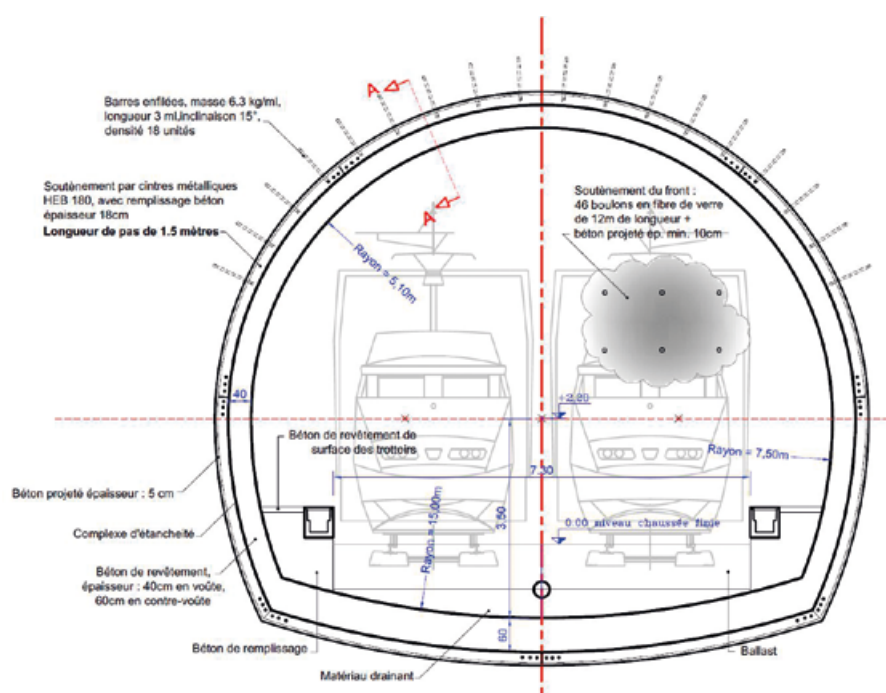


Illustration 47 : Dessins de quelques classes de soutènement pour D10

Routier – D10 - S7



Ferroviaire – D10 - S3



5.3.2 Données pour chaque géométrie D8 à D12 : cf. cahier séparé

5.3.2.a Principales caractéristiques des classes de soutènement retenues

Tableau de définition des classes de soutènement S1 à S11 et étanchéité-revêtement associés.

5.3.2.b Prix des classes de soutènement

Prix au mètre et au mètre cube excavé, en fonction de la cadence de creusement, pour les 11 classes de soutènement S1 à S11 (présentation des prix pour un creusement en 3 x 8).

5.3.2.c Prix des répartitions de classes de soutènement

Prix au mètre et au mètre cube excavé, en fonction de la cadence de creusement, pour les 5 répartitions de classes de soutènement A à E (présentation des prix pour un creusement en 3 x 8).

5.3.2.d Incidence des cadences sur les prix

Comparaison des prix des répartitions de classes de soutènement pour un creusement en 2 ou 3 postes/jour.

5.3.2.e Prix du génie civil en section courante en fonction des profils types utilisés

Histogrammes pour les 11 profils P1 à P11 et les répartitions A à E, associés aux classes de soutènement S1 à S11.

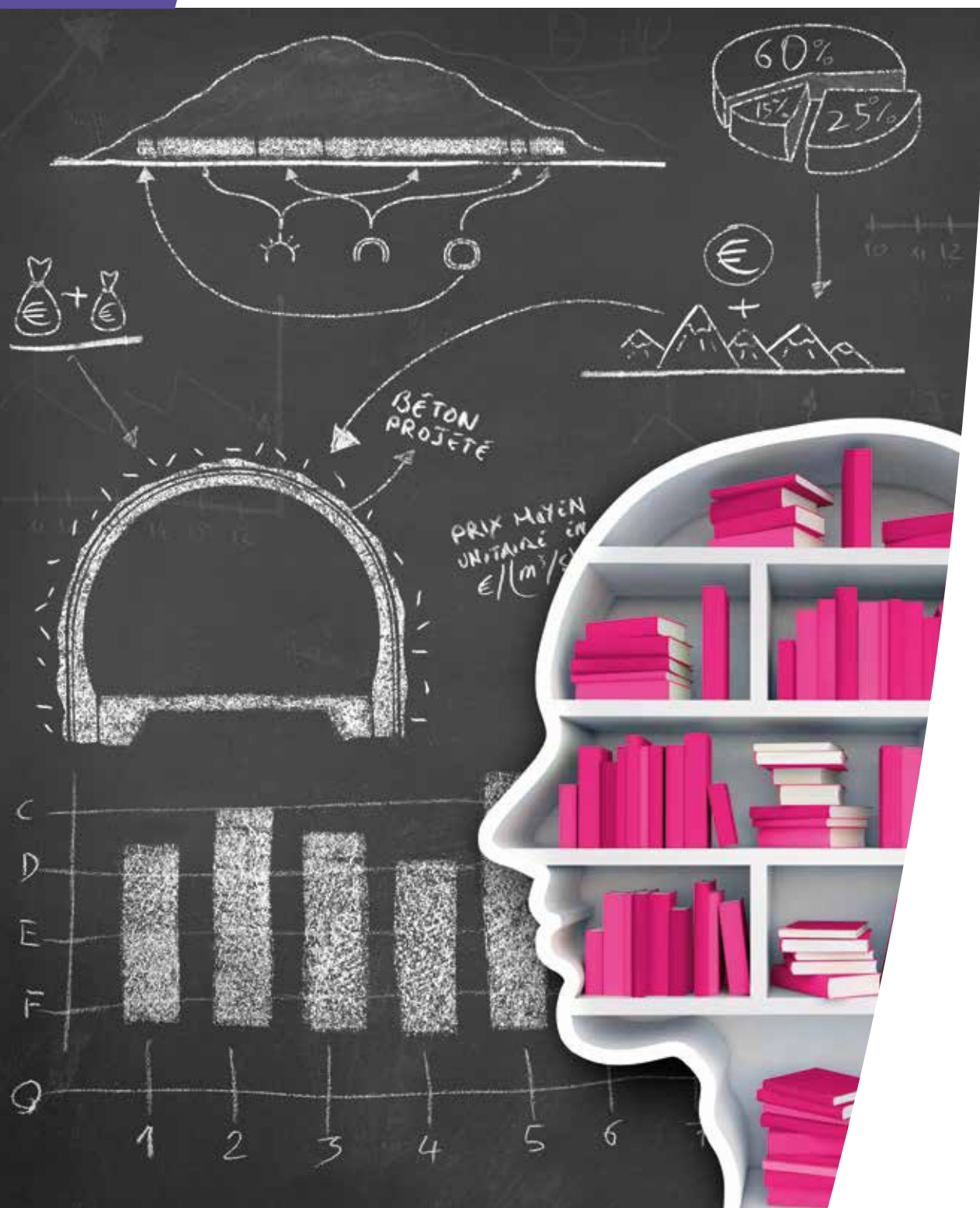


Centre d'Études des Tunnels
25 avenue François Mitterrand
Case n°1
69674 BRON - FRANCE
Tél. 33 (0)4 72 14 34 00
Fax. 33 (0)4 72 14 34 30
cetu@developpement-durable.gouv.fr



FASCICULE 2

Annexe – Excavation en méthode conventionnelle



AVERTISSEMENT

Les documents d'information ont pour but de fournir une information sur une technique ou un problème nouveau ou insuffisamment traité par ailleurs. Le lecteur pourra y trouver des repères susceptibles de l'aider dans son activité. Le contenu et les éventuelles conclusions présentés ne doivent pas être considérés comme des recommandations du CETU. Bien que le maximum soit fait pour s'assurer de la fiabilité des sources utilisées, la responsabilité du CETU ou des auteurs du document ne saurait être engagée.

TABLE DES MATIÈRES

GÉOMÉTRIE D8 – TUNNEL FERROVIAIRE	4
GÉOMÉTRIE D9 – TUNNEL FERROVIAIRE	8
GÉOMÉTRIE D10 – TUNNEL FERROVIAIRE	12
GÉOMÉTRIE D10 – TUNNEL ROUTIER	16
GÉOMÉTRIE D11 – TUNNEL FERROVIAIRE	20
GÉOMÉTRIE D11 – TUNNEL ROUTIER	24
GÉOMÉTRIE D12 – TUNNEL FERROVIAIRE	28
GÉOMÉTRIE D12 – TUNNEL ROUTIER	32

GÉOMÉTRIE D8 – TUNNEL FERROVIAIRE

Principales caractéristiques des classes de soutènement retenues (notées S1 à S11)

Géométrie D8 – tunnel ferroviaire	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11
Rayon intrados : 4,1 m	Contre-voûte non cintrée								Contre-voûte cintrée		
	Boulons				Cintres				Cintres		
					Enfilage				Enfilage		
					Voûte parapluie				Voûte parapluie		
Pas de creusement (longueur de référence)	4,00 m	3,00 m	2,50 m	2,00 m	2,00 m	1,50 m	1,50 m	1,25 m	1,50 m	1,25 m	1,00 m
Section excavée (cf. schéma)	1										
Section min. (ligne A + 0,15 m)	77,26 m²	78,66 m²	79,79 m²	81,21 m²	82,63 m²	82,63 m²	82,63 m²	82,63 m²	89,14 m²	89,14 m²	89,14 m²
Section max. (ligne A + 0,15 m)								111,35 m²			117,78 m²
Rayon de la voûte (ligne A)	4,54 m	4,59 m	4,63 m	4,68 m	4,73 m	4,73 m	4,73 m	5,23 m	4,83 m	4,83 m	5,33 m
Périmètre de la voûte (voûte + piédroits ; ligne S)	19,99 m	19,99 m	19,99 m	19,99 m	19,99 m	19,99 m	19,99 m	21,54 m	20,30 m	20,30 m	21,85 m
Largeur en base de piédroits (valeur approximative IS ou IA)	9,08 m	9,18 m	9,26 m	9,36 m	9,46 m	9,46 m	9,46 m	10,46 m	11,95 m	11,95 m	12,29 m
Soutènements	2										
En voûte											
Épaisseur de béton projeté	0,04 m	0,09 m	0,13 m	0,18 m	0,23 m ¹	0,23 m ¹	0,23 m ¹	0,23 m ¹	0,23 m ¹	0,23 m ¹	0,23 m ¹
Nombre de boulons par pas	7 u/pas	11 u/pas	14 u/pas	19 u/pas							
Nombre de boulons par mètre	1,8 u/m	3,7 u/m	5,6 u/m	9,5 u/m							
Longueur des boulons	3,00 m	3,00 m	3,00 m	3,00 m							
Type de cintre (1u/pas)					HEB 180	HEB 180	HEB 180	HEB 180	HEB 180	HEB 180	HEB 180
En contre-voûte											
Épaisseur de béton projeté	0,05 m	0,05 m	0,05 m	0,05 m	0,05 m	0,05 m	0,05 m	0,05 m	0,23 m ¹	0,23 m ¹	0,23 m ¹
Type de cintre (1u/pas)									HEB 180	HEB 180	HEB 180
Au front											
Épaisseur de béton projeté			0,05 m	0,10 m	0,05 m	0,10 m	0,10 m	0,10 m	0,10 m	0,10 m	0,15 m
Pré-soutènements											
Boulons de front	3										
Nombre de boulons						16 u	16 u	15 u	17 u	17 u	16 u
Longueur des boulons						12,00 m	12,00 m	17,50 m	12,00 m	12,50 m	18,00 m
Mis en œuvre tous les ...						4,0 pas	4,0 pas	3,5 pas	4,0 pas	5,0 pas	4,5 pas
Mis en œuvre tous les ...						6,00 m	6,00 m	4,38 m	6,00 m	6,25 m	4,50 m
Nombre total des boulons visibles au front						32 u	32 u	60 u	34 u	34 u	62 u
Répartition des boulons au front (sur Smin, hors c-v)						2,0 m²/u	2,0 m²/u	1,3 m²/u	2,0 m²/u	2,0 m²/u	1,3 m²/u
Posés en ...						2 fois	2 fois	4 fois	2 fois	2 fois	4 fois
Enfilage	4										
Masse linéique des barres							6,3 kg/m			6,3 kg/m	
Nombre de barres							15 u			15 u	
Longueur des barres							3,00 m			3,00 m	
Mises en œuvre tous les ...							1,0 pas			1,0 pas	
Mises en œuvre tous les ...							1,50 m			1,25 m	
Entraxe approximatif (sur 120° ; ligne A)							0,71 m			0,72 m	
Voûte parapluie	5										
Masse linéique des tubes								26,2 kg/m			26,2 kg/m
Nombre de tubes								35 u			36 u
Longueur des tubes								17,50 m			18,00 m
Mis en œuvre tous les ...								7,0 pas			9,0 pas
Mis en œuvre tous les ...								8,75 m			9,00 m
Entraxe approximatif (sur 180° ; ligne A min)								0,50 m			0,50 m
Surexcavation max théorique en voûte (α = 6°)								0,92 m			0,95 m

Étanchéité et revêtements associés

Étanchéité	6										
En voûte (ligne S)		19,99 m²	19,99 m²	19,99 m²	19,99 m²	19,99 m²	19,99 m²	21,54 m²	20,30 m²	20,30 m²	21,85 m²
En contre-voûte									11,95 m²	11,95 m²	12,29 m²
Revêtement : Épaisseur de béton	7										
En voûte		0,40 m ¹	0,40 m ¹	0,40 m ¹	0,40 m ¹	0,40 m	0,40 m	0,40 m	0,50 m	0,50 m	1,00 m
En contre-voûte		0,60 m	0,60 m	0,60 m	0,60 m	0,60 m	0,60 m	0,60 m	0,75 m	0,75 m	0,75 m

- Variations de la longueur de pas autour de la longueur de référence :
Longueur de pas constante pour P7, P8, P10 et P11.
Pour les autres profils (P1 à P6 et P9) :
± 0,50 m pour Lg référence ≥ 2 m
± 0,25 m pour 1 m < Lg référence < 2 m
± 0 m pour Lg référence ≤ 1 m

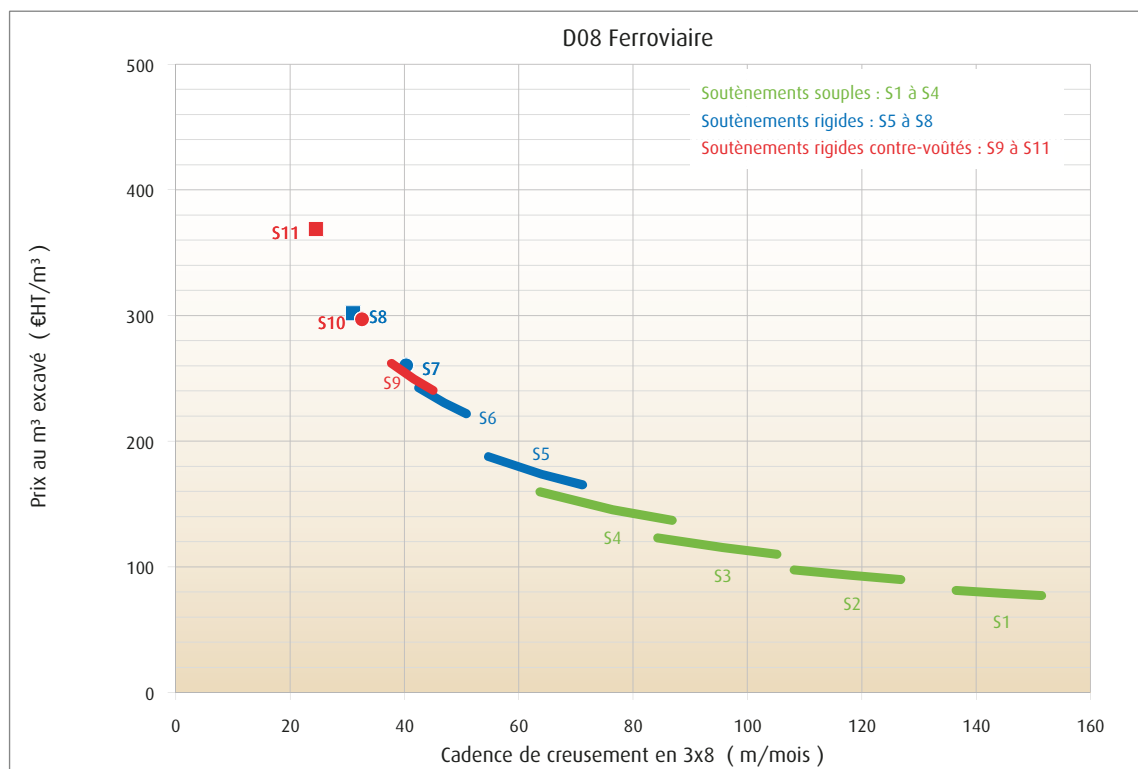
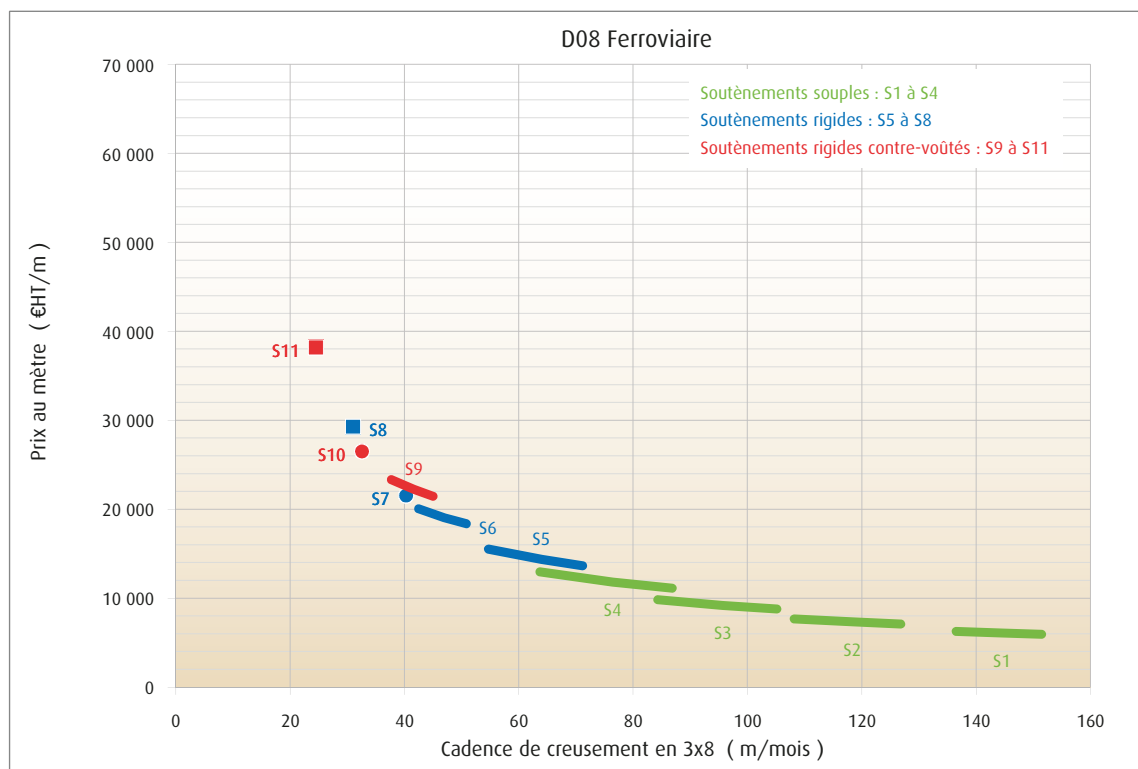
Masse linéique des profilés métalliques
HEB 180 : 51,2 kg/m
HEB 200 : 61,3 kg/m

1. – Les hors-profils sont pris en compte via un décalage de 0,15 m du gabarit d'excavation ou « ligne A » (cf. fascicule 69 du CCTG – art. II.1.1). Les 0,15 m au-delà de la ligne A sont comblés soit par du béton de revêtement (cas des profils boulonnés), soit par du béton projeté (cas des profils cintrés).
Pour les profils avec voûte parapluie (P8 et P11), il s'agit de valeurs moyennes.
2. – Pour les profils boulonnés, les boulons en voûte sont des boulons à ancrage réparti, non scellés.
Pour les profils cintrés, on considère 1 cintre par pas. L'épaisseur de béton projeté est égale à 0,05 m (1^{re} passe) + épaisseur du cintre (2^e passe : remplissage).
3. – Il s'agit de boulons de front « longs », en fibre de verre.
4. – Il s'agit d'enfilage « court », mis en œuvre à chaque pas de creusement, de type HA32 (6,3 kg/m).
5. – Les tubes de voûte parapluie sont de type Ø109/127 (26,2 kg/m de tube). Ils sont mis en œuvre avec une inclinaison de 6°.
- 6-7. – Pour les profils avec voûte parapluie (P8 et P11), il s'agit de valeurs moyennes.

GÉOMÉTRIE D8 – TUNNEL FERROVIAIRE

Prix des classes de soutènement

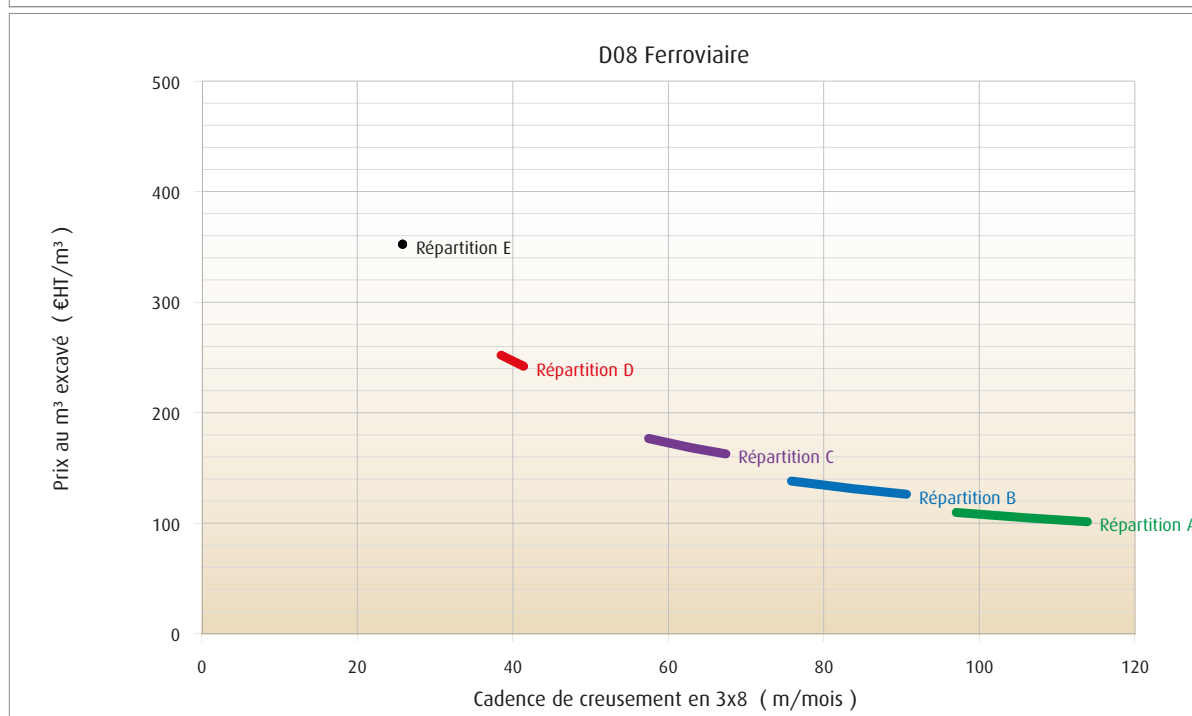
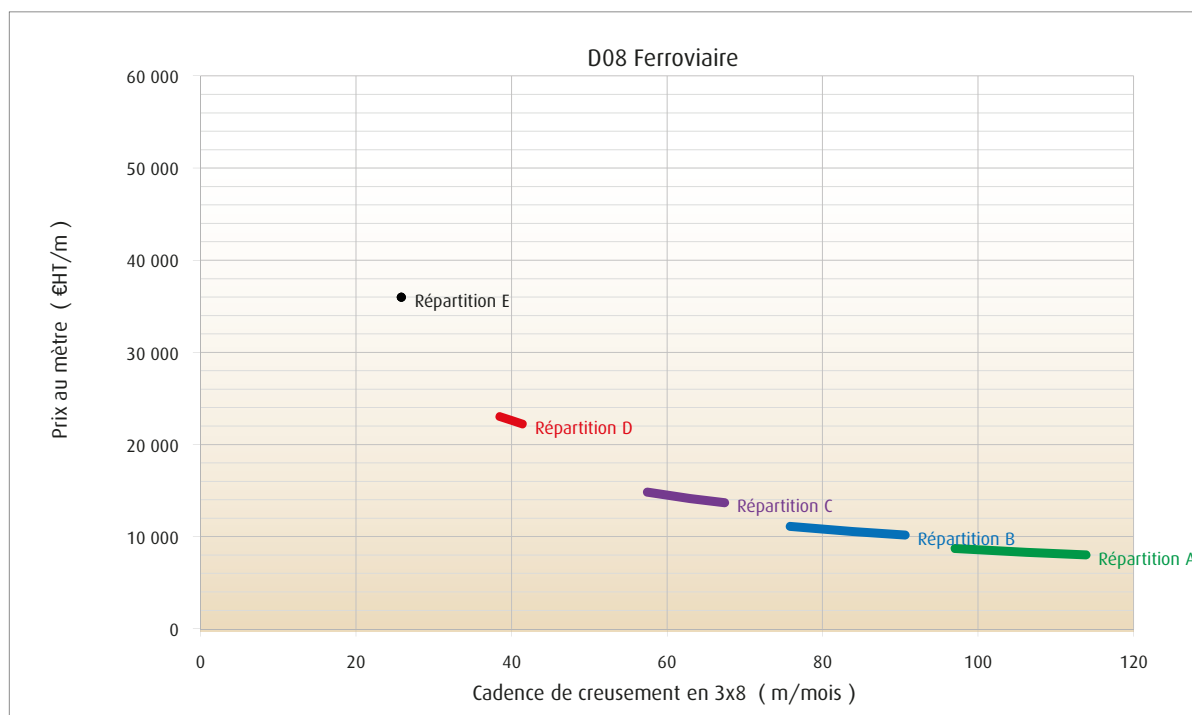
Les graphes ci-dessous présentent les prix des classes de soutènement S1 à S11, au mètre et au mètre cube excavé, en fonction des cadences de creusement (creusement en 3 postes/jour).



Prix des répartitions de classes de soutènement A à E, au mètre et au mètre cube excavé, en fonction des cadences de creusement (creusement en 3 postes/jour).

Les graphes ci-dessous présentent les prix des répartitions de classes de soutènement A à E, au mètre et au mètre cube excavé, en fonction des cadences de creusement (creusement en 3 postes/jour).

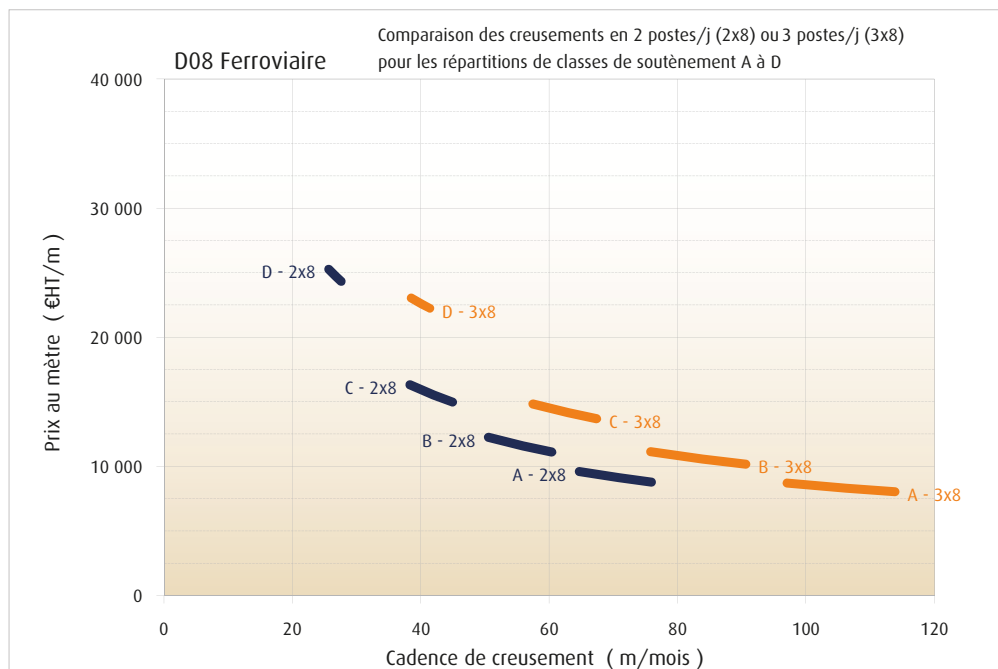
	A	B	C	D	E
Part de S1 (souple)	60 %	35 %	—	—	—
Part de S3 (souple)	30 %	40 %	60 %	20 %	—
Part de S6 (rigide)	10 %	25 %	30 %	35 %	—
Part de S8 (rigide)	—	—	10 %	35 %	25 %
Part de S11 (rigide contre-voûté)	—	—	—	10 %	75 %



GÉOMÉTRIE D8 – TUNNEL FERROVIAIRE

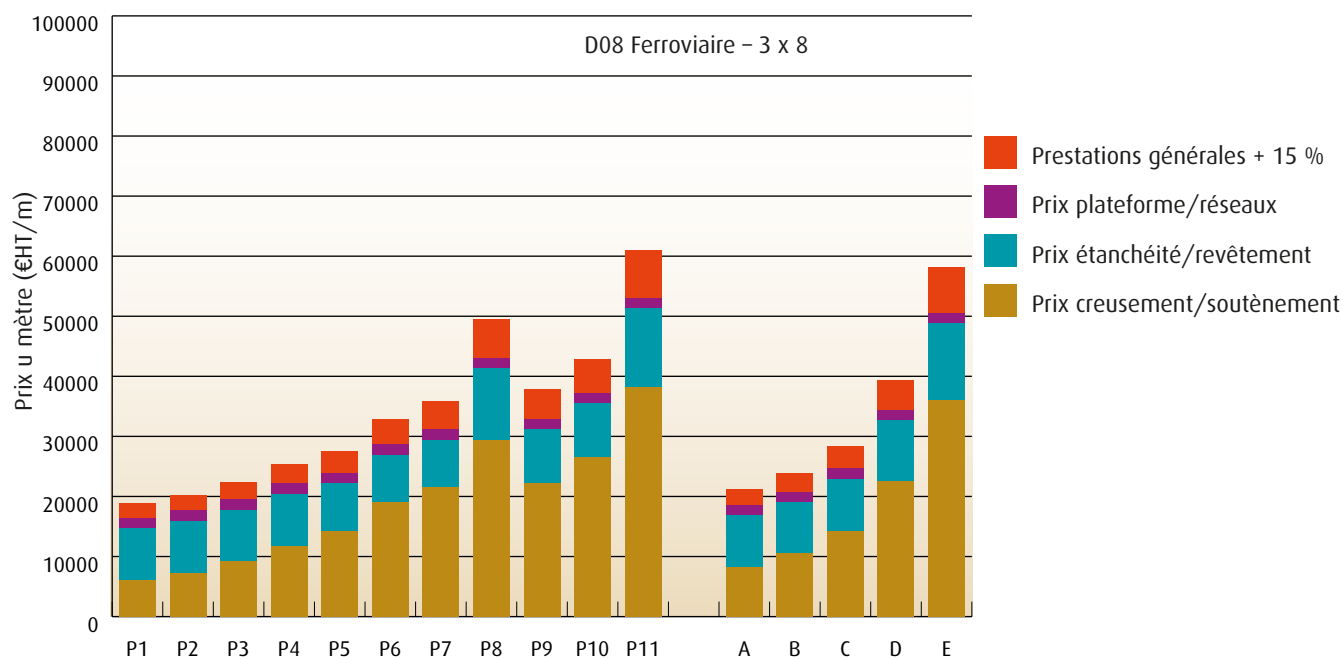
Incidence des cadences sur les prix

Le graphe ci-dessous présente les prix des répartitions de classes de soutènement A à D, au mètre, en fonction des cadences de creusement selon deux hypothèses : creusement en 2 postes/jour (2 x 8) et 3 postes/jour (3 x 8).



Prix des profils types

Les histogrammes ci-dessous présentent les prix des profils types associés aux classes de soutènement S1 à S11 et aux répartitions A à E, au mètre.



GÉOMÉTRIE D9 – TUNNEL FERROVIAIRE

Principales caractéristiques des classes de soutènement retenues (notées S1 à S11)

Géométrie D9 – tunnel ferroviaire	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11
Rayon intrados : 4,6 m	Contre-voûte non cintrée								Contre-voûte cintrée		
	Boulons				Cintres				Cintres		
					Enfilage		Voûte parapluie		Enfilage		Voûte parapluie
Pas de creusement (longueur de référence)	4,00 m	3,00 m	2,50 m	2,00 m	2,00 m	1,50 m	1,50 m	1,25 m	1,50 m	1,25 m	1,00 m
Section excavée (cf. schéma)	1										
Section min. (ligne A + 0,15 m)	90,51 m²	91,97 m²	93,14 m²	94,60 m²	95,78 m²	95,78 m²	95,78 m²	95,78 m²	103,16 m²	103,16 m²	103,16 m²
Section max. (ligne A + 0,15 m)								125,47 m²			132,28 m²
Rayon de la voûte (ligne A)	5,05 m	5,10 m	5,14 m	5,19 m	5,23 m	5,23 m	5,23 m	5,73 m	5,33 m	5,33 m	5,83 m
Périmètre de la voûte (voûte + piédroits ; ligne S)	21,53 m	21,53 m	21,53 m	21,53 m	21,53 m	21,53 m	21,53 m	23,08 m	21,84 m	21,84 m	23,40 m
Largeur en base de piédroits (valeur approximative IS ou IA)	10,10 m	10,20 m	10,28 m	10,38 m	10,46 m	10,46 m	10,46 m	11,46 m	13,19 m	13,19 m	13,46 m
Soutènements	2										
En voûte											
Épaisseur de béton projeté	0,05 m	0,10 m	0,14 m	0,19 m	0,23 m ¹	0,23 m ¹	0,23 m ¹	0,23 m ¹	0,23 m ¹	0,23 m ¹	0,23 m ¹
Nombre de boulons par pas	8 u/pas	13 u/pas	16 u/pas	22 u/pas							
Nombre de boulons par mètre	2,0 u/m	4,3 u/m	6,4 u/m	11,0 u/m							
Longueur des boulons	3,00 m	3,00 m	3,00 m	3,00 m							
Type de cintre (1u/pas)					HEB 180	HEB 180	HEB 180	HEB 180	HEB 180	HEB 180	HEB 180
En contre-voûte											
Épaisseur de béton projeté	0,05 m	0,05 m	0,05 m	0,05 m	0,05 m	0,05 m	0,05 m	0,05 m	0,23 m ¹	0,23 m ¹	0,23 m ¹
Type de cintre (1u/pas)									HEB 180	HEB 180	HEB 180
Au front											
Épaisseur de béton projeté			0,05 m	0,10 m	0,05 m	0,10 m	0,10 m	0,10 m	0,10 m	0,10 m	0,15 m
Pré-soutènements											
Boulons de front	3										
Nombre de boulons						19 u	19 u	18 u	19 u	19 u	18 u
Longueur des boulons						12,00 m	12,00 m	17,50 m	12,00 m	12,50 m	18,00 m
Mis en œuvre tous les ...						4,0 pas	4,0 pas	3,5 pas	4,0 pas	5,0 pas	4,5 pas
Mis en œuvre tous les ...						6,00 m	6,00 m	4,38 m	6,00 m	6,25 m	4,50 m
Nombre total des boulons visibles au front						38 u	38 u	70 u	38 u	38 u	72 u
Répartition des boulons au front (sur Smin, hors c-v)						2,0 m²/u	2,0 m²/u	1,3 m²/u	2,0 m²/u	2,0 m²/u	1,3 m²/u
Posés en ...						2 fois	2 fois	4 fois	2 fois	2 fois	4 fois
Enfilage	4										
Masse linéique des barres							6,3 kg/m			6,3 kg/m	
Nombre de barres							16 u			17 u	
Longueur des barres							3,00 m			3,00 m	
Mises en œuvre tous les ...							1,0 pas			1,0 pas	
Mises en œuvre tous les ...							1,50 m			1,25 m	
Entraxe approximatif (sur 120° ; ligne A)							0,73 m			0,70 m	
Voûte parapluie	5										
Masse linéique des tubes								26,2 kg/m			26,2 kg/m
Nombre de tubes								38 u			39 u
Longueur des tubes								17,50 m			18,00 m
Mis en œuvre tous les ...								7,0 pas			9,0 pas
Mis en œuvre tous les ...								8,75 m			9,00 m
Entraxe approximatif (sur 180° ; ligne A min)								0,50 m			0,50 m
Surexcavation max théorique en voûte (α = 6°)								0,92 m			0,95 m

Étanchéité et revêtements associés

Étanchéité	6										
En voûte (ligne S)	21,53 m²	21,53 m²	21,53 m²	21,53 m²	21,53 m²	21,53 m²	21,53 m²	23,08 m²	21,84 m²	21,84 m²	23,40 m²
En contre-voûte									13,19 m²	13,19 m²	13,46 m²
Revêtement : Épaisseur de béton	7										
En voûte	0,40 m ¹	0,40 m ¹	0,40 m ¹	0,40 m ¹	0,40 m	0,40 m	0,40 m	0,90 m	0,50 m	0,50 m	1,00 m
En contre-voûte	0,60 m	0,60 m	0,60 m	0,60 m	0,60 m	0,60 m	0,60 m	0,60 m	0,75 m	0,75 m	0,75 m

- Variations de la longueur de pas autour de la longueur de référence :
Longueur de pas constante pour P7, P8, P10 et P11.
Pour les autres profils (P1 à P6 et P9) :
± 0,50 m pour Lg référence ≥ 2 m
± 0,25 m pour 1 m < Lg référence < 2 m
± 0 m pour Lg référence ≤ 1m

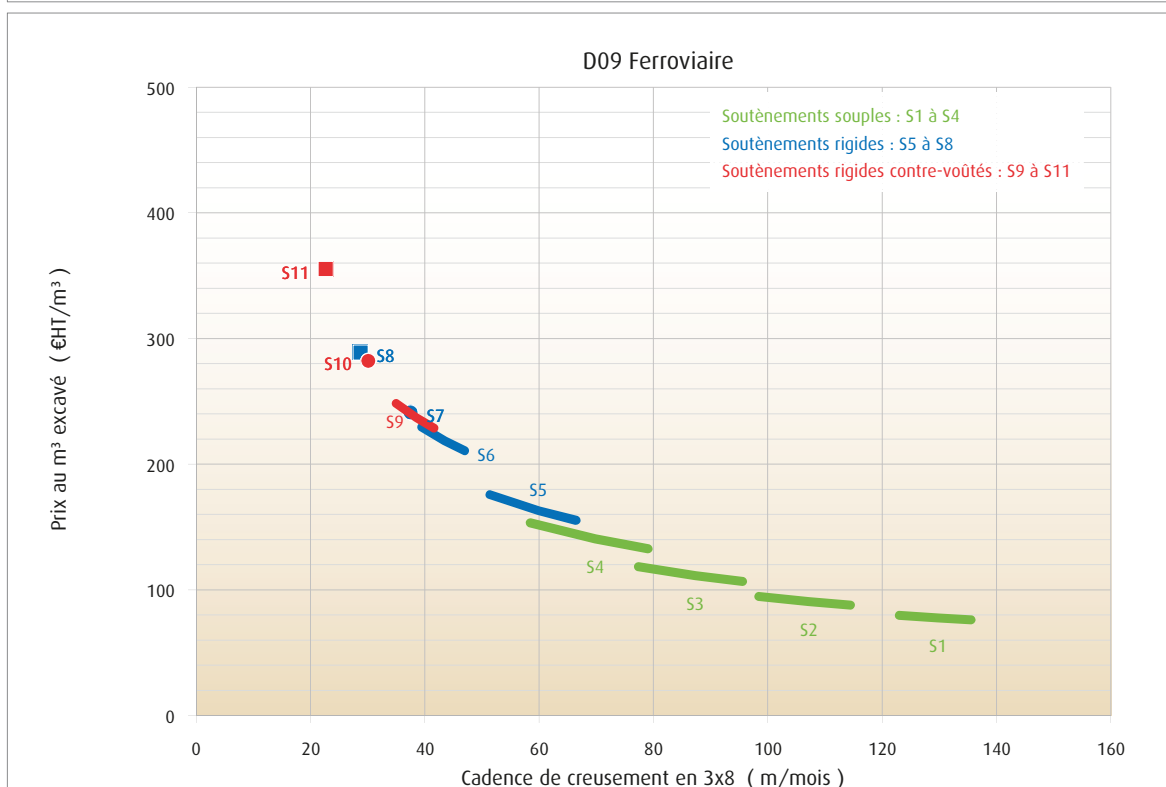
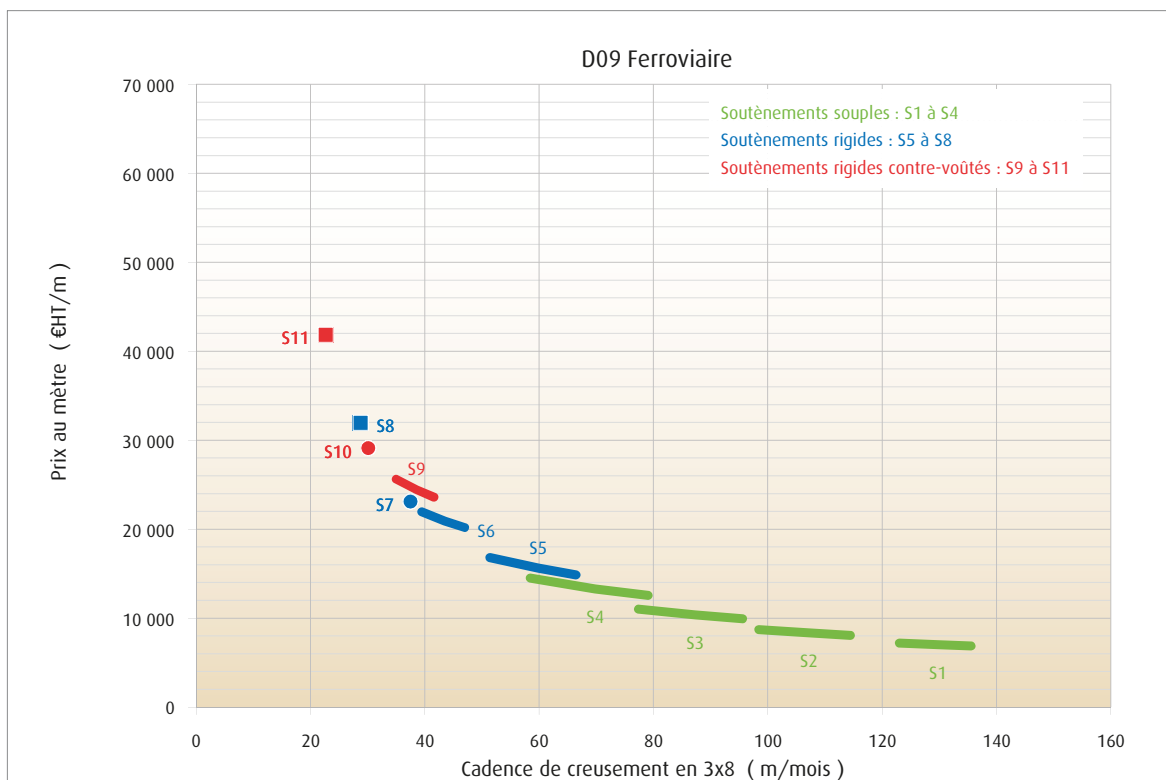
Masse linéique des profilés métalliques
HEB 180 : 51,2 kg/m
HEB 200 : 61,3 kg/m

- Les hors-profils sont pris en compte via un décalage de 0,15 m du gabarit d'excavation ou « ligne A » (cf. fascicule 69 du CCTG – art. II.1.1). Les 0,15 m au-delà de la ligne A sont comblés soit par du béton de revêtement (cas des profils boulonnés), soit par du béton projeté (cas des profils cintrés).
Pour les profils avec voûte parapluie (P8 et P11), il s'agit de valeurs moyennes.
- Pour les profils boulonnés, les boulons en voûte sont des boulons à ancrage réparti, non scellés.
Pour les profils cintrés, on considère 1 cintre par pas. L'épaisseur de béton projeté est égale à 0,05 m (1^{re} passe) + épaisseur du cintre (2^e passe : remplissage).
- Il s'agit de boulons de front « longs », en fibre de verre.
- Il s'agit d'enfilage « court », mis en œuvre à chaque pas de creusement, de type HA32 (6,3 kg/m).
- Les tubes de voûte parapluie sont de type Ø109/127 (26,2 kg/m de tube). Ils sont mis en œuvre avec une inclinaison de 6°.
- Pour les profils avec voûte parapluie (P8 et P11), il s'agit de valeurs moyennes.

GÉOMÉTRIE D9 – TUNNEL FERROVIAIRE

Prix des classes de soutènement

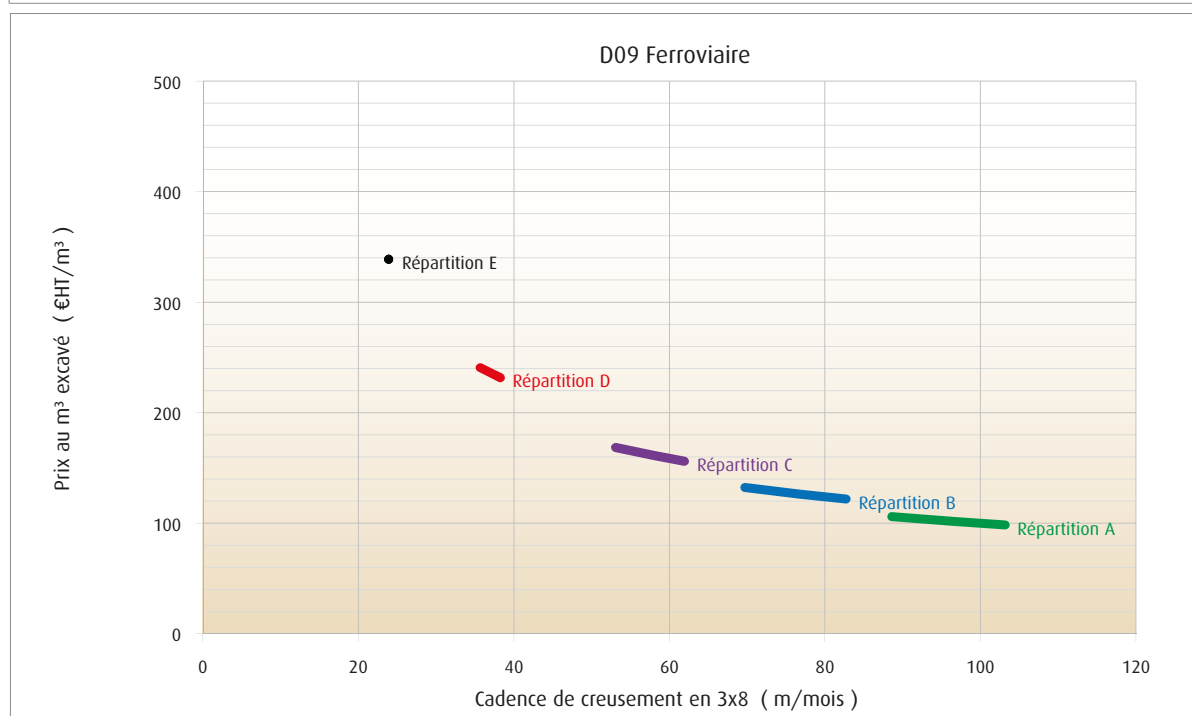
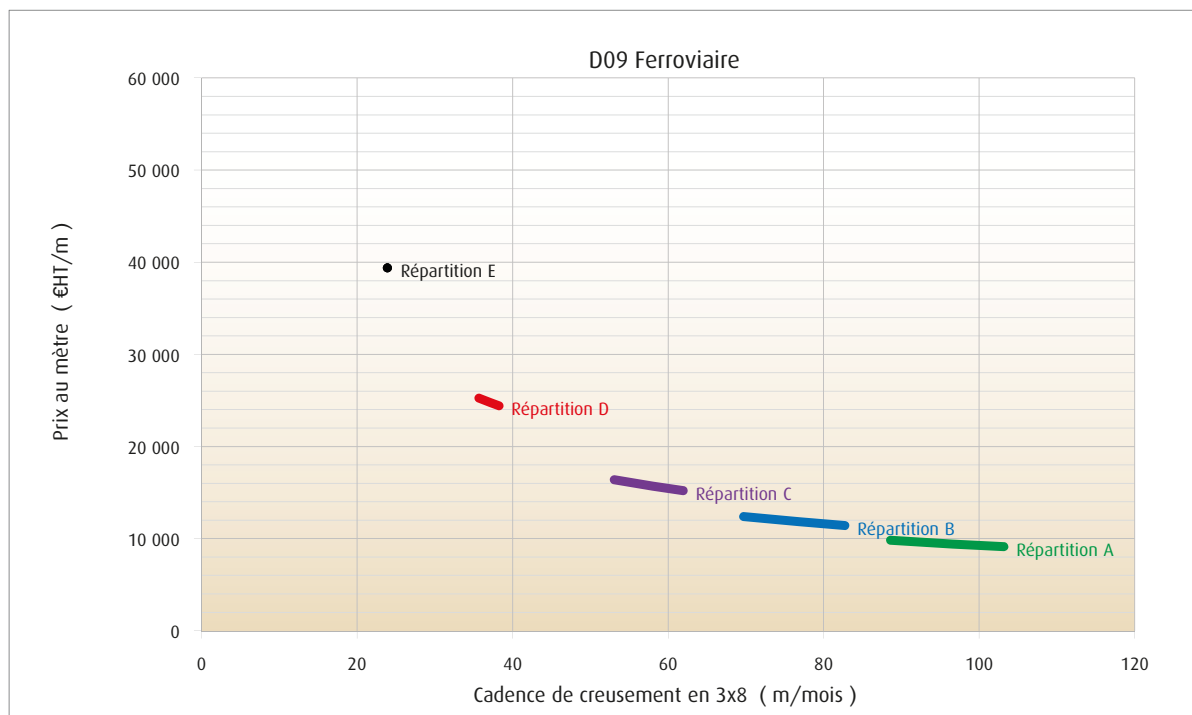
Les graphes ci-dessous présentent les prix des classes de soutènement S1 à S11, au mètre et au mètre cube excavé, en fonction des cadences de creusement (creusement en 3 postes/jour).



Prix des répartitions de classes de soutènement

Les graphes ci-dessous présentent les prix des répartitions de classes de soutènement A à E, au mètre et au mètre cube excavé, en fonction des cadences de creusement (creusement en 3 postes/jour).

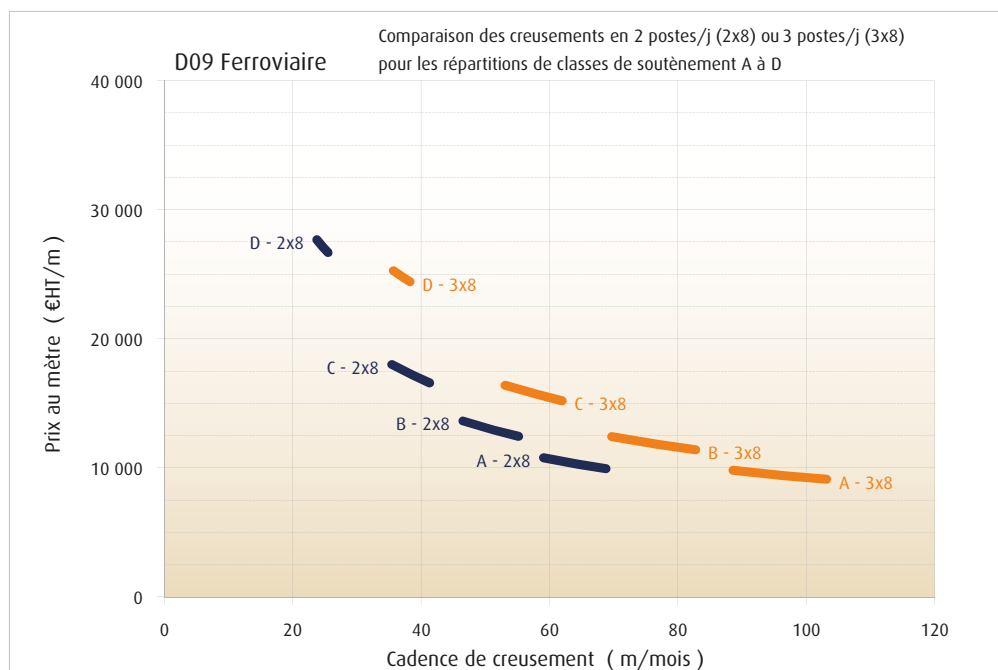
	A	B	C	D	E
Part de S1 (souple)	60 %	35 %	—	—	—
Part de S3 (souple)	30 %	40 %	60 %	20 %	—
Part de S6 (rigide)	10 %	25 %	30 %	35 %	—
Part de S8 (rigide)	—	—	10 %	35 %	25 %
Part de S11 (rigide contre-voûté)	—	—	—	10 %	75 %



GÉOMÉTRIE D9 – TUNNEL FERROVIAIRE

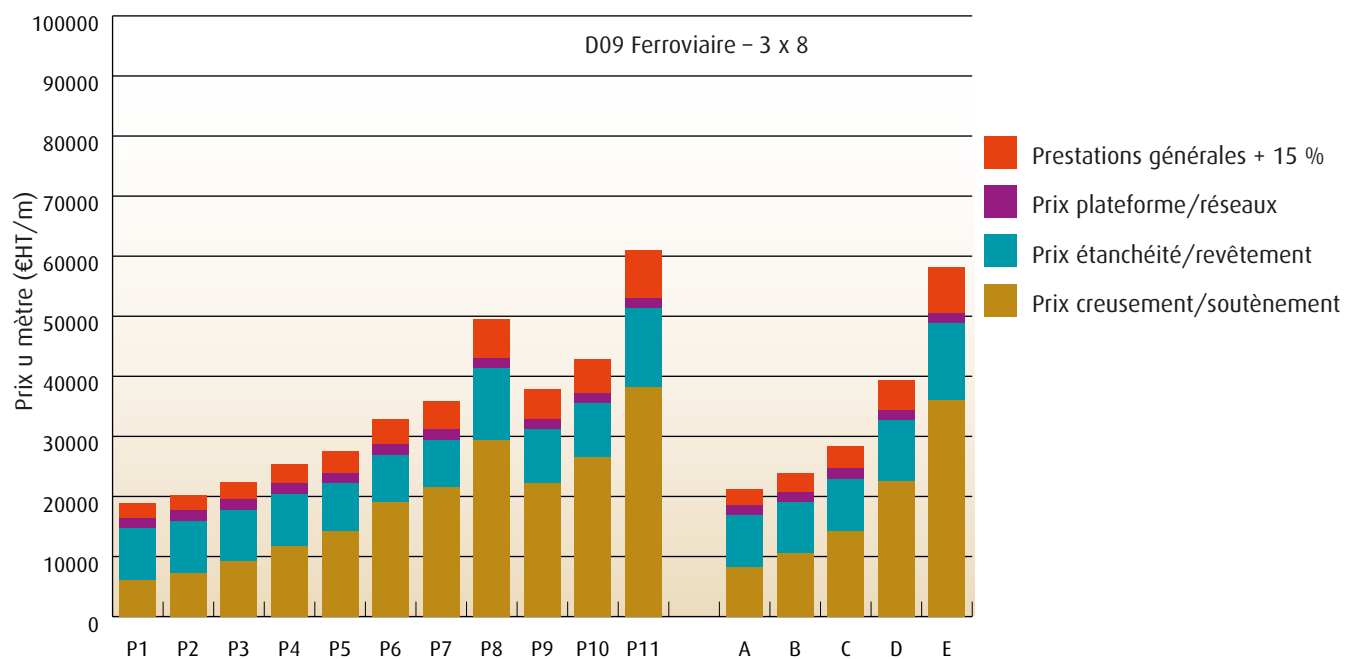
Incidence des cadences sur les prix

Le graphe ci-dessous présente les prix des répartitions de classes de soutènement A à D, au mètre, en fonction des cadences de creusement selon deux hypothèses : creusement en 2 postes/jour (2 x 8) et 3 postes/jour (3 x 8).



Prix des profils types

Les histogrammes ci-dessous présentent les prix des profils types associés aux classes de soutènement S1 à S11 et aux répartitions A à E, au mètre.



GÉOMÉTRIE D10 – TUNNEL FERROVIAIRE

Principales caractéristiques des classes de soutènement retenues (notées S1 à S11)

Géométrie D10 – tunnel ferroviaire		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	
Rayon intrados : 5,1 m		Contre-voûte non cintrée								Contre-voûte cintrée			
		Boulons				Cintres				Cintres			
						Enfilage		Voûte parapluie		Enfilage		Voûte parapluie	
Pas de creusement (longueur de référence)		4,00 m	3,00 m	2,50 m	2,00 m	2,00 m	1,50 m	1,50 m	1,25 m	1,50 m	1,25 m	1,00 m	
Section excavée (cf. schéma)		1											
Section min. (ligne A + 0,15 m)		100,07 m²	101,52 m²	102,99 m²	104,45 m²	105,33 m²	105,33 m²	105,33 m²	105,33 m²	114,71 m²	114,71 m²	114,71 m²	
Section max. (ligne A + 0,15 m)									135,02 m²			144,14 m²	
Rayon de la voûte (ligne A)		5,55 m	5,60 m	5,65 m	5,70 m	5,73 m	5,73 m	5,73 m	6,23 m	5,83 m	5,83 m	6,33 m	
Périmètre de la voûte (voûte + piédroits ; ligne S)		21,74 m	21,74 m	21,74 m	21,74 m	21,74 m	21,74 m	21,74 m	23,30 m	22,05 m	22,05 m	23,61 m	
Largeur en base de piédroits (valeur approximative IS ou IA)		11,10 m	11,20 m	11,30 m	11,40 m	11,46 m	11,46 m	11,46 m	12,46 m	14,29 m	14,29 m	14,77 m	
Soutènements		2											
En voûte													
Épaisseur de béton projeté		0,05 m	0,10 m	0,15 m	0,20 m	0,23 m ¹	0,23 m ¹	0,23 m ¹	0,23 m ¹	0,23 m ¹	0,23 m ¹	0,23 m ¹	
Nombre de boulons par pas		9 u/pas	15 u/pas	18 u/pas	24 u/pas								
Nombre de boulons par mètre		2,3 u/m	5,0 u/m	7,2 u/m	12,0 u/m								
Longueur des boulons		3,00 m	3,00 m	3,00 m	3,00 m								
Type de cintre (1u/pas)						HEB 180	HEB 180	HEB 180	HEB 180	HEB 180	HEB 180	HEB 180	
En contre-voûte													
Épaisseur de béton projeté		0,05 m	0,05 m	0,05 m	0,05 m	0,05 m	0,05 m	0,05 m	0,05 m	0,23 m ¹	0,23 m ¹	0,23 m ¹	
Type de cintre (1u/pas)										HEB 180	HEB 180	HEB 180	
Au front													
Épaisseur de béton projeté					0,05 m	0,10 m	0,10 m	0,10 m	0,10 m	0,10 m	0,10 m	0,15 m	
Pré-soutènements													
Boulons de front		3											
Nombre de boulons						20 u		20 u	18 u	20 u	20 u	19 u	
Longueur des boulons						12,00 m		12,00 m	17,50 m	12,00 m	12,50 m	18,00 m	
Mis en œuvre tous les ...						4,0 pas		4,0 pas	3,5 pas	4,0 pas	5,0 pas	4,5 pas	
Mis en œuvre tous les ...						6,00 m		6,00 m	4,38 m	6,00 m	6,25 m	4,50 m	
Nombre total des boulons visibles au front						40 u		40 u	72 u	40 u	40 u	74 u	
Répartition des boulons au front (sur Smin, hors c-v)						2,0 m²/u		2,0 m²/u	1,3 m²/u	2,0 m²/u	2,0 m²/u	1,3 m²/u	
Posés en ...						2 fois		2 fois	4 fois	2 fois	2 fois	4 fois	
Enfilage		4											
Masse linéique des barres								6,3 kg/m		6,3 kg/m			
Nombre de barres								18 u		18 u			
Longueur des barres								3,00 m		3,00 m			
Mises en œuvre tous les ...								1,0 pas		1,0 pas			
Mises en œuvre tous les ...								1,50 m		1,25 m			
Entraxe approximatif (sur 120° ; ligne A)								0,71 m		0,72 m			
Voûte parapluie		5											
Masse linéique des tubes									26,2 kg/m	26,2 kg/m			
Nombre de tubes									42 u	42 u			
Longueur des tubes									17,50 m	18,00 m			
Mis en œuvre tous les ...									7,0 pas	9,0 pas			
Mis en œuvre tous les ...									8,75 m	9,00 m			
Entraxe approximatif (sur 180° ; ligne A min)									0,50 m	0,50 m			
Surexcavation max théorique en voûte (α = 6°)									0,92 m	0,95 m			
Étanchéité et revêtements associés													
Étanchéité		6											
En voûte (ligne S)		21,74 m²	21,74 m²	21,74 m²	21,74 m²	21,74 m²	21,74 m²	21,74 m²	23,30 m²	22,05 m²	22,05 m²	23,61 m²	
En contre-voûte											14,29 m²	14,29 m²	14,77 m²
Revêtement : Épaisseur de béton		7											
En voûte		0,40 m ¹	0,40 m ¹	0,40 m ¹	0,40 m ¹	0,40 m	0,40 m	0,40 m	0,90 m	0,50 m	0,50 m	1,00 m	
En contre-voûte		0,60 m	0,60 m	0,60 m	0,60 m	0,60 m	0,60 m	0,60 m	0,60 m	0,75 m	0,75 m	0,75 m	

- Variations de la longueur de pas autour de la longueur de référence :
Longueur de pas constante pour P7, P8, P10 et P11.
Pour les autres profils (P1 à P6 et P9) :
± 0,50 m pour Lg référence ≥ 2 m
± 0,25 m pour 1 m < Lg référence < 2 m
± 0 m pour Lg référence ≤ 1 m

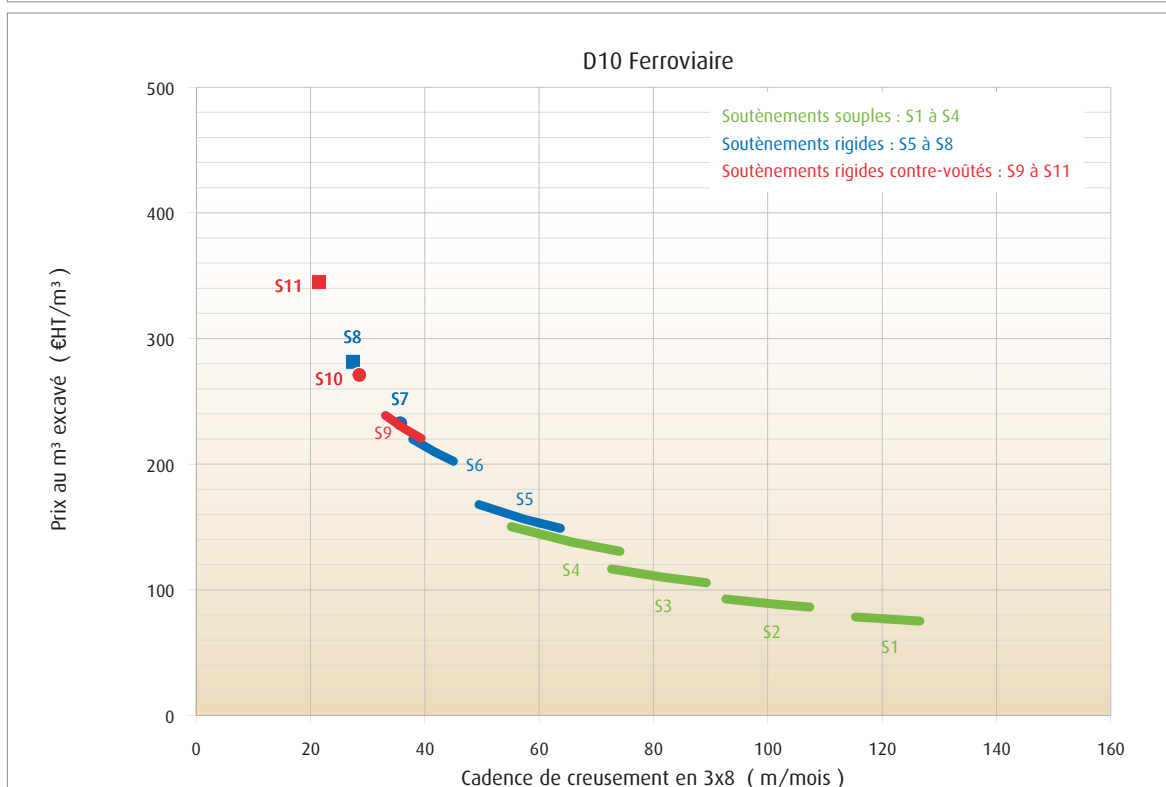
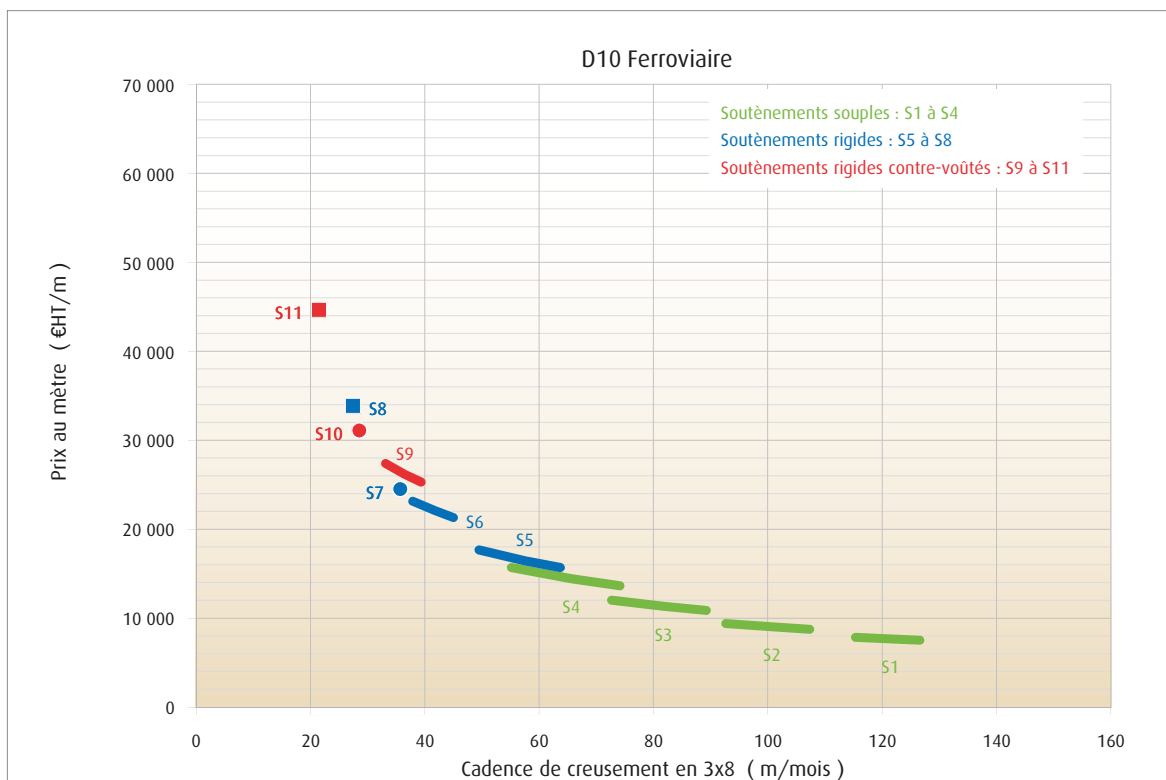
Masse linéique des profilés métalliques
HEB 180 : 51,2 kg/m
HEB 200 : 61,3 kg/m

1. – Les hors-profils sont pris en compte via un décalage de 0,15 m du gabarit d'excavation ou « ligne A » (cf. fascicule 69 du CCTG – art. II.1.1). Les 0,15 m au-delà de la ligne A sont comblés soit par du béton de revêtement (cas des profils boulonnés), soit par du béton projeté (cas des profils cintrés).
Pour les profils avec voûte parapluie (P8 et P11), il s'agit de valeurs moyennes.
2. – Pour les profils boulonnés, les boulons en voûte sont des boulons à ancrage réparti, non scellés.
Pour les profils cintrés, on considère 1 cintre par pas. L'épaisseur de béton projeté est égale à 0,05 m (1^{re} passe) + épaisseur du cintre (2^e passe : remplissage).
3. – Il s'agit de boulons de front « longs », en fibre de verre.
4. – Il s'agit d'enfilage « court », mis en œuvre à chaque pas de creusement, de type HA32 (6,3 kg/m).
5. – Les tubes de voûte parapluie sont de type Ø109/127 (26,2 kg/m de tube). Ils sont mis en œuvre avec une inclinaison de 6°.
- 6-7. – Pour les profils avec voûte parapluie (P8 et P11), il s'agit de valeurs moyennes.

GÉOMÉTRIE D10 – TUNNEL FERROVIAIRE

Prix des classes de soutènement

Les graphes ci-dessous présentent les prix des classes de soutènement S1 à S11, au mètre et au mètre cube excavé, en fonction des cadences de creusement (creusement en 3 postes/jour).

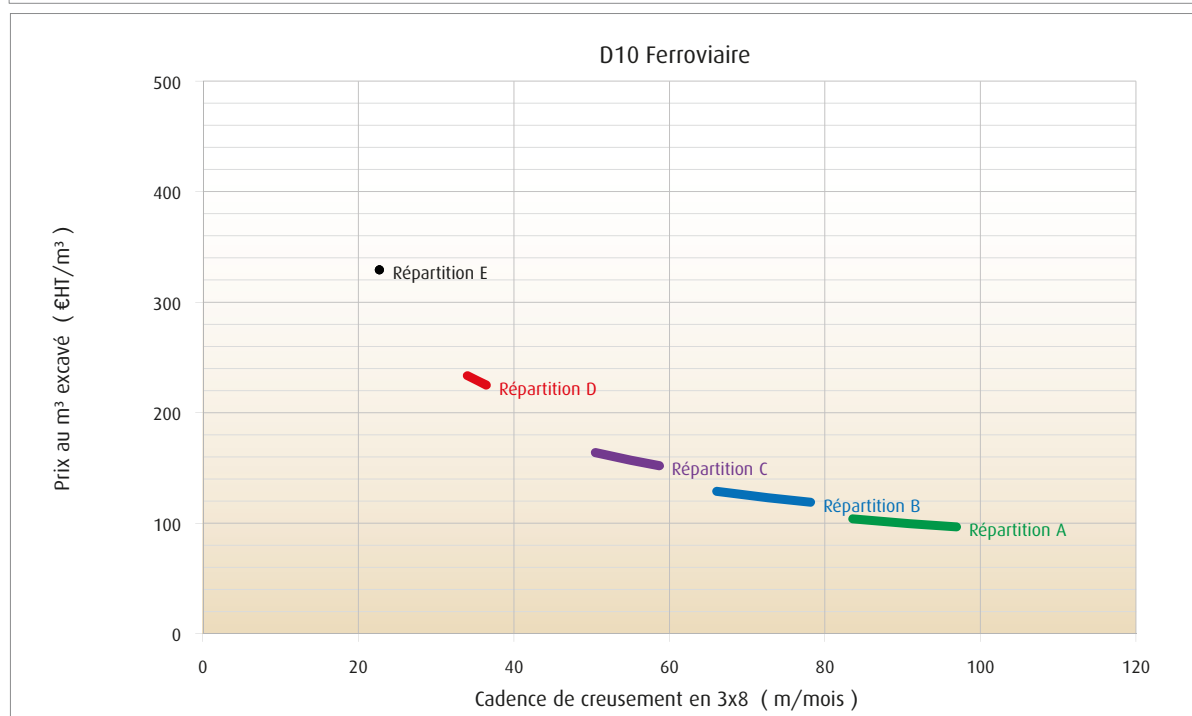
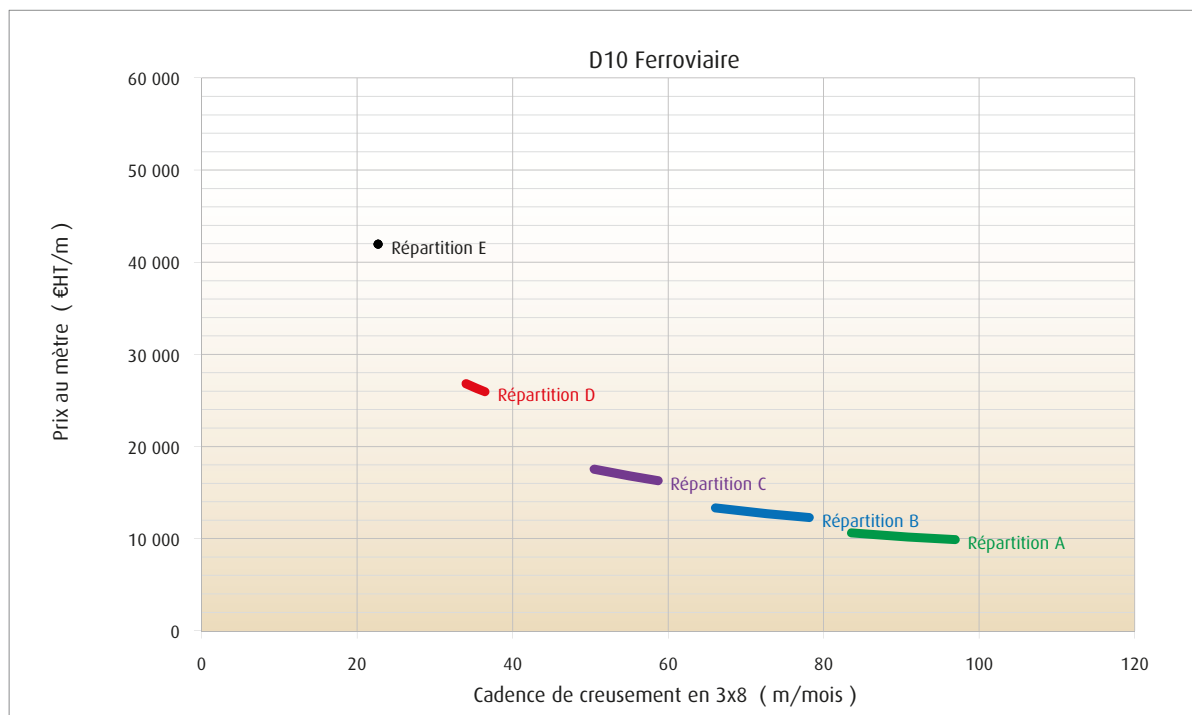


GÉOMÉTRIE D10 – TUNNEL FERROVIAIRE

Prix des répartitions de classes de soutènement

Les graphes ci-dessous présentent les prix des répartitions de classes de soutènement A à E, au mètre et au mètre cube excavé, en fonction des cadences de creusement (creusement en 3 postes/jour).

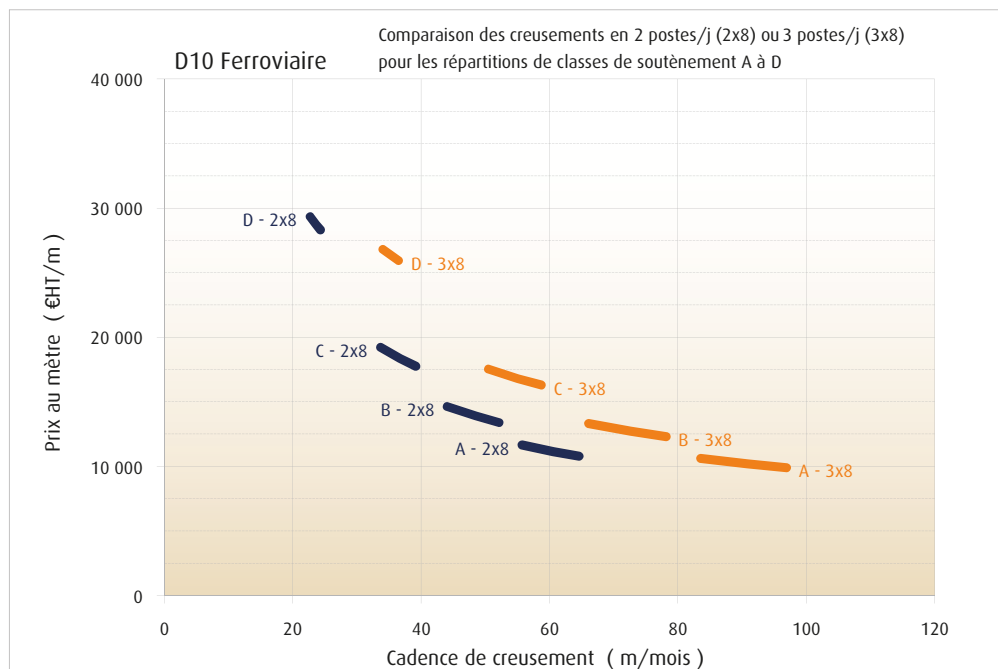
	A	B	C	D	E
Part de S1 (souple)	60 %	35 %	—	—	—
Part de S3 (souple)	30 %	40 %	60 %	20 %	—
Part de S6 (rigide)	10 %	25 %	30 %	35 %	—
Part de S8 (rigide)	—	—	10 %	35 %	25 %
Part de S11 (rigide contre-voûté)	—	—	—	10 %	75 %



GÉOMÉTRIE D10 – TUNNEL FERROVIAIRE

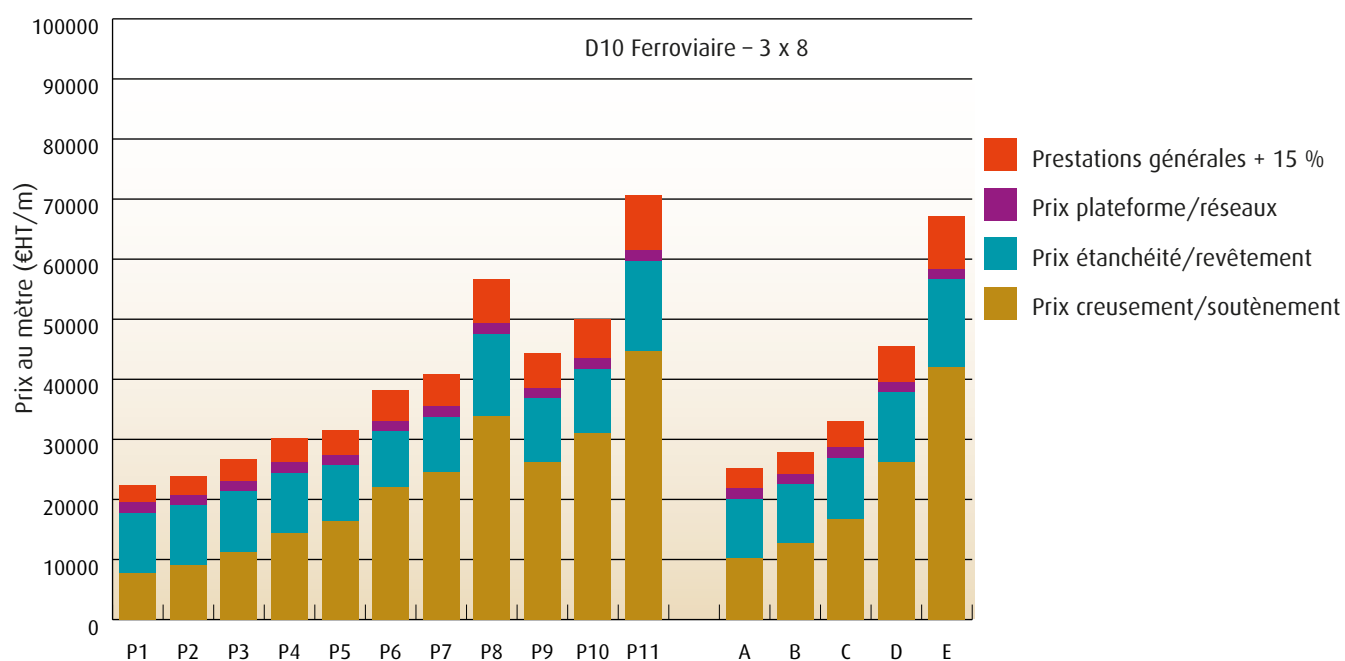
Incidence des cadences sur les prix

Le graphe ci-dessous présente les prix des répartitions de classes de soutènement A à D, au mètre, en fonction des cadences de creusement selon deux hypothèses : creusement en 2 postes/jour (2 x 8) et 3 postes/jour (3 x 8).



Prix des profils types

Les histogrammes ci-dessous présentent les prix des profils types associés aux classes de soutènement S1 à S11 et aux répartitions A à E, au mètre.



GÉOMÉTRIE D10 – TUNNEL ROUTIER

Principales caractéristiques des classes de soutènement retenues (notées S1 à S11)

Géométrie D10 – tunnel routier		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	
Rayon intrados : 5,1 m		Contre-voûte non cintrée								Contre-voûte cintrée			
		Boulons				Cintres				Cintres			
						Enfilage		Voûte parapluie		Enfilage		Voûte parapluie	
Pas de creusement (longueur de référence)		4,00 m	3,00 m	2,50 m	2,00 m	2,00 m	1,50 m	1,50 m	1,25 m	1,50 m	1,25 m	1,00 m	
Section excavée (cf. schéma)		1											
Section min. (ligne A + 0,15 m)		84,93 m²	86,07 m²	87,23 m²	88,39 m²	89,08 m²	89,08 m²	89,08 m²	89,08 m²	114,71 m²	114,71 m²	114,71 m²	
Section max. (ligne A + 0,15 m)									113,24 m²			144,14 m²	
Rayon de la voûte (ligne A)		5,55 m	5,60 m	5,65 m	5,70 m	5,73 m	5,73 m	5,73 m	6,23 m	5,83 m	5,83 m	6,33 m	
Périmètre de la voûte (voûte + piédroits ; ligne S)		22,75 m	22,75 m	22,75 m	22,75 m	22,28 m	22,28 m	22,28 m	23,85 m	21,22 m	21,22 m	22,79 m	
Largeur en base de piédroits (valeur approximative IS ou IA)		11,10 m	11,20 m	11,30 m	11,40 m	11,46 m	11,46 m	11,46 m	12,46 m	15,11 m	15,11 m	15,59 m	
Soutènements		2											
En voûte													
Épaisseur de béton projeté		0,05 m	0,10 m	0,15 m	0,20 m	0,23 m ¹	0,23 m ¹	0,23 m ¹	0,23 m ¹	0,23 m ¹	0,23 m ¹	0,23 m ¹	
Nombre de boulons par pas		9 u/pas	15 u/pas	18 u/pas	24 u/pas								
Nombre de boulons par mètre		2,3 u/m	5,0 u/m	7,2 u/m	12,0 u/m								
Longueur des boulons		3,00 m	3,00 m	3,00 m	3,00 m								
Type de cintre (1u/pas)						HEB 180	HEB 180	HEB 180	HEB 180	HEB 180	HEB 180	HEB 180	
En contre-voûte													
Épaisseur de béton projeté										0,23 m ¹	0,23 m ¹	0,23 m ¹	
Type de cintre (1u/pas)										HEB 180	HEB 180	HEB 180	
Au front													
Épaisseur de béton projeté					0,05 m	0,10 m	0,10 m	0,10 m	0,10 m	0,10 m	0,10 m	0,15 m	
Pré-soutènements													
Boulons de front		3											
Nombre de boulons						19 u		19 u	17 u	19 u	19 u	18 u	
Longueur des boulons						12,00 m		12,00 m	17,50 m	12,00 m	12,50 m	18,00 m	
Mis en œuvre tous les ...						4,0 pas		4,0 pas	3,5 pas	4,0 pas	5,0 pas	4,5 pas	
Mis en œuvre tous les ...						6,00 m		6,00 m	4,38 m	6,00 m	6,25 m	4,50 m	
Nombre total des boulons visibles au front						38 u		38 u	68 u	38 u	38 u	70 u	
Répartition des boulons au front (sur Smin, hors c-v)						2,0 m²/u		2,0 m²/u	1,3 m²/u	2,0 m²/u	2,0 m²/u	1,3 m²/u	
Posés en ...						2 fois		2 fois	4 fois	2 fois	2 fois	4 fois	
Enfilage		4							6,3 kg/m		6,3 kg/m		
Masse linéique des barres								18 u			18 u		
Nombre de barres								3,00 m			3,00 m		
Longueur des barres								1,0 pas			1,0 pas		
Mises en œuvre tous les ...								1,50 m			1,25 m		
Mises en œuvre tous les ...								0,71 m			0,72 m		
Entraxe approximatif (sur 120° ; ligne A)													
Voûte parapluie		5							26,2 kg/m			26,2 kg/m	
Masse linéique des tubes								42 u			42 u		
Nombre de tubes								17,50 m			18,00 m		
Longueur des tubes								7,0 pas			9,0 pas		
Mis en œuvre tous les ...								8,75 m			9,00 m		
Mis en œuvre tous les ...								0,50 m			0,50 m		
Entraxe approximatif (sur 180° ; ligne A min)								0,92 m			0,95 m		
Surexcavation max théorique en voûte (α = 6°)													
Étanchéité et revêtements associés													
Étanchéité		6											
En voûte (ligne S)		22,75 m²	22,75 m²	22,75 m²	22,75 m²	22,28 m²	22,28 m²	22,28 m²	23,85 m²	21,22 m²	21,22 m²	22,79 m²	
En contre-voûte										15,11 m²	15,11 m²	15,59 m²	
Revêtement : Épaisseur de béton		7											
En voûte		0,40 m ¹	0,40 m ¹	0,40 m ¹	0,40 m ¹	0,40 m	0,40 m	0,40 m	0,90 m	0,50 m	0,50 m	1,00 m	
En contre-voûte										0,75 m	0,75 m	0,75 m	

- Variations de la longueur de pas autour de la longueur de référence :
Longueur de pas constante pour P7, P8, P10 et P11.
Pour les autres profils (P1 à P6 et P9) :
± 0,50 m pour Lg référence ≥ 2 m
± 0,25 m pour 1 m < Lg référence < 2 m
± 0 m pour Lg référence ≤ 1 m

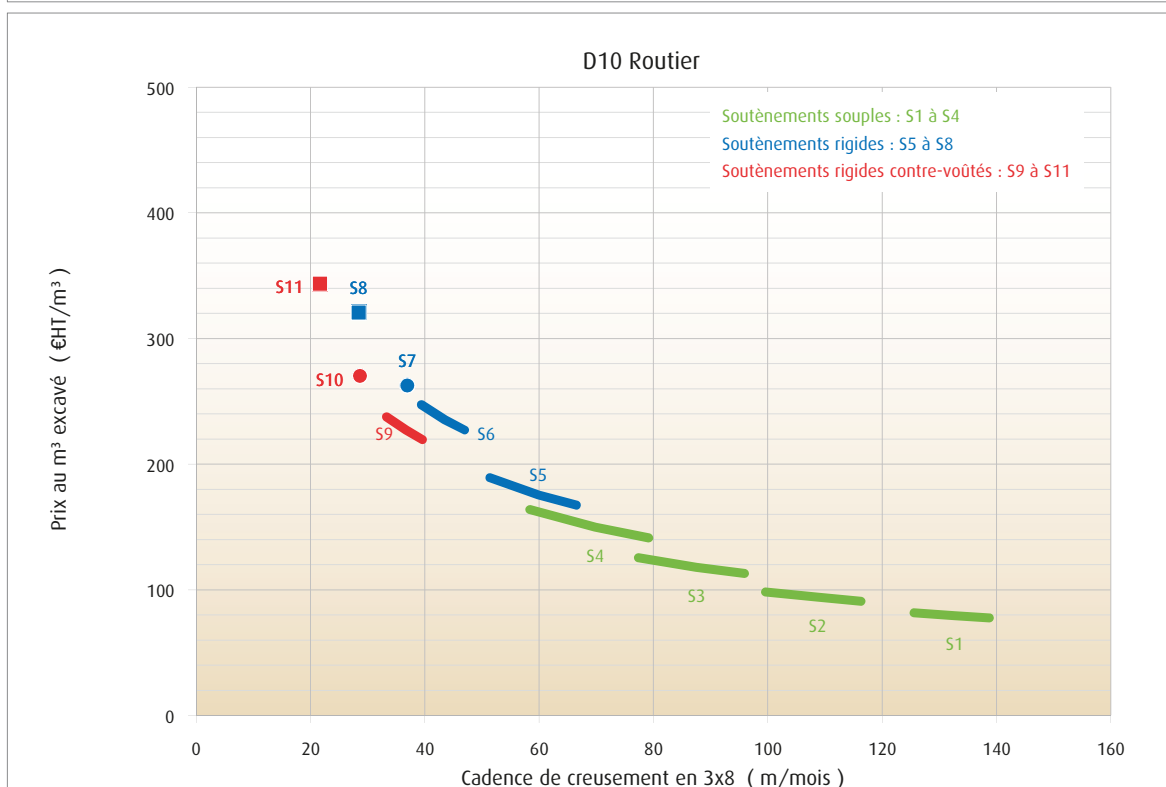
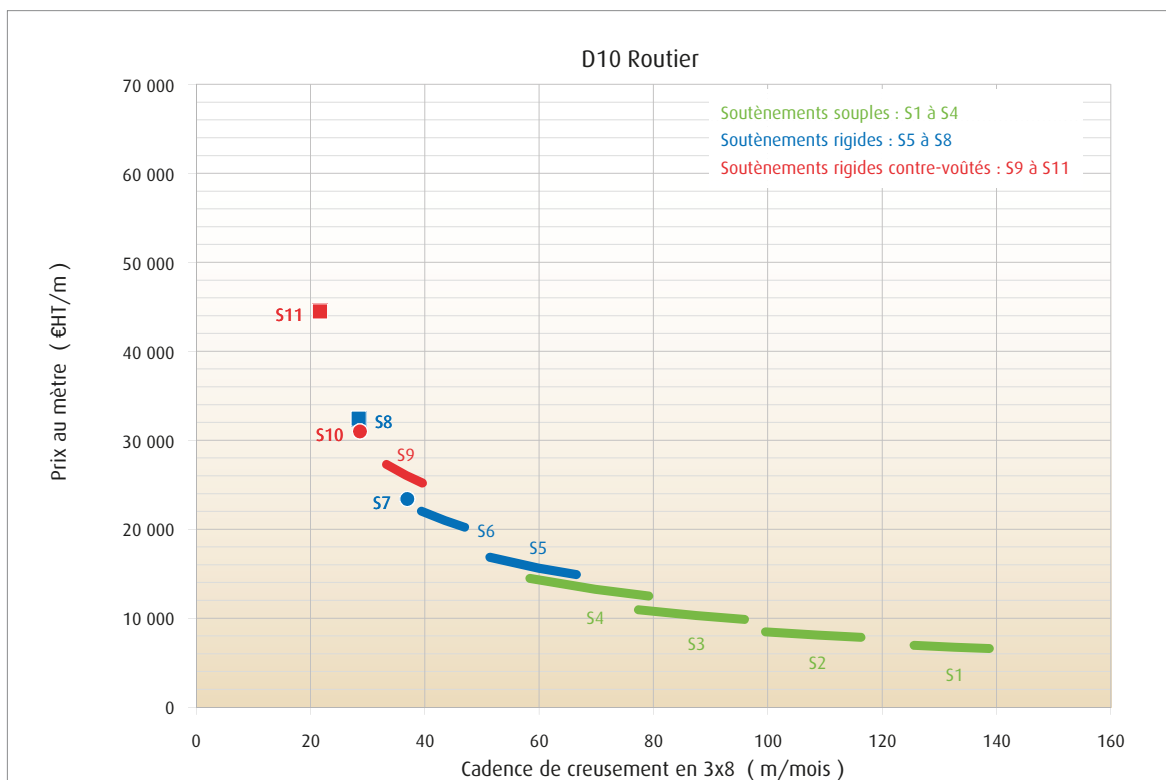
Masse linéique des profilés métalliques
HEB 180 : 51,2 kg/m
HEB 200 : 61,3 kg/m

1. – Les hors-profils sont pris en compte via un décalage de 0,15 m du gabarit d'excavation ou « ligne A » (cf. fascicule 69 du CCTG – art. II.1.1). Les 0,15 m au-delà de la ligne A sont comblés soit par du béton de revêtement (cas des profils boulonnés), soit par du béton projeté (cas des profils cintrés).
Pour les profils avec voûte parapluie (P8 et P11), il s'agit de valeurs moyennes.
2. – Pour les profils boulonnés, les boulons en voûte sont des boulons à ancrage réparti, non scellés.
Pour les profils cintrés, on considère 1 cintre par pas. L'épaisseur de béton projeté est égale à 0,05 m (1re passe) + épaisseur du cintre (2e passe : remplissage).
3. – Il s'agit de boulons de front « longs », en fibre de verre.
4. – Il s'agit d'enfilage « court », mis en œuvre à chaque pas de creusement, de type HA32 (6,3 kg/m).
5. – Les tubes de voûte parapluie sont de type Ø109/127 (26,2 kg/m de tube). Ils sont mis en œuvre avec une inclinaison de 6°.
- 6-7. – Pour les profils avec voûte parapluie (P8 et P11), il s'agit de valeurs moyennes.

GÉOMÉTRIE D10 – TUNNEL ROUTIER

Prix des classes de soutènement

Les graphes ci-dessous présentent les prix des classes de soutènement S1 à S11, au mètre et au mètre cube excavé, en fonction des cadences de creusement (creusement en 3 postes/jour).

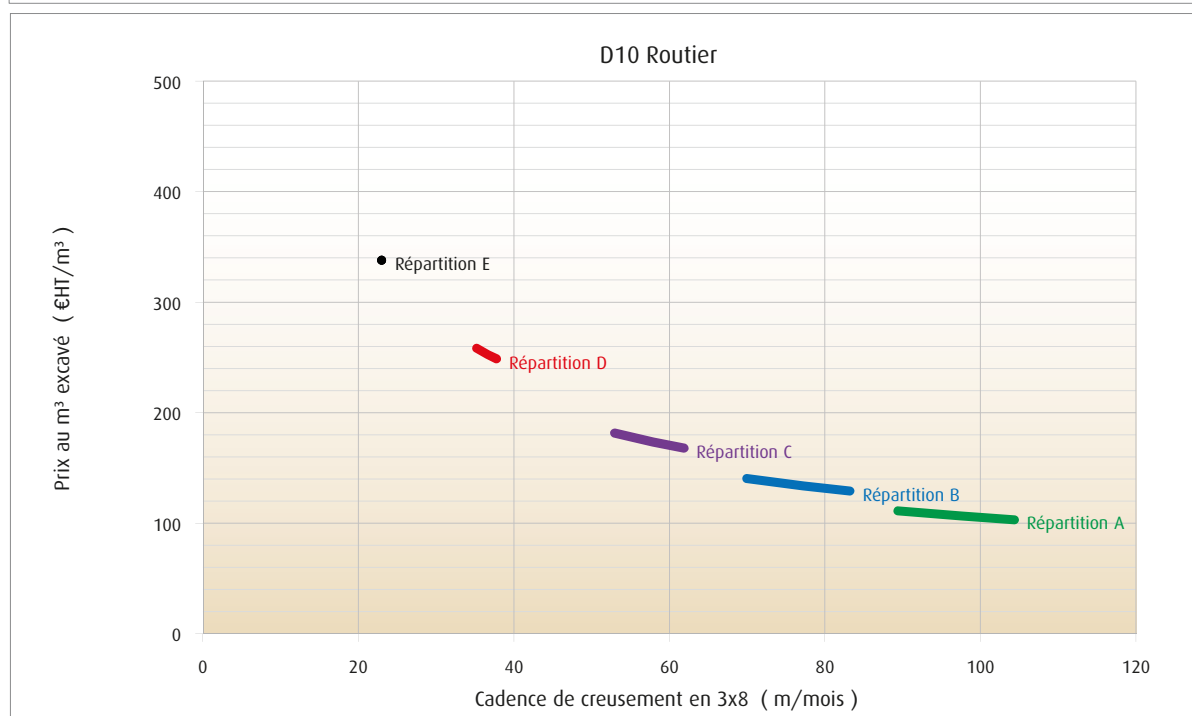
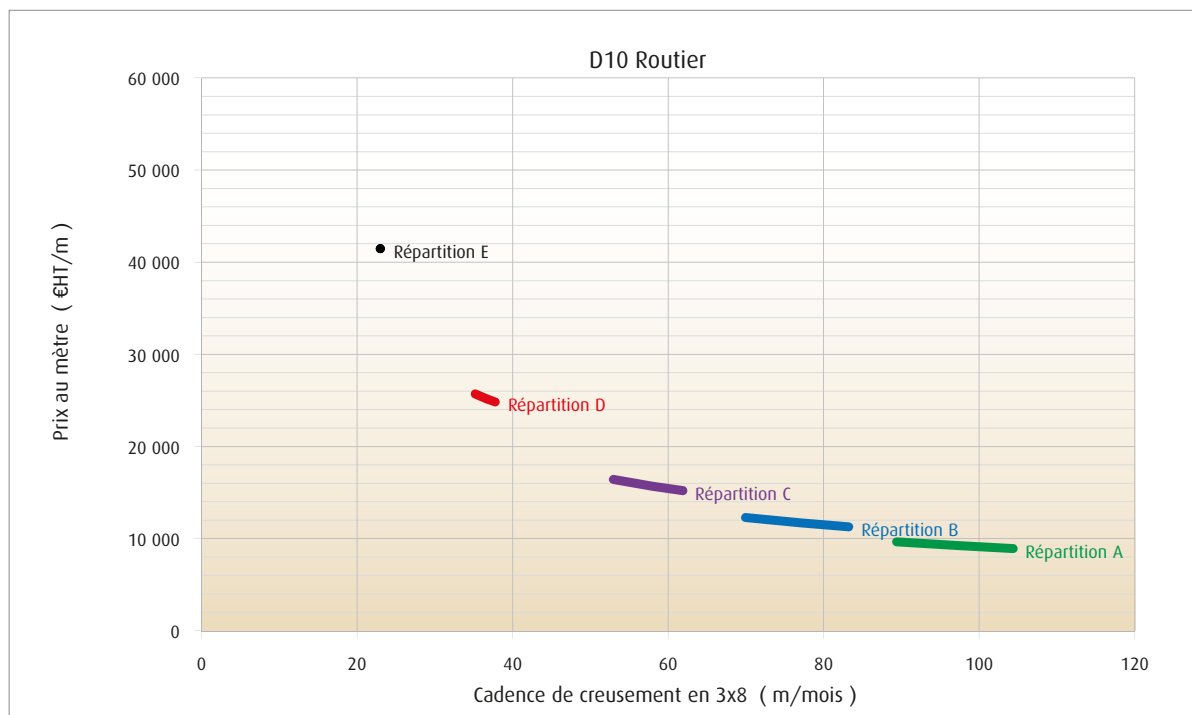


GÉOMÉTRIE D10 – TUNNEL ROUTIER

Prix des répartitions de classes de soutènement

Les graphes ci-dessous présentent les prix des répartitions de classes de soutènement A à E, au mètre et au mètre cube excavé, en fonction des cadences de creusement (creusement en 3 postes/jour).

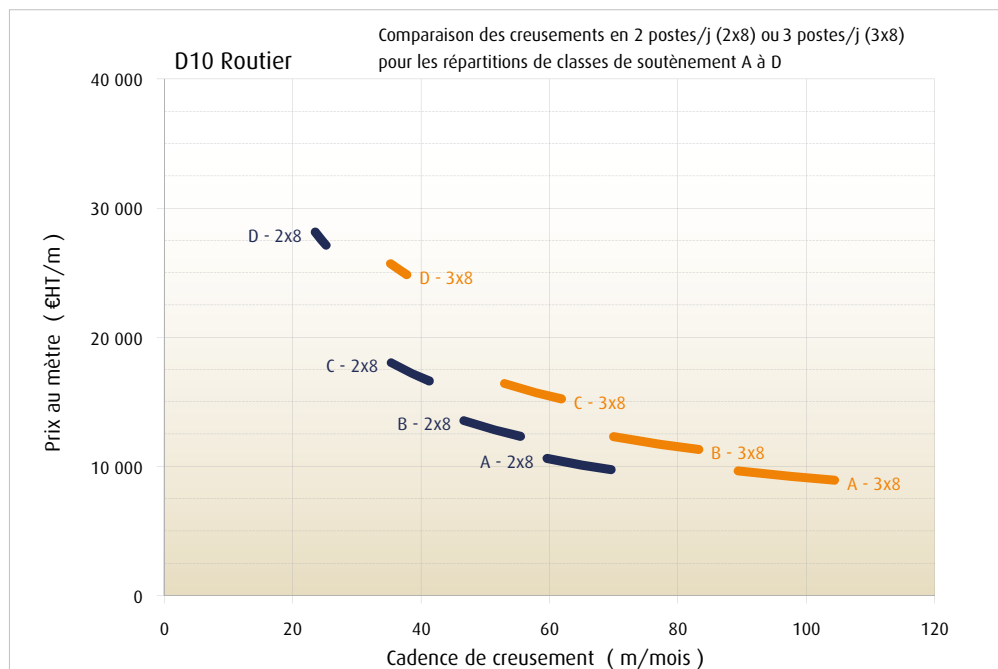
	A	B	C	D	E
Part de S1 (souple)	60 %	35 %	—	—	—
Part de S3 (souple)	30 %	40 %	60 %	20 %	—
Part de S6 (rigide)	10 %	25 %	30 %	35 %	—
Part de S8 (rigide)	—	—	10 %	35 %	25 %
Part de S11 (rigide contre-voûté)	—	—	—	10 %	75 %



GÉOMÉTRIE D10 – TUNNEL ROUTIER

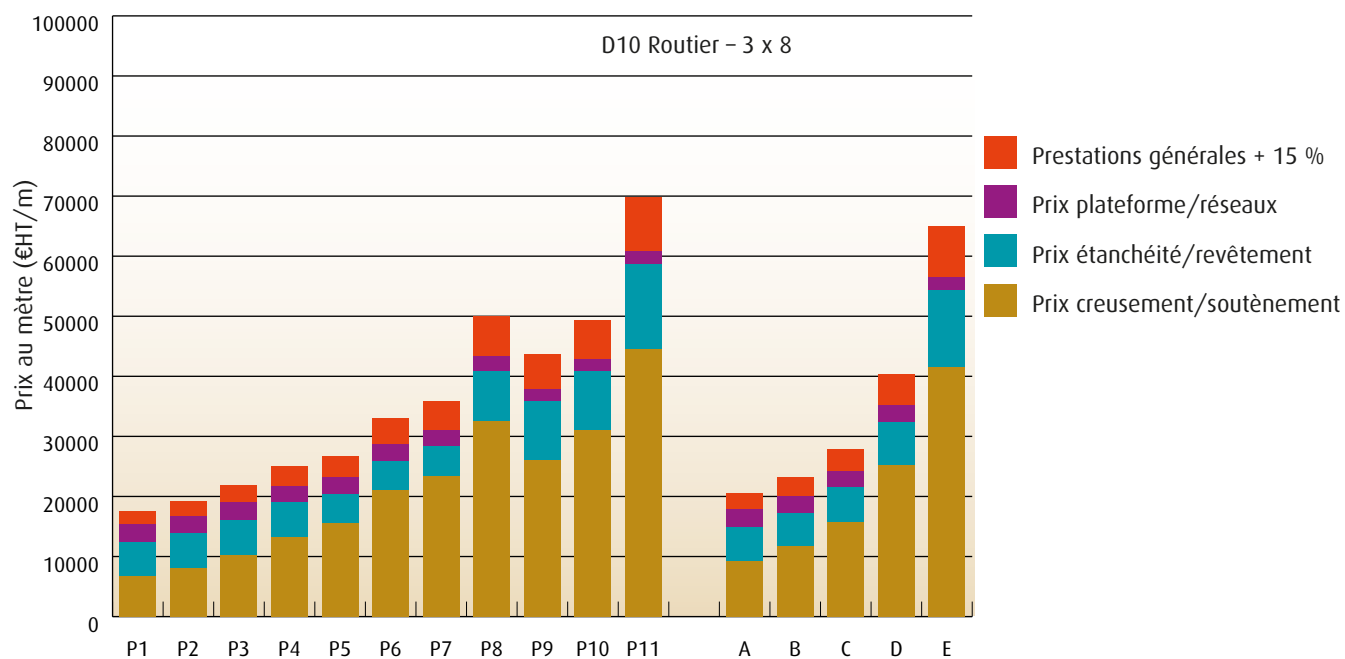
Incidence des cadences sur les prix

Le graphe ci-dessous présente les prix des répartitions de classes de soutènement A à D, au mètre, en fonction des cadences de creusement selon deux hypothèses : creusement en 2 postes/jour (2 x 8) et 3 postes/jour (3 x 8).



Prix des profils types

Les histogrammes ci-dessous présentent les prix des profils types associés aux classes de soutènement S1 à S11 et aux répartitions A à E, au mètre.



GÉOMÉTRIE D11 – TUNNEL FERROVIAIRE

Principales caractéristiques des classes de soutènement retenues (notées S1 à S11)

Géométrie D11 – tunnel ferroviaire		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11
Rayon intrados : 5,6 m		Contre-voûte non cintrée								Contre-voûte cintrée		
		Boulons				Cintres				Cintres		
						Enfilage		Voûte parapluie		Enfilage		Voûte parapluie
Pas de creusement (longueur de référence)	•	4,00 m	3,00 m	2,50 m	2,00 m	2,00 m	1,50 m	1,50 m	1,25 m	1,50 m	1,25 m	1,00 m
Section excavée (cf. schéma)	1											
Section min. (ligne A + 0,15 m)		124,06 m²	125,73 m²	127,41 m²	129,43 m²	130,44 m²	130,44 m²	130,44 m²	130,44 m²	140,84 m²	140,84 m²	140,84 m²
Section max. (ligne A + 0,15 m)									164,50 m²			174,75 m²
Rayon de la voûte (ligne A)		6,06 m	6,11 m	6,16 m	6,22 m	6,25 m	6,25 m	6,25 m	6,75 m	6,35 m	6,35 m	6,85 m
Périmètre de la voûte (voûte + piédroits ; ligne S)		25,06 m	25,06 m	25,06 m	25,06 m	25,06 m	25,06 m	25,06 m	26,62 m	25,37 m	25,37 m	26,93 m
Largeur en base de piédroits (valeur approximative IS ou IA)		12,12 m	12,22 m	12,32 m	12,44 m	12,50 m	12,50 m	12,50 m	13,50 m	15,90 m	15,90 m	16,27 m
Soutènements	2											
En voûte												
Épaisseur de béton projeté		0,06 m	0,11 m	0,16 m	0,22 m	0,25 m ¹	0,25 m ¹	0,25 m ¹	0,25 m ¹	0,25 m ¹	0,25 m ¹	0,25 m ¹
Nombre de boulons par pas		10 u/pas	17 u/pas	20 u/pas	27 u/pas							
Nombre de boulons par mètre		2,5 u/m	5,7 u/m	8,0 u/m	13,5 u/m							
Longueur des boulons		3,00 m	3,00 m	3,00 m	3,00 m							
Type de cintre (1u/pas)						HEB 200	HEB 200	HEB 200	HEB 200	HEB 200	HEB 200	HEB 200
En contre-voûte												
Épaisseur de béton projeté		0,05 m	0,05 m	0,05 m	0,05 m	0,05 m	0,05 m	0,05 m	0,05 m	0,25 m ¹	0,25 m ¹	0,25 m ¹
Type de cintre (1u/pas)										HEB 200	HEB 200	HEB 200
Au front												
Épaisseur de béton projeté				0,05 m	0,10 m	0,05 m	0,10 m	0,10 m	0,10 m	0,10 m	0,10 m	0,15 m
Pré-soutènements												
Boulons de front	3											
Nombre de boulons							26 u	26 u	23 u	26 u	26 u	24 u
Longueur des boulons							12,00 m	12,00 m	17,50 m	12,00 m	12,50 m	18,00 m
Mis en œuvre tous les ...							4,0 pas	4,0 pas	3,5 pas	4,0 pas	5,0 pas	4,5 pas
Mis en œuvre tous les ...							6,00 m	6,00 m	4,38 m	6,00 m	6,25 m	4,50 m
Nombre total des boulons visibles au front							52 u	52 u	92 u	52 u	52 u	94 u
Répartition des boulons au front (sur Smin, hors c-v)							2,0 m²/u	2,0 m²/u	1,3 m²/u	2,0 m²/u	2,0 m²/u	1,3 m²/u
Posés en ...							2 fois	2 fois	4 fois	2 fois	2 fois	4 fois
Enfilage	4											
Masse linéique des barres								6,3 kg/m			6,3 kg/m	
Nombre de barres								19 u			20 u	
Longueur des barres								3,00 m			3,00 m	
Mises en œuvre tous les ...								1,0 pas			1,0 pas	
Mises en œuvre tous les ...								1,50 m			1,25 m	
Entraxe approximatif (sur 120° ; ligne A)								0,73 m			0,70 m	
Voûte parapluie	5											
Masse linéique des tubes									26,2 kg/m			26,2 kg/m
Nombre de tubes									45 u			45 u
Longueur des tubes									17,50 m			18,00 m
Mis en œuvre tous les ...									7,0 pas			9,0 pas
Mis en œuvre tous les ...									8,75 m			9,00 m
Entraxe approximatif (sur 180° ; ligne A min)									0,50 m			0,50 m
Surexcavation max théorique en voûte (α = 6°)									0,92 m			0,95 m
Étanchéité	6											
En voûte (ligne S)		25,06 m²	25,06 m²	25,06 m²	25,06 m²	25,06 m²	25,06 m²	25,06 m²	26,62 m²	25,37 m²	25,37 m²	26,93 m²
En contre-voûte										15,90 m²	15,90 m²	16,27 m²
Revêtement : Épaisseur de béton	7											
En voûte		0,40 m ¹	0,40 m ¹	0,40 m ¹	0,40 m ¹	0,40 m	0,40 m	0,40 m	0,90 m	0,50 m	0,50 m	1,00 m
En contre-voûte		0,60 m	0,60 m	0,60 m	0,60 m	0,60 m	0,60 m	0,60 m	0,60 m	0,75 m	0,75 m	0,75 m

- Variations de la longueur de pas autour de la longueur de référence :
Longueur de pas constante pour P7, P8, P10 et P11.
Pour les autres profils (P1 à P6 et P9) :
± 0,50 m pour Lg référence ≥ 2 m
± 0,25 m pour 1 m < Lg référence < 2 m
± 0 m pour Lg référence ≤ 1 m

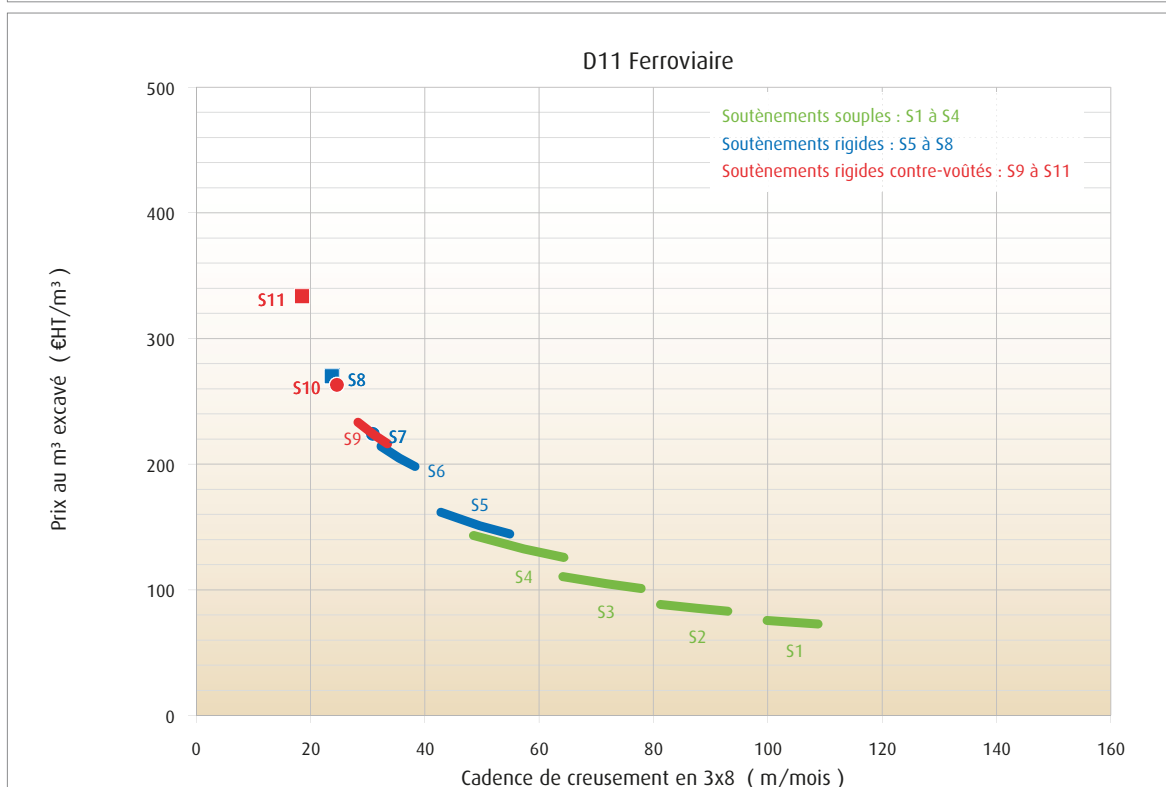
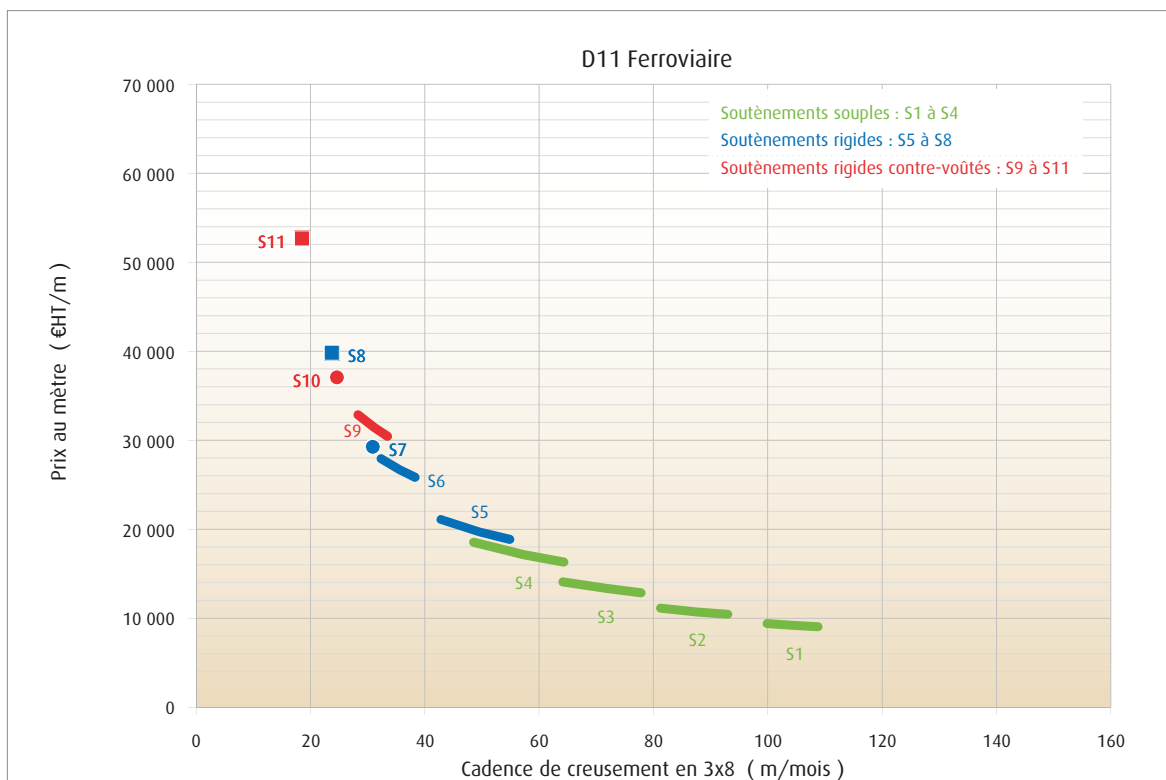
Masse linéique des profilés métalliques
HEB 180 : 51,2 kg/m
HEB 200 : 61,3 kg/m

- Les hors-profils sont pris en compte via un décalage de 0,15 m du gabarit d'excavation ou « ligne A » (cf. fascicule 69 du CCTG – art. II.1.1). Les 0,15 m au-delà de la ligne A sont comblés soit par du béton de revêtement (cas des profils boulonnés), soit par du béton projeté (cas des profils cintrés).
Pour les profils avec voûte parapluie (P8 et P11), il s'agit de valeurs moyennes.
- Pour les profils boulonnés, les boulons en voûte sont des boulons à ancrage réparti, non scellés.
Pour les profils cintrés, on considère 1 cintre par pas. L'épaisseur de béton projeté est égale à 0,05 m (1re passe) + épaisseur du cintre (2e passe : remplissage).
- Il s'agit de boulons de front « longs », en fibre de verre.
- Il s'agit d'enfilage « court », mis en œuvre à chaque pas de creusement, de type HA32 (6,3 kg/m).
- Les tubes de voûte parapluie sont de type Ø109/127 (26,2 kg/m de tube). Ils sont mis en œuvre avec une inclinaison de 6°.
- Pour les profils avec voûte parapluie (P8 et P11), il s'agit de valeurs moyennes.

GÉOMÉTRIE D11 – TUNNEL FERROVIAIRE

Prix des classes de soutènement

Les graphes ci-dessous présentent les prix des classes de soutènement S1 à S11, au mètre et au mètre cube excavé, en fonction des cadences de creusement (creusement en 3 postes/jour).

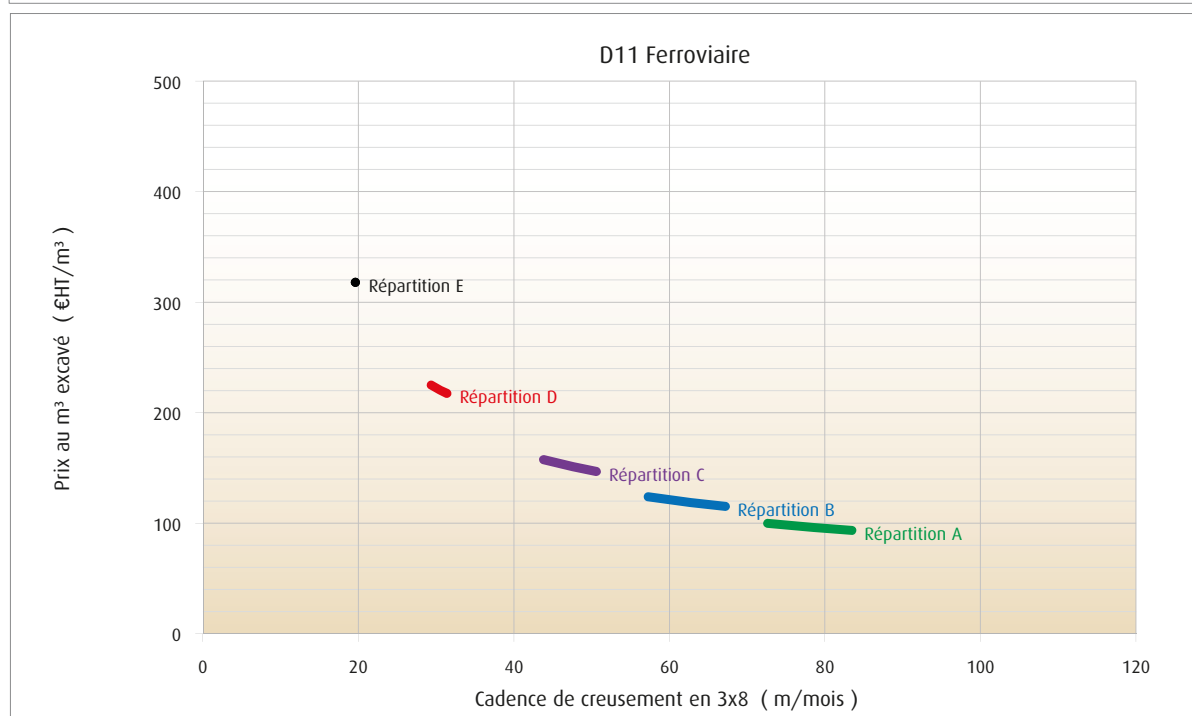
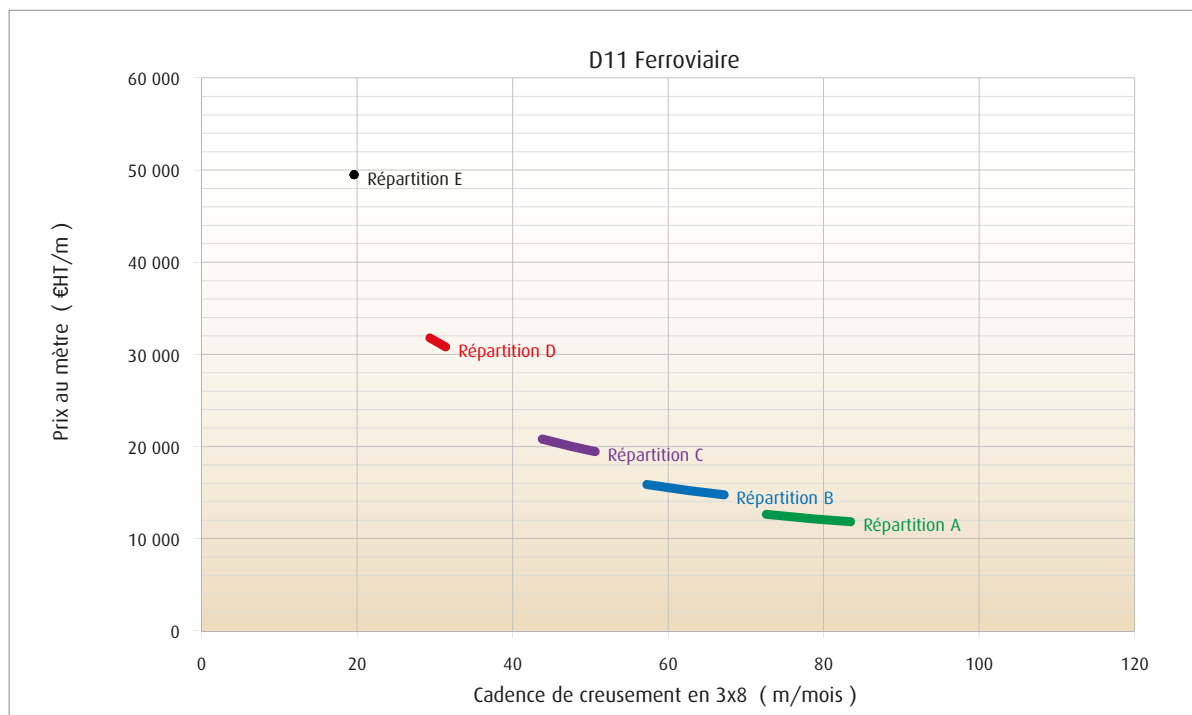


GÉOMÉTRIE D11 – TUNNEL FERROVIAIRE

Prix des répartitions de classes de soutènement

Les graphes ci-dessous présentent les prix des répartitions de classes de soutènement A à E, au mètre et au mètre cube excavé, en fonction des cadences de creusement (creusement en 3 postes/jour).

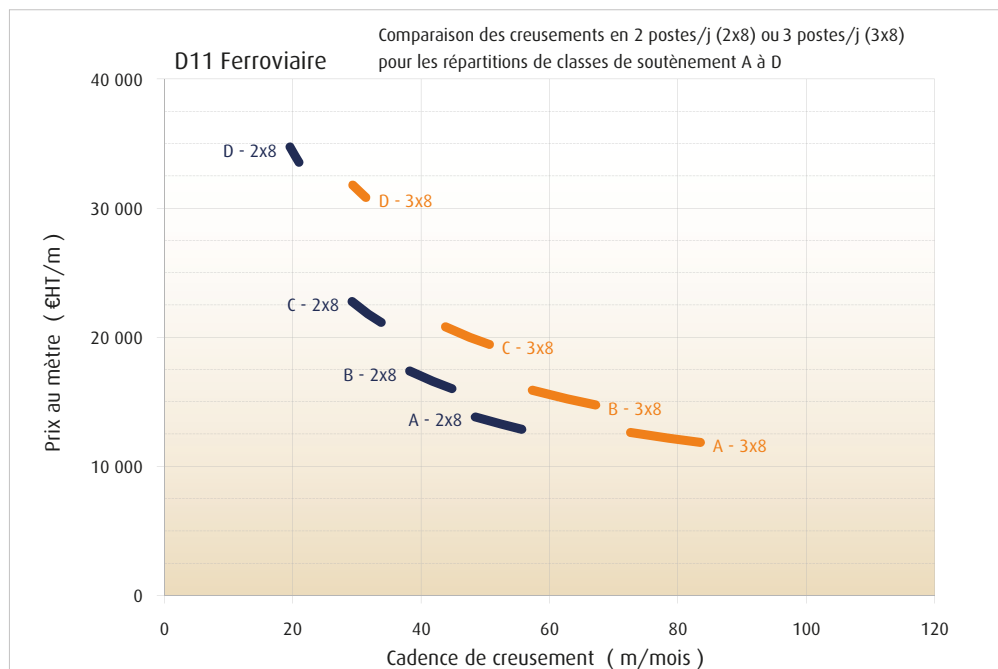
	A	B	C	D	E
Part de S1 (souple)	60 %	35 %	—	—	—
Part de S3 (souple)	30 %	40 %	60 %	20 %	—
Part de S6 (rigide)	10 %	25 %	30 %	35 %	—
Part de S8 (rigide)	—	—	10 %	35 %	25 %
Part de S11 (rigide contre-voûté)	—	—	—	10 %	75 %



GÉOMÉTRIE D11 – TUNNEL FERROVIAIRE

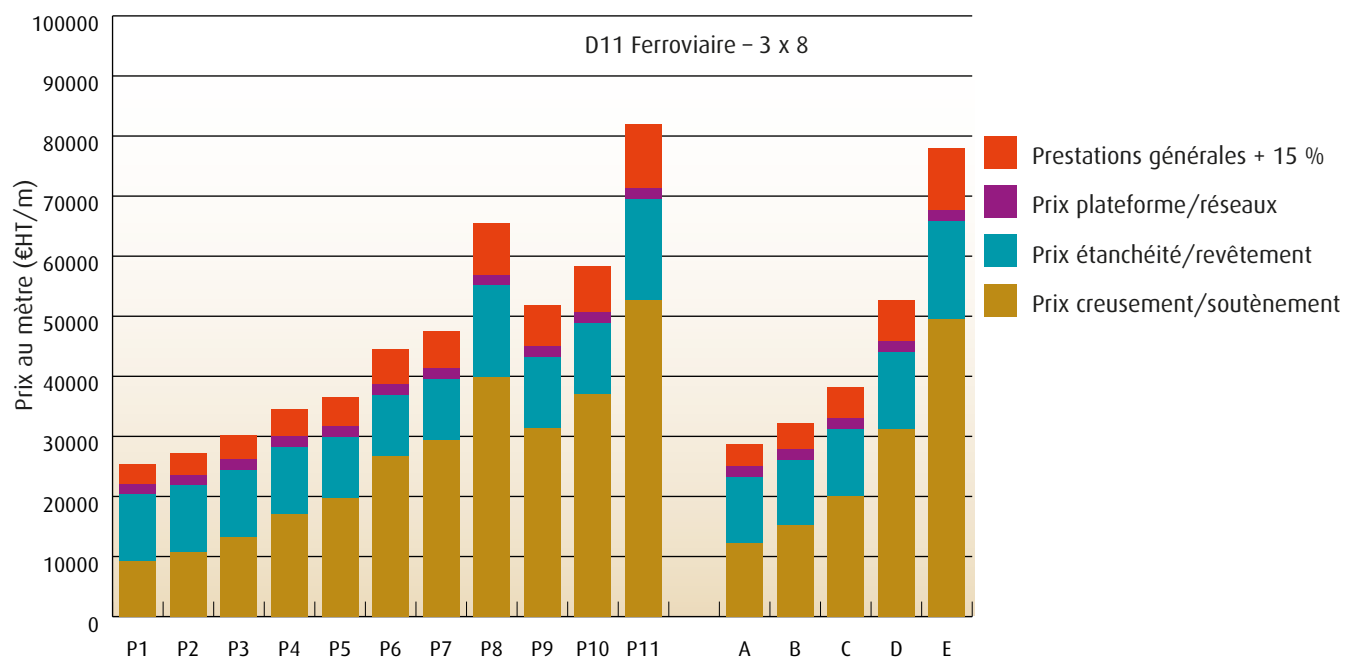
Incidence des cadences sur les prix

Le graphe ci-dessous présente les prix des répartitions de classes de soutènement A à D, au mètre, en fonction des cadences de creusement selon deux hypothèses : creusement en 2 postes/jour (2 x 8) et 3 postes/jour (3 x 8).



Prix des profils types

Les histogrammes ci-dessous présentent les prix des profils types associés aux classes de soutènement S1 à S11 et aux répartitions A à E, au mètre.



GÉOMÉTRIE D11 – TUNNEL ROUTIER

Principales caractéristiques des classes de soutènement retenues (notées S1 à S11)

Géométrie D11 – tunnel routier		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11
Rayon intrados : 5,6 m		Contre-voûte non cintrée								Contre-voûte cintrée		
		Boulons				Cintres				Cintres		
						Enfilage		Voûte parapluie		Enfilage		Voûte parapluie
Pas de creusement (longueur de référence)	•	4,00 m	3,00 m	2,50 m	2,00 m	2,00 m	1,50 m	1,50 m	1,25 m	1,50 m	1,25 m	1,00 m
Section excavée (cf. schéma)	1											
Section min. (ligne A + 0,15 m)		102,87 m²	104,16 m²	105,45 m²	107,01 m²	107,80 m²	107,80 m²	107,80 m²	107,80 m²	140,84 m²	140,84 m²	140,84 m²
Section max. (ligne A + 0,15 m)									134,79 m²			174,75 m²
Rayon de la voûte (ligne A)		6,06 m	6,11 m	6,16 m	6,22 m	6,25 m	6,25 m	6,25 m	6,75 m	6,35 m	6,35 m	6,85 m
Périmètre de la voûte (voûte + piédroits ; ligne S)		24,92 m	24,92 m	24,92 m	24,92 m	24,45 m	24,45 m	24,45 m	26,02 m	24,02 m	24,02 m	25,58 m
Largeur en base de piédroits (valeur approximative IS ou IA)		12,12 m	12,22 m	12,32 m	12,44 m	12,50 m	12,50 m	12,50 m	13,50 m	17,26 m	17,26 m	17,62 m
Soutènements	2											
En voûte												
Épaisseur de béton projeté		0,06 m	0,11 m	0,16 m	0,22 m	0,25 m ¹	0,25 m ¹	0,25 m ¹	0,25 m ¹	0,25 m ¹	0,25 m ¹	0,25 m ¹
Nombre de boulons par pas		10 u/pas	17 u/pas	20 u/pas	27 u/pas							
Nombre de boulons par mètre		2,5 u/m	5,7 u/m	8,0 u/m	13,5 u/m							
Longueur des boulons		3,00 m	3,00 m	3,00 m	3,00 m							
Type de cintre (1u/pas)						HEB 200	HEB 200	HEB 200	HEB 200	HEB 200	HEB 200	HEB 200
En contre-voûte												
Épaisseur de béton projeté										0,25 m ¹	0,25 m ¹	0,25 m ¹
Type de cintre (1u/pas)										HEB 200	HEB 200	HEB 200
Au front												
Épaisseur de béton projeté				0,05 m	0,10 m	0,05 m	0,10 m	0,10 m	0,10 m	0,10 m	0,10 m	0,15 m
Pré-soutènements												
Boulons de front	3											
Nombre de boulons							23 u	23 u	22 u	24 u	24 u	22 u
Longueur des boulons							12,00 m	12,00 m	17,50 m	12,00 m	12,50 m	18,00 m
Mis en œuvre tous les ...							4,0 pas	4,0 pas	3,5 pas	4,0 pas	5,0 pas	4,5 pas
Mis en œuvre tous les ...							6,00 m	6,00 m	4,38 m	6,00 m	6,25 m	4,50 m
Nombre total des boulons visibles au front							46 u	46 u	86 u	48 u	48 u	88 u
Répartition des boulons au front (sur Smin, hors c-v)							2,0 m²/u	2,0 m²/u	1,3 m²/u	2,0 m²/u	2,0 m²/u	1,3 m²/u
Posés en ...							2 fois	2 fois	4 fois	2 fois	2 fois	4 fois
Enfilage	4											
Masse linéique des barres								6,3 kg/m			6,3 kg/m	
Nombre de barres								19 u			20 u	
Longueur des barres								3,00 m			3,00 m	
Mises en œuvre tous les ...								1,0 pas			1,0 pas	
Mises en œuvre tous les ...								1,50 m			1,25 m	
Entraxe approximatif (sur 120° ; ligne A)								0,73 m			0,70 m	
Voûte parapluie	5											
Masse linéique des tubes									26,2 kg/m			26,2 kg/m
Nombre de tubes									45 u			45 u
Longueur des tubes									17,50 m			18,00 m
Mis en œuvre tous les ...									7,0 pas			9,0 pas
Mis en œuvre tous les ...									8,75 m			9,00 m
Entraxe approximatif (sur 180° ; ligne A min)									0,50 m			0,50 m
Surexcavation max théorique en voûte (α = 6°)									0,92 m			0,95 m
Étanchéité et revêtements associés												
Étanchéité	6											
En voûte (ligne S)		24,92 m²	24,92 m²	24,92 m²	24,92 m²	24,45 m²	24,45 m²	24,45 m²	26,02 m²	24,02 m²	24,02 m²	25,58 m²
En contre-voûte										17,26 m²	17,26 m²	17,62 m²
Revêtement : Épaisseur de béton	7											
En voûte		0,40 m ¹	0,40 m ¹	0,40 m ¹	0,40 m ¹	0,40 m	0,40 m	0,40 m	0,90 m	0,50 m	0,50 m	1,00 m
En contre-voûte										0,75 m	0,75 m	0,75 m

- Variations de la longueur de pas autour de la longueur de référence :
Longueur de pas constante pour P7, P8, P10 et P11.
Pour les autres profils (P1 à P6 et P9) :
± 0,50 m pour Lg référence ≥ 2 m
± 0,25 m pour 1 m < Lg référence < 2 m
± 0 m pour Lg référence ≤ 1m

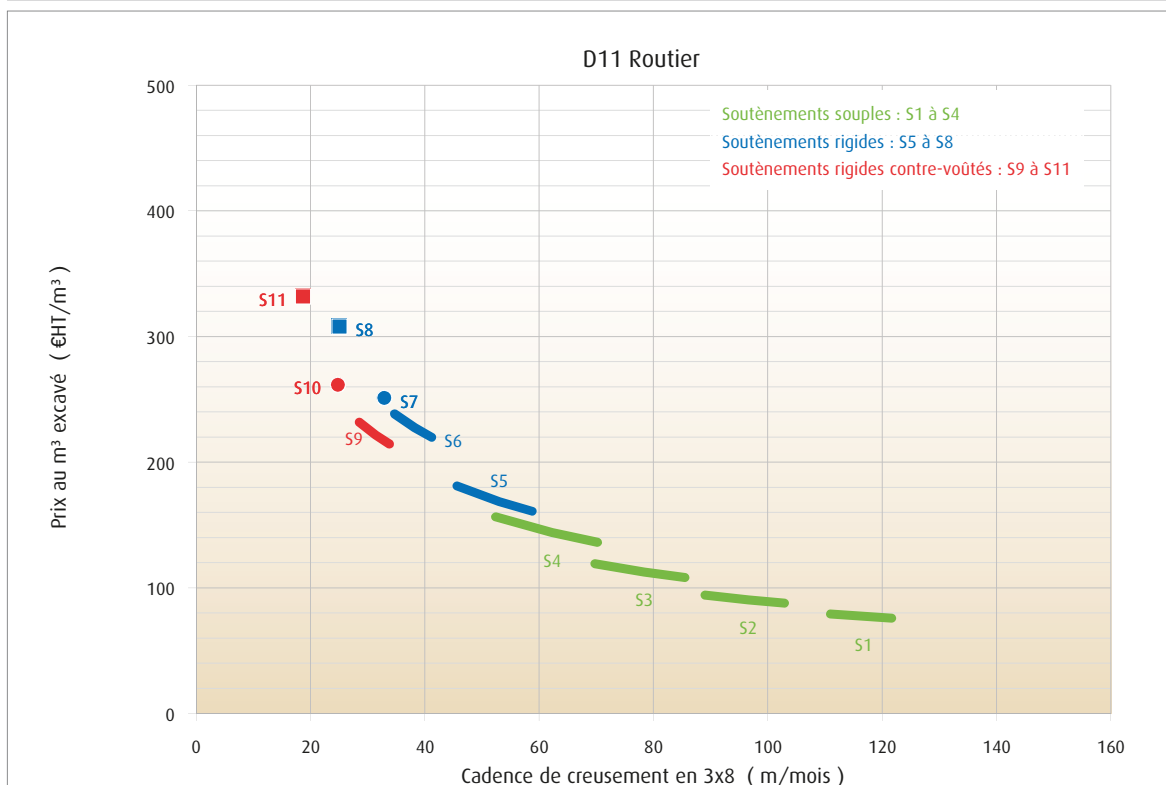
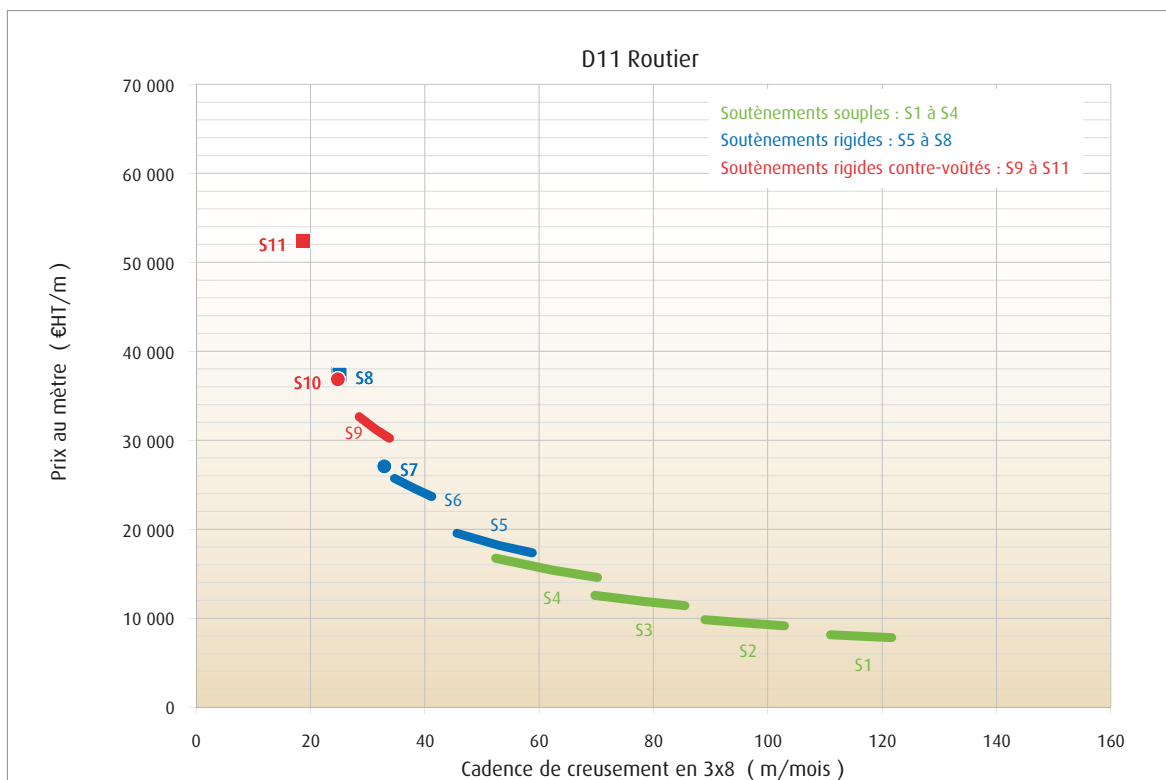
Masse linéique des profilés métalliques
HEB 180 : 51,2 kg/m
HEB 200 : 61,3 kg/m

- Les hors-profils sont pris en compte via un décalage de 0,15 m du gabarit d'excavation ou « ligne A » (cf. fascicule 69 du CCTG – art. II.1.1). Les 0,15 m au-delà de la ligne A sont comblés soit par du béton de revêtement (cas des profils boulonnés), soit par du béton projeté (cas des profils cintrés).
Pour les profils avec voûte parapluie (P8 et P11), il s'agit de valeurs moyennes.
- Pour les profils boulonnés, les boulons en voûte sont des boulons à ancrage réparti, non scellés.
Pour les profils cintrés, on considère 1 cintre par pas. L'épaisseur de béton projeté est égale à 0,05 m (1re passe) + épaisseur du cintre (2e passe : remplissage).
- Il s'agit de boulons de front « longs », en fibre de verre.
- Il s'agit d'enfilage « court », mis en œuvre à chaque pas de creusement, de type HA32 (6,3 kg/m).
- Les tubes de voûte parapluie sont de type Ø109/127 (26,2 kg/m de tube). Ils sont mis en œuvre avec une inclinaison de 6°.
- Pour les profils avec voûte parapluie (P8 et P11), il s'agit de valeurs moyennes.

GÉOMÉTRIE D11 – TUNNEL ROUTIER

Prix des classes de soutènement

Les graphes ci-dessous présentent les prix des classes de soutènement S1 à S11, au mètre et au mètre cube excavé, en fonction des cadences de creusement (creusement en 3 postes/jour).

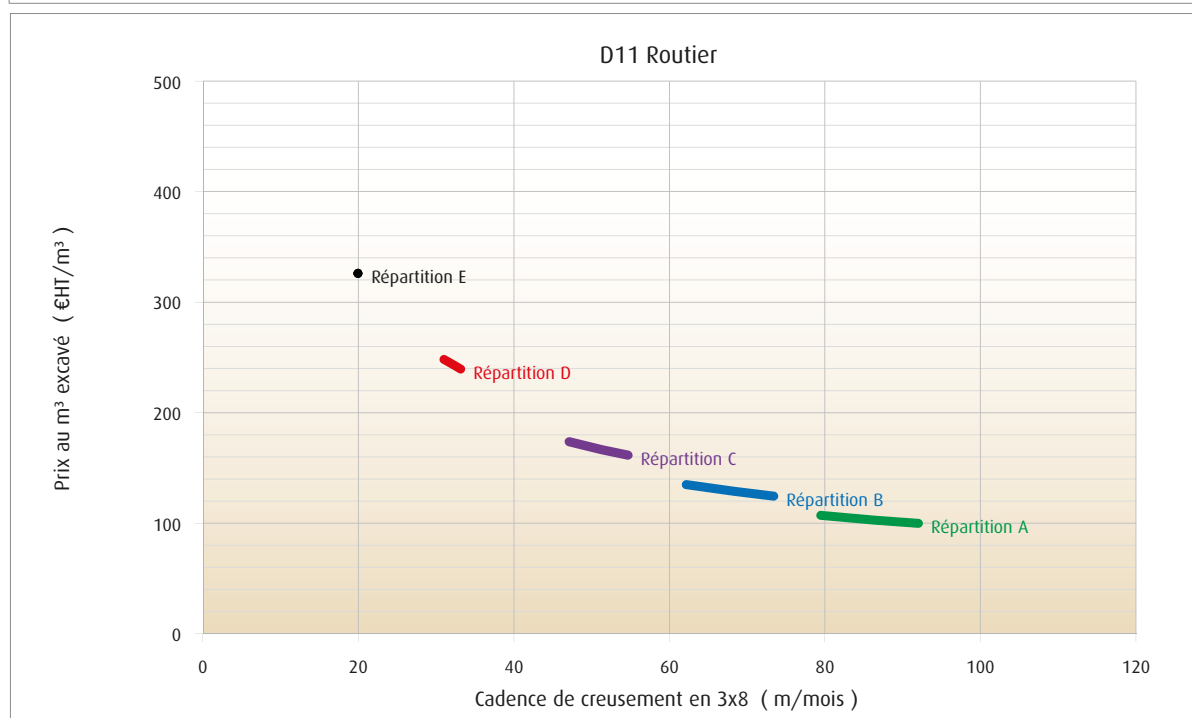
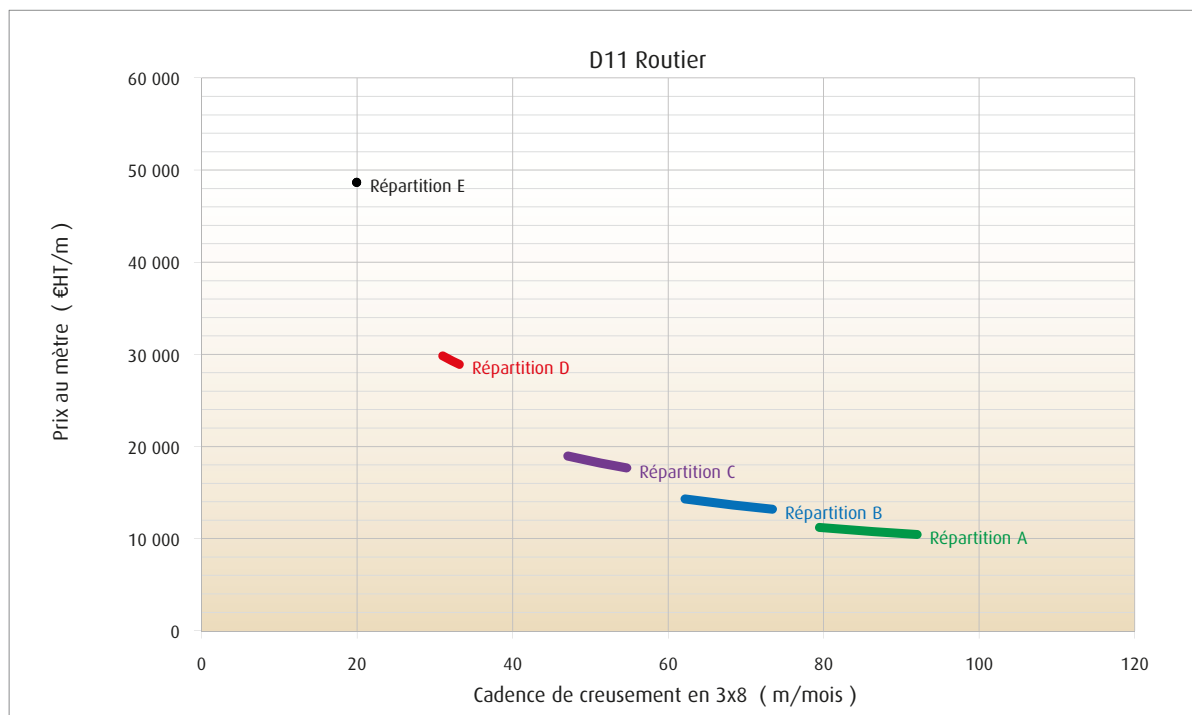


GÉOMÉTRIE D11 – TUNNEL ROUTIER

Prix des répartitions de classes de soutènement

Les graphes ci-dessous présentent les prix des répartitions de classes de soutènement A à E, au mètre et au mètre cube excavé, en fonction des cadences de creusement (creusement en 3 postes/jour).

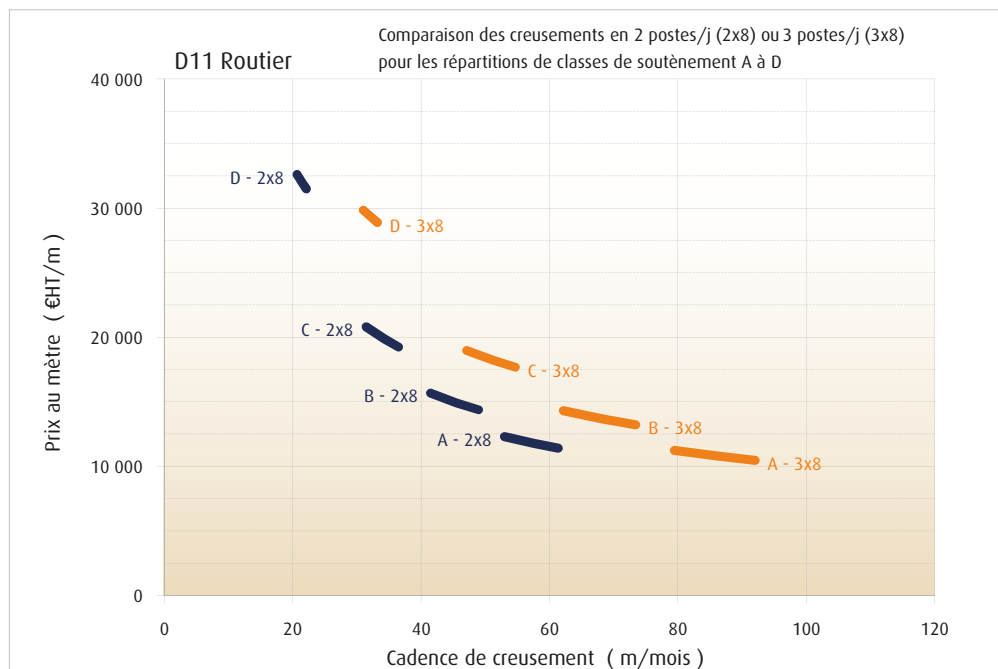
	A	B	C	D	E
Part de S1 (souple)	60 %	35 %	—	—	—
Part de S3 (souple)	30 %	40 %	60 %	20 %	—
Part de S6 (rigide)	10 %	25 %	30 %	35 %	—
Part de S8 (rigide)	—	—	10 %	35 %	25 %
Part de S11 (rigide contre-voûté)	—	—	—	10 %	75 %



GÉOMÉTRIE D11 – TUNNEL ROUTIER

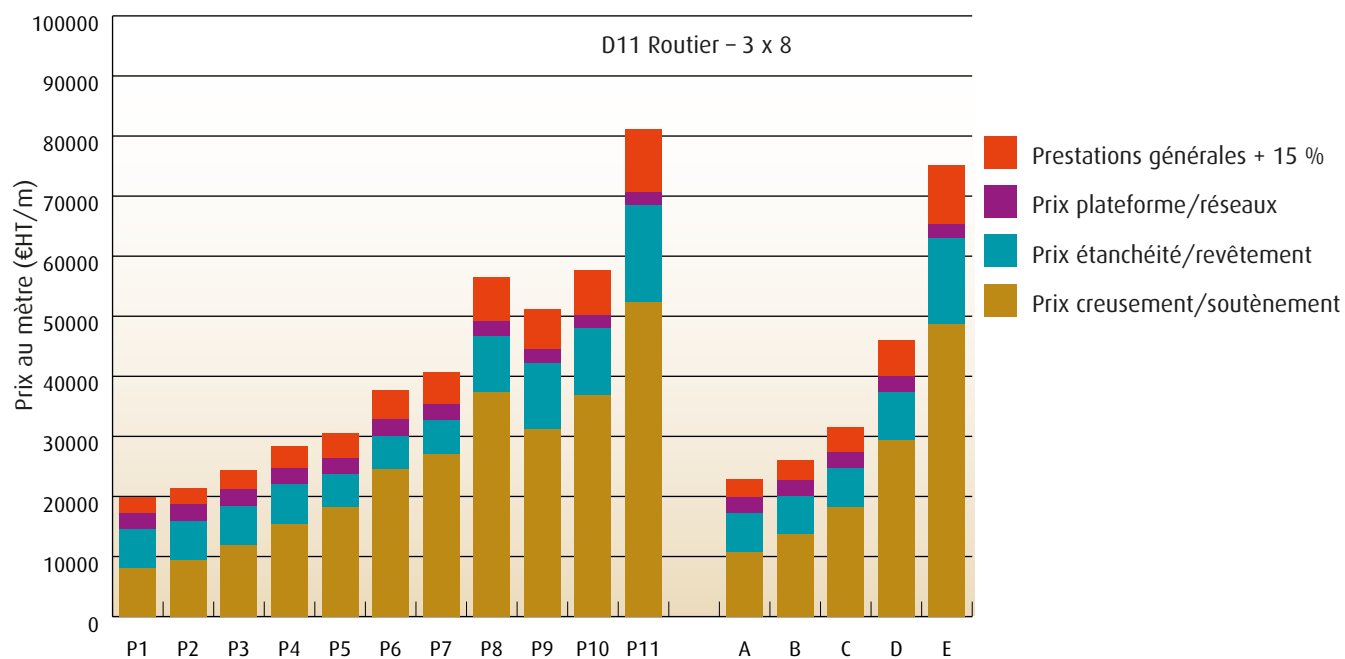
Incidence des cadences sur les prix

Le graphe ci-dessous présente les prix des répartitions de classes de soutènement A à D, au mètre, en fonction des cadences de creusement selon deux hypothèses : creusement en 2 postes/jour (2 x 8) et 3 postes/jour (3 x 8).



Prix des profils types

Les histogrammes ci-dessous présentent les prix des profils types associés aux classes de soutènement S1 à S11 et aux répartitions A à E, au mètre.



GÉOMÉTRIE D12 – TUNNEL FERROVIAIRE

Principales caractéristiques des classes de soutènement retenues (notées S1 à S11)

Géométrie D12 – tunnel ferroviaire	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11
Rayon intrados : 6,1 m	Contre-voûte non cintrée								Contre-voûte cintrée		
	Boulons				Cintres				Cintres		
					Enfilage		Voûte parapluie		Enfilage		Voûte parapluie
Pas de creusement (longueur de référence)	4,00 m	3,00 m	2,50 m	2,00 m	2,00 m	1,50 m	1,50 m	1,25 m	1,50 m	1,25 m	1,00 m
Section excavée (cf. schéma)	1										
Section min. (ligne A + 0,15 m)	149,75 m²	151,60 m²	153,84 m²	156,08 m²	156,83 m²	156,83 m²	156,83 m²	156,83 m²	168,49 m²	168,49 m²	168,49 m²
Section max. (ligne A + 0,15 m)								194,58 m²			206,28 m²
Rayon de la voûte (ligne A)	6,66 m	6,71 m	6,77 m	6,83 m	6,85 m	6,85 m	6,85 m	7,35 m	6,95 m	6,95 m	7,45 m
Périmètre de la voûte (voûte + piédroits ; ligne S)	27,90 m	27,90 m	27,90 m	27,90 m	27,90 m	27,90 m	27,90 m	29,46 m	28,21 m	28,21 m	29,77 m
Largeur en base de piédroits (valeur approximative IS ou IA)	13,32 m	13,42 m	13,54 m	13,66 m	13,70 m	13,70 m	13,70 m	14,70 m	16,53 m	16,53 m	17,04 m
Soutènements	2										
En voûte											
Épaisseur de béton projeté	0,06 m	0,11 m	0,17 m	0,23 m	0,25 m ¹	0,25 m ¹	0,25 m ¹	0,25 m ¹	0,25 m ¹	0,25 m ¹	0,25 m ¹
Nombre de boulons par pas	10 u/pas	18 u/pas	21 u/pas	29 u/pas							
Nombre de boulons par mètre	2,5 u/m	6,0 u/m	8,4 u/m	14,5 u/m							
Longueur des boulons	3,00 m	3,00 m	3,00 m	3,00 m							
Type de cintre (1u/pas)					HEB 200	HEB 200	HEB 200	HEB 200	HEB 200	HEB 200	HEB 200
En contre-voûte											
Épaisseur de béton projeté	0,05 m	0,05 m	0,05 m	0,05 m	0,05 m	0,05 m	0,05 m	0,05 m	0,25 m ¹	0,25 m ¹	0,25 m ¹
Type de cintre (1u/pas)									HEB 200	HEB 200	HEB 200
Au front											
Épaisseur de béton projeté			0,05 m	0,10 m	0,05 m	0,10 m	0,10 m	0,10 m	0,10 m	0,10 m	0,15 m
Pré-soutènements											
Boulons de front	3										
Nombre de boulons						31 u	31 u	28 u	32 u	32 u	29 u
Longueur des boulons						12,00 m	12,00 m	17,50 m	12,00 m	12,50 m	18,00 m
Mis en œuvre tous les ...						4,0 pas	4,0 pas	3,5 pas	4,0 pas	5,0 pas	4,5 pas
Mis en œuvre tous les ...						6,00 m	6,00 m	4,38 m	6,00 m	6,25 m	4,50 m
Nombre total des boulons visibles au front						62 u	62 u	112 u	64 u	64 u	114 u
Répartition des boulons au front (sur Smin, hors c-v)						2,0 m²/u	2,0 m²/u	1,3 m²/u	2,0 m²/u	2,0 m²/u	1,3 m²/u
Posés en ...						2 fois	2 fois	4 fois	2 fois	2 fois	4 fois
Enfilage	4										
Masse linéique des barres							6,3 kg/m			6,3 kg/m	
Nombre de barres							21 u			21 u	
Longueur des barres							3,00 m			3,00 m	
Mises en œuvre tous les ...							1,0 pas			1,0 pas	
Mises en œuvre tous les ...							1,50 m			1,25 m	
Entraxe approximatif (sur 120° ; ligne A)							0,72 m			0,73 m	
Voûte parapluie	5										
Masse linéique des tubes								26,2 kg/m			26,2 kg/m
Nombre de tubes								49 u			49 u
Longueur des tubes								17,50 m			18,00 m
Mis en œuvre tous les ...								7,0 pas			9,0 pas
Mis en œuvre tous les ...								8,75 m			9,00 m
Entraxe approximatif (sur 180° ; ligne A min)								0,50 m			0,50 m
Surexcavation max théorique en voûte (α = 6°)								0,92 m			0,95 m
Étanchéité et revêtements associés											
Étanchéité	6										
En voûte (ligne S)	27,90 m²	27,90 m²	27,90 m²	27,90 m²	27,90 m²	27,90 m²	27,90 m²	29,46 m²	28,21 m²	28,21 m²	29,77 m²
En contre-voûte									16,53 m²	16,53 m²	17,04 m²
Revêtement : Épaisseur de béton	7										
En voûte	0,50 m ¹	0,50 m ¹	0,50 m ¹	0,50 m ¹	0,50 m	0,50 m	0,50 m	1,00 m	0,60 m	0,60 m	1,10 m
En contre-voûte	0,75 m	0,75 m	0,75 m	0,75 m	0,75 m	0,75 m	0,75 m	0,75 m	0,90 m	0,90 m	0,90 m

- Variations de la longueur de pas autour de la longueur de référence :
Longueur de pas constante pour P7, P8, P10 et P11.
Pour les autres profils (P1 à P6 et P9) :
± 0,50 m pour Lg référence ≥ 2 m
± 0,25 m pour 1 m < Lg référence < 2 m
± 0 m pour Lg référence ≤ 1 m

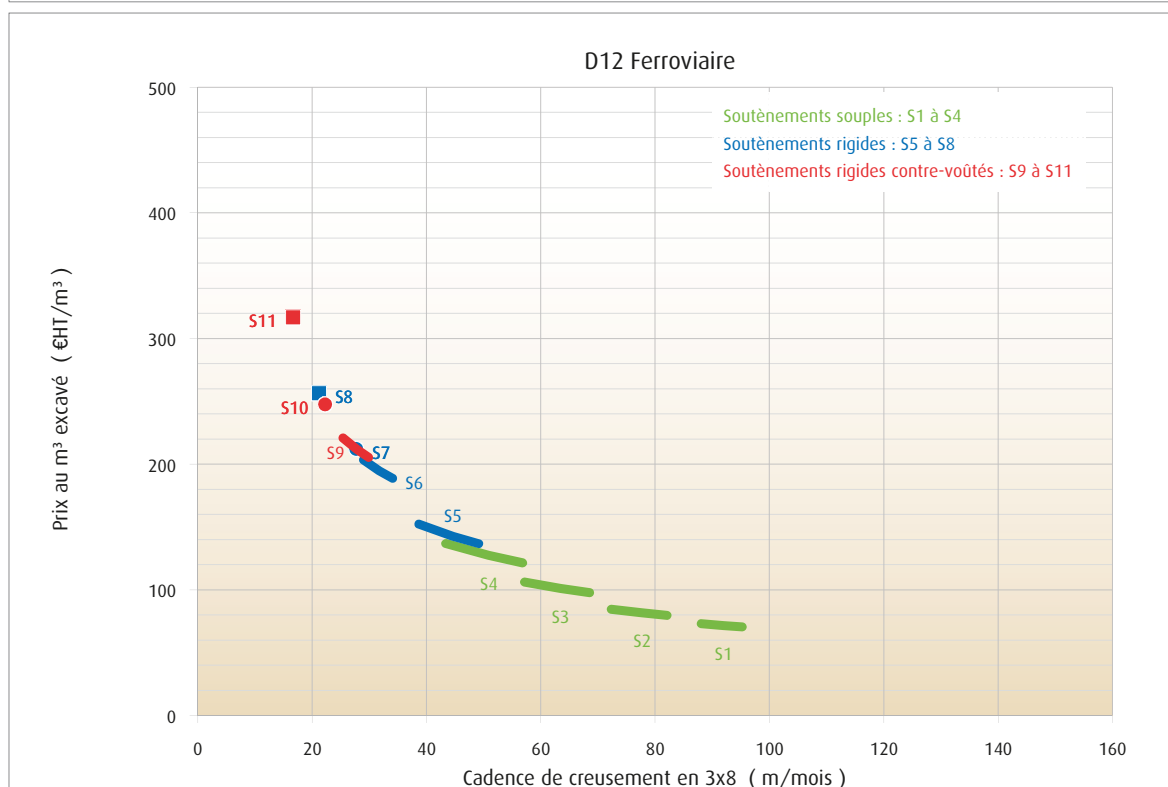
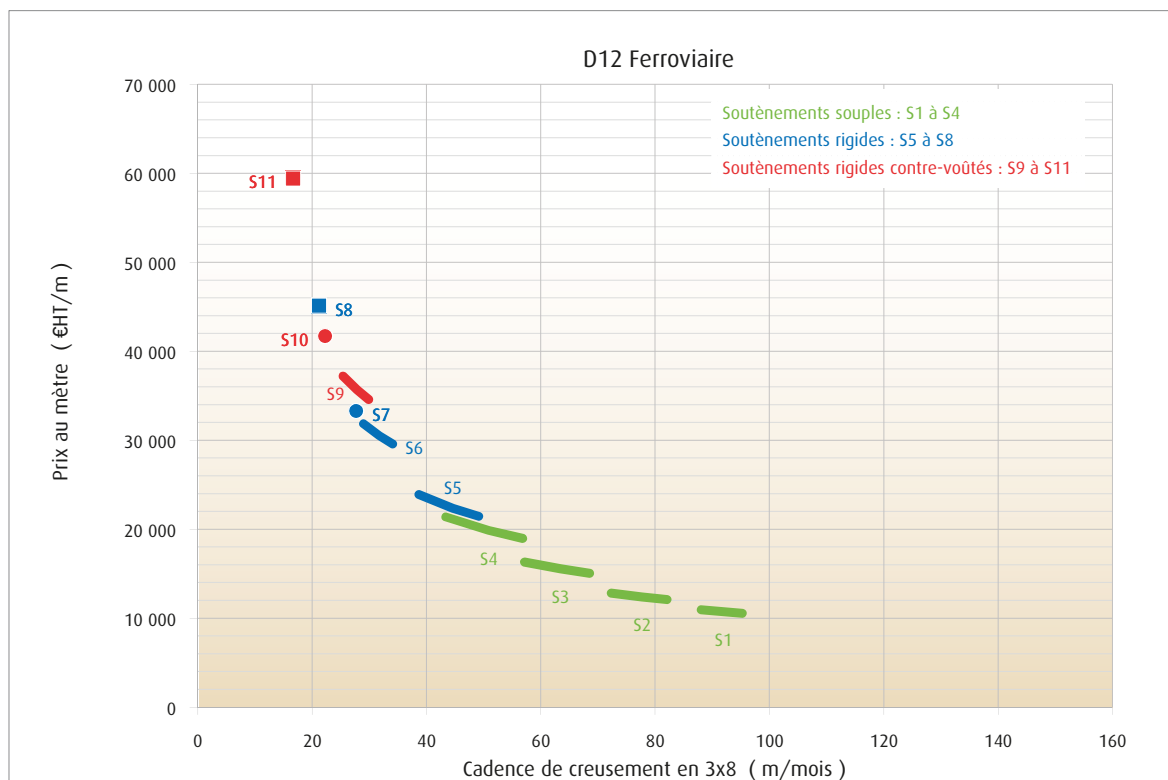
Masse linéique des profilés métalliques
HEB 180 : 51,2 kg/m
HEB 200 : 61,3 kg/m

- Les hors-profils sont pris en compte via un décalage de 0,15 m du gabarit d'excavation ou « ligne A » (cf. fascicule 69 du CCTG – art. II.1.1). Les 0,15 m au-delà de la ligne A sont comblés soit par du béton de revêtement (cas des profils boulonnés), soit par du béton projeté (cas des profils cintrés).
Pour les profils avec voûte parapluie (P8 et P11), il s'agit de valeurs moyennes.
- Pour les profils boulonnés, les boulons en voûte sont des boulons à ancrage réparti, non scellés.
Pour les profils cintrés, on considère 1 cintre par pas. L'épaisseur de béton projeté est égale à 0,05 m (1re passe) + épaisseur du cintre (2e passe : remplissage).
- Il s'agit de boulons de front « longs », en fibre de verre.
- Il s'agit d'enfilage « court », mis en œuvre à chaque pas de creusement, de type HA32 (6,3 kg/m).
- Les tubes de voûte parapluie sont de type Ø109/127 (26,2 kg/m de tube). Ils sont mis en œuvre avec une inclinaison de 6°.
- Pour les profils avec voûte parapluie (P8 et P11), il s'agit de valeurs moyennes.

GÉOMÉTRIE D12 – TUNNEL FERROVIAIRE

Prix des classes de soutènement

Les graphes ci-dessous présentent les prix des classes de soutènement S1 à S11, au mètre et au mètre cube excavé, en fonction des cadences de creusement (creusement en 3 postes/jour).

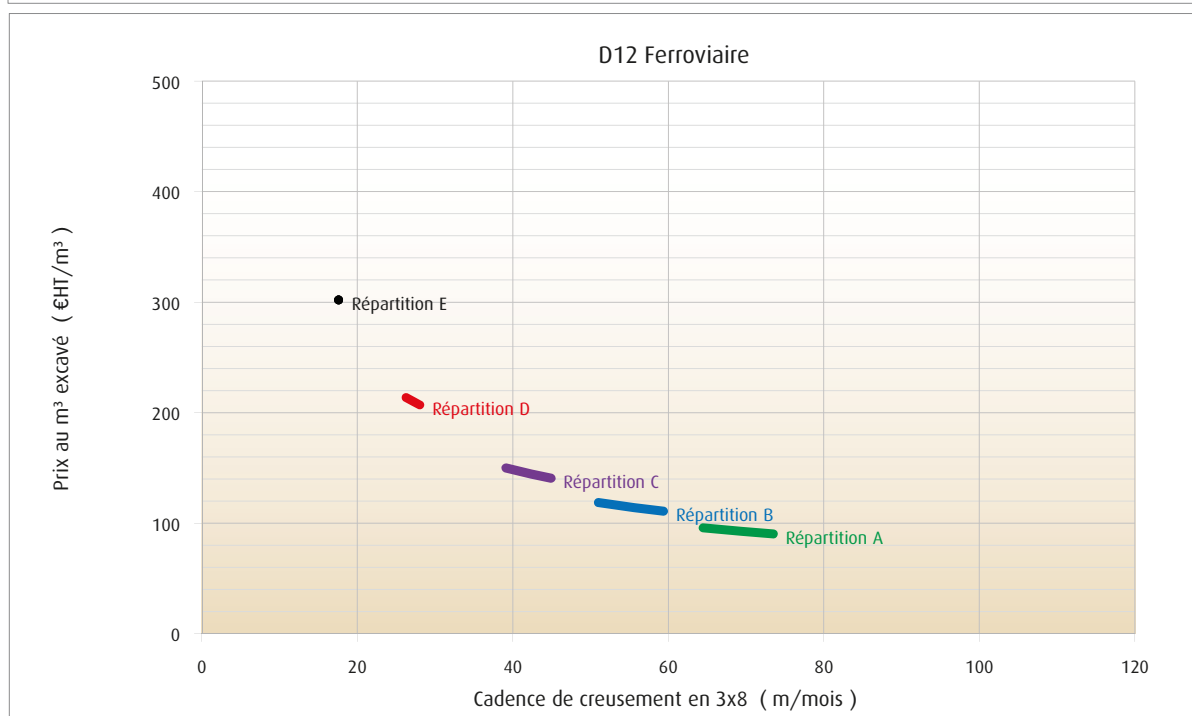
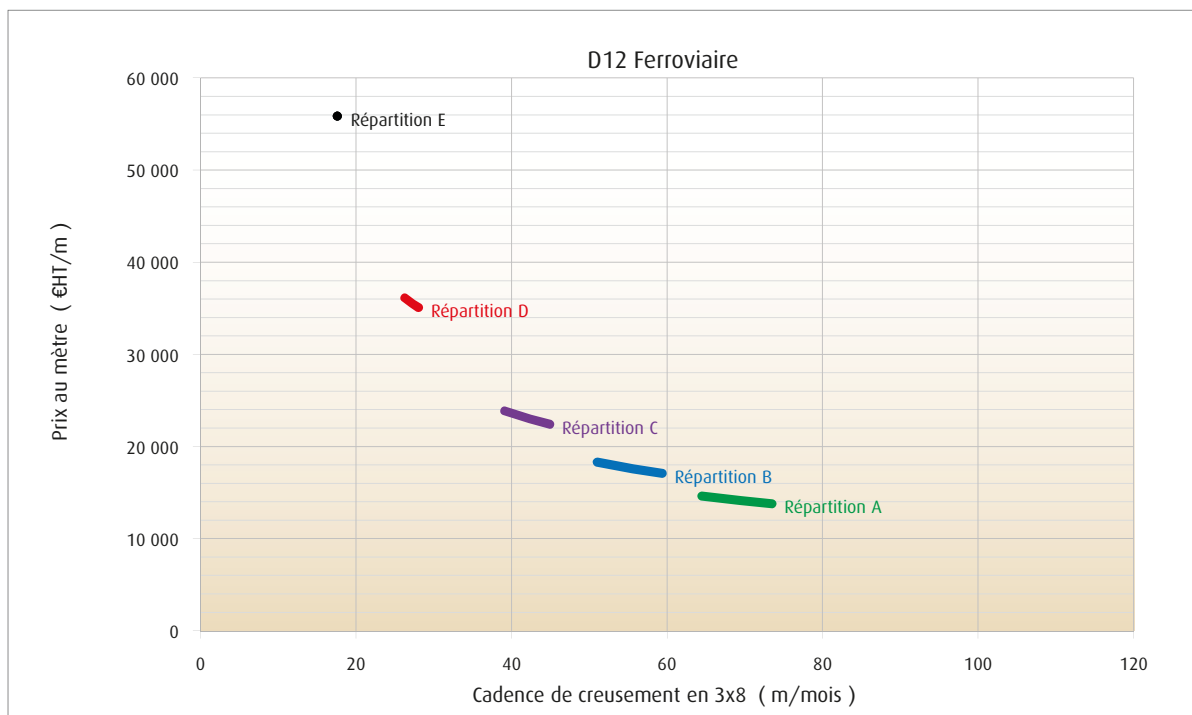


GÉOMÉTRIE D12 – TUNNEL FERROVIAIRE

Prix des répartitions de classes de soutènement

Les graphes ci-dessous présentent les prix des répartitions de classes de soutènement A à E, au mètre et au mètre cube excavé, en fonction des cadences de creusement (creusement en 3 postes/jour).

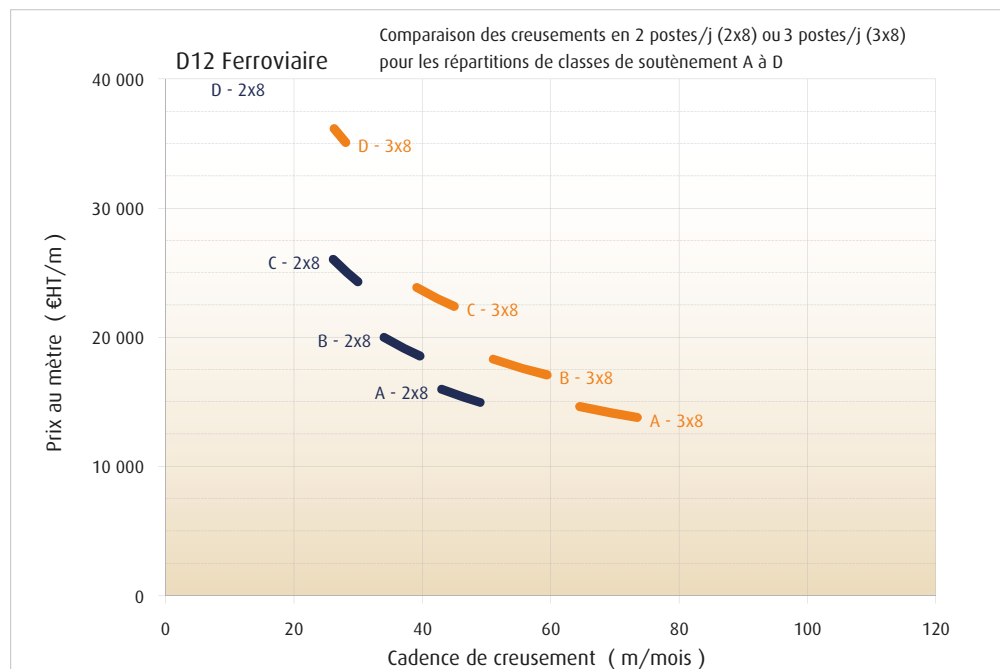
	A	B	C	D	E
Part de S1 (souple)	60 %	35 %	—	—	—
Part de S3 (souple)	30 %	40 %	60 %	20 %	—
Part de S6 (rigide)	10 %	25 %	30 %	35 %	—
Part de S8 (rigide)	—	—	10 %	35 %	25 %
Part de S11 (rigide contre-voûté)	—	—	—	10 %	75 %



GÉOMÉTRIE D12 – TUNNEL FERROVIAIRE

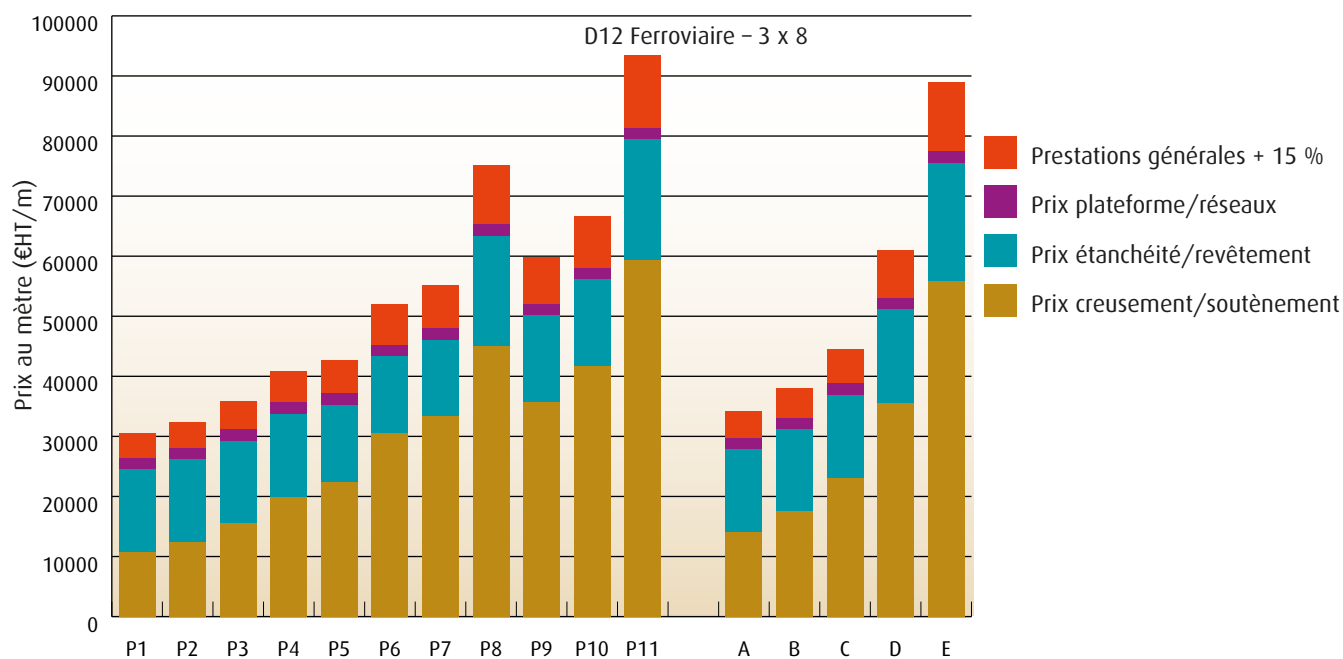
Incidence des cadences sur les prix

Le graphe ci-dessous présente les prix des répartitions de classes de soutènement A à D, au mètre, en fonction des cadences de creusement selon deux hypothèses : creusement en 2 postes/jour (2 x 8) et 3 postes/jour (3 x 8).



Prix des profils types

Les histogrammes ci-dessous présentent les prix des profils types associés aux classes de soutènement S1 à S11 et aux répartitions A à E, au mètre.



GÉOMÉTRIE D12 – TUNNEL ROUTIER

Principales caractéristiques des classes de soutènement retenues (notées S1 à S11)

Géométrie D12 – tunnel routier		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11
Rayon intrados : 6,1 m		Contre-voûte non cintrée								Contre-voûte cintrée		
		Boulons				Cintres				Cintres		
						Enfilage		Voûte parapluie		Enfilage		Voûte parapluie
Pas de creusement (longueur de référence)	•	4,00 m	3,00 m	2,50 m	2,00 m	2,00 m	1,50 m	1,50 m	1,25 m	1,50 m	1,25 m	1,00 m
Section excavée (cf. schéma)	1											
Section min. (ligne A + 0,15 m)		117,44 m²	118,81 m²	120,47 m²	122,13 m²	122,69 m²	122,69 m²	122,69 m²	122,69 m²	168,49 m²	168,49 m²	168,49 m²
Section max. (ligne A + 0,15 m)									151,36 m²			206,28 m²
Rayon de la voûte (ligne A)		6,66 m	6,71 m	6,77 m	6,83 m	6,85 m	6,85 m	6,85 m	7,35 m	6,95 m	6,95 m	7,45 m
Périmètre de la voûte (voûte + piédroits ; ligne S)		26,61 m	26,61 m	26,61 m	26,61 m	26,13 m	26,13 m	26,13 m	27,71 m	25,69 m	25,69 m	27,26 m
Largeur en base de piédroits (valeur approximative IS ou IA)		13,32 m	13,42 m	13,54 m	13,66 m	13,70 m	13,70 m	13,70 m	14,70 m	19,05 m	19,05 m	19,54 m
Soutènements	2											
En voûte												
Épaisseur de béton projeté		0,06 m	0,11 m	0,17 m	0,23 m	0,25 m ¹	0,25 m ¹	0,25 m ¹	0,25 m ¹	0,25 m ¹	0,25 m ¹	0,25 m ¹
Nombre de boulons par pas		10 u/pas	18 u/pas	21 u/pas	29 u/pas							
Nombre de boulons par mètre		2,5 u/m	6,0 u/m	8,4 u/m	14,5 u/m							
Longueur des boulons		3,00 m	3,00 m	3,00 m	3,00 m							
Type de cintre (1u/pas)						HEB 200	HEB 200	HEB 200	HEB 200	HEB 200	HEB 200	HEB 200
En contre-voûte												
Épaisseur de béton projeté										0,25 m ¹	0,25 m ¹	0,25 m ¹
Type de cintre (1u/pas)										HEB 200	HEB 200	HEB 200
Au front												
Épaisseur de béton projeté				0,05 m	0,10 m	0,05 m	0,10 m	0,10 m	0,10 m	0,10 m	0,10 m	0,15 m
Pré-soutènements												
Boulons de front	3											
Nombre de boulons							27 u	27 u	25 u	28 u	28 u	25 u
Longueur des boulons							12,00 m	12,00 m	17,50 m	12,00 m	12,50 m	18,00 m
Mis en œuvre tous les ...							4,0 pas	4,0 pas	3,5 pas	4,0 pas	5,0 pas	4,5 pas
Mis en œuvre tous les ...							6,00 m	6,00 m	4,38 m	6,00 m	6,25 m	4,50 m
Nombre total des boulons visibles au front							54 u	54 u	98 u	56 u	56 u	100 u
Répartition des boulons au front (sur Smin, hors c-v)							2,0 m²/u	2,0 m²/u	1,3 m²/u	2,0 m²/u	2,0 m²/u	1,3 m²/u
Posés en ...							2 fois	2 fois	4 fois	2 fois	2 fois	4 fois
Enfilage	4											
Masse linéique des barres								6,3 kg/m			6,3 kg/m	
Nombre de barres								21 u			21 u	
Longueur des barres								3,00 m			3,00 m	
Mises en œuvre tous les ...								1,0 pas			1,0 pas	
Mises en œuvre tous les ...								1,50 m			1,25 m	
Entraxe approximatif (sur 120° ; ligne A)								0,72 m			0,73 m	
Voûte parapluie	5											
Masse linéique des tubes									26,2 kg/m			26,2 kg/m
Nombre de tubes									49 u			49 u
Longueur des tubes									17,50 m			18,00 m
Mis en œuvre tous les ...									7,0 pas			9,0 pas
Mis en œuvre tous les ...									8,75 m			9,00 m
Entraxe approximatif (sur 180° ; ligne A min)									0,50 m			0,50 m
Surexcavation max théorique en voûte (α = 6°)									0,92 m			0,95 m
Étanchéité et revêtements associés												
Étanchéité	6											
En voûte (ligne S)		26,61 m²	26,61 m²	26,61 m²	26,61 m²	26,13 m²	26,13 m²	26,13 m²	27,71 m²	25,69 m²	25,69 m²	27,26 m²
En contre-voûte										19,05 m²	19,05 m²	19,54 m²
Revêtement : Épaisseur de béton	7											
En voûte		0,50 m ¹	0,50 m ¹	0,50 m ¹	0,50 m ¹	0,50 m	0,50 m	0,50 m	1,00 m	0,60 m	0,60 m	1,10 m
En contre-voûte										0,90 m	0,90 m	0,90 m

- Variations de la longueur de pas autour de la longueur de référence :
Longueur de pas constante pour P7, P8, P10 et P11.
Pour les autres profils (P1 à P6 et P9) :
± 0,50 m pour Lg référence ≥ 2 m
± 0,25 m pour 1 m < Lg référence < 2 m
± 0 m pour Lg référence ≤ 1 m

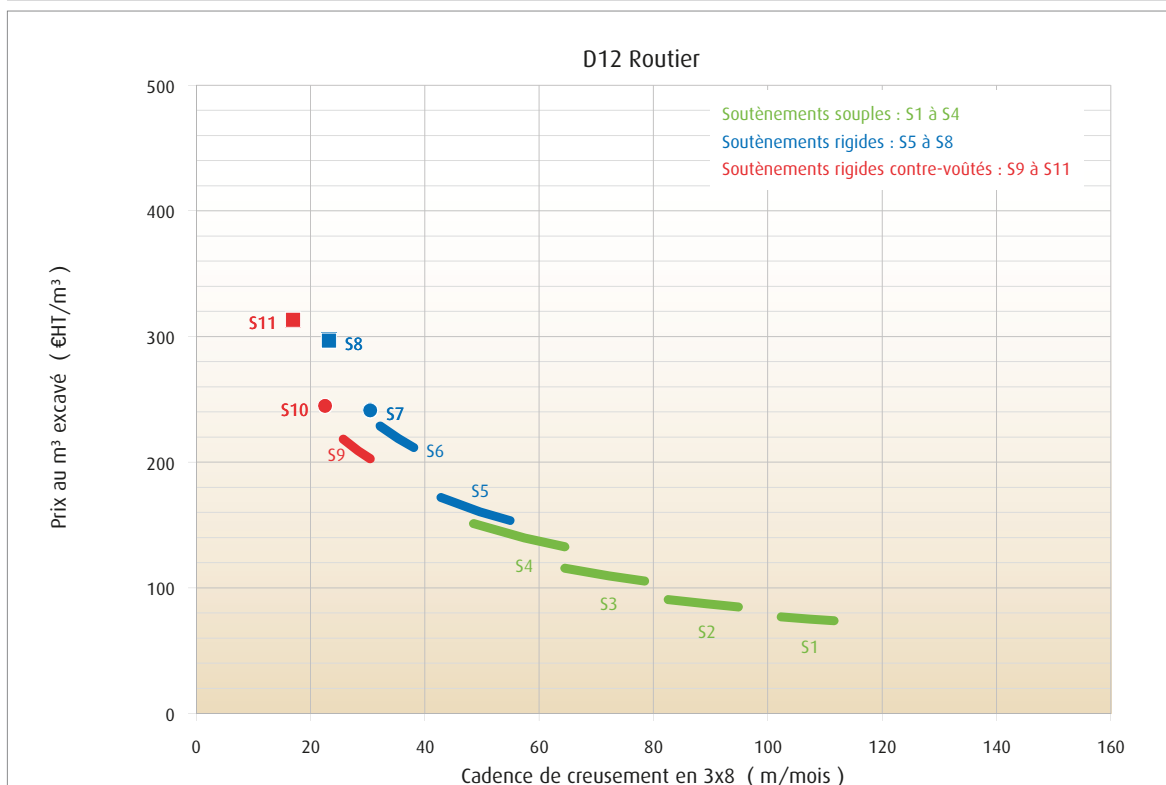
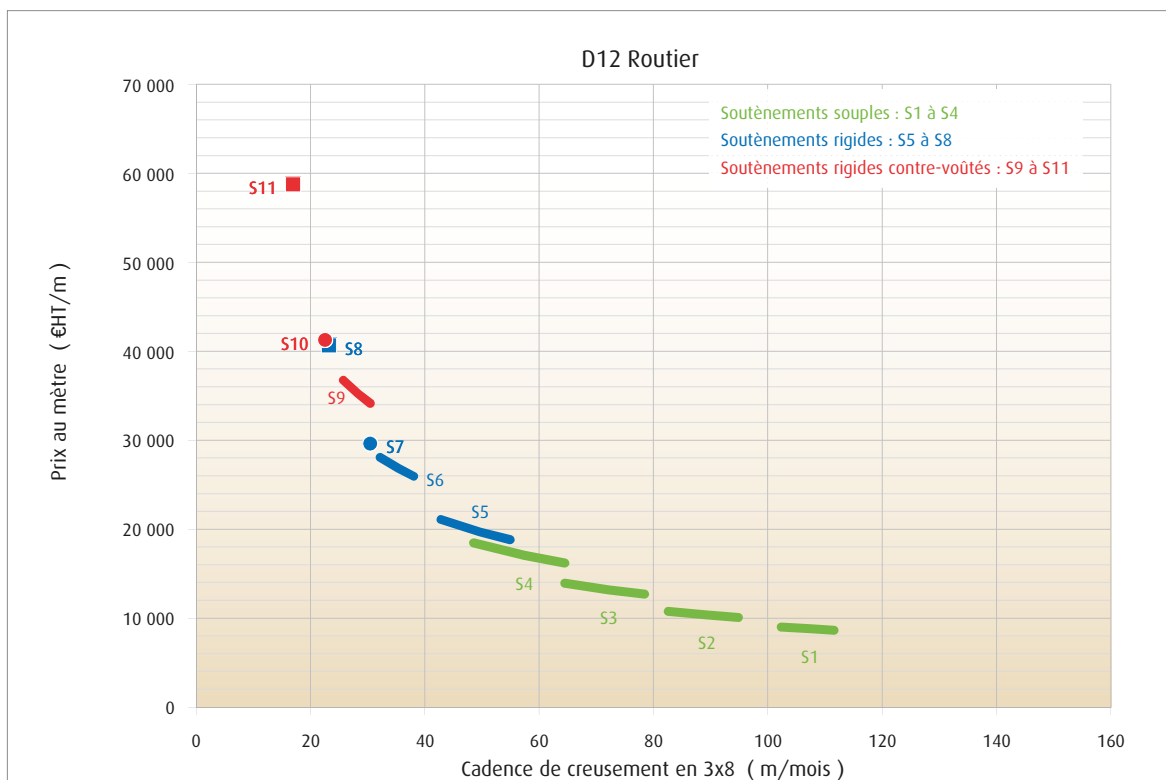
Masse linéique des profilés métalliques
HEB 180 : 51,2 kg/m
HEB 200 : 61,3 kg/m

- Les hors-profils sont pris en compte via un décalage de 0,15 m du gabarit d'excavation ou « ligne A » (cf. fascicule 69 du CCTG – art. II.1.1). Les 0,15 m au-delà de la ligne A sont comblés soit par du béton de revêtement (cas des profils boulonnés), soit par du béton projeté (cas des profils cintrés).
Pour les profils avec voûte parapluie (P8 et P11), il s'agit de valeurs moyennes.
- Pour les profils boulonnés, les boulons en voûte sont des boulons à ancrage réparti, non scellés.
Pour les profils cintrés, on considère 1 cintre par pas. L'épaisseur de béton projeté est égale à 0,05 m (1re passe) + épaisseur du cintre (2e passe : remplissage).
- Il s'agit de boulons de front « longs », en fibre de verre.
- Il s'agit d'enfilage « court », mis en œuvre à chaque pas de creusement, de type HA32 (6,3 kg/m).
- Les tubes de voûte parapluie sont de type Ø109/127 (26,2 kg/m de tube). Ils sont mis en œuvre avec une inclinaison de 6°.
- Pour les profils avec voûte parapluie (P8 et P11), il s'agit de valeurs moyennes.

GÉOMÉTRIE D12 – TUNNEL ROUTIER

Prix des classes de soutènement

Les graphes ci-dessous présentent les prix des classes de soutènement S1 à S11, au mètre et au mètre cube excavé, en fonction des cadences de creusement (creusement en 3 postes/jour).

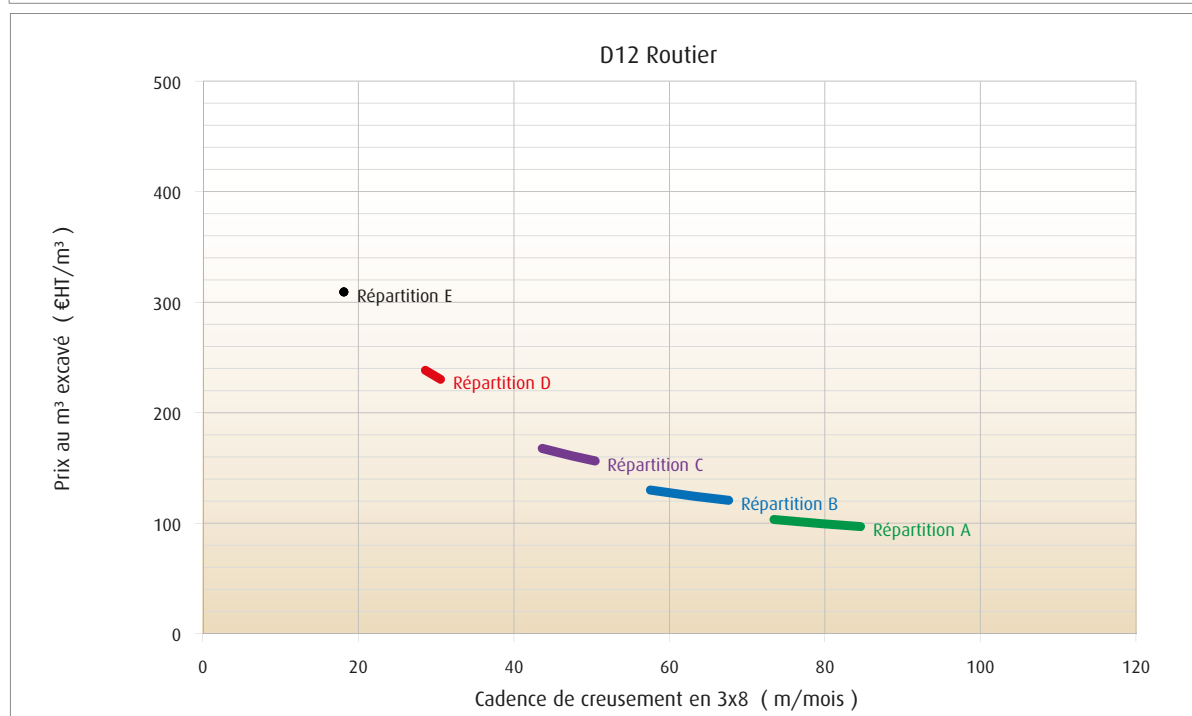
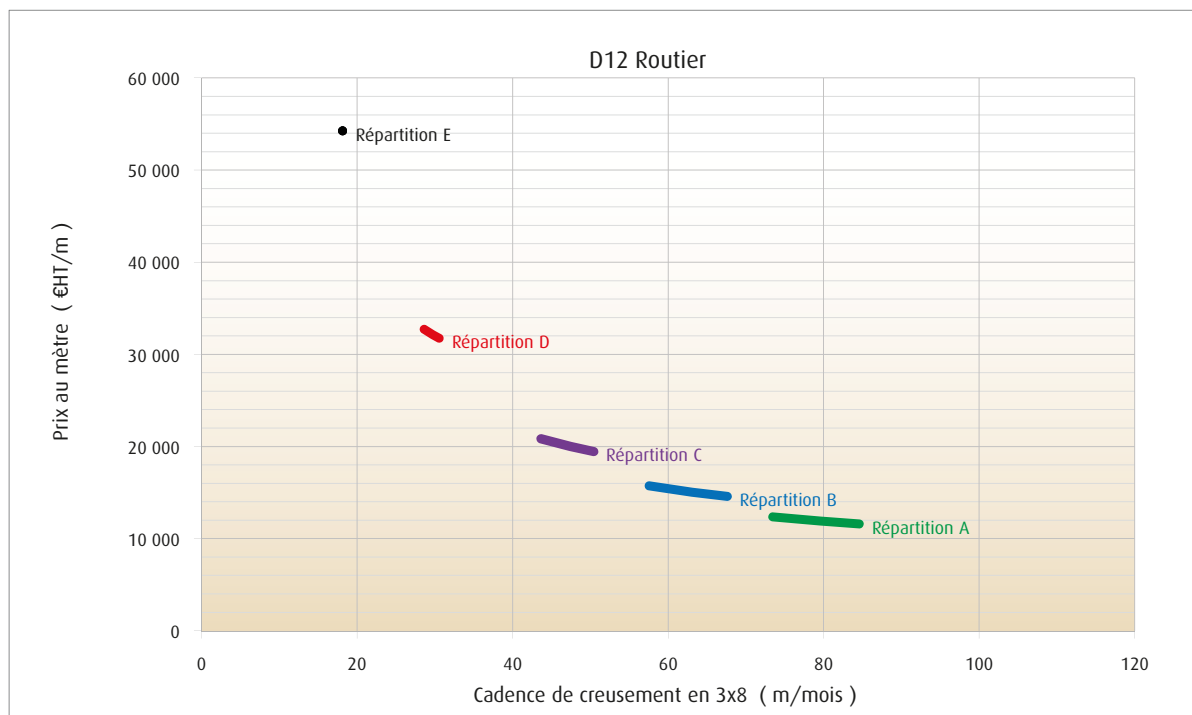


GÉOMÉTRIE D12 – TUNNEL ROUTIER

Prix des répartitions de classes de soutènement

Les graphes ci-dessous présentent les prix des répartitions de classes de soutènement A à E, au mètre et au mètre cube excavé, en fonction des cadences de creusement (creusement en 3 postes/jour).

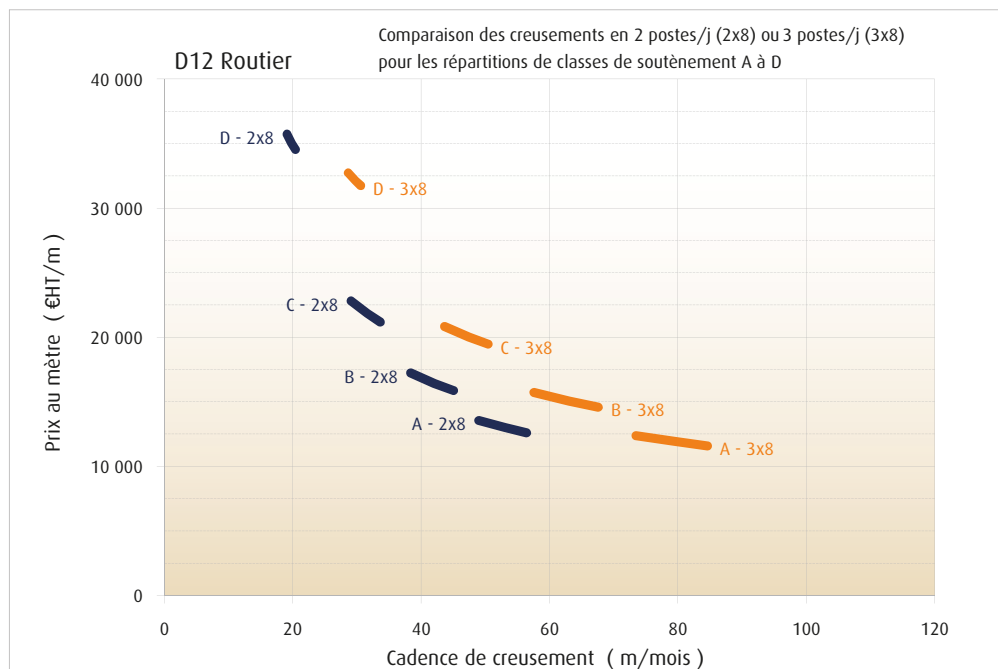
	A	B	C	D	E
Part de S1 (souple)	60 %	35 %	—	—	—
Part de S3 (souple)	30 %	40 %	60 %	20 %	—
Part de S6 (rigide)	10 %	25 %	30 %	35 %	—
Part de S8 (rigide)	—	—	10 %	35 %	25 %
Part de S11 (rigide contre-voûté)	—	—	—	10 %	75 %



GÉOMÉTRIE D12 – TUNNEL ROUTIER

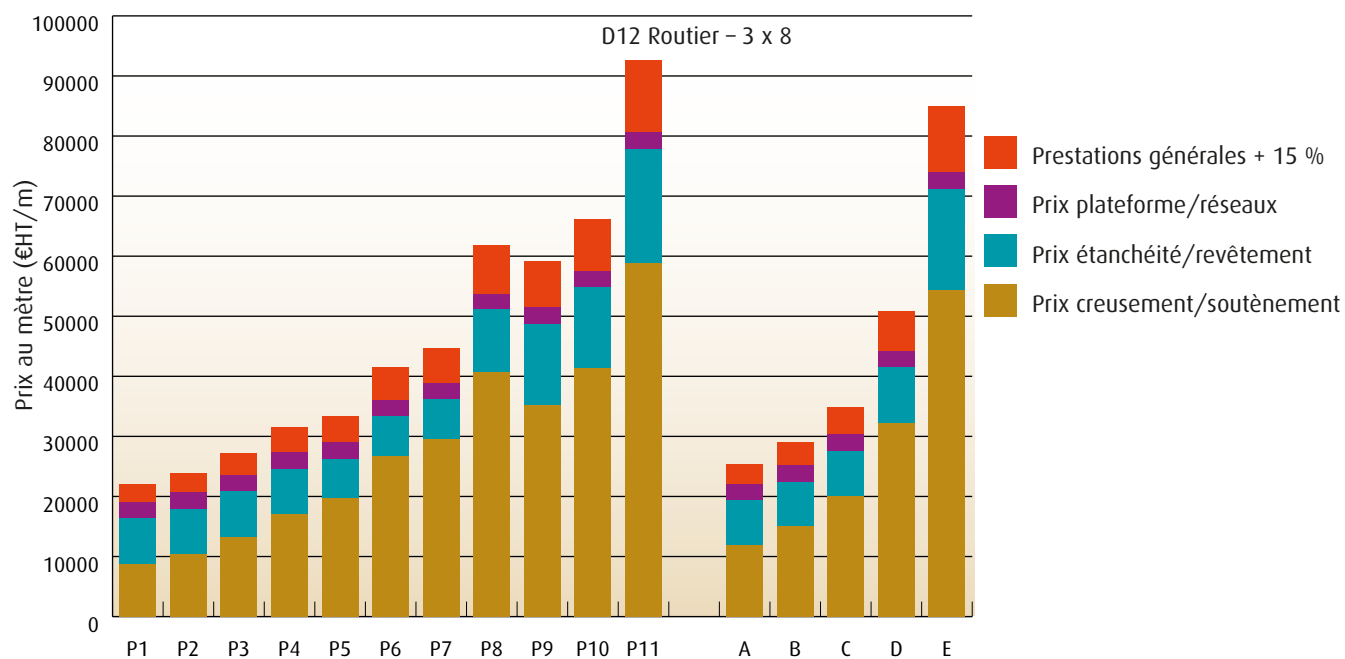
Incidence des cadences sur les prix

Le graphe ci-dessous présente les prix des répartitions de classes de soutènement A à D, au mètre, en fonction des cadences de creusement selon deux hypothèses : creusement en 2 postes/jour (2 x 8) et 3 postes/jour (3 x 8).



Prix des profils types

Les histogrammes ci-dessous présentent les prix des profils types associés aux classes de soutènement S1 à S11 et aux répartitions A à E, au mètre.



This image shows a single sheet of white paper with horizontal blue ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

This image shows a full page of blank, lined paper. It features approximately 20 evenly spaced horizontal blue lines across its entire width, typical of notebook or primary writing paper. The background is a solid off-white color. There are no margins, text, or other markings present.

This image shows a full-page view of a notebook or worksheet. At the top left, there is a purple curved tab with the word "NOTES" written in white capital letters. The main body of the page is white and filled with horizontal blue lines for writing. At the bottom, there is a solid purple horizontal bar with the number "38" written in white. The overall design is clean and functional for note-taking.



Centre d'Études des Tunnels
25 avenue François Mitterrand
Case n°1
69674 BRON - FRANCE
Tél. 33 (0)4 72 14 34 00
Fax. 33 (0)4 72 14 34 30
cetu@developpement-durable.gouv.fr



FASCICULE 3

Travaux de génie civil – ouvrages émergents



AVERTISSEMENT

Les documents d'information ont pour but de fournir une information sur une technique ou un problème nouveau ou insuffisamment traité par ailleurs. Le lecteur pourra y trouver des repères susceptibles de l'aider dans son activité. Le contenu et les éventuelles conclusions présentés ne doivent pas être considérés comme des recommandations du CETU. Bien que le maximum soit fait pour s'assurer de la fiabilité des sources utilisées, la responsabilité du CETU ou des auteurs du document ne saurait être engagée.

TABLE DES MATIÈRES

1 INTRODUCTION	4
2 TECHNIQUES DE CONFORTEMENTS RENCONTRÉES	5
2.1 Parois clouées	5
2.2 Parois moulées	5
2.3 Parois berlinoises	5
3 ANALYSE DES PRIX DES TÊTES	6
4 EXEMPLES	8
5 ANNEXE : LISTE DES TUNNELS RECENSÉS	9

INTRODUCTION

Le fascicule 3 s'inscrit dans une série de fascicules constituant le document d'information sur le prix des tunnels :

- fascicule 0 : périmètre du document, données d'entrée pour l'estimation
- fascicule 1 : provisions et autres postes de l'enveloppe prévisionnelle plafond
- fascicule 2 : travaux de génie civil – tunnel en section courante
- **fascicule 3 : travaux de génie civil – ouvrages émergents**
- fascicule 4 : travaux d'équipements de sécurité et d'exploitation – ventilation et métallerie

Le deuxième fascicule du document d'information a pour objectif l'estimation du prix du tunnel en section courante. La méthode se base sur la décomposition de cette partie souterraine en tronçons où les caractéristiques du terrain sont homogènes à l'échelle du tunnel. Le prix de chaque tronçon, appelés profils types, comprend le pré-soutènement éventuel, le soutènement, l'étanchéité et le revêtement.

Dans ce troisième fascicule est proposé un retour d'expérience sur les prix de construction des ouvrages émergents, c'est-à-dire des ouvrages connexes qui ne sont pas construits en souterrain. Du fait de leur répartition ponctuelle dans le tunnel,

la méthode d'estimation précédemment décrite ne peut pas s'appliquer. Dans une prochaine version de ce fascicule nous développerons une méthodologie d'estimation de ces ouvrages.

Les ouvrages émergents pris en compte dans cette première édition du fascicule sont (i) les terrassements à l'air libre et les soutènements des talus latéraux et des fronts à la fois pour les tubes principaux et les galeries, et (ii) les ouvrages de génie civil associés (tranchées d'accès au front de creusement des ouvrages souterrains, voûtes remblayées et casquettes, ouvrages architecturaux, etc. Cf. illustration 1).

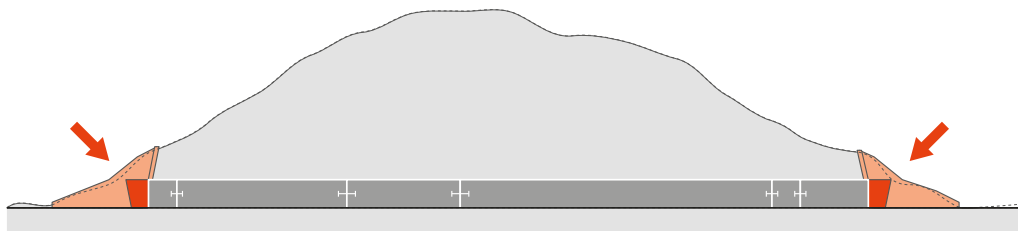


Illustration 1 : Ouvrages émergents

Dans une première partie, les trois types de confortement des têtes recensés dans cette étude sont décrits. Après avoir succinctement expliqué la manière de représenter les résultats, l'analyse du retour d'expérience est ensuite développée. Enfin, dans une dernière partie, certains exemples de têtes sont mis en avant.

TECHNIQUES DE CONFORTEMENTS RENCONTRÉES

La réalisation d'un tunnel nécessite au préalable l'aménagement du site d'entrée en terre pour permettre le commencement des travaux d'excavation à proprement parler. Pour des considérations paysagères et architecturales, le site est aménagé en phase définitive le plus souvent par des voûtes construites

à l'air libre réalisées dans le prolongement de l'excavation et qui sont remblayées de manière à rétablir la pente naturelle du terrain. Les têtes recensées dans cette étude sont confortées de trois manières :

2.1 PAROIS CLOUÉES

La technique du clouage permet la réalisation d'excavations, à parement vertical, stabilisées par la mise en place d'armatures subverticales placées contre le massif au fur et à mesure du terrassement. Ce renforcement est associé à un parement en béton projeté et des drains.

La technique est applicable dans la plupart des terrains meubles, à condition qu'ils soient situés hors nappe (ou éventuellement drainés) et non bouillants. Elle est cependant à éviter dans les argiles en raison des faibles valeurs du frottement latéral sol-clou dans ce type de terrain.

2.2 PAROIS MOULÉES

Cette technique de construction repose sur un mur construit en injectant du béton dans une fouille étroite et profonde, préalablement remplie d'une boue argileuse destinée à en maintenir les parois, et dans laquelle on immerge des cages ou des treillis

d'armatures. Les parois moulées sont ainsi des soutènements réalisés préalablement aux terrassements. Elles sont étanches et peuvent être conçues et dimensionnées pour s'opposer à des pressions hydrauliques internes.

2.3 PAROIS BERLINOISES

Cette technique consiste à réaliser un mur de soutènement de haut en bas dont l'ossature composée de micropieux, de pieux armés de tubes ou de profilés métalliques se trouve déjà enfilée dans le sous-sol. Le parement est provisoire et peut-être en

béton projeté, bois (traverse de chemin de fer) ou métallique. Elles sont provisoires ou définitives selon leur destination. Le parement peut-être tiranté notamment pour éviter des mouvements au droit des ouvrages existants et améliorer la stabilité.

ANALYSE DES PRIX DES TÊTES

La spécificité du terrain fait que chaque tête de tunnel est unique, ce qui rend donc délicate la définition d'une méthodologie générale d'estimation. Pour préciser les choses, un retour d'expérience des prix des têtes basé sur les amarchés de construction de tunnels routiers et de tunnels ferroviaires a été réalisé. Les résultats sont présentés sous la forme d'une boîte de Tukey, plus communément appelée « boîte à moustache », où sont présentés le minimum, le maximum, la valeur moyenne ainsi que les premier et troisième quartiles d'une liste de données (voir Fascicule 2 annexe 1).

Les prix considérés dans ce retour d'expérience, issus des marchés de travaux, comprennent les aménagements d'une tête d'un tunnel (pour les deux tubes le cas échéant), et prennent en compte quatre postes :

- 1. Le terrassement à l'air libre : travaux préparatoires, déblais, remblais, confortement, fosse, drainage, etc.
- 2. Le soutènement à l'air libre : boulons d'ancrage, parois moulées, parois berlinoises, béton projeté, treillis soudé, etc.

- 3. Les ouvrages de génie civil à l'air libre : coffrage, béton, armatures, drainage, structures métalliques, etc.
- 4. Les réseaux et assainissement à l'air libre : collecteurs, fourreaux, regards, etc.

Ces prix ne prennent notamment pas en compte les prestations générales, c'est-à-dire les installations de chantier, les prix généraux, les études et les divers contrôles. Ils ne prennent pas en compte non plus le génie civil des bâtiments extérieurs. Notons par ailleurs qu'en fonction de la rédaction du marché, les têtes sont traitées dans le même marché que le tunnel ou dans un marché à part, les prestations générales s'appliquent alors au chantier global ou uniquement aux têtes.

Sur l'illustration 2 est représentée la répartition du prix d'une tête, tout type de confortement confondu. Le prix de la moitié des têtes recensées est compris entre 1,19 M€ HT et 2,92 M€ HT.

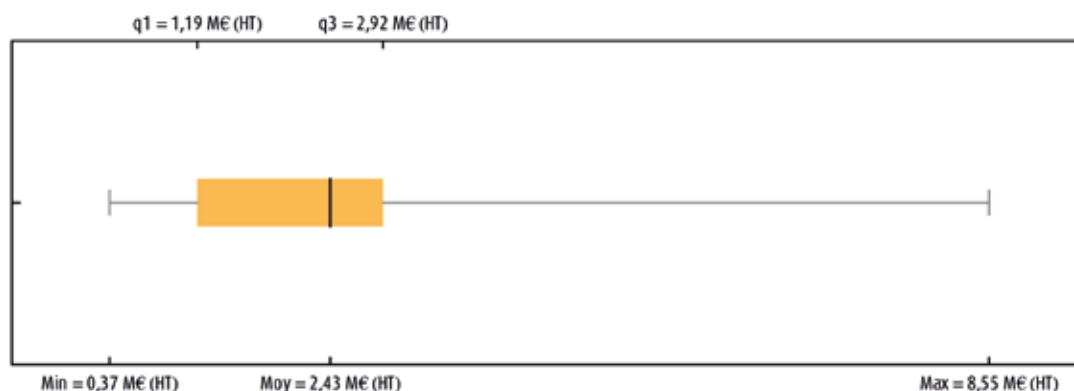


Illustration 2 : Répartition du prix d'une tête

L'illustration 3 représente le prix d'une tête rapporté à son volume de déblais en fonction dudit volume de déblais. La première observation est que le prix volumique varie de 15 €/m³ à 500 €/m³, et que le volume de déblais varie entre 1 000 m³ et 178 000 m³ (tête ouest du tunnel de Chavannes). Il ressort globalement que plus le volume de déblais de la tête est important, plus son prix volumique est faible.

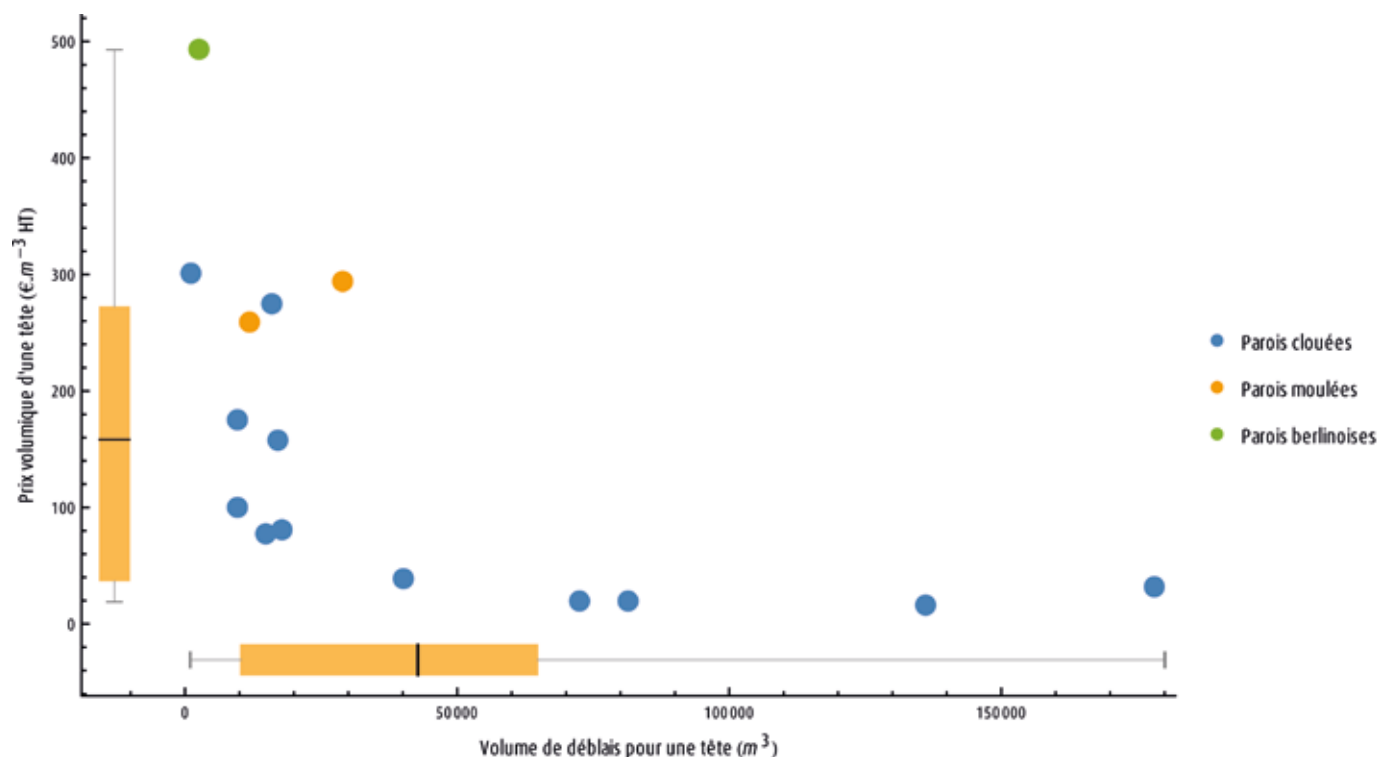


Illustration 3 : Prix d'une tête ramené à son volume de déblais, en fonction de ce volume de déblais

Décomposition en postes élémentaires

La décomposition en quatre postes pour chaque tunnel est représentée sur l'illustration 4 : le prix du génie civil est prépondérant devant les autres postes, variant entre 15 % et 80 % du prix des têtes. La part du soutènement est assez peu variable, représentant en moyenne 16 % du prix. Enfin le

poste de terrassement peut varier entre 5 % et 55 % en fonction des conditions d'aménagement de site rencontrées. Les parts moyennes de ces postes sont représentées sur l'illustration 5 : la moitié du prix pour le poste génie civil, 30 % pour le terrassement, 16 % pour le soutènement et 4 % pour les réseaux.

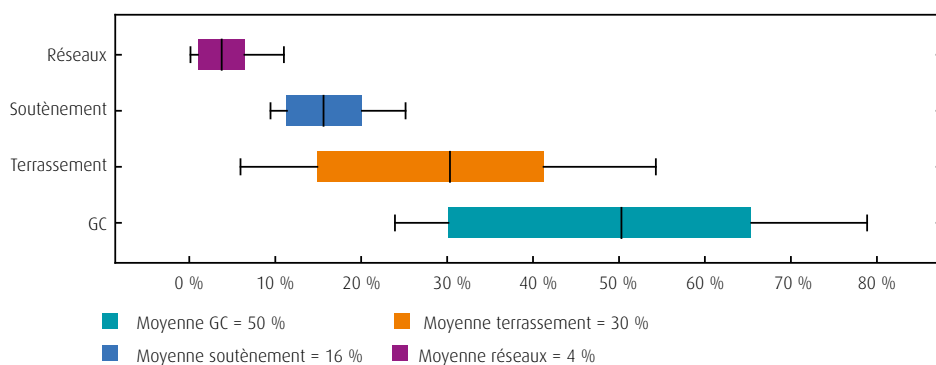


Illustration 4 : Répartition des prix des quatre postes constituant les prix des têtes

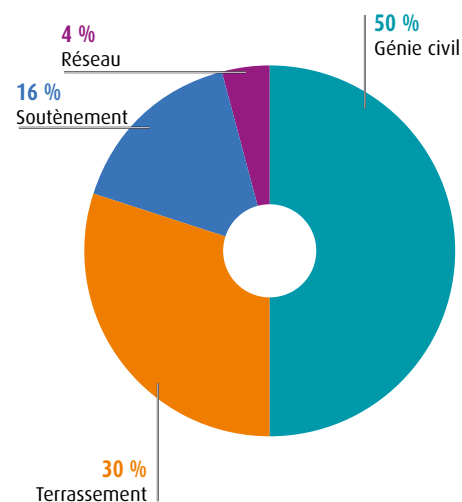


Illustration 5 : Parts moyennes des postes de génie civil, terrassement, soutènement et réseaux dans le prix d'une tête

EXEMPLES

Le coût de construction des ouvrages d'entrée en terre (têtes de tunnels) peut varier très sensiblement selon les quantités à excaver ou les techniques utilisées. Les exemples suivants illustrent la grande variabilité des travaux possibles ainsi que

les coûts correspondants. Cette grande disparité témoigne de l'importance d'une caractérisation, même partielle, des travaux à réaliser, dès les phases d'étude les plus préliminaires.

Tunnel	Type	Méthode de construction des têtes	Coût (non actualisé)	Illustration
Bois du Peu Tête Doubs	Tunnel routier : 2 tubes à 2 voies	Parois clouées	4,5 M€ HT (valeur 1/06/2003)	
Bois du Peu Tête Vallon	Tunnel routier : 2 tubes à 2 voies	Parois moulées	7,8 M€ HT (valeur 1/06/2003)	
Tunnel d'Osse	Tunnel routier : 1 tube à 2 voies	Parois clouées	1,75 M€ HT (valeur octobre 2003) Coût pour 2 têtes hors frais généraux, travaux préparatoires, etc. env. 20 %).	
Tunnel du Lioran Terrassements tranchée d'accès MURAT	Tunnel routier : 1 tube à 2 voies	Parois berlinoises	2,7 M€ HT (valeur juin 2003)	
Tunnel du Lioran Terrassements tranchée d'accès AURILLAC	Tunnel routier : 1 tube à 2 voies	Parois clouées	3,05 M€ HT (valeur septembre 2002)	
Tunnel du Lioran Station de ventilation Tête Murat	Tunnel routier : 1 tube à 2 voies	Stations de ventilation et ouvrages de tête (hors terrassements)	2,3 M€ HT (valeur octobre 2005)	
Tunnel du Lioran Station de ventilation Tête Aurillac	Tunnel routier : 1 tube à 2 voies	Stations de ventilation et ouvrages de tête (hors terrassements)	2,3 M€ HT (valeur octobre 2005)	

Tableau 1 : Exemple de coûts de construction des ouvrages d'entrée en terre

ANNEXE : LISTE DES TUNNELS RECENSÉS

Les tunnels pris en compte dans ce retour d'expérience sont les suivants :

Tunnels routiers	Tunnels ferroviaires
Bois de peu	Chavanne
Chabrières	Lambesc
Lioran	Pennes Mirabeau
Osse	
Propriano	
Saint-Béat	
Saorge	
Sommand	
Talant	

Tableau 2 : Liste des tunnels composant le retour d'expérience

[illegible]



Centre d'Études des Tunnels
25 avenue François Mitterrand
Case n°1
69674 BRON - FRANCE
Tél. 33 (0)4 72 14 34 00
Fax. 33 (0)4 72 14 34 30
cetu@developpement-durable.gouv.fr



FASCICULE 4

Travaux d'équipements de sécurité et d'exploitation – ventilation et métallerie



AVERTISSEMENT

Les documents d'information ont pour but de fournir une information sur une technique ou un problème nouveau ou insuffisamment traité par ailleurs. Le lecteur pourra y trouver des repères susceptibles de l'aider dans son activité. Le contenu et les éventuelles conclusions présentés ne doivent pas être considérés comme des recommandations du CETU. Bien que le maximum soit fait pour s'assurer de la fiabilité des sources utilisées, la responsabilité du CETU ou des auteurs du document ne saurait être engagée.

TABLE DES MATIÈRES

1 OBJET DU FASCICULE 4	4
1.1 Périmètre d'application	4
1.2 Principe d'estimation	4
1.3 Précautions d'utilisation	5
2 RETOUR D'EXPÉRIENCE DU PRIX DE LA VENTILATION ET DE LA MÉTALLERIE DES OUVRAGES SOUTERRAINS	6
2.1 Base de données utilisée pour la définition de prix moyens	6
2.2 Prix moyens obtenus	6
3 PRIX DE LA VENTILATION SANITAIRE ET DU DÉSENFUMAGE	10
3.1 Pré-requis : type de ventilation, section aéraulique et géométrie de l'ouvrage	10
3.2 Composition du prix	10
3.3 Prix de référence retenus	10
4 PRIX DE LA VENTILATION DES OUVRAGES SPÉCIFIQUES LIÉS À L'EXPLOITATION ET À LA SÉCURITÉ	14
5 PRIX DE LA MÉTALLERIE	15
5.1 Composition	15
5.2 Prix de référence retenus	15
6 ANNEXE A : ABAQUES POUR L'ESTIMATION DE LA POUSSEE À INSTALLER EN VENTILATION LONGITUDINALE	17
6.1 Sections rectangulaires comprises entre 54 et 70 m ²	17
6.2 Sections rectangulaires comprises entre 86 et 102 m ²	19
6.3 Sections semi-circulaires comprises entre 58 et 86 m ²	21
6.4 Sections semi-circulaires supérieures à 100 m ²	23
7 ANNEXE B : COMPLÉMENTS POUR L'ESTIMATION DES PRIX DE VENTILATION	24
7.1 Ventilation transversale : détail de la composition du prix de référence	24
7.2 Ventilation longitudinale avec extractions massives	25
7.3 Ventilation des ouvrages spécifiques liés à l'exploitation et à la sécurité	25
8 ANNEXE C : DÉTAIL DES ÉQUIPEMENTS DE MÉTALLERIE SELON LES OUVRAGES	26
8.1 Métallerie des issues de secours	26
8.2 Métallerie en locaux techniques (cas des tunnels non ventilés ou dotés d'une ventilation longitudinale)	26
8.3 Métallerie en station de ventilation (cas des tunnels ventilés transversalement)	26
8.4 Métallerie en station d'extraction massive (cas des tunnels ventilés longitudinalement avec extractions massives)	27

OBJET DU FASCICULE 4

Le fascicule 4 s'inscrit dans une série de fascicules constituant le document d'information sur le prix des tunnels :

- fascicule 0 : périmètre du document, données d'entrée pour l'estimation
- fascicule 1 : provisions et autres postes de l'enveloppe prévisionnelle plafond
- fascicule 2 : travaux de génie civil – tunnel en section courante
- fascicule 3 : travaux de génie civil – ouvrages émergents
- **fascicule 4 : travaux d'équipements de sécurité et d'exploitation – ventilation et métallerie**

1.1 PÉRIMÈTRE D'APPLICATION

Le présent fascicule traite du prix des équipements de ventilation et des éléments de métallerie des ouvrages souterrains routiers. Certaines parties du document pourront néanmoins être facilement utilisées pour l'estimation de projets d'ouvrages souterrains ferroviaires ou de transport en commun en site propre.

Les équipements de ventilation concernés sont ceux destinés à la ventilation sanitaire et au désenfumage de l'espace circulé, ainsi que ceux installés dans les ouvrages de sécurité (issues de secours principalement) et les locaux techniques.

Les éléments de métallerie sont essentiellement les portes installées dans les issues de secours, les niches de sécurité et l'ensemble des locaux techniques.

Les équipements de ventilation et la métallerie ont été regroupés dans ce fascicule car leur installation en tunnel relève de métiers très proches :

- lorsque l'ensemble des équipements fait l'objet d'un marché unique, ce qui est en général le cas, les travaux de ventilation et de métallerie sont la plupart du temps réalisés par la même entreprise au sein d'un groupement plus ou moins large ;
- lorsque les travaux d'équipements font l'objet de plusieurs lots ou plusieurs marchés, ce qui est toutefois plus rare, la ventilation et la métallerie sont regroupés dans le même lot ou le même marché.

Le présent fascicule ne traite pas des prix de construction des ouvrages de génie civil associés à la ventilation tels que les gaines, les puits ou les locaux techniques. Le prix du génie civil des gaines de ventilation relève du fascicule 2 et celui des locaux techniques du fascicule 3. Le cas particulier des puits n'étant traité par aucun des fascicules, une estimation spécifique devra être menée si de tels ouvrages sont projetés.

Le prix de la ventilation de chantier étant intégré dans les prix de creusement donnés par le fascicule 2, il n'est pas traité ici.

1.2 PRINCIPE D'ESTIMATION

Le prix des équipements de ventilation dépend principalement :

- de la géométrie de l'ouvrage (longueur, section ventilée, pente) qui découle des fonctionnalités attendues ;
- des exigences liées à l'exploitation et la sécurité qui conduisent au choix du type de ventilation et à la définition des aménagements pour l'évacuation et la protection des usagers ainsi que l'accès des secours.

L'estimation est menée avec un niveau de précision adapté aux données disponibles, au niveau de maturité du projet et aux exigences de fiabilité éventuellement imposées.

Ce fascicule comprend :

- 1. la présentation d'un retour d'expérience du prix des ouvrages existants construit à partir de données recueillies par le CETU ;
- 2. la présentation de prix reconstitués à partir des outils d'évaluation des prix et délais développés par le CETU ;
- 3. des annexes contenant des abaques utiles à la reconstitution des prix, ainsi que des commentaires donnant le détail de la composition des prix reconstitués.

Pour la bonne utilisation de ce guide, il conviendra de se reporter au fascicule 0 qui donne les niveaux d'études concernés, le mode de décomposition de l'estimation prévisionnelle par postes et la méthode de construction des prix de référence.

Les prix fournis dans ce fascicule constituent une partie du poste 2.6 « Estimation technique des travaux / Équipements d'exploitation et de sécurité » tel qu'il figure dans le cadre général de présentation d'une estimation (cf. fascicule 0 – §1.5.2).

Les ratios de prix intègrent :

- les déboursés ou frais directs de l'entreprise (main d'œuvre, matériaux et matières consommables, matériel) ;
- les frais généraux (frais de chantier et de siège, d'agence, assurances, amortissement des matériels indivis, gérance et mandat, impôts et taxes) ;
- la marge de l'entreprise pour risques et bénéfices.

Ils n'intègrent ni somme à valoir (SAV) ni provision pour risques identifiés (PRI).

Les ratios de prix sont adaptés pour une estimation de niveau études préliminaires et avant-projet. Pour les études détaillées, il est recommandé d'utiliser des prix unitaires et des quantités issues d'un avant-métré détaillé.

L'ensemble des prix proposés dans ce document est donné hors taxes.

Les valeurs fournies dans les différents fascicules sont attachées aux conditions économiques lors de la rédaction du présent document, soit une date de valeur au 01/01/2015 (index publiés au JO du 18/04/2015).

Pour l'actualisation des valeurs de ce fascicule, il est proposé de faire appel à l'index suivant :

- index **BT41** – Ventilation et conditionnement d'air.

RETOUR D'EXPÉRIENCE DU PRIX DE LA VENTILATION ET DE LA MÉTALLERIE DES OUVRAGES SOUTERRAINS

2.1 BASE DE DONNÉES UTILISÉE POUR LA DÉFINITION DE PRIX MOYENS

Les prix moyens présentés sont issus d'appels d'offres lancés en France pour la réalisation des équipements de ventilation et de métallerie de tunnels routiers, dans le cadre de projets neufs ou de rénovations d'ouvrages existants. Parmi la liste des ouvrages figurent à la fois des tunnels creusés et des tranchées couvertes.

La base de données comporte au total 12 tunnels routiers :

- tunnel de Foix (1999) ;
- tunnel de Toulon – tube nord (2000) ;
- tunnel de la gare St Charles (2005) ;
- tunnel des Monts (2005) ;
- tunnel du Lioran (2005) ;
- tunnel de Schirmeck (2005) ;
- tunnel du Pas de l'Escalette (2008) ;
- tunnel du Rond-Point (2009) ;

- tunnel du Landy (2010) ;
- tunnel de Champigny (2010) ;
- tunnel de Toulon – tube sud (2010) ;
- tunnel de Talant (2012).

Les prix indiqués résultent de la moyenne des offres retenues lors de la consultation des entreprises, à laquelle est appliquée une formule d'actualisation selon l'index BT41.

Les montants de règlement de ces marchés, qui dépendent des prix de règlement mais aussi des quantités effectivement réalisées et retenues dans le décompte général et définitif, ne sont pas toujours disponibles. Elles ne sont ici jamais prises en compte, car il n'est pas souhaitable de mélanger dans le retour d'expérience des montants initiaux et des montants de règlement.

2.2 PRIX MOYENS OBTENUS

Le retour d'expérience sur les prix moyens obtenus est présenté selon trois indicateurs de référence :

- la part relative des différents postes de dépenses concernant la ventilation et la métallerie (cas des tunnels neufs) ;
- le prix de la ventilation longitudinale ramené au newton (N) de poussée installée ;
- le prix de la ventilation transversale ramené au m³/s d'air vicié extrait ou d'air frais soufflé.

- autres équipements, essais, maintenance et lot de pièces de rechange ;
- ventilation des ouvrages de sécurité ;
- métallerie.

Le contenu de ces postes est détaillé plus loin dans le document.

Le prix de chaque poste a été calculé, pour chaque tunnel, en multipliant les quantités prévues dans le détail estimatif à la signature du marché par les prix unitaires inscrits dans l'offre retenue.

2.2.1 Part relative des différents postes de dépenses concernant la ventilation et la métallerie (cas des tunnels neufs)

La répartition des postes de dépenses concernant la ventilation et la métallerie a été calculée pour quatre tunnels neufs :

- deux dotés d'une ventilation longitudinale (Schirmeck et Talant) ;
- un doté d'une ventilation transversale (Lioran) ;
- et un doté d'une ventilation transversale avec contrôle du courant d'air (Toulon tube sud).

Les dépenses totales sont regroupées en cinq postes (cf. illustrations 1 à 4) :

- ventilation (longitudinale ou transversale) ;
- suivi de la pollution ;

Les résultats obtenus montrent que la ventilation est en général le poste principal de dépense. Il n'est toutefois pas suffisamment prépondérant pour qu'il soit possible de négliger les autres postes. Certaines spécificités peuvent même conduire à ce que le poste « ventilation » ne soit pas le plus important. C'est le cas du tube sud de Toulon pour lequel la ventilation du tube proprement dite ne représente que 26 % du prix total, au profit essentiellement des postes « métallerie », « ventilation des ouvrages de sécurité » et « autres équipements, essais, etc. ». La forte part du poste « métallerie » s'explique par le fait que les prix de construction du tube sud intègrent la réalisation de rameaux utiles aux deux tubes, nord et sud, alors que pour le poste ventilation, il n'y a que les matériels utiles au tube sud. Les rameaux étant dotés à chaque extrémité de sas avec portes coupe-feu dont le prix est élevé, l'incidence sur le prix de la métallerie est forte. Bien que moins marquée, cette particularité est aussi visible sur le poste « ventilation des ouvrages

de sécurité». La forte part du poste «autres équipements, essais, etc.» peut s'expliquer pour plusieurs raisons : essais particulièrement poussés pour la mise au point et la vérification du contrôle du courant d'air, essais plus délicats du fait de la présence du tube nord en exploitation, ou encore réalisation d'un essai avec combustion d'une épave de véhicule.

Si l'on compare les deux tunnels ventilés longitudinalement (Schirmeck et Talant), on constate que la typologie de tunnel, bien différente entre l'un et l'autre, se traduit par une répartition substantiellement différente des postes de dépenses, alors qu'ils ont pourtant des longueurs assez proches. De type monotube bidirectionnel non urbain, le tunnel de Schirmeck est doté d'une seule issue de secours (galerie débouchant directement à l'extérieur avec un seul sas surpressé côté tunnel), alors que le tunnel de Talant, de type bitube urbain, est doté de trois issues de secours (rameaux intertubes dotés chacun d'un sas surpressé à chaque extrémité). Le poste «métallerie» et surtout

le poste «ventilation des ouvrages de sécurité» sont ainsi beaucoup plus élevés pour le tunnel de Talant, diminuant par conséquent la part de la ventilation du tunnel proprement dite.

Pour les raisons qui ont été évoquées plus haut, le tube sud de Toulon est très spécifique et peut donc difficilement être comparé au tunnel du Lioran, pourtant lui aussi ventilé transversalement. L'observation de la répartition des prix obtenus pour le tunnel du Lioran fait bien ressortir sa nature «monotube non urbain». Ce tunnel étant doté de rameaux implantés seulement tous les 400 mètres avec des sas uniquement côté tunnel car débouchant dans une galerie de sécurité, le prix de la ventilation des ouvrages de sécurité est très faible. Celui de la métallerie reste cependant significatif – en comparaison des tunnels ventilés longitudinalement – du fait de la présence de nombreuses portes et trappes dans les gaines de ventilation et dans les deux stations de ventilation.

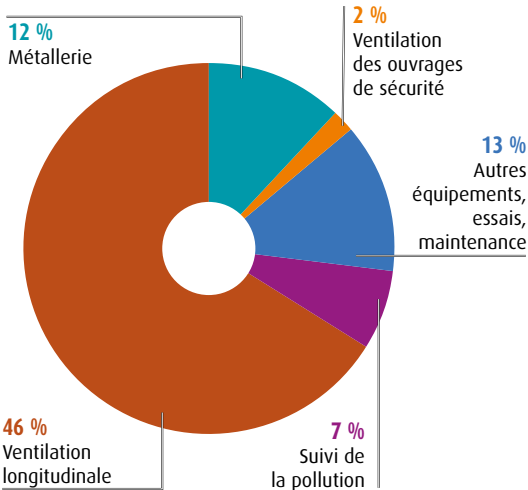


Illustration 1 : Répartition des postes de dépenses - Tunnel de Schirmeck

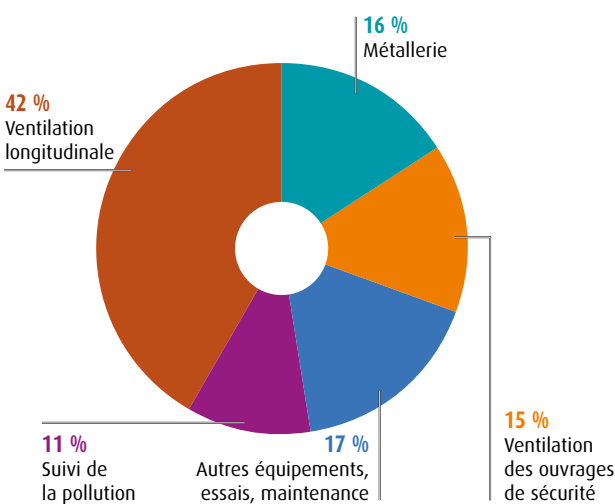


Illustration 2 : Répartition des postes de dépenses - Tunnel de Talant

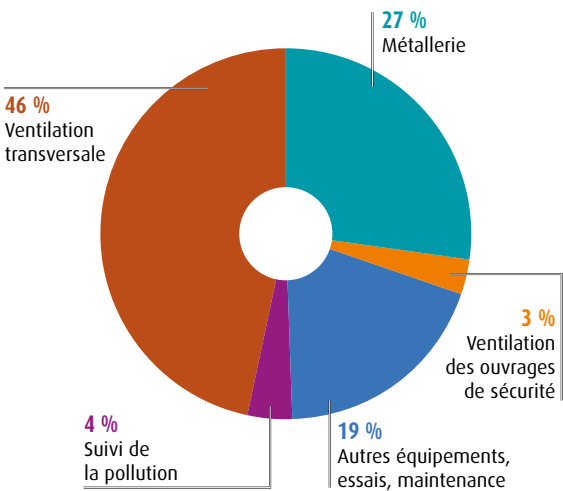


Illustration 3 : Répartition des postes de dépenses - Tunnel du Lioran

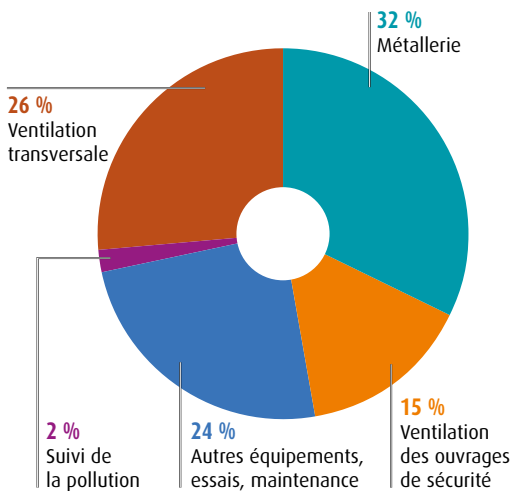


Illustration 4 : Répartition des postes de dépenses - Tube Sud de Toulon

Il ressort de ces comparaisons que la répartition des postes de dépenses est très variable d'un tunnel à l'autre. Cette variabilité

s'explique par des typologies et des caractéristiques différentes, qui ne permettent pas d'établir un modèle-type de répartition.

2.2.2 Prix moyen de la ventilation longitudinale ramené au newton (N) de poussée installée

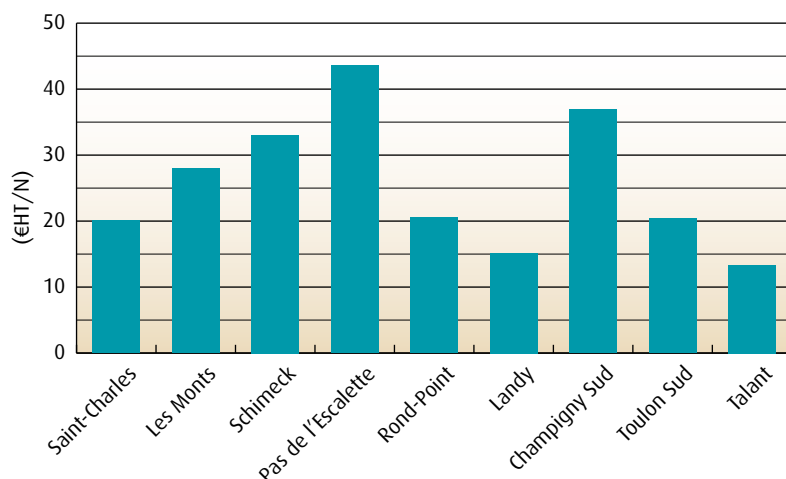


Illustration 5 : Variabilité du prix de la ventilation longitudinale par newton de poussée installée

Le graphique ci-dessus montre la distribution des prix de la ventilation longitudinale, exprimée en euros par newton de poussée installée. L'ordre de présentation retenu est l'ordre chronologique. Pour chaque tunnel, il s'agit du prix de l'offre retenue.

La variabilité du prix du newton est relativement forte. Les prix les plus élevés sont relevés pour des travaux réalisés dans des tunnels en exploitation, à l'occasion de travaux de rénovation (Les Monts, Pas de l'Escalette, Champigny), ce qui n'empêche pas l'obtention de prix bas pour de telles conditions de travaux (Rond-Point, Landy).

La conjoncture économique semble être un paramètre d'influence très supérieur aux caractéristiques des tunnels. À partir

de 2009, une chute très nette des prix est visible, sans doute liée au ralentissement de l'activité et à une concurrence accrue.

Le prix moyen de la ventilation longitudinale ramené au newton (N) de poussée installée est de 26 €/N (valeur au 1^{er} janvier 2015).

Ce prix a été obtenu en faisant la moyenne du prix du newton relevé dans les marchés des neuf tunnels dans lesquels des accélérateurs ont été installés (tunnels de la gare Saint-Charles, des Monts, de Schirmeck, du Pas de l'Escalette, du Rond-Point, du Landy, de Champigny tube sud, de Toulon tube sud et de Talant).

2.2.3 Prix moyen de la ventilation transversale ramené au m³/s d'air vicié extrait ou d'air frais soufflé

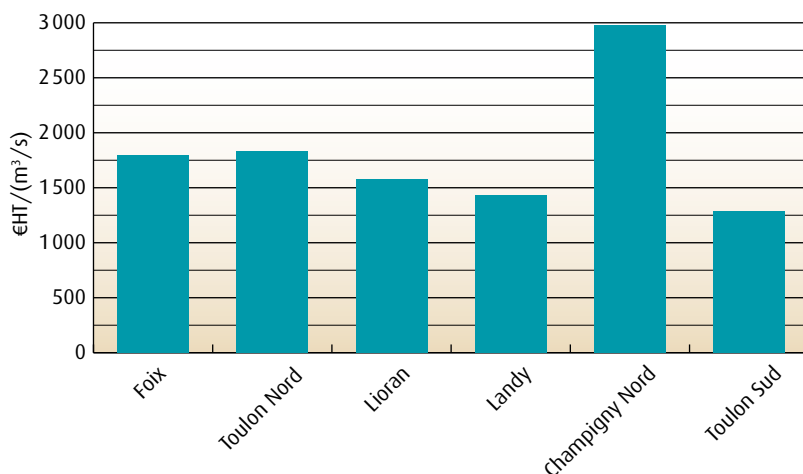


Illustration 6 : Prix de la ventilation longitudinale en euros par m³/s d'air vicié extrait

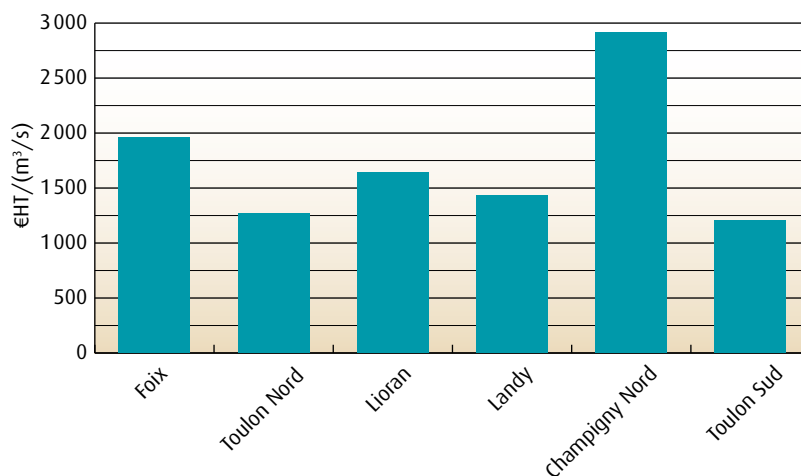


Illustration 7 : Prix de la ventilation longitudinale en euros par m³/s d'air frais soufflé

Les deux graphiques ci-dessus montrent la distribution des prix de la ventilation transversale, exprimés en euros par m³/s d'air vicié extrait ou en euros par m³/s d'air frais soufflé. L'ordre de présentation retenu est l'ordre chronologique. Pour chaque tunnel, il s'agit du prix de l'offre retenue.

La variabilité du prix de la ventilation transversale est peu marquée – à l'exception du tunnel de Champigny dont le niveau de prix est très élevé. Ce prix plus élevé pour le tunnel de Champigny peut aisément s'expliquer par le fait qu'il s'agit de travaux réalisés dans un tunnel en exploitation.

Même si cela est moins marqué que pour la ventilation longitudinale, la conjoncture économique semble être un paramètre d'influence supérieur aux caractéristiques des tunnels, avec une érosion des prix ces dernières années, exception faite encore une fois du tunnel de Champigny.

Les prix moyens de la ventilation d'extraction et de celle de soufflage sont très proches, malgré des exigences de résistance au feu propres à la ventilation d'extraction :

- le prix moyen de la ventilation d'extraction ramené au m³/s d'air vicié extrait est de 1900 €/m³/s (valeur au 1^{er} janvier 2015) ;
- le prix moyen de la ventilation d'extraction ramené au m³/s d'air frais soufflé est de 1800 €/m³/s (valeur au 1^{er} janvier 2015).

Ce prix a été obtenu en faisant la moyenne des prix du m³/s d'air extrait ou soufflé relevés dans les marchés des six tunnels dans lesquels une ventilation transversale a été installée (tunnels de Foix, de Toulon tube nord, du Lioran, du Landy, de Champigny tube nord et de Toulon tube sud).

PRIX DE LA VENTILATION SANITAIRE ET DU DÉSENFUMAGE

3.1 PRÉ-REQUIS : TYPE DE VENTILATION, SECTION AÉRAULIQUE ET GÉOMÉTRIE DE L'OUVRAGE

Lors de la conception d'un tunnel, plusieurs systèmes de ventilation sont envisageables et dépendent du type de trafic (routier, ferroviaire, etc.), des caractéristiques de l'ouvrage et des objectifs de désenfumage qui en découlent.

Lorsque plusieurs types de ventilation sont autorisés par la réglementation, les études de ventilation, qui sont toujours nécessaires, permettent de choisir la solution la mieux adaptée. Ces études doivent intégrer les aspects «génie civil» et «exploitation», qui peuvent avoir un impact sur les prix très variables d'une solution de ventilation à l'autre. Lorsque plusieurs solutions sont raisonnablement envisageables, il est

toujours judicieux d'étudier plusieurs solutions jusqu'au stade de l'AVP.

Pour un type de ventilation donné, les pré-requis à l'estimation sont toujours :

- la **section** aéraulique et la **géométrie** de l'ouvrage (longueur, pente, etc.), déterminées en lien avec les études de génie civil ;
- la **présence ou pas de Transports de Marchandises Dangereuses (TMD)**.

3.2 COMPOSITION DU PRIX

L'ensemble du système de ventilation est estimé à l'exclusion des éléments de structure tels que gaines, puits, cheminées ou stations de ventilation (ces derniers sont estimés dans le Fascicule 2 : travaux de génie civil – tunnel en section courante), de l'alimentation électrique et du contrôle-commande.

Les trois types de ventilation mécanique traités sont les suivants :

- ventilation longitudinale ;
- ventilation transversale ;
- ventilation longitudinale avec extractions massives.

Pour les ouvrages ventilés naturellement, les seuls prix à prendre en compte sont ceux de la ventilation des issues de secours. On se reportera pour cela au paragraphe 4 consacré à ces équipements.

3.3 PRIX DE RÉFÉRENCE RETENUS

3.3.1 Date de référence des prix

Sauf mention contraire, tous les prix sont donnés en valeur à la date du 1^{er} janvier 2015.

L'index d'actualisation utilisé est l'index BT41 «Ventilation et conditionnement d'air».

3.3.2 Cas de la ventilation longitudinale

Le prix de référence est fondé sur un prix moyen unitaire en euro par newton.

Le prix de la ventilation nécessite donc l'estimation de la poussée totale à installer dans chaque tube. Dans la suite, on note P_{tot1} la poussée à installer dans le tube 1 et, si le tunnel comporte deux tubes, P_{tot2} la poussée à installer dans le tube 2.

Si l'on note x_{acc} (en €/N) le prix moyen unitaire des accélérateurs et de leurs dispositifs de fixation, alors le prix total des accélérateurs et de leurs dispositifs de fixation est :

$$C_{acc} = x_{acc} \cdot (P_{tot1} + P_{tot2}) .$$

L'estimation de la poussée (en newtons) à installer dans chaque tube se fait à l'aide des abaques¹ fournis en Annexe A : Abaques pour l'estimation de la poussée à installer en ventilation longitudinale.

Le prix obtenu intègre, outre le prix des moto-ventilateurs, le prix des dispositifs d'insonorisation, des châssis-supports, des dispositifs de retenue ultime et autres accessoires, y compris leur assemblage, leur transport, leur stockage et leur pose.

À ce prix doit être ajouté celui des appareils de suivi et de contrôle des niveaux de pollution en tunnel. Il est prévu l'installation d'un point de mesure (dioxyde d'azote, monoxyde de carbone, opacité) tous les 300 mètres, dans chaque tube, sans que ce nombre puisse être inférieur à deux afin de limiter les conséquences de la panne d'un capteur. Il est également prévu l'installation d'un anémomètre tous les 300 mètres, dans chaque tube.

Il faut également prendre en compte le prix du dispositif de ventilation des locaux techniques du tunnel, le prix de fourniture d'un lot de pièces de rechange, le prix des essais en usine et sur site et, enfin, le prix de la maintenance pendant la période de garantie.

Le tableau qui suit donne le récapitulatif des prix issus du retour d'expérience, L étant la longueur du tunnel :

Dispositif	Prix issus du retour d'expérience
Ventilation longitudinale	$26 \times (P_{tot1} + P_{tot2}) \text{ €}$
Suivi et contrôle de la pollution	$44\,000 \times (L/300 + 1) \text{ €}$ si $L > 300 \text{ m}$ ou $88\,000 \text{ €}$ si $L \leq 300 \text{ m}$
Autres équipements, essais, maintenance et lot de pièces de rechange	220 000 €

Tableau 1 : Prix des dispositifs dans le cas de la ventilation longitudinale

3.3.3 Cas de la ventilation transversale

Le système de ventilation transversale étant complexe, l'estimation financière nécessite de faire des hypothèses sur sa conception (notamment le nombre de stations).

On considère qu'une station de ventilation est implantée tous les 2000 mètres². Cette hypothèse permet de déterminer le nombre de stations, noté N_{st} .

Le nombre de stations est identique qu'il y ait un ou deux tubes. S'il y a deux tubes, la station est simplement de taille plus importante. Elle intègre les ventilateurs de soufflage d'air frais spécifiques à chaque tube (pour la ventilation sanitaire) ainsi que les ventilateurs d'extraction communs aux deux tubes (pour le désenfumage).

Extracteurs d'air vicié

Le prix de référence est basé sur un prix moyen unitaire (en €/ (m³/s)).

Le prix de la ventilation associée nécessite donc l'estimation du débit total d'extraction (en m³/s).

On suppose à ce stade des études que le courant d'air n'est pas contrôlé, ce qui conduit à un surdimensionnement du débit dans les cas où le contrôle du courant d'air est retenu. Les dispositifs spécifiques de contrôle du courant d'air qui pourraient se révéler nécessaires ne sont pour leur part pas estimés.

En l'absence de contrôle de courant d'air³, le débit de fumées à extraire pour chaque station, en m³/s, est forfaitairement défini⁴ comme suit : $Q_{ef} = 80 + 1,5 S$, 80 m³/s étant le débit forfaitaire de fumées dégagé par un incendie de poids lourd de 30 MW et S étant la section ventilée de l'ouvrage en m².

Ce débit est majoré d'un coefficient 3/2 pour prendre en compte la réserve de débit dont il faut disposer en cas de panne d'un ventilateur.

Le débit total d'extraction à prévoir pour la totalité du tunnel est donc, en m³/s :

$$Q_e = \frac{3}{2} \cdot N_{st} \cdot (80 + 1,5 S) .$$

1. L'abaque doit être choisi d'une part en fonction de la valeur de la section aéraulique et de sa forme (rectangulaire ou semi-circulaire) et d'autre part en fonction de la présence ou non de TMD. Sur chaque abaque, la poussée est donnée en fonction de la longueur et de la pente du tunnel.

2. Le Dossier pilote ventilation des tunnels édité par le CETU recommande une longueur maximale de 2 000 m pour les gaines d'air frais et de 3 000 m pour les gaines d'air vicié. La longueur maximale des cantons est ici fixée à 2 000 m dans les deux cas, de façon à avoir des installations communes aux circuits d'air frais et vicié.

3. Cette solution n'est acceptable que pour des ouvrages d'une longueur inférieure à 3 000 m d'après la circulaire interministérielle n° 2006-20 du 29 mars 2006 relative à la sécurité des tunnels routiers d'une longueur supérieure à 300 m, Annexe n° 2 : Instruction technique relative aux dispositions de sécurité dans les nouveaux tunnels routiers (conception et exploitation), § 3.2.2.b.

4. Circulaire interministérielle n° 2006-20 du 29 mars 2006 relative à la sécurité des tunnels routiers d'une longueur supérieure à 300 m, Annexe n° 2 : Instruction technique relative aux dispositions de sécurité dans les nouveaux tunnels routiers (conception et exploitation), § 3.2.2.b.

Si l'on note x_{EF} (en €/m³/s) le prix moyen unitaire de la ventilation de désenfumage, alors le prix de la ventilation d'extraction du tunnel est : $C_e = x_{EF} \cdot Q_e$.

Ce prix intègre, outre le prix des extracteurs complets proprement dits, le prix des registres et des armoires de démarrage avec variateur.

Réglementairement, pour les tunnels routiers, la présence de TMD n'a pas d'incidence sur le dimensionnement d'une installation de ventilation transversale, car en pratique, leur prise en compte conduirait à des sections de tunnel trop grandes. Des mesures compensatoires doivent néanmoins être envisagées en cas d'autorisation de la circulation aux TMD.

Si le tunnel est interdit aux poids-lourds et seulement autorisé aux véhicules de gabarit inférieur à 3,5 mètres voire uniquement aux véhicules légers, l'incendie à prendre en compte peut être inférieur à 30 MW et le débit de fumées inférieur à 80 m³/s. On préfère toutefois ici retenir dans tous les cas l'incendie de 30 MW, qui est majorant.

Ventilateurs de soufflage

Le prix de référence est basé sur un prix moyen unitaire (en €/m³/s).

Le prix de la ventilation associée nécessite l'estimation du débit à insuffler.

Les ventilateurs de soufflage sont dimensionnés de façon à assurer un renouvellement d'air suffisant dans les conditions

d'exploitation normale. À ce stade des études, le débit à souffler est estimé à 50 m³/s par voie et par kilomètre⁵.

Pour la totalité du tube i , le débit à insuffler est donc : $Q_{ai} = 0,05 \cdot L_i \cdot N_{voies_i}$ (L_i étant la longueur du tube i en mètres).

Si l'on note x_{AF} (en €/m³/s) le prix moyen unitaire de la ventilation de soufflage, alors le prix de la ventilation de soufflage du tube i est : $C_{ai} = x_{AF} \cdot Q_{ai}$.

Ce prix intègre, outre le prix des ventilateurs de soufflage complets proprement dits, le prix des registres, des pavillons d'aspiration et des armoires de démarrage avec variateur.

En pratique, le débit Q_{ai} est réparti sur l'ensemble des N_{st} stations, également utilisées pour la ventilation de désenfumage.

Autres équipements, essais, maintenance et lot de pièces de rechange

L'estimation doit être complétée par le prix des équipements des réseaux aérauliques (aménagements aérauliques en station, dispositifs de réglage du débit des carneaux d'air frais, bouches de soufflage et trappes d'extraction en tunnel), du câblage des ventilateurs, des appareils de suivi et de contrôle de la pollution, d'un lot de pièces de rechange, des essais et de la maintenance. Ce prix comprend également le dispositif de ventilation des locaux techniques.

Le détail de ces prix est donné en annexe (Annexe B : Compléments pour l'estimation des prix de ventilation).

Dispositif	Prix issus du retour d'expérience
Extracteurs d'air vicié	$1900 \times 3/2 \times (80 + 1,5 \times S) \times N_{st}$
Ventilateurs de soufflage	$1800 \times 0,05 \times (N_{voies1} \times L_1 + N_{voies2} \times L_2) \text{ €}$
Suivi et contrôle de la pollution	$44000 \times (L/300 + 1) \text{ €}$ si $L > 300 \text{ m}$ ou 88000 € si $L \leq 300 \text{ m}$
Autres équipements, essais, maintenance et lot de pièces de rechange	$280000 \times N_{st} + 300 \times (L_1 + L_2) + 440000 \text{ €}$

Tableau 2 : Prix des dispositifs dans le cas de la ventilation transversale

3.3.4 Cas de la ventilation longitudinale avec extractions massives

Le cas du système de ventilation longitudinale avec extractions massives est construit à partir des cas « ventilation longitudinale » et « ventilation transversale » traités en 3.3.2 et 3.3.3. Il s'agit d'estimer d'une part le prix des accélérateurs en tunnel (et de leurs équipements associés), et d'autre part le prix des

ventilateurs d'extraction (et de leurs équipements associés) installés dans les stations d'extraction massive⁶.

Accélérateurs de contrôle du courant d'air

Pour les accélérateurs, les abaques fournis en annexe (Annexe A : Abaques pour l'estimation de la poussée à installer en ventilation longitudinale) sont à appliquer à chaque tube, sans changement par rapport à ce qui est proposé dans le paragraphe 3.3.2 consacré à la ventilation longitudinale.

5. Cette valeur tirée de l'expérience correspond aux tunnels urbains et constitue le cas le plus défavorable.

6. Dans le cas des tunnels creusés, il conviendra toutefois d'être vigilant sur l'éventuel prix de creusement d'un ou plusieurs puits d'extraction. Ce prix, qui n'est pas estimé dans ce chapitre consacré aux équipements, est potentiellement élevé.

Extractions massives

Pour estimer les prix liés à l'installation des ventilateurs d'extraction, il faut d'abord évaluer le nombre de points d'extraction massive N_{em} ⁷. On considérera par la suite qu'il y a autant de stations d'extraction massive que de points d'extraction massive, et que ces stations sont espacées de 500 mètres si le tunnel est urbain, et de 5 000 mètres si le tunnel est non urbain, ce qui donne la valeur de N_{em} .

Le nombre de stations est identique que le tunnel comporte un ou deux tubes, l'incendie simultané dans les deux tubes n'étant pas pris en compte.

Pour estimer le prix des ventilateurs d'extraction massive, on utilise le même prix unitaire moyen que celui utilisé pour les ventilateurs d'extraction dans le cas des systèmes transversaux x_{em} (en €/m³), et le prix de la ventilation d'extraction massive du tunnel est alors :

Cem = 3/2 · xem · Qem · Nem⁸.

Ce prix intègre, outre le prix des extracteurs complets proprement dits, le prix des registres et des armoires de démarrage avec variateur.

Autres équipements, essais, maintenance et lot de pièces de rechange

Il convient d'ajouter à ce prix celui des équipements propres à chaque station (équipements des réseaux aérauliques, câblage des ventilateurs), celui de la trappe motorisée à mettre en place à chaque point d'extraction, celui des appareils de suivi et de contrôle de la pollution, d'un lot de pièces de rechange, des essais et de la maintenance. Ce prix comprend également le dispositif de ventilation des locaux techniques.

Les prix de tous les dispositifs qui précèdent sont estimés de façon similaire à celle retenue pour les systèmes transversaux.

Récapitulatif

L'ensemble des dispositifs à estimer sont récapitulés dans le tableau qui suit, avec l'indication de leur prix :

Dispositif	Prix issus du retour d'expérience
Accélérateurs de contrôle du courant d'air	26 x (P_tot1 + P_tot2) €
Ventilateurs d'extraction massive	1 900 x 3/2 x (4 x S + 57) x N_EM € si TMD interdits 1 900 x 3/2 x (5 x S + 377) x N_EM € si TMD autorisés
Trappes d'extraction	800 x (4 x S + 57) € si TMD interdits 800 x (5 x S + 377) € si TMD autorisés
Suivi et contrôle de la pollution	44 000 x (L/300 + 1) € si L > 300 m ou 88 000 € si L ≤ 300 m
Autres équipements, essais, maintenance et lot de pièces de rechange	490 000 + 230 000 x N_EM €

Tableau 3 : Prix des dispositifs dans le cas de la ventilation longitudinale avec extractions massives

7. Pour les tunnels routiers, ce nombre est donné par l'instruction technique du 25 août 2000 qui fixe la distance maximale entre deux extractions à 500 m en tunnel urbain et 5 000 m en tunnel non urbain.
8. Le coefficient 3/2 s'explique par le fait que l'on considère que l'installation mise en œuvre se compose de trois ventilateurs de capacité Q_{em}/2 par station, dont 1 de secours.

PRIX DE LA VENTILATION DES OUVRAGES SPÉCIFIQUES LIÉS À L'EXPLOITATION ET À LA SÉCURITÉ

Les ouvrages spécifiques liés à l'exploitation et à la sécurité à ventiler sont les issues de secours (y compris leur sas éventuel), les locaux techniques (notamment les stations de ventilation) et les niches de sécurité.

Le prix de la ventilation des locaux techniques ayant déjà été intégré au prix de la ventilation traité en 3 et le prix de la ventilation des niches de sécurité pouvant être négligé aux stades EP et AVP, les seuls ouvrages dont la ventilation doit ici être estimée sont les issues de secours.

Le nombre d'issues de secours dépend de la longueur du tunnel et de l'inter-distance entre deux issues successives. Cette inter-distance est fixée par la réglementation. Elle est de 400 mètres pour un tunnel routier de type non urbain,

200 mètres pour un tunnel de type urbain dont le nombre de voies est inférieur ou égal à 3, et 100 à 150 mètres pour les nombres de voies supérieurs. Le nombre d'issues est noté N_{issues} .

Le prix de la ventilation des issues de secours figure dans le tableau ci-dessous. Le détail de la composition de ce prix est donné en Annexe B : Compléments pour l'estimation des prix de ventilation.

Dispositif	Prix issu du retour d'expérience
Ventilation des ouvrages de sécurité	$(65\,000 + 3\,500 \times N_{\text{tubes}}) \times N_{\text{issues}}$ €

Tableau 4 : Prix de la ventilation des ouvrages de sécurité

PRIX DE LA MÉTALLERIE

5.1 COMPOSITION

Les éléments de métallerie à estimer sont principalement les portes, installées dans les issues de secours, les niches de sécurité et les locaux techniques. Leur prix est particulièrement

élevé lorsqu'elles possèdent de fortes exigences de tenue au feu.

5.2 PRIX DE RÉFÉRENCE RETENUS

Métallerie des issues de secours

Le nombre d'issues de secours dépend des caractéristiques du tunnel.

La description des équipements de métallerie à prévoir selon les cas de figure est donnée en annexe (Annexe C : Détail des équipements de métallerie selon les ouvrages).

Le prix de la métallerie par issue, tel qu'il est donné par le retour d'expérience, est le suivant :

- tunnels comportant un seul tube : 24 000 € ;
- tunnels comportant deux tubes : 54 000 €.

Métallerie des niches de sécurité

Une porte simple vitrée est installée pour fermer chaque niche de sécurité (qu'elle soit en tunnel ou à l'air libre au niveau des têtes).

Le nombre de niches de sécurité dépend de la longueur du tunnel et de leur inter-distance.

Le prix de la métallerie par niche de sécurité, tel qu'il est donné par le retour d'expérience, est de 5 500 €.

Métallerie des niches techniques

Une porte à simple vantail normale est installée pour fermer chaque niche technique. Il n'est pas prévu de tenue au feu particulière pour cette porte, car on fait l'hypothèse que le maintien de la continuité de l'alimentation électrique et des télé-transmissions au droit d'un incendie est garanti soit par la conception même de l'architecture des réseaux, soit par l'utilisation de coffrets électriques spécifiques présentant la tenue au feu nécessaire.

Le prix de la métallerie par niche technique, tel qu'il est donné par le retour d'expérience, est de 4 500 €.

Métallerie en locaux techniques (cas des tunnels non ventilés ou dotés d'une ventilation longitudinale)

Il s'agit ici d'estimer le prix de la métallerie du bâtiment accueillant les locaux techniques des tunnels non ventilés ou ventilés longitudinalement.

Les métalleries à prévoir sont les portes des différents locaux techniques composant le bâtiment.

Selon les projets, la configuration des locaux techniques peut être extrêmement variée. Afin d'établir la formule d'estimation qui est proposée ci-dessous, une configuration fictive a été imaginée. Sa description est donnée en annexe (Annexe C : Détail des équipements de métallerie selon les ouvrages).

Pour une telle configuration⁹, le prix de la métallerie issu du retour d'expérience est de 130 000 €.

Métallerie en station de ventilation (cas des tunnels ventilés transversalement)

On considère ici qu'une station de ventilation transversale comporte des locaux spécifiques aux différents usages attendus, et que chaque local, qui peut selon son usage donner directement à l'extérieur de la station ou pas, est fermé par une porte.

Des portes sont également prévues pour accéder aux gaines de ventilation depuis la station de ventilation.

Comme dans le cas précédent, une configuration fictive a été imaginée afin d'élaborer une formule d'estimation. Sa description est donnée en annexe (Annexe C : Détail des équipements de métallerie selon les ouvrages).

Pour une telle configuration, le prix de la métallerie issu du retour d'expérience est de 190 000 € par station.

9. Si plusieurs bâtiments sont prévus, le prix donné sera multiplié par le nombre de bâtiments.

Métallerie en station d'extraction massive (cas des tunnels ventilés longitudinalement avec extractions massives)

La démarche d'estimation des éléments de métallerie à installer dans une station d'extraction massive est similaire à celle retenue pour une station de ventilation transversale. Afin d'établir la formule d'estimation qui est proposée ci-dessous, une

configuration fictive a été imaginée. Sa description est donnée en annexe (Annexe C : Détail des équipements de métallerie selon les ouvrages).

Pour une telle configuration, le prix de la métallerie issu du retour d'expérience, est de 150 000 €.

Récapitulatif

Dispositif	Prix issus du retour d'expérience
Métallerie des issues de secours <ul style="list-style-type: none"> tunnels comportant un seul tube tunnels comportant deux tubes 	24 000 € par issue 54 000 € par issue
Métallerie des niches de sécurité	5 500 € par niche
Métallerie des niches techniques	4 500 € par niche
Métallerie en locaux techniques <ul style="list-style-type: none"> tunnels non ventilés ou dotés d'une ventilation longitudinale tunnels ventilés transversalement tunnels dotés d'une ventilation longitudinale avec extractions massives 	130 000 € 190 000 € par station 150 000 € par station

Tableau 5 : Prix de la métallerie

ANNEXE A : ABAQUES POUR L'ESTIMATION DE LA POUSSÉE À INSTALLER EN VENTILATION LONGITUDINALE

Un système de ventilation longitudinal doit permettre de maintenir, pendant 2 heures, une vitesse moyenne de courant d'air dans la section du tunnel en amont du foyer de 4 m/s pour un ouvrage¹⁰ autorisé aux véhicules transportant des marchandises dangereuses (TMD) et de 3 m/s sinon¹¹.

Le dimensionnement de l'installation consiste ici à estimer la poussée totale à installer afin d'atteindre les objectifs qui viennent d'être exposés. Il est à noter que la démarche proposée concerne uniquement les ouvrages de longueur inférieure à 1500 mètres. Au-delà, des études particulières sont nécessaires.

Le calcul de la poussée n'est pas direct. Pour un ouvrage donné, il suppose la réalisation de calculs¹² pour plusieurs positions de l'incendie dans des conditions d'environnement variées (choix de différents régimes de contre-pressions atmosphériques).

Afin de faciliter l'estimation, ces calculs ont été menés lors d'un travail préliminaire à l'issue duquel, selon le type de tunnel, la poussée totale minimale à mettre en œuvre a été estimée. Le résultat de ces calculs est présenté sous forme d'abaques.

Ces abaques permettent d'obtenir la poussée minimale à installer, tout en assurant la vitesse de courant d'air requise, même en cas de perte d'une batterie, au droit de l'incendie par exemple.

L'abaque doit être choisi en fonction de la présence ou pas de TMD et de la section aérodynamique du tunnel (section ventilée), en retenant celui relatif à la section qui se rapproche le plus de la configuration étudiée (section rectangulaire ou semi-circulaire). Pour une section donnée, l'abaque donne les valeurs de poussée totale P_t à installer en fonction de la longueur et de la pente du tunnel.

6.1 SECTIONS RECTANGULAIRES COMPRISES ENTRE 54 ET 70 M²

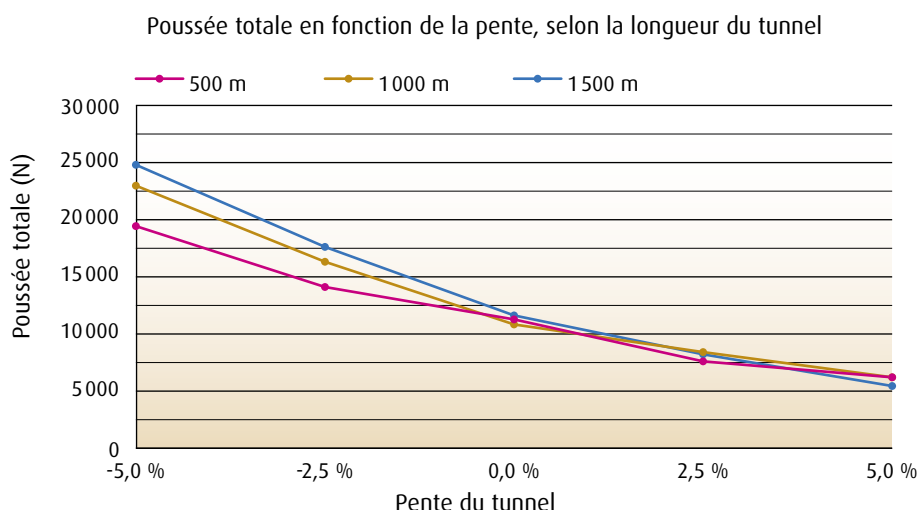


Illustration 8 : Section rectangulaire 54 m², sans TMD

10. La démarche exposée dans ce document traite des ouvrages dans lesquels le trafic poids lourds est autorisé. Le cas des tunnels de gabarit inférieur ou égal à 3,5 m (véhicules légers seulement) n'est pas abordé car plus favorable du point de vue de la ventilation.

11. Instruction technique relative aux dispositions de sécurité dans les nouveaux tunnels routiers (conception et exploitation), § 3.2.2.a.

12. Ces calculs sont effectués à l'aide de simulateurs numériques en l'absence de solutions analytiques.

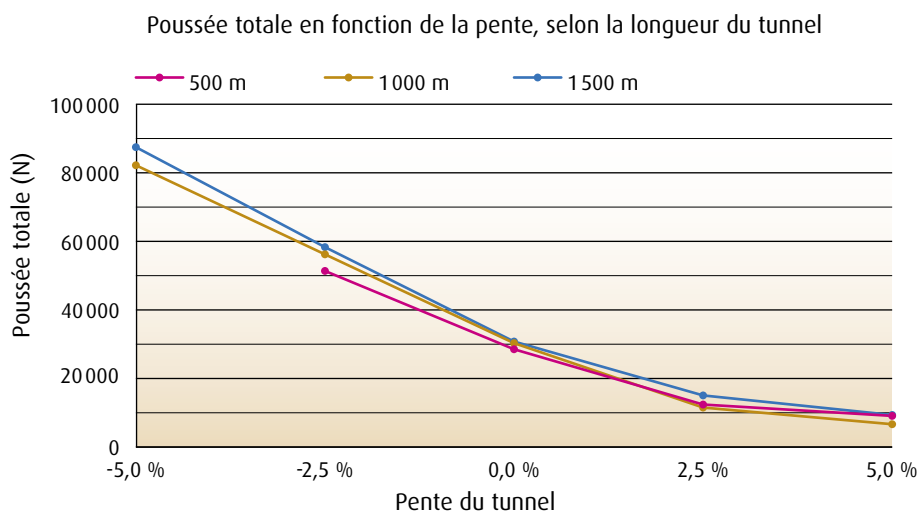


Illustration 9 : Section rectangulaire 54 m², avec TMD

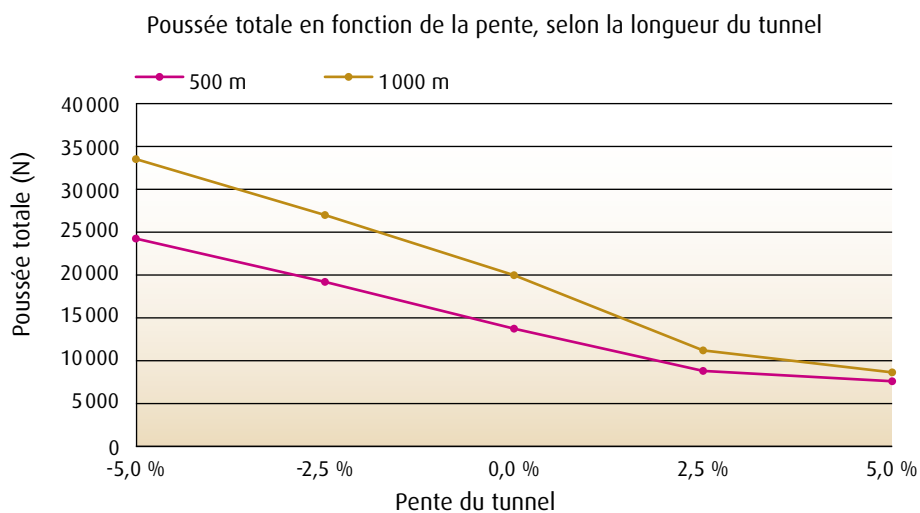


Illustration 10 : Section rectangulaire 56 m², sans TMD

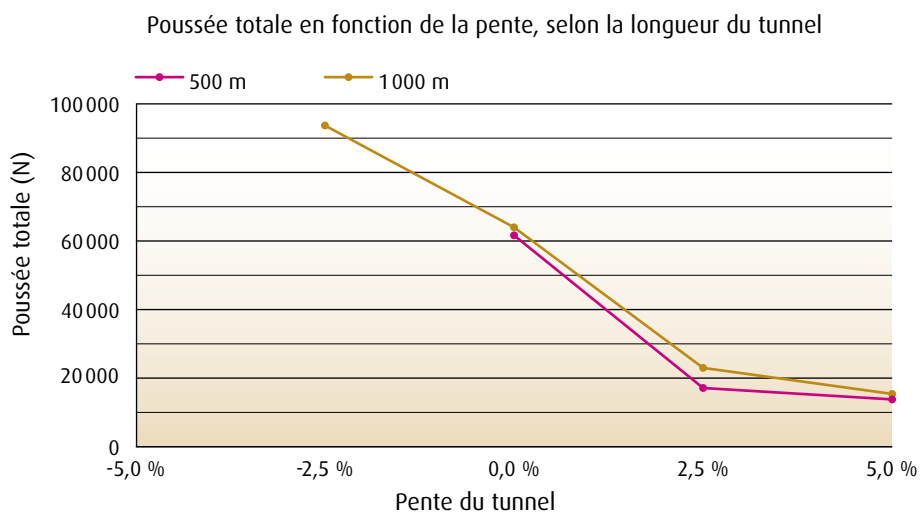


Illustration 11 : Section rectangulaire 56 m², avec TMD

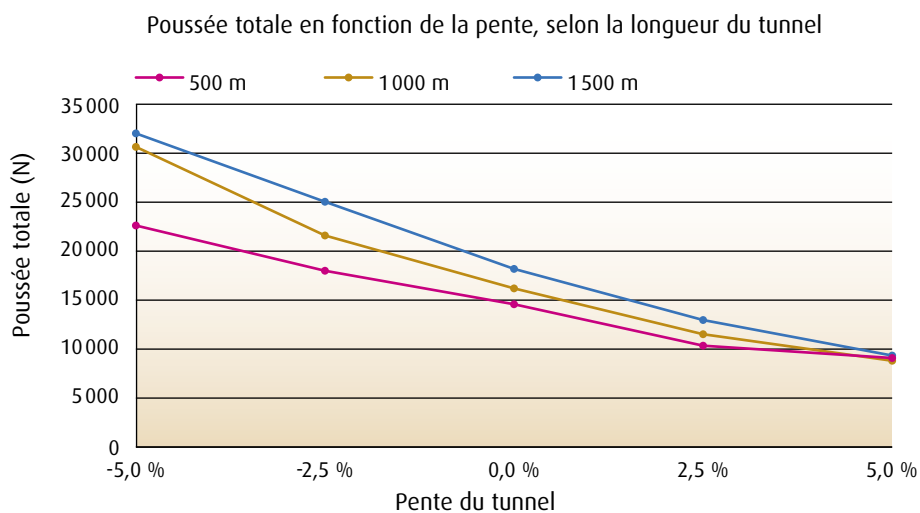


Illustration 12 : Section rectangulaire 70 m², sans TMD

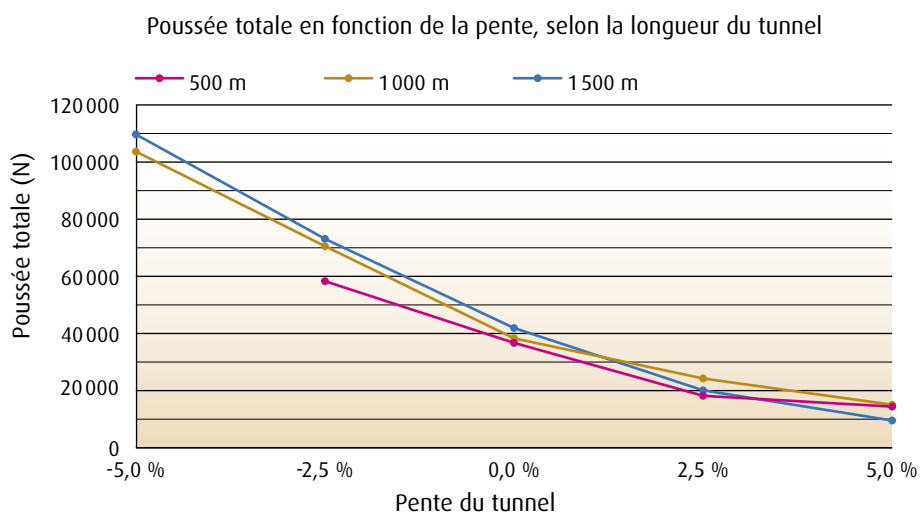


Illustration 13 : Section rectangulaire 70 m², avec TMD

6.2 SECTIONS RECTANGULAIRES COMPRISES ENTRE 86 ET 102 M²

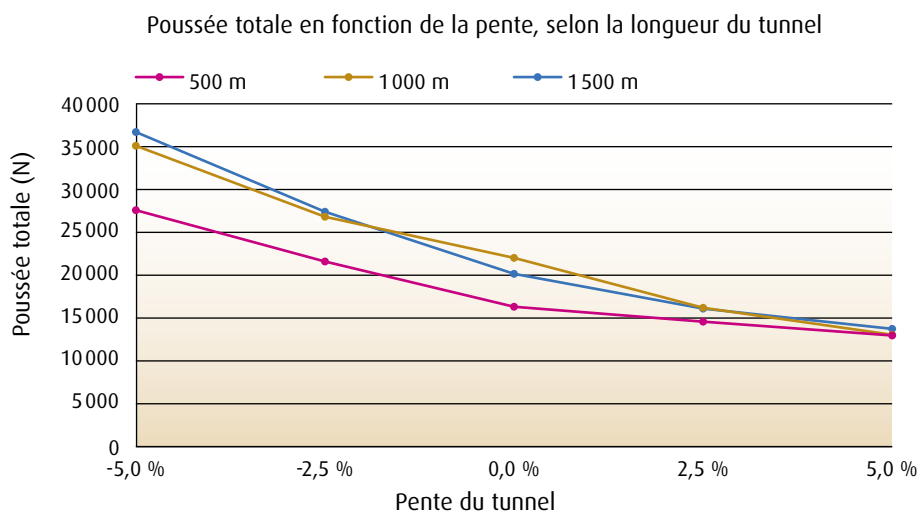


Illustration 14 : Section rectangulaire 86 m², sans TMD

Poussée totale en fonction de la pente, selon la longueur du tunnel

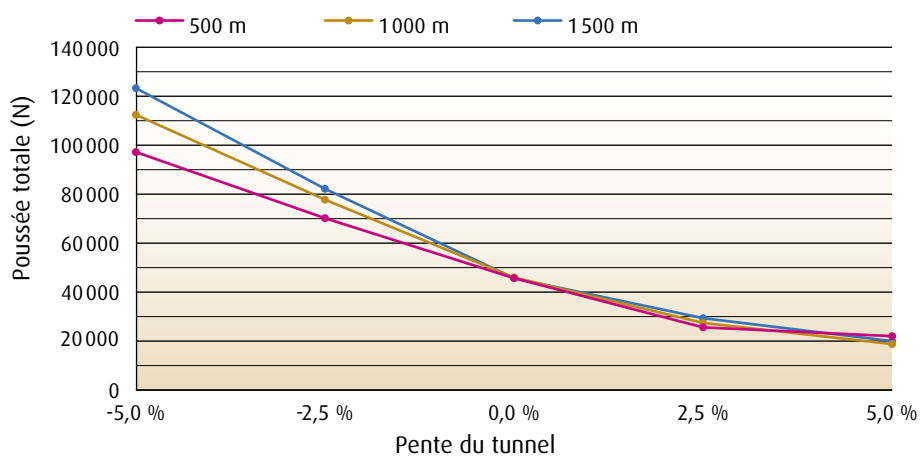


Illustration 15 : Section rectangulaire 86 m², avec TMD

Poussée totale en fonction de la pente, selon la longueur du tunnel

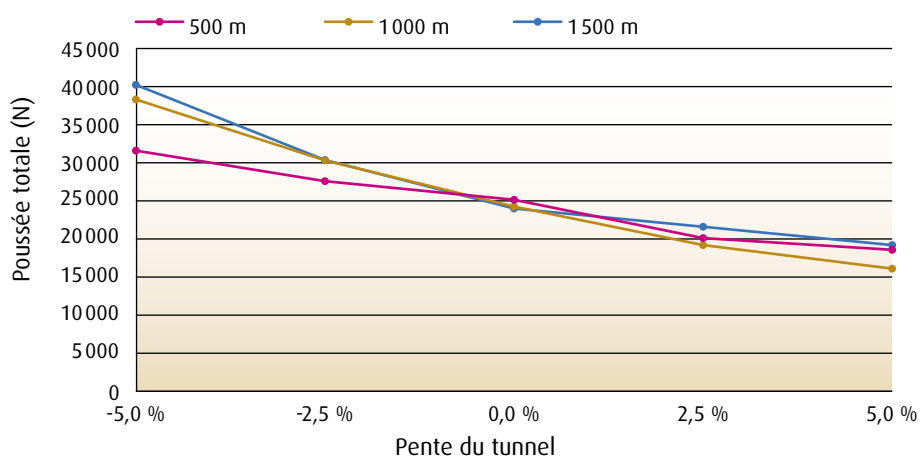


Illustration 16 : Section rectangulaire 102 m², sans TMD

Poussée totale en fonction de la pente, selon la longueur du tunnel

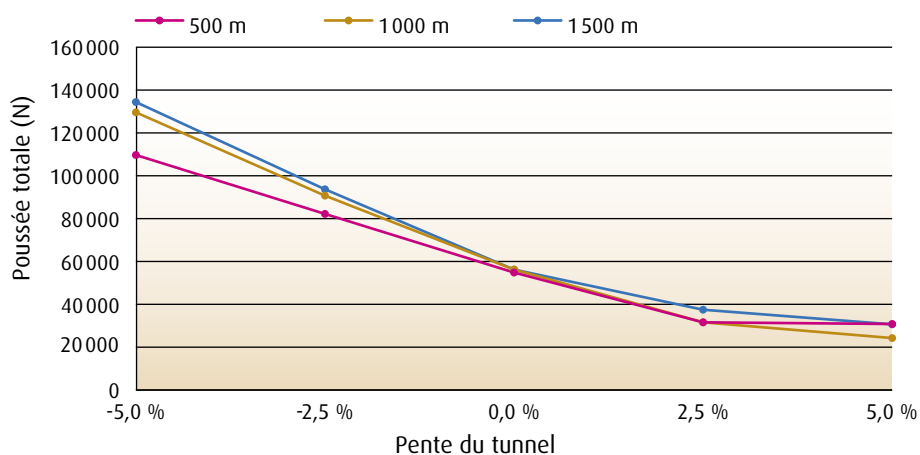


Illustration 17 : Section rectangulaire 102 m², avec TMD

6.3 SECTIONS SEMI-CIRCULAIRES COMPRISES ENTRE 58 ET 86 M²

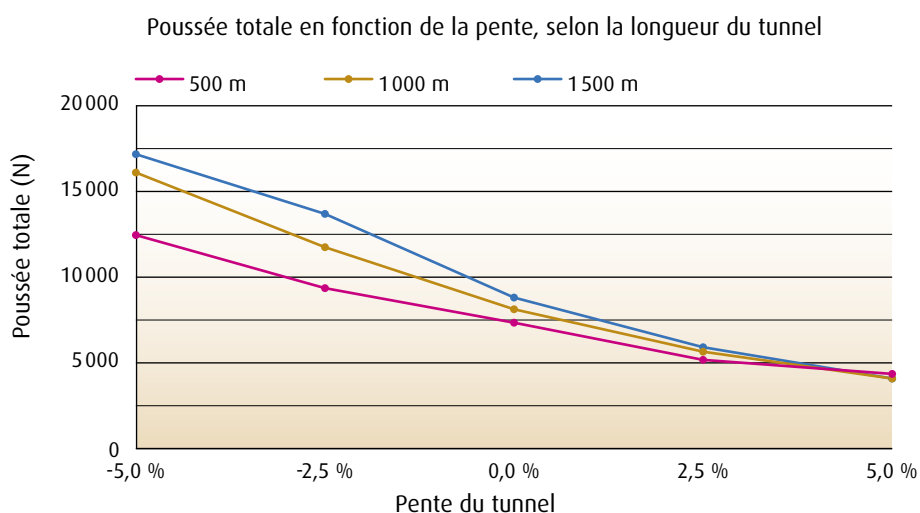


Illustration 18 : Section semi-circulaire 58,5 m², sans TMD

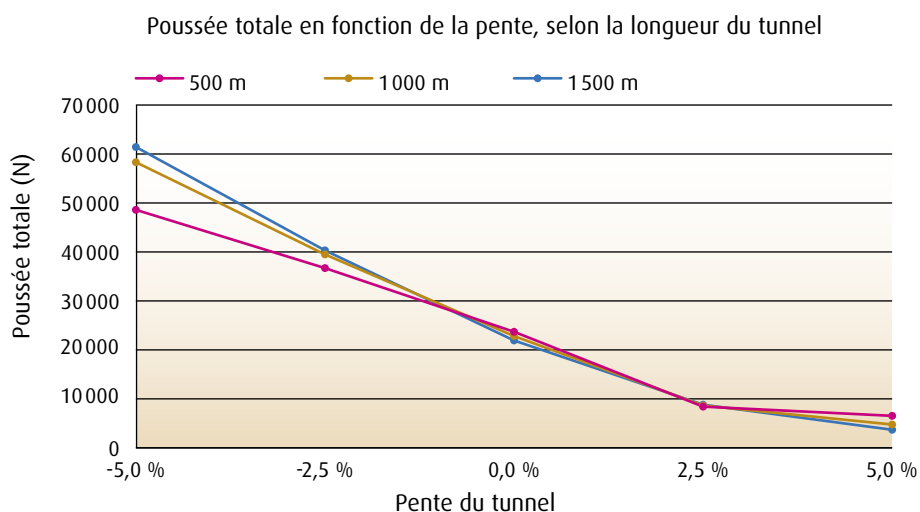


Illustration 19 : Section semi-circulaire 58,5 m², avec TMD

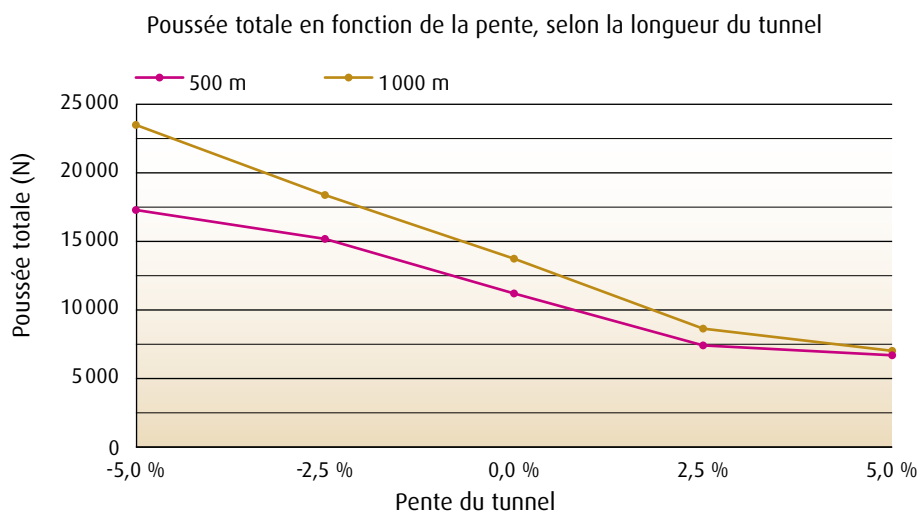


Illustration 20 : Section semi-circulaire 75,5 m², sans TMD

Poussée totale en fonction de la pente, selon la longueur du tunnel

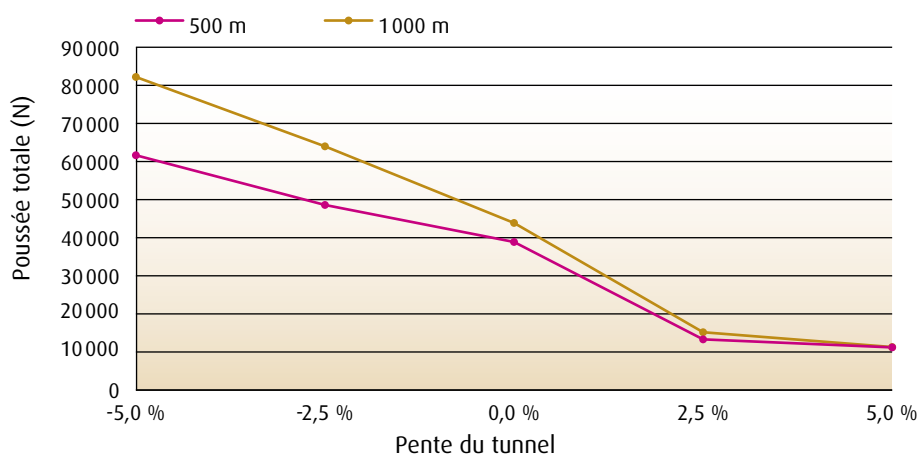


Illustration 21 : Section semi-circulaire 75,5 m², avec TMD

Poussée totale en fonction de la pente, selon la longueur du tunnel

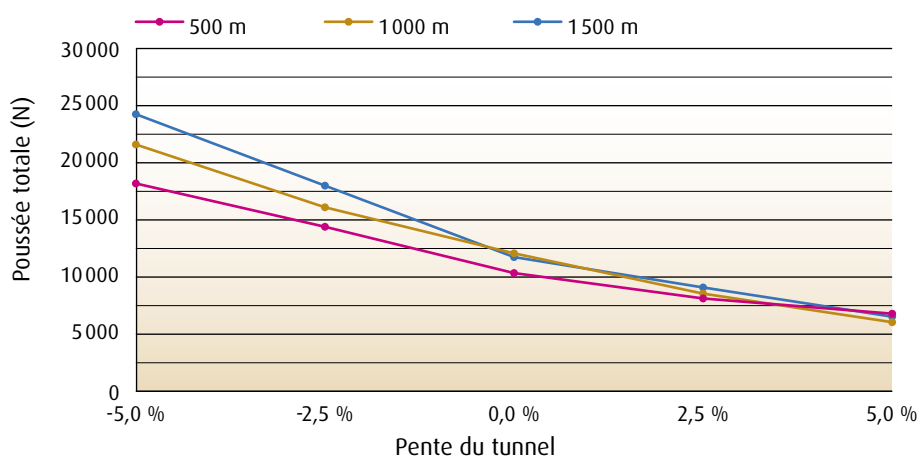


Illustration 22 : Section semi-circulaire 86 m², sans TMD

Poussée totale en fonction de la pente, selon la longueur du tunnel

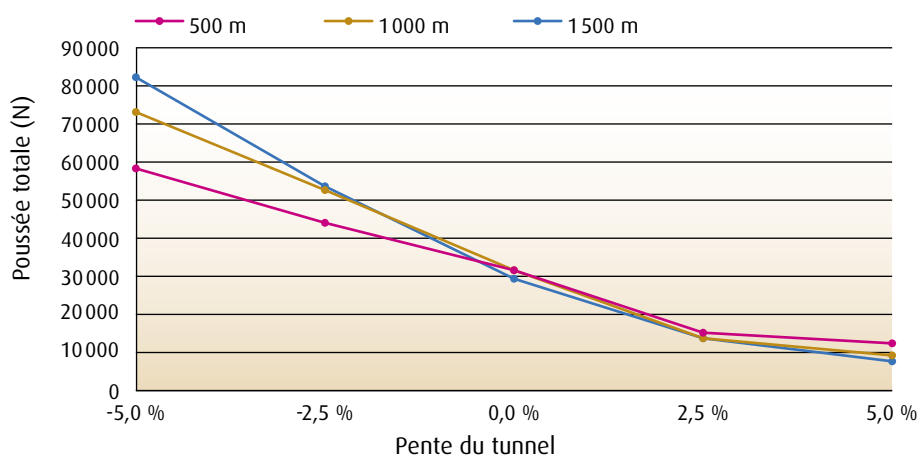


Illustration 23 : Section semi-circulaire 86 m², avec TMD

6.4 SECTIONS SEMI-CIRCULAIRES SUPÉRIEURES À 100 M²

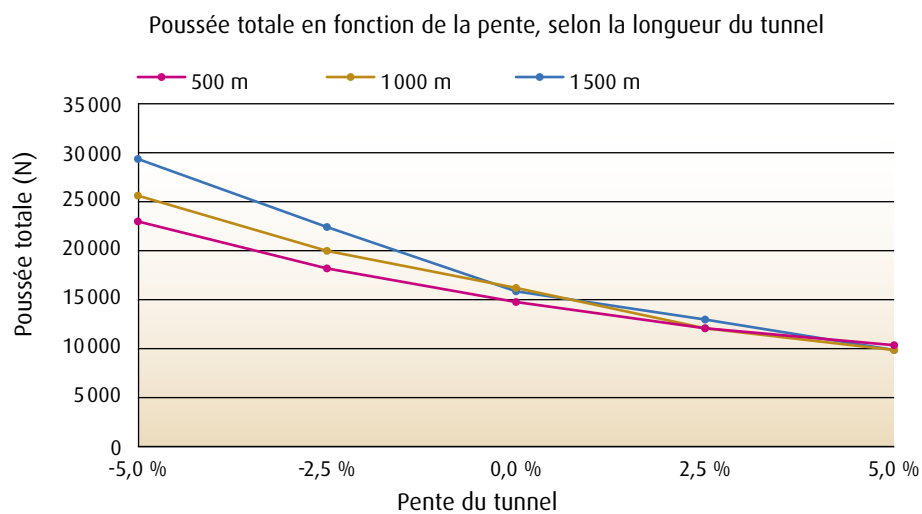


Illustration 24 : Section semi-circulaire 106 m², sans TMD

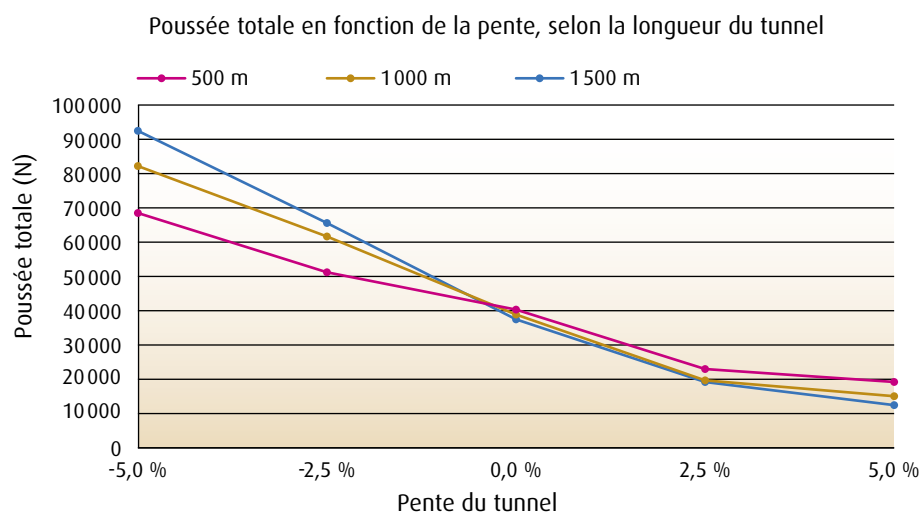


Illustration 25 : Section semi-circulaire 106 m², avec TMD

ANNEXE B : COMPLÉMENTS POUR L'ESTIMATION DES PRIX DE VENTILATION

7.1

VENTILATION TRANSVERSALE : DÉTAIL DE LA COMPOSITION DU PRIX DE RÉFÉRENCE

Outre les extracteurs et les ventilateurs de soufflage, l'estimation du prix d'un système de ventilation transversal doit intégrer un certain nombre d'autres rubriques. Il s'agit des équipements à installer dans les stations de ventilation (pièces spéciales des réseaux aérauliques et câblage électrique), des appareils de contrôle de la pollution à installer en tunnel, d'un lot de pièces de rechange, des essais et de la maintenance.

Réseaux aérauliques

Les pièces spéciales des réseaux aérauliques sont :

- les aménagements aérauliques (gainés, pièces de transformation, etc.), métalliques la plupart du temps, destinés à relier entre eux les ventilateurs, leurs équipements associés (registres, dispositifs d'insonorisation) et le génie civil de l'ouvrage (gainés côté tunnel ou côté extérieur, cheminées de rejet, bouche d'aspiration) ;
- les ventelles pare-pluie qui protègent chaque prise d'air frais, une bouche étant prévue par station si le tunnel ne comporte qu'un tube, et deux bouches si le tunnel en comporte deux ;
- les grillages anti-volatiles qui protègent l'extrémité du dispositif de rejet (cheminée par exemple) de chaque station ;
- les bouches de soufflage assurant la distribution d'air frais sur toute la longueur du tunnel, régulièrement espacées de 10 mètres, en base de piédroit, dans chaque tube¹³ ;
- les dispositifs de réglage du débit des carneaux qui permettent le transit d'air frais de la gaine vers la bouche de soufflage en base du piédroit, et dont le nombre est identique à celui des bouches de soufflage ;
- les trappes de désenfumage motorisées installées dans chaque tube, tous les 50 mètres pour un tunnel de type urbain, et tous les 100 mètres pour un tunnel de type non urbain.

Câblage électrique

Le prix des armoires de démarrage et des variateurs étant intégré au prix des extracteurs d'air vicié et des ventilateurs de soufflage, le seul prix supplémentaire à prendre en compte est celui des câblages (alimentation électrique, contrôle, commande et mise à la terre) entre les ventilateurs et les armoires installés dans chaque station.

Insonorisation en station

Il s'agit :

- du prix du dispositif d'insonorisation à installer à l'aval du circuit d'air vicié de chaque station de ventilation afin de limiter les nuisances acoustiques sur l'environnement extérieur ;
- du prix du dispositif d'insonorisation à installer à l'amont de chaque circuit d'air frais, afin de limiter les nuisances acoustiques sur l'environnement extérieur.

Un dispositif d'insonorisation est prévu par station si le tunnel ne comporte qu'un tube, et deux si le tunnel comporte deux tubes.

Suivi et contrôle des niveaux de pollution en tunnel

Le prix est estimé de façon identique à celle proposée pour la ventilation longitudinale, traitée au paragraphe 3.3.2.

Essais et maintenance

Dans le cas d'un système transversal, les prix concernés par la rubrique « Essais et maintenance » sont les suivants : essai de fonctionnement en usine d'un moteur pour ventilateur d'air frais, essai de fonctionnement en usine d'un moteur pour ventilateur d'air vicié, essai de fonctionnement en usine d'un moto-ventilateur d'air frais, essai de fonctionnement en usine d'un moto-ventilateur d'air vicié, essai d'un variateur, essai en usine d'un prototype de registre, essai en usine d'un prototype de trappe de désenfumage, essai de fonctionnement sur site d'un moto-ventilateur d'air frais, essai de fonctionnement sur site d'un moto-ventilateur d'air vicié, essai de réception sur site de l'installation de ventilation d'air frais, essai de réception sur site de l'installation de ventilation d'air vicié, essai de désenfumage, formation du personnel, forfait de maintenance et d'entretien pendant la période de garantie.

13. Lorsque le nombre de voies est supérieur ou égal à 3, des bouches sont installées sur les 2 piédroits et il faut dans ces cas-là doubler le nombre de bouches.

7.2.1 Calcul des débits d'extraction massive

Le calcul du débit de chaque extraction massive Q_{em} est donnée par la formule suivante (cf. dossier pilote ventilation [13]) :

$$Q_{em} = V_1 \cdot S_v + V_2 \cdot S_v + \frac{Q_{conv}}{(\rho_0 C_p T_0)}$$

avec :

V_1 : vitesse en amont de l'incendie (m/s), $V_1 = 4$ m/s si les TMD sont autorisés, sinon $V_1 = 3$ m/s ;

V_2 : vitesse en aval de l'incendie (m/s), $V_2 = 1$ m/s dans tous les cas ;

S_v : section ventilée maximale des deux tubes (m²) ;

Q_{conv} : puissance convectée de l'incendie, égale à 2/3 de la puissance totale de l'incendie de référence (MW) ;

C_p : chaleur massique de l'air frais = 1006 J/kg/K ;

ρ_0 : masse volumique de l'air frais = 1,202 kg/m³ ;

T_0 : température de l'air frais = 293 K.

La puissance totale de l'incendie est de 200 MW si les TMD sont autorisés¹⁴, et sinon de 30 MW. On en déduit donc le débit de chaque extraction massive :

- TMD non autorisés : $Q_{em} = 4 \cdot S_v + 57$ (en m³/s) ;
- TMD autorisés : $Q_{em} = 5 \cdot S_v + 377$ (en m³/s).

7.2.2 Détail de la composition du prix de référence

Outre les accélérateurs en tunnels et les extracteurs en station, l'estimation doit intégrer un certain nombre d'autres rubriques. Il s'agit des équipements à installer dans les stations d'extraction massive (pièces spéciales des réseaux aérauliques et câblage électrique), des appareils de contrôle de la pollution à installer en tunnel, d'un lot de pièces de rechange, des essais et de la maintenance.

Pour connaître le détail de ces autres équipements, on pourra se référer à la ventilation transversale, qui présente beaucoup de similarités. La différence principale concerne la rubrique « Essais et maintenance ». Dans le cas d'un système longitudinal avec extraction massive, les prix concernés par cette rubrique sont les suivants : essai de fonctionnement en usine d'un moteur pour ventilateur d'air vicié, essai de fonctionnement en usine d'un moto-ventilateur d'air vicié, essai d'un variateur, essai en usine d'un prototype de registre, essai en usine d'un prototype de trappe de désenfumage, essai de fonctionnement sur site d'un moto-ventilateur d'air vicié, essai de réception sur site de l'installation de ventilation d'air vicié, essai de désenfumage, formation du personnel, forfait de maintenance et d'entretien pendant la période de garantie.

7.3.1 Ventilation des issues de secours

La composition du prix de la ventilation des issues de secours s'appuie sur l'hypothèse que chaque issue est équipée de deux ventilateurs avec deux registres, qu'il s'agisse d'un tunnel bi-tube avec des galeries inter-tubes équipées d'un ventilateur à chaque extrémité, ou d'un tunnel mono-tube avec des issues débouchant directement à l'extérieur équipées de deux ventilateurs dont 1 de secours. Dans le second cas, l'hypothèse faite est majorante, car le ventilateur de secours n'est ni obligatoire ni même recommandé, et en pratique rarement installé.

Le cas d'un tunnel bi-tube avec issues débouchant à l'extérieur, qui n'est pas traité, devra être assimilé à celui d'un tunnel bi-tube avec inter-tubes.

Il est prévu, pour chaque ventilateur, un coffret d'alimentation, un caisson d'aspiration et un caisson de soufflage.

Le nombre de clapets de décompression est égal au nombre d'issues multiplié par le nombre de tubes, l'hypothèse étant faite que la décompression a toujours lieu vers le tube sinistré.

Une gaine est par ailleurs prévue pour chaque issue.

7.3.2 Ventilation des locaux techniques

Il est prévu l'installation d'un groupe moto-ventilateur par bâtiment, accompagné d'un coffret d'alimentation, d'un caisson d'aspiration, d'un caisson de soufflage, d'un registre, d'un clapet, d'ensemble de gaines et de cinq grilles de ventilation naturelle.

14. Le dossier pilote Ventilation indique que dans le cas des tunnels autorisés au transport des marchandises dangereuses, la formule peut donner des valeurs de débit volumique très importantes, voire impossibles à atteindre selon les contraintes propres du tunnel considéré. Dans ce cas, le dossier pilote indique qu'il est alors possible de limiter les débits extraits, par exemple en retenant un incendie de référence de 100 MW et en adoptant des mesures compensatoires.

ANNEXE C : DÉTAIL DES ÉQUIPEMENTS DE MÉTALLERIE SELON LES OUVRAGES

8.1 MÉTALLERIE DES ISSUES DE SECOURS

S'il n'y a qu'un seul tube, on considère que chaque issue comprend :

- à son extrémité côté tunnel, un sas fermé par une porte simple vantail N2 (côté tunnel) et une porte simple vantail normale (côté issue) ;
- à son extrémité à l'air libre, une porte simple vantail normale.

Le prix de la métallerie est donc égal à la somme du prix de deux portes à simple vantail normales et d'une porte à simple vantail N2, multipliée par le nombre d'issues N_{issues} , soit :

$$24\,000 \times N_{\text{issues}} \text{ €}.$$

S'il y a deux tubes, on prévoit des galeries inter-tubes équipées à chaque extrémité d'une porte à double vantail N2. Le prix de la métallerie est donc égal au prix de 2 portes à double vantail N2 multiplié par le nombre d'issues N_{issues} , soit :

$$54\,000 \times N_{\text{issues}} \text{ €}.$$

8.2 MÉTALLERIE EN LOCAUX TECHNIQUES (CAS DES TUNNELS NON VENTILÉS OU DOTÉS D'UNE VENTILATION LONGITUDINALE)

La station de ventilation fictive utilisée pour établir l'estimation comporte :

- un local alimentation électrique donnant directement sur l'extérieur, fermé par 1 porte à double vantail ;
- un local haute-tension donnant directement sur l'extérieur, fermé par 1 porte à double vantail ;
- un local basse-tension, fermé par 1 porte à double vantail ;
- un local courants faibles, fermé par 1 porte à double vantail N1 ;
- un local incendie accueillant un sur-presseur, fermé par 1 porte à double vantail ;
- une porte à simple vantail pour accéder à une salle de réunion ou de travail ;
- 4 portes à simple vantail pour l'accès à des locaux divers (stockage de petit matériel, sanitaires...).

Il est en outre prévu une trappe d'accès matériel et des ensembles de garde-corps et d'échelles ainsi que des

caillebotis. Il est aussi prévu des accessoires de manutention (crochets de levage et chariot de manutention).

Au total, pour la station, on prévoit donc :

- 4 portes à double vantail ;
- 1 porte à double vantail N1 ;
- 5 portes à simple vantail ;
- 1 trappe d'accès matériel ;
- 1 ensemble de passerelles ;
- 1 ensemble des caillebotis ;
- 1 ensemble de garde corps ;
- 1 ensemble d'échelles ;
- 1 ensemble d'accessoires de manutention.

Le prix de la métallerie du bâtiment accueillant les locaux techniques est obtenu en multipliant le nombre de chaque élément de métallerie donné ci-dessus par leur prix unitaire. Ce prix issu du retour d'expérience s'établit à 130 000 €.

8.3 MÉTALLERIE EN STATION DE VENTILATION (CAS DES TUNNELS VENTILÉS TRANSVERSALEMENT)

La station de ventilation fictive utilisée pour établir l'estimation comporte :

- un local alimentation électrique donnant directement sur l'extérieur, fermé par 1 porte double ;
- un local haute-tension donnant directement sur l'extérieur, fermé par 1 porte double ;

- un local basse-tension, fermé par 1 porte double ;
- un local courants faibles, fermé par 1 porte double N1 ;
- un local ventilation, fermé par 1 porte double N1 ;
- un local incendie accueillant un sur-presseur, fermé par 1 porte double ;

- une porte simple permettant d'accéder à la gaine d'air frais depuis la station de ventilation, pour chaque tube ;
- trois portes simples pour accéder au réseau d'air frais à l'aval des ventilateurs (accès aux dispositifs d'insonorisation, aux plenums d'aspiration...), pour chaque tube ;
- une porte simple N1 pour accéder à la gaine d'air vicié depuis le local ventilation ou depuis la gaine d'air frais ;
- trois portes simples N1 pour accéder au réseau d'air vicié à l'aval des ventilateurs (accès aux dispositifs d'insonorisation, à la cheminée de rejet...);
- une porte simple pour accéder à une salle de réunion ou de travail ;
- 4 portes simples d'accès à des locaux divers (stockage de petit matériel, sanitaires...).

Il est en outre prévu une trappe d'accès matériel et des ensembles de passerelles, de caillebotis, de garde-corps et d'échelles, ainsi que des accessoires de manutention (ensemble monorail + palan, crochets de levage et chariot de manutention).

Au total, pour une station, on prévoit donc :

- 4 portes à double vantail ;
- 2 portes à double vantail N1 ;
- 4 portes à simple vantail N1 ;
- 5 portes simples et, pour chaque tube, 4 autres portes simples ;
- 1 trappe d'accès matériel ;
- 1 ensemble de passerelles ;
- 1 ensemble des caillebotis ;
- 1 ensemble de garde corps ;
- 1 ensemble d'échelles ;
- 1 ensemble d'accessoires de manutention.

Le prix de la métallerie des stations de ventilation est obtenu en multipliant le nombre de chaque élément de métallerie donné ci-dessus par leur prix unitaire et par le nombre de stations N_{st} . Ce prix issu du retour d'expérience s'établit à 190 000 € par station.

8.4

MÉTALLERIE EN STATION D'EXTRACTION MASSIVE (CAS DES TUNNELS VENTILÉS LONGITUDINALEMENT AVEC EXTRACTIONS MASSIVES)

La station fictive utilisée pour établir l'estimation comporte :

- un local alimentation électrique donnant directement sur l'extérieur, fermé par 1 porte double ;
- un local haute-tension donnant directement sur l'extérieur, fermé par 1 porte double ;
- un local basse-tension, fermé par 1 porte double ;
- un local courants faibles, fermé par 1 porte double N1 ;
- un local ventilation, fermé par 1 porte double N1 ;
- un local incendie accueillant un surprasseur, fermé par 1 porte double ;
- une porte simple N1 pour accéder à la gaine d'extraction depuis le local ;
- trois portes simples N1 pour accéder au réseau d'extraction à l'aval des ventilateurs (accès aux dispositifs d'insonorisation, à la cheminée de rejet...);
- une porte simple pour accéder à une salle de réunion ou de travail ;
- 4 portes simples d'accès à des locaux divers (stockage de petit matériel, sanitaires...).

Il est en outre prévu une trappe d'accès matériel et des ensembles de passerelles, de caillebotis, de garde-corps et d'échelles, ainsi que des accessoires de manutention (ensemble monorail + palan et crochets de levage).

Au total, pour une station, on prévoit donc :

- 4 portes doubles ;
- 2 portes doubles N1 ;
- 4 portes simples N1 ;
- 5 portes simples ;
- 1 trappe d'accès matériel ;
- 1 ensemble de passerelles ;
- 1 ensemble des caillebotis ;
- 1 ensemble de garde corps ;
- 1 ensemble d'échelles ;
- 1 ensemble d'accessoires de manutention.

Le prix de la métallerie des stations d'extraction est obtenu en multipliant le nombre de chaque élément de métallerie donné ci-dessus par leur prix unitaire et par le nombre de stations N_{em} . Ce prix issu du retour d'expérience s'établit à 150 000 € par station.

[illegible]

This image shows a single sheet of white paper with horizontal blue ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

This image shows a full-page view of a notebook or worksheet. At the top left, there is a purple tab-like shape containing the word "NOTES" in white capital letters. The main body of the page is white and filled with horizontal blue lines, providing space for writing. At the bottom of the page, there is a solid purple horizontal bar containing the number "30" in white. The overall design is clean and functional, typical of educational materials.



Centre d'Études des Tunnels
25 avenue François Mitterrand
Case n°1
69674 BRON - FRANCE
Tél. 33 (0)4 72 14 34 00
Fax. 33 (0)4 72 14 34 30
cetu@developpement-durable.gouv.fr



FASCICULE 5

Travaux d'équipements de sécurité et d'exploitation – autres équipements



AVERTISSEMENT

Les documents d'information ont pour but de fournir une information sur une technique ou un problème nouveau ou insuffisamment traité par ailleurs. Le lecteur pourra y trouver des repères susceptibles de l'aider dans son activité. Le contenu et les éventuelles conclusions présentés ne doivent pas être considérés comme des recommandations du CETU. Bien que le maximum soit fait pour s'assurer de la fiabilité des sources utilisées, la responsabilité du CETU ou des auteurs du document ne saurait être engagée.

TABLE DES MATIÈRES

1 OBJET DU FASCICULE 5	4
1.1 Périmètre d'application	4
1.2 Contenu du fascicule	4
1.3 Précautions d'utilisation	5
1.4 Avertissement	5
2 RETOUR D'EXPÉRIENCE DU PRIX DES ÉQUIPEMENTS DE SÉCURITÉ ET D'EXPLOITATION	6
2.1 Base de données utilisée	6
2.2 Retour d'expérience sur les prix moyens des marchés équipements	7
2.3 Retour d'expérience sur les prestations générales	7
2.4 Prix d'ordre des équipements de sécurité et d'exploitation (hors réseau incendie, ventilation et métallerie)	8
3 PRIX DE RÉFÉRENCE DES FAMILLES D'ÉQUIPEMENTS	9
3.1 Principes	9
3.2 Prix de référence alimentation électrique	9
3.3 Prix de référence installations d'éclairage du tunnel	10
3.4 Prix de référence Gestion Technique Centralisée-Supervision	11
3.5 Prix de référence vidéo-surveillance et DAI	11
3.6 Prix de références équipements de sécurité	12
3.7 Prix de référence réseau incendie	13
ANNEXE : PRÉSENTATION DES OUVRAGES DE LA BASE DE DONNÉES	14

OBJET DU FASCICULE 5

Le fascicule 5 s'inscrit dans une série de fascicules constituant le document d'information sur le prix des tunnels :

- fascicule 0 : périmètre du document, données d'entrée pour l'estimation
- fascicule 1 : études et frais de maîtrise d'ouvrage, reconnaissances et essais, maîtrise d'œuvre, somme à valoir, provision pour risques
- fascicule 2 : travaux de génie civil – ouvrages en souterrain
- fascicule 3 : travaux de génie civil – ouvrages aux émergents
- fascicule 4 : travaux d'équipements de sécurité et d'exploitation – ventilation et métallerie
- **fascicule 5 : travaux d'équipements de sécurité et d'exploitation – autres équipements**

1.1

PÉRIMÈTRE D'APPLICATION

Le présent fascicule traite du prix des principaux équipements de sécurité et d'exploitation (hors ventilation et métallerie) des ouvrages souterrains routiers :

- équipements d'alimentation et de distribution électriques ;
- équipements d'éclairage ;
- équipements de réseaux de télécommunication et de GTC - Supervision ;
- équipements de vidéo-surveillance et de détection automatique d'incidents ;
- équipements de communication, comprenant notamment la radio-communication et le réseau d'appel d'urgence ;
- équipements de sécurité (équipements des niches, d'auto-évacuation et fermeture) ;
- autres équipements, comprenant notamment les équipements de signalisation extérieurs (autre que ceux

du dispositif de fermeture), les équipements du local technique et des gaines techniques ;

- équipements du réseau d'eau pour la lutte contre l'incendie.

Le présent fascicule ne traite pas des prix de construction des ouvrages de génie civil associés aux équipements tels que les gaines, les locaux techniques et les réseaux secs (fourreaux, multitubulaires et chambres de tirage) ainsi que des équipements de ventilation et de métallerie. Ces prix sont traités dans les autres fascicules du présent dossier pilote :

- le fascicule 2 pour le prix du génie civil des gaines de ventilation et des réseaux secs ;
- le fascicule 3 pour le prix des locaux techniques ;
- le fascicule 4 pour les prix des équipements de ventilation et de métallerie.

1.2

CONTENU DU FASCICULE

Le prix des équipements électriques et de gestion dépend principalement :

- de la géométrie de l'ouvrage (longueur, section) ;
- des exigences liées à l'exploitation et la sécurité qui conduisent au choix des familles d'équipements et à la définition des aménagements pour l'évacuation et la protection des usagers.

L'estimation est menée avec un niveau de précision adapté aux données disponibles, au niveau de maturité du projet et aux exigences de fiabilité éventuellement imposées.

Ce fascicule comprend :

1. la présentation d'un retour d'expérience du prix d'équipements d'ouvrages existants construit à partir de données recueillies par le CETU. Ce retour d'expérience permet notamment de définir un prix d'ordre des équipements (pour une évaluation du prix de niveau étude de faisabilité) ;
2. la présentation de prix de références par famille d'équipements permettant d'évaluer les coûts de façon plus précise que le prix d'ordre (pour un niveau étude préliminaire).

1.3 PRÉCAUTIONS D'UTILISATION

Pour la bonne utilisation de ce document, il conviendra de se reporter au fascicule 0 qui donne les niveaux d'études concernés, le mode de décomposition de l'estimation prévisionnelle par postes et la méthode de construction des prix de référence.

Les prix fournis dans ce fascicule constituent une partie du poste 2.6 « Estimation technique des travaux / Équipements d'exploitation et de sécurité » tel qu'il figure dans le cadre général de présentation d'une estimation (cf. fascicule 0 – §1.5.2).

Les prix présentés correspondent à des prix de vente. Ils comprennent la fourniture, la pose et la mise en service des équipements. Ils intègrent :

- les déboursés ou frais directs de l'entreprise (main d'œuvre, matériaux et matières consommables, matériel) ;

- les frais généraux (frais de chantier et de siège, d'agence, assurances, amortissement des matériels, gérance et mandat, les impôts et taxes) ;
- la marge de l'entreprise pour risques et bénéfices.

L'ensemble des prix proposés dans ce document est donné hors taxes.

Les valeurs fournies sont attachées aux conditions économiques lors de la rédaction du présent document, soit une date de valeur au 01/01/2021.

Pour l'actualisation des valeurs de ce fascicule, il est proposé de faire appel à l'index :

- **BT47** – Électricité-Base 2010.

1.4 AVERTISSEMENT

La constitution des prix des équipements de sécurité et d'exploitation proposés dans le présent document présente des limites :

- rareté des données d'entrée ;
- fluctuation du coût des matières premières ;
- évolution technologique très rapide de certains équipements ;
- non-linéarité des coûts en fonction de la longueur ou du nombre de tubes ;

- contexte économique local ;
- surcoûts liés à des travaux sous exploitation.

En considérant ces limites, ces prix peuvent être utilisés pour une estimation de niveau « études de faisabilité » et de « niveau d'études préliminaires ».

Pour les études détaillées, il est recommandé d'utiliser des prix unitaires et des quantités issues d'un avant-métré détaillé.

RETOUR D'EXPÉRIENCE DU PRIX DES ÉQUIPEMENTS DE SÉCURITÉ ET D'EXPLOITATION

2.1 BASE DE DONNÉES UTILISÉE

Les prix moyens présentés sont issus d'appels d'offre lancés en France pour l'installation d'équipements de tunnels routiers dans le cadre de projets neufs ou de rénovations d'ouvrages existants. Parmi la liste des ouvrages, figurent à la fois des tunnels creusés et des tranchées couvertes.

La base de données comporte au total seize marchés de travaux d'équipements de tunnel routier (cf. annexe n°1) :

- tunnel du Lioran (2005) ;
- tunnel de Schirmeck (2005) ;
- tunnels de Fontain et de Bois-de-Peu (2009) ;
- tunnel de Champigny (2010) ;
- tunnel de Toulon – tube sud (2010) ;
- tunnel de Talant et tranchée couverte de Daix (2012) ;
- tunnel du Chat (2014) ;
- tunnel de Chabrières (2014) ;
- tunnel de Saint-Béat (2015) ;
- tunnel de Baza (2016) ;
- tranchée couverte d'Ours Mons (2017) ;
- tunnel de Liepvre (2017) ;
- tranchée couverte de Marange-Silvange (2018) ;
- tranchée couverte de Firminy (2018) ;
- tranchée couverte de Champoulet (2019) ;
- tunnels district urbain de la DIRMED – (Saint-Antoine, Penne-Mirabeau, Treize-Vents) (2021).

Classification des tunnels selon le niveau d'équipement

Les tunnels de la base de données présentent différents niveaux d'équipements. Ils sont classés en 3 types, selon leur niveau d'équipement :

- type 1 : correspond aux tunnels non couverts par le champ d'application de la circulaire interministérielle n°2006-20 du 29 mars 2006 et de son annexe 2 connue également comme l'Instruction Technique de 2000, du fait de leur longueur inférieure à 300 m, donc avec un niveau d'équipement faible (éclairage principalement) ;
- type 2 : correspond aux tunnels couverts par le champ d'application de l'Instruction Technique de 2000 et ne possédant pas de système de ventilation de désenfumage. Outre de l'éclairage, de l'alimentation électrique et quelques équipements de sécurité et d'exploitation, ces tunnels peuvent posséder tout de même certains « petits » dispositifs de ventilation : capteurs de pollution, opacimètre, anémomètre, ventilation sanitaire dans les issues...
- type 3 : correspond aux tunnels couverts par le champ d'application de l'Instruction Technique de 2000 et possédant un système de ventilation de désenfumage, en plus d'équipements de sécurité et d'exploitation très complets.

Tunnel de type 1	Tunnel de type 2	Tunnel de type 3
Tunnel de Chabrières	Tunnels de Fontain et de Bois de Peu	Tunnel du Lioran
Tunnel de Liepvre	Tunnel de Baza	Tunnel de Schirmeck
Tranchée couverte d'Ours Mons	Tranchée couverte de Marange-Silvange	Tunnel de Champigny
Tranchée couverte de Champoulet	Tranchée couverte de Firminy	Tunnel de Toulon Sud
Tunnels district urbain de la DIRMED	Tunnels district urbain de la DIRMED	Tunnel de Talant et tranchée couverte de Daix
		Tunnel du Chat
		Tunnel de Saint-Béat

Tableau 1 : Répartition des tunnels dans la base étudiée suivant la typologie.

RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR LES PRIX MOYENS DES MARCHÉS ÉQUIPEMENTS

Les prix indiqués (hors taxes) résultent de la moyenne des offres reçues lors de la consultation des entreprises, à laquelle est appliquée une formule d'actualisation selon l'index BT47¹.

Le graphique suivant représente la répartition des prix moyens en fonction de la longueur équipée pour l'ensemble des tunnels étudiés.

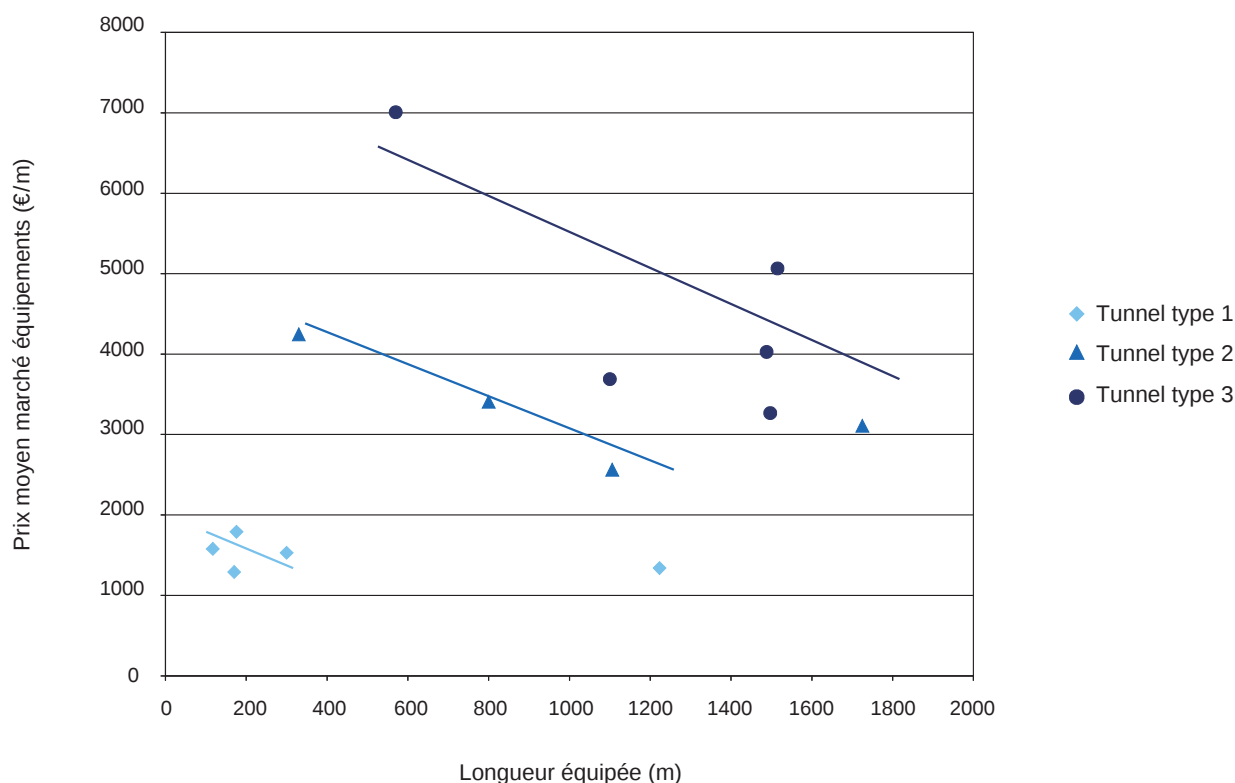


Figure 1 : Prix moyen des marchés équipements de la base de données en fonction de la longueur équipée.

Le prix au mètre linéaire augmente logiquement avec le niveau d'équipements et donc le type de tunnel.

Les coûts des tunnels de même type sont regroupés autour de trois paliers, ce qui montre une certaine cohérence de prix pour chaque typologie.

Par ailleurs, ces paliers ne sont pas horizontaux, mais décroissants en fonction de la longueur équipée.

Ceci peut s'expliquer notamment par l'impact sur les prix de grand volume d'achat : plus la longueur équipée augmente, plus le volume d'équipements est important, et plus les remises fournisseurs peuvent être importantes. Une autre explication est que certains coûts fixes, comme les coûts d'études, dépendent peu de la longueur équipée.

RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR LES PRESTATIONS GÉNÉRALES

Les prestations générales comprennent les installations de chantier, le plan d'assurance qualité, le plan de respect de l'environnement, le dossier de récolement, la maintenance, la formation et les garanties.

Tous les éléments de prix rattachables à des familles d'équipement ont été retirés des prestations générales et redistribués dans les familles respectives.

1. Date de valeur du 01/01/2021.

Le graphique suivant présente les taux constatés pour les ouvrages issus de la base de données.

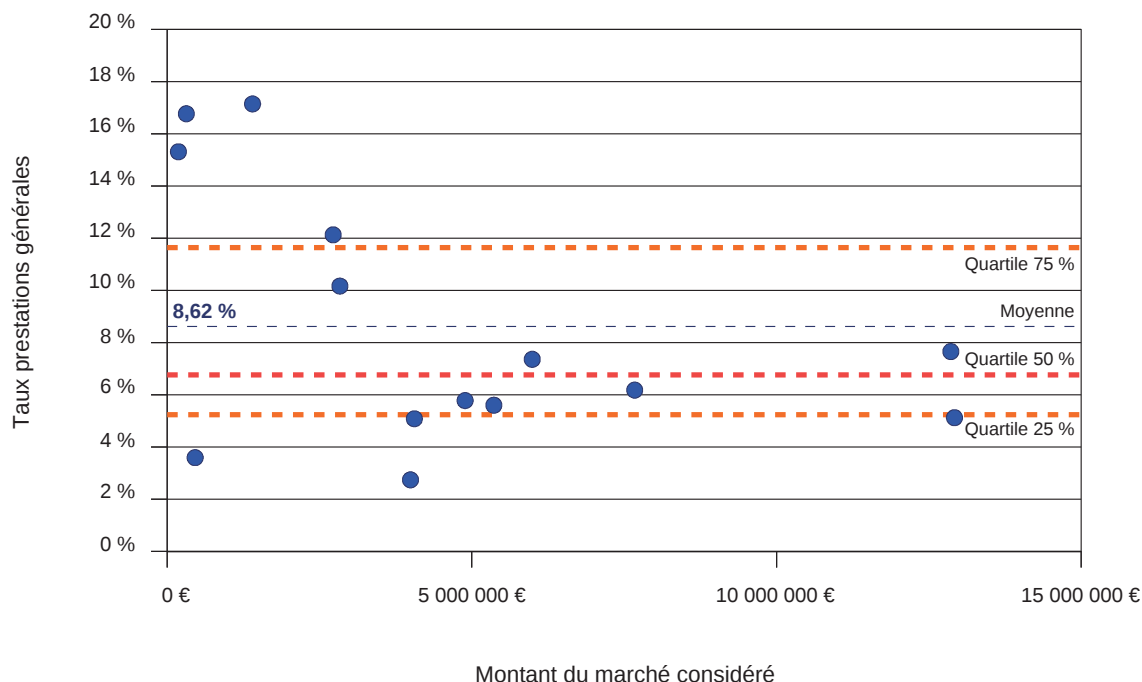


Figure 2 : Taux prestations générales des marchés de la base de données.

Les ratios observés sont très variables de 3 % à plus de 17 % du montant des marchés considérés. Cette variabilité importante découle de plusieurs facteurs et notamment :

- du prix des installations de chantier qui dépend de nombreux paramètres liés au tunnel et à son environnement (accessibilité, gardiennage, sensibilité, etc.) ;
- de certaines prestations générales qui peuvent être mutualisées avec l'entreprise en charge des travaux génie-civil le cas échéant, diminuant le coût de ces prestations pour l'entreprise en charge des travaux d'équipements ;

- des compositions des détails estimatifs sont très variables selon les offres. Cela peut se traduire par des choix différents de répartition de coût entre les prestations générales et les prestations liées à l'installation des équipements. Par exemple, certains frais de personnel ou d'études sont intégrés, selon les marchés, soit dans les prestations générales, soit dans les prestations équipements.

Le choix a été fait de retenir un ratio moyen de **10 %** pour les prestations générales.

2.4

PRIX D'ORDRE DES ÉQUIPEMENTS DE SÉCURITÉ ET D'EXPLOITATION (HORS RÉSEAU INCENDIE, VENTILATION ET MÉTALLERIE)

Les prix d'ordre permettent de procéder à une première évaluation sommaire du prix des équipements de sécurité et d'exploitation (hors réseau incendie, ventilation, métallerie) d'un ouvrage à partir de ses caractéristiques essentielles.

Les coûts de la ventilation et de la métallerie sont donnés par le fascicule 4. Le coût du réseau incendie est donné par la formule du prix de référence (chapitre 3.7 du présent document).

Ils sont issus des prix moyens provenant de la base de données tunnels présentée au §2.1. Les tunnels de Toulon et de Champigny, présentant des coûts atypiques, n'ont pas été considérés pour la composition du prix d'ordre.

Ils s'entendent par longueur équipée, qui correspond à la longueur du tunnel dans le cas d'un monotube et la longueur de la somme des tubes dans le cas d'un tunnel comportant plusieurs tubes.

Type	Coût en k€ HT (date de valeur 01/01/2021)
Type 1	$1,3 L_{\text{equ}} + 80$
Type 2*	$3 L_{\text{equ}} + 500$
Type 3*	$4 L_{\text{equ}} + 2\,000$

L_{equ} : longueur équipée en m

* Formule pour $L_{\text{equ}} < 2\,000$ m

PRIX DE RÉFÉRENCE DES FAMILLES D'ÉQUIPEMENTS

3.1 PRINCIPES

3.1.1 Composition d'un prix de référence

Le prix de référence équipement comprend :

- les études (développement, exécution) : il a été choisi d'inclure les études dans les prix équipement dans le présent fascicule, contrairement aux autres fascicules du document d'information sur les prix des tunnels. La justification est que les études peuvent représenter une grande proportion du prix de certaines familles d'équipements, comme ceux de la GTC-Supervision ;
- la fourniture et l'installation des équipements ;
- le lot de pièces de rechange ;
- l'ensemble des essais en usine, sur plateforme et sur site.

3.1.2 Familles d'équipements considérées

Le présent document présente le prix d'ordre des familles d'équipements ayant les poids les plus significatifs dans un marché global d'équipement, à savoir :

- l'alimentation électrique ;
- l'éclairage ;
- la GTC-Supervision ;
- la vidéosurveillance – DAI ;
- les équipements de sécurité (situés en niches de sécurité, en issues de secours et du dispositif de fermeture) ;
- le réseau incendie.

Les autres familles d'équipements (signalisation fixe, radio-communication, dispositif hors-gabarit...) pourront faire l'objet d'une étude spécifique.

3.2 PRIX DE RÉFÉRENCE ALIMENTATION ÉLECTRIQUE

3.2.1 Composition

Le prix de l'alimentation électrique dépend directement du niveau d'équipement et donc de la typologie de tunnel. Il se décompose en quatre groupes de prix :

- Groupe ETUDES_{ELEC} : études d'exécution, essais ;
- Groupe LT-BT_{ELEC} : fourniture et installation des équipements BT (situés en local technique BT) ;
- Groupe LT-HT_{ELEC} : fourniture et installation des équipements HT (situés en local technique HT) et câble HT ;
- Groupe TUNNEL_{ELEC} : équipements de distribution électrique dans le tunnel et dans les issues de secours et notamment :
 - les armoires électriques en tunnel et à proximité de têtes pour l'alimentation des équipements de sécurité du tunnel, souvent dénommées CAES (Coffret d'Alimentation des Équipements Secours),
 - les câbles basse tension issus des TGBT pour l'alimentation des armoires électriques, de l'installation

d'éclairage, de l'installation de ventilation, des prises pompiers...

- les chemins de câble en tunnel et issues de secours,
- les câbles cuivre du réseau de terre.

3.2.2 Prix de référence

Niveau de surveillance	Prix de référence en k€ HT (date de valeur 01/01/2021)			
	ETUDES _{ELEC}	LT-BT _{ELEC}	LT-HT _{ELEC}	TUNNEL _{ELEC}
Type 1	10	20 x Nbt	/	0,3 x L _{equ}
Type 2	50 à 100	[100 à 150] x Nbt	[400 à 500] x Nht	0,5 x L _{equ}
Type 3	100 à 200	[200 à 300] x Nbt	[400 à 500] x Nht	[0,7 à 0,9] x L _{equ}

L_{equ} : longueur équipée en m

Nbt : nombre de postes électriques BT

Nht : nombre de postes électriques HT

3.3 PRIX DE RÉFÉRENCE INSTALLATIONS D'ÉCLAIRAGE DU TUNNEL

Le présent prix concerne les installations d'éclairage situées dans la partie circulée du tunnel.

3.3.1 Composition

Le prix de référence de l'éclairage comprend les éléments présentés au paragraphe 3.1.

Concernant la partie « fourniture et installation », celle-ci inclut les équipements suivants :

- luminaires de technologie LED ;
- boîtes de dérivation associées aux luminaires (normale ou résistante au feu pour l'éclairage de sécurité) ;
- dispositif de pilotage des régimes d'éclairage : contrôleur d'éclairage et capteurs (luminancemètres – un par entrée – et cellule photoélectrique – une par tunnel) ;

Le dimensionnement de l'éclairage de base est basé sur une installation avec des luminaires espacés de 10 m.

Le dimensionnement de l'éclairage de renforcement dépend des conditions de site (voile) et de la vitesse pratiquée.

Le prix du câblage depuis les TGBT n'est pas compris dans le présent prix de référence car déjà inclus dans le prix de référence de l'alimentation électrique. Si l'on souhaite avoir un coût complet de l'éclairage indépendamment du coût de l'alimentation électrique, il y a lieu de le rajouter. Une formule de prix de référence du câblage est proposée.

3.3.2 Prix de référence

Dispositif	Prix de référence en k€ HT (date de valeur 01/01/2021)
Installation d'éclairage de base	$30 + 0,08 L_{\text{equ}}$
Installation d'éclairage de renforcement (par entrée)	$40 + C_{\text{renf}} \cdot l_r$
Câblage (prix déjà compris dans le prix de référence de l'alimentation électrique)	
Câblage éclairage de base	$0,01 L_{\text{equ}}$ (pour mémoire)
Câblage éclairage de renforcement (par entrée)	12 (pour mémoire)

L_{equ} : longueur équipée en m

C_{renf} : coût de l'éclairage de renforcement par mètre de largeur roulable, donné dans l'abaque ci-dessous. Ce coût est donné pour une longueur complète de renforcement, dans le cas d'un tunnel court pour lequel la longueur du renforcement sera raccourcie, il y aura lieu de diminuer le coût calculé ou de faire une étude particulière.

l_r : largeur roulable

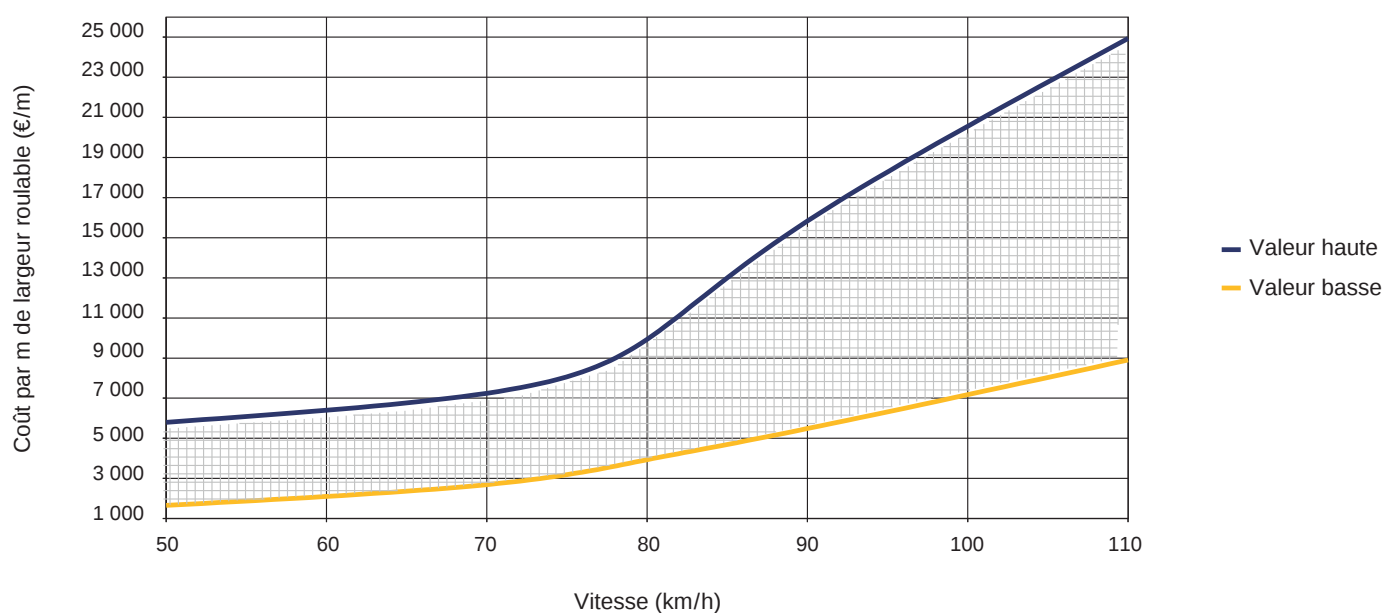


Figure 3 : Coût de l'éclairage de renforcement pour une entrée et par mètre de largeur roulable, valeur 01/01/2021, actualisation BT47.

3.4 PRIX DE RÉFÉRENCE GESTION TECHNIQUE CENTRALISÉE-SUPERVISION

3.4.1 Composition

Le prix de référence GTC-Supervision est fortement lié au niveau de surveillance du tunnel. Il se décompose en trois groupes de prix :

- Groupe $ETUDES_{GTC SUP}$: études d'exécution supervision et de contrôle-commande, licences et logiciels, essais ;
- Groupe $LT_{GTC SUP}$: équipements de supervision et de contrôle-commande (principalement situés en local technique) :
 - automates et modules d'entrées-sorties déportés,
 - équipements informatiques pour la supervision tunnel,
 - baies,
 - commutateurs ;
- Groupe $TUNNEL_{GTC SUP}$: équipements de réseau et de contrôle-commande répartis dans le tunnel et à proximité des têtes :
 - fibres optiques (réseaux de terrain et fédérateurs),
 - commutateurs,
 - modules d'entrées-sorties déportés.

Les équipements suivants ne sont pas intégrés dans le présent prix :

- réseau de transport : équipements de réseau, liaison fibre optique, etc. destinés à raccorder le tunnel au poste de contrôle commande ;
- équipements propres au poste de contrôle-commande (postes informatiques, bureaux, équipements de réseaux...).

3.4.2 Prix de référence

Type de tunnel	Niveau de surveillance considérée	Prix de référence en k€ HT (date de valeur 01/01/2021)		
		$ETUDES_{GTC SUP}$	$LT_{GTC SUP}$	$TUNNEL_{GTC SUP}$
Type 1	D1 ou D2	10 à 15	10 à 15	/ *
Type 2 ou type 3	D3 ou D4	300 à 400	100 à 300	$[0,2 \text{ à } 0,3] \times L_{equ}$

L_{equ} : longueur équipée en m

* Ce type de tunnel n'a usuellement pas d'équipements de GTC-Supervision répartis sur le terrain. Une étude spécifique devra être réalisée dans le cas contraire.

3.5 PRIX DE RÉFÉRENCE VIDÉO-SURVEILLANCE ET DAI

3.5.1 Composition

Ce prix concerne une installation complète de vidéo-surveillance (couverture totale) comprenant la fonction de détection automatique d'incident. Les installations sans DAI ou avec une couverture partielle peuvent faire l'objet d'une étude spécifique simple.

Le prix de référence de vidéo-surveillance et DAI dépend du niveau de surveillance du tunnel. Il se décompose en trois groupes de prix :

- Groupe $ETUDES_{VID-DAI}$: études d'exécution, licences et logiciels, essais ;
- Groupe $LT_{VID-DAI}$: équipements informatiques centraux (principalement situés en local technique) :
 - analyseur DAI redondant,
 - serveur vidéo et enregistreur ;

- Groupe $TUNNEL_{VID-DAI}$: équipements de prise de vue répartis dans le tunnel et dans les issues de secours, qui sont fonctions de la longueur du tunnel :
 - caméras fixes DAI,
 - caméras dôme ou mobile en issue de secours et à l'extérieur à proximité des têtes.

3.5.2 Prix de référence

Prix de référence en k€ HT (date de valeur 01/01/2021)		
$ETUDES_{VID-DAI}$	$LT_{VID-DAI}$	$TUNNEL_{VID-DAI}$
30 à 50	100 à 200	$[0,07 \text{ à } 0,10] \times L_{equ}$

L_{equ} : longueur équipée en m

3.6 PRIX DE RÉFÉRENCES ÉQUIPEMENTS DE SÉCURITÉ

3.6.1 Plots de jalonnement

3.6.1.a. Composition

Le prix comprend :

- les plots de jalonnement lumineux : les plots sont disposés sur les piédroits droit et gauche avec un espacement de 10 m ;
- le câblage depuis les CAES.

3.6.1.b. Prix de référence

Prix de référence en k€ HT (date de valeur 01/01/2021)
Prix = $0,055 \times L_{\text{equ}}$

L_{equ} : longueur de tube équipée en m

3.6.2 Niches de sécurité

3.6.2.a. Composition

Le prix comprend :

- un poste d'appel d'urgence (PAU) ;
- un coffret prise pompier ;
- un coffret extincteurs avec deux extincteurs ;
- un détecteur de présence ;
- la signalétique usager ;
- l'éclairage ;
- la signalétique lumineuse (un ensemble de panneaux double face lumineux CE26-CE2a).

3.6.2.b. Prix de référence

Prix de référence en k€ HT (date de valeur 01/01/2021) Pour une niche
Prix = 12

3.6.3 Issue de secours

3.6.3.a. Composition

Le prix des équipements de l'issue comprend :

- un poste d'appel d'urgence (PAU) ;
- la signalétique porte ;

- le sur-éclairage porte ;
- les bandeaux lumineux verts (deux, situés de part et d'autre de la porte d'accès à l'issue) ;
- les feux flash (deux groupes de trois, situés de part et d'autre de la porte d'accès à l'issue) ;
- un détecteur de présence ;
- la signalétique usager ;
- la signalétique lumineuse (un panneau double face lumineux CE30).

Le prix de l'éclairage de l'issue se compose des luminaires et du câblage depuis le CAES.

3.6.3.b. Prix de référence

Prix de référence en k€ HT (date de valeur 01/01/2021) Pour une issue
Prix équipements = $7 + 7 \times N_{\text{entrée}}$ Prix de l'éclairage de l'issue : $0,080 \times L_{\text{issue}}$

$N_{\text{entrée}}$: nombre d'entrée(s) dans l'issue depuis le tunnel (exemple = 1 pour une galerie d'évacuation vers l'extérieur et = 2 pour un inter-tube)

L_{issue} : longueur d'une issue

3.6.4 Dispositif de fermeture

3.6.4.a. Composition

Le prix du dispositif de fermeture comprend :

- deux demi-barrières avec feux R24 ;
- deux feux R24 ;
- un panneau à message variable dédié à la fermeture.

Ce prix ne comprend pas la présignalisation (PMV, panneaux fixes...).

3.6.4.b. Prix de référence

Prix de référence en k€ HT (date de valeur 01/01/2021) Pour un dispositif de fermeture
Prix équipements = 60

3.7 PRIX DE RÉFÉRENCE RÉSEAU INCENDIE

3.7.1 Composition

Ce prix de référence comprend globalement les études, la fourniture, la mise en œuvre et les essais des équipements permettant aux services de secours de lutter contre un incendie. Les travaux de génie civil associés à un tel réseau incendie (e.g. réservoir de stockage, tranchée de cheminement de conduites enterrées, réalisation de chambres, gros œuvre et second œuvre des éventuels locaux dédiés) sont exclus.

L'architecture du réseau incendie envisagée en première approche consiste en une distribution régulière de poteaux incendie alimentés en eau par une conduite cheminant sous trottoir. L'alimentation en eau du réseau incendie est assurée par un raccordement à un réseau public de distribution si les performances de ce dernier le permettent, ou via une installation dédiée de mise en surpression du réseau si nécessaire.

Le prix de référence Réseau incendie se décompose ainsi en trois groupes :

- Groupe $ETUDES_{RI}$: ensemble des études et prestations nécessaires à l'exploitation d'un réseau incendie (exécution, coordination, essais de fonctionnement et de performance, etc.) ;
- Groupe $TUNNEL_{RI}$: travaux de réalisation du réseau incendie (fourniture, raccordement, mise en œuvre des équipements incendie, etc.) ;
- Groupe $SURPRESSION_{RI}$: réalisation et équipement d'un système permettant d'alimenter en eau sous pression le réseau incendie (fourniture, raccordement et essais de motopompes, etc.).

3.7.2 Prix de référence

Prix de référence en k€ HT (date de valeur 01/01/2021)		
$ETUDES_{RI}$	$TUNNEL_{RI}$	$SURPRESSION_{RI}$
25	$0,2 \times L_{equ}$	50

L_{equ} : longueur équipée en m

ANNEXE : PRÉSENTATION DES OUVRAGES DE LA BASE DE DONNÉES

Nom	Date marché	Type	Longueur couverte en mètres	Type de travaux
Tranchée couverte d'Ours Mons	2017	Bitube unidirectionnel	150	Neuf
Tunnel de Liepvre	2017	Monotube bidirectionnel	117,25	Rénovation éclairage
Tunnel de Chabrières	2014	Monotube bidirectionnel	176	Neuf
Tunnels de la voie des Mercureaux	2009	Bitube uni	Tunnel de Fontain : 287 / 297 Tunnel de Bois de Peu : 576 / 565	Neuf
Tunnel de Baza	2016	Monotube bidirectionnel	330	Rénovation équipements
Tranchée couverte de Marange-Silvange	2018	Bitube unidirectionnel	400	Neuf
Tranchée couverte de Firminy	2018	Bitube unidirectionnel	553	Rénovation équipements
Tunnel de Saint-Béat	2015	Monotube bidirectionnel	1 100	Neuf
Tunnel du Lioran	2005	Monotube bidirectionnel	1 515	Rénovation équipements
Tunnels de la LINO	2012	Bitube unidirectionnel	Tunnel de Talant : 631 / 608 Tranchée couverte de Daix : 258 / 258	Neuf
Tunnel de Champigny	2009	Bitube unidirectionnel	Tranchée couverte de Champigny : 747 / 782 Tranchée couverte Dreyer : 240	Rénovation équipements
Tunnel de Schirmeck	2005	Monotube bidirectionnel	570	Neuf
Tunnel du Chat	2014	Monotube bidirectionnel	1 488	Rénovation équipements
Tunnel de Toulon Sud	2010	Monotube unidirectionnel	2 986	Neuf
Tunnel des Pennes Mirabeau	2021	Bitube unidirectionnel	216	Rénovation éclairage
Tunnel Saint-Antoine	2021	Bitube unidirectionnel	109	Rénovation éclairage
Tunnel des Treize Vents	2021	Bitube unidirectionnel	270	Rénovation éclairage

Centre d'Études des Tunnels

25 avenue François Mitterrand
69500 BRON - FRANCE
Tél. +33 (0)4 72 14 34 00
Fax. +33 (0)4 72 14 34 30
cetu@developpement-durable.gouv.fr

www.cetu.developpement-durable.gouv.fr



**MINISTÈRE
CHARGÉ
DES TRANSPORTS**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

