

OUVRAGES SOUTERRAINS

CONCEPTION ET RÉALISATION
DU GÉNIE CIVIL



François LAIGLE
et François MARTIN

Préfaces de Mark S. DIEDERICHS
et Alain GUILLOUX



OUVRAGES SOUTERRAINS

CONCEPTION ET RÉALISATION DU GÉNIE CIVIL

François LAIGLE et François MARTIN



Cet ouvrage a été réalisé grâce au soutien du Ministère de la Culture et du laboratoire Architecture, Culture, Société/AUSser (ACS UMR AUSser) de l'École nationale supérieure d'architecture Paris-Malaquais – PSL

Crédit photo de couverture

Conduite forcée de la Sarenne – Isère (France) – Compagnie Nationale du Rhône

Conception maquette et mise en page

Desk

25 boulevard de la Vannerie, 53940 Saint-Berthevin

Tél : 02 43 01 22 11

<https://www.desk53.com.fr>

© 2025

ISBN 978-2-85978-575-8

Pour la diffusion en Amérique :

Presses de l'Université Laval

Dépôt légal 1^{er} trimestre 2026

ISBN : 978-2-7663-0925-2

Imprimé au Canada

www.pulaval.com

Presses des Ponts

24, boulevard de l'Hôpital – 75005 Paris

Tél. : 01 44 58 27 29

Site internet : <http://www.presses-des-ponts.fr>

Courriel : presses.des.ponts@fc-enpc.fr

Presses de l'Université de Laval

2180, chemin Sainte-Foy – Québec

Tél. : 581-505-8065

Site internet : <https://www.pulaval.com/contact>

Courriel : edition@pulaval.ca

There have been many rock mechanics textbooks over the years. Some are more theoretical and useful in a university setting while others are more general for the non-specialist or for basic recognition of the main issues with limited detail. Many rock engineering and geotechnical handbooks have been developed for mining while few have been focused on the practice of tunnelling and cavern construction. This new offering "*Ouvrages souterrains – Conception et réalisation du génie civil*" seems to have married the best of all of these worlds into a very technical yet accessible handbook combining soil and rock mechanics theory with tunnelling practice, written at a level to be a comprehensive guide investigation, ground characterization, analysis, design and monitoring works, while remaining clear and concise for the practicing engineer.

The well illustrated text covers historical tunnelling milestones, regulatory issues (France), risk management and contractual norms including health and safety. The authors offer a comprehensive discussion of both classical field and lab investigation of rock and soil, and a practical guide to modern geophysical techniques for ground characterization and risk assessment. Investigation and determination of boundary conditions are described, including the development of an in situ stress model, a geological/geotechnical model including large and small scales engineering elements, hydrogeological setting and failure mode assessment.

Strategies and techniques for analysis of rock and soil behaviour and the relevance to surface disturbance, excavation

method, support and long-term issues are covered in detail. An extensive discussion of tunnelling methods and decision making is included as well as a detailed presentation of ground support components and overall design approaches. This is followed by an excellent summary of empirical, analytical and modern numerical analysis (including continuum, discontinuum and rheological) approaches for tunnel and cavern support design as well as hydraulic risk assessment for water tunnels. Monitoring and quality control rounds out the handbook.

This is certainly an overdue volume that I would recommend as a text for classroom teaching and graduate student research, as well as a practical, yet comprehensive guide for the practicing tunnel engineer at any level.

The authors, François Laigle and François Martin have more than a combined 50 years of experience in advanced rock mechanics, tunnelling, underground construction, and in other fields of civil and geotechnical engineering. They have created the perfect blend of theory and practical application in this must-have volume.

Dr. Mark S. Diederichs

PhD., P.Eng. (Ont, BC), FEIC, ARMA Fellow, FCAE, FRSC
Professor Emeritus of Geological Engineering
Queen's University, Kingston, Ontario, Canada
Queen's Geomechanics and Geohazards Group
President, Innovative Geomechanics Inc.
IGMI, Kingston, Ontario, Canada

À la lecture de cet ouvrage, ma première réaction a été d'apprécier la parution, très attendue, d'un livre francophone particulièrement complet sur les ouvrages souterrains. Comme le soulignent les auteurs, le dernier manuel de ce type date maintenant de plus de 30 ans, et la pratique a beaucoup évolué depuis cette date, tant sur la conception, les méthodologies d'études que les méthodes de construction. La normalisation a aussi beaucoup évolué, permettant une pratique plus facile et unifiée, une sécurité améliorée, mais aussi une approche parfois quelque peu « aveugle » des principes de base.

Certes les recommandations de l'AFTES constituent un corpus francophone que l'on pourrait qualifier d'exhaustif sur le sujet, mais elles ne permettent guère une vision synthétique et cohérente des multiples aspects pluridisciplinaires qu'il faut intégrer dans la conception et la construction des ouvrages souterrains.

Gageons qu'à ce titre ce livre constituera une référence essentielle, tant pour les étudiants, les jeunes ingénieurs abordant ce type de projets, et même pour les ingénieurs plus expérimentés qui pourront y trouver des réponses à leurs interrogations constantes sur tel ou tel aspect du métier.

Mais ma seconde, et principale, réaction fût d'apprécier la complétude de ce livre, qui traite de façon approfondie les multiples aspects de conception et construction des tunnels :

- ✦ en premier lieu les grands principes qui doivent guider la conception de base des ouvrages, qu'ils soient géométriques, fonctionnels, technologiques, logistiques, de sécurité pour les personnes et pour l'environnement, en phase chantier comme en phase exploitation ;
- ✦ ensuite les notions théoriques sur le comportement des terrains, qu'il s'agisse des sols et des roches mais aussi des SIRT (Sols Indurés Roches Tendres), matériaux intermédiaires qui relèvent des deux types de comportement. Il développe notamment de façon très pédagogique à la fois les différences majeures et les parallèles que l'on peut faire, dans les mécanismes de base expliquant le comportement de ces deux types de géomatériaux. Le rôle de l'eau y est également largement traité ;
- ✦ puis les principes d'études et de dimensionnement des ouvrages, en faisant systématiquement le lien avec le comportement des terrains et les mécanismes de rupture et de déformation, et en insistant à juste titre sur le rôle essentiel des mécanismes d'interaction terrains – structures sans lesquels un grand nombre de tunnels n'auraient pu être réalisés ;

- ✦ et enfin la présentation concrète des techniques de construction des ouvrages souterrains, qu'il s'agisse des méthodes dites « traditionnelles », connues et appliquées depuis des siècles mais qui ont largement évolué grâce au développement de nouveaux matériels et matériaux (pour les creusements en pleine section par exemple), ou des méthodes mécanisées, avec notamment les tunneliers dont l'usage ne s'est réellement généralisé que dans les dernières décennies. Les auteurs n'ont pas oublié non plus les « méthodes d'accompagnement » que sont les techniques de traitement de terrain et de maîtrise des circulations d'eau, et toutes les techniques de pré-soutènement.

Outre ces grands concepts de base, le livre traite également d'autres sujets que l'on pourrait qualifier de « divers » s'ils n'étaient pas également partie prenante essentielle de nombreux projets souterrains, et qui ne sont souvent traités que dans des publications spécifiques, plutôt destinées à des spécialistes. Il s'agit notamment :

- ✦ des ouvrages « particuliers » tels que les puits, de subsurface pour les tunnels peu profonds, ou de grande profondeur, verticaux ou inclinés, des cavernes de très grandes dimensions, des galeries hydrauliques (avec les échanges hydrauliques entre l'intérieur et le terrain encaissant), sans oublier les notions de base sur les mines ou carrières. Et pour chacun d'entre eux le lien est fait avec les mécanismes de base des comportements géomécaniques et des interactions terrain – eau – structures ;
- ✦ ainsi que de sujets traitant de l'auscultation des ouvrages (avec les liens étroits entre la conception et la réalisation), de la gestion des matériaux extraits des tunnels, une préoccupation environnementale relativement récente mais devenue majeure, de la tenue au feu des ouvrages, de leur comportement sous séisme et du dimensionnement correspondant, etc.

Ces nombreux développements devraient permettre aux ingénieurs généralistes d'assimiler les multiples facettes du métier et ainsi de dialoguer plus efficacement avec les différents intervenants spécialisés, qu'ils soient maîtres d'ouvrages et/ou futurs exploitants, géotechniciens, ingénieurs de structure, ingénieurs de méthodes, responsables de la sécurité, etc.

Et ces ingénieurs plus spécialisés pourront eux-mêmes y trouver un rappel souvent utile des grands principes avec une bibliographie détaillée pour aller plus loin si nécessaire, mais aussi et surtout les fondements des pratiques usuelles :

ouvrages souples ou ouvrages rigides ? Pourquoi la « rupture » du terrain n'est pas forcément rédhibitoire, voire parfois nécessaire ? Pourquoi un soutènement en béton projeté ne se dimensionne pas toujours, et souvent pas comme une structure usuelle ? Comment le risque sismique affecte-t-il plus ou moins le comportement d'un tunnel ?

Un grand merci aux deux auteurs d'avoir ainsi contribué à éclairer la communauté francophone sur la conception et la

construction de ces ouvrages souterrains, qui sont souvent un défi, mais un défi que l'on peut relever grâce à une bonne compréhension mutuelle des différents acteurs.

Alain GUILLOUX

Ingénieur Civil des Pont et Chaussées,
Docteur Ingénieur en Géologie de l'Ingénieur
Expert géotechnicien

Préfaces	3
-----------------------	----------

Chapitre I

Introduction et principales notions.....	11
---	-----------

I.1. Préambule et remerciements	11
I.2. Lexique et terminologie.....	11
I.3. Définition de la géométrie et du tracé d'un ouvrage souterrain	15

Chapitre II

Histoire des tunnels.....	19
----------------------------------	-----------

II.1. Étymologie et symbolique des tunnels	19
II.2. Les tunnels de l'Antiquité jusqu'au xvii ^e siècle	20
II.3. Les tunnels du xvii ^e au milieu xix ^e siècle	21
II.4. Les grands tunnels dans la 2 ^e moitié du xix ^e siècle	23
II.5. Les tunnels durant la première moitié du xx ^e siècle.....	27
II.6. Les tunnels durant la deuxième moitié du xx ^e siècle.....	28
II.7. Les tunnels au xxi ^e siècle	31

Chapitre III

Contexte réglementaire – gestion des risques – contractualisation.....	35
---	-----------

III.1. Contexte réglementaire français	35
III.2. Gestion des Risques	38
III.3. Contractualisation des travaux.....	46
III.4. Lignes contractuelles, tolérances, implantation	49
III.5. Santé et sécurité.....	51

Chapitre IV

Reconnaitances et caractérisation du sous-sol 55

IV.1.	Des situations très diverses	55
IV.2.	Caractérisation géologique et reconnaissances associées	57
IV.3.	L'évaluation des contraintes naturelles du massif	74
IV.4.	Caractérisation géotechnique	81
IV.5.	Maquette géologique et géotechnique : définition des ensembles géomécaniques.....	161

Chapitre V

Techniques et méthodes de creusement..... 163

V.1.	Méthodes conventionnelles.....	163
V.2.	Méthodes Mécanisées – Tunneliers et micro-tunneliers	173
V.3.	Les puits.....	203
V.4.	Logistique dans les tunnels longs et profonds	216
V.5.	Ventilation de chantier	216
V.6.	Gestion des venues d'eau	217
V.7.	Gestion des matériaux excavés	220

Chapitre VI

Approche générale de la stabilité des ouvrages souterrains 223

VI.1.	Principaux mécanismes comportementaux d'une cavité souterraine	223
VI.2.	Concept d'interaction sol/structure par la méthode convergence-confinement	265
VI.3.	Principes généraux de conception des soutènements/revêtements.....	271

Chapitre VII

Soutènements et revêtements : concepts, technologie et prédimensionnement..... 285

VII.1.	Techniques de soutènement	285
VII.2.	Présoutènements et traitements des terrains	307
VII.3.	Revêtements.....	322
VII.4.	Soutènements spéciaux pour tunnels profonds.....	333
VII.5.	Profils types de soutènement et démarche de planification des travaux	342

Chapitre VIII**Méthodes de calcul et justifications de la conception 347**

VIII.1.	Introduction aux principales méthodes de calcul.....	347
VIII.2.	Contexte réglementaire.....	348
VIII.3.	Approches empiriques de choix des soutènements.....	348
VIII.4.	Calcul des soutènements dans le cas d'un mécanisme de blocs	354
VIII.5.	Calculs avancés en milieux discontinus.....	357
VIII.6.	Calculs en milieux continus.....	359
VIII.7.	Estimation des tassements – cas des tunnels superficiels.....	397
VIII.8.	Calculs aux réactions hyperstatiques	405
VIII.9.	Vérification des structures.....	407
VIII.10.	Intégration de l'eau dans les calculs	415

Chapitre IX**Ouvrages spécifiques 419**

IX.1.	Grandes cavernes en site vierge.....	419
IX.2.	Adductions hydrauliques en charge	431
IX.3.	Mines et carrières	449

Chapitre X**Auscultations et contrôle qualité..... 453**

X.1.	Auscultations ou contrôles ?	453
X.2.	Auscultation de l'ouvrage.....	453
X.3.	Contrôles	459

Chapitre XI**Références 463****Chapitre XII****Index 489**



L'accueil des envoyés du roi par Pierre-Paul Riquet sur le chantier du Tunnel de Malpas
© Collections des musées de Béziers. Joseph-Noël Sylvestre

Introduction et principales notions

I.1. Préambule et remerciements

Ce livre est né d'un constat : dans le domaine des travaux souterrains, la littérature francophone est lacunaire et dispersée. Le dernier ouvrage en français qui aborde les principaux concepts de conception et les grands principes de réalisation des tunnels date de 1993. Il s'agit du livre « *Ouvrages souterrains : conception, réalisation, entretien* », édité à deux reprises par les Presses des Ponts mais jamais réédité depuis.

Le livre que vous tenez entre vos mains est la synthèse d'un travail de presque 10 ans, rédigé à partir de l'expérience des auteurs et d'un ensemble de publications francophones et anglophones rassemblées dans la bibliographie générale. Les premiers intéressés par ce livre sont les auteurs eux-mêmes, car c'est bien là le principal objectif : servir de manuel de référence pour trouver les bonnes pratiques, les ordres de grandeur, les recommandations, les écueils à éviter, les publications qui font référence... en un mot un livre à avoir toujours à portée de main lorsqu'on travaille dans le monde des tunnels. Ce livre est donc principalement destiné aux étudiants en génie et aux ingénieurs francophones.

La structure du livre suit une certaine logique qu'il est bon de présenter en préambule. Le décor est posé dans les premiers chapitres avec une petite histoire des tunnels, une présentation des principaux termes et notions, la réglementation, la gestion contractuelle et la santé et sécurité. Afin d'aborder la conception des ouvrages souterrains avec une connaissance suffisante des problèmes et des enjeux, deux gros chapitres présentent 1 – les reconnaissances et la construction du modèle géotechnique et 2 – les techniques d'excavation et de soutènement. Le volet conception a ensuite été séparé en trois chapitres : tout d'abord une présentation des principaux concepts mécaniques de stabilité autour d'une excavation souterraine, puis les grands concepts de soutènements et revêtements avec leur prédimensionnement, et enfin les méthodes de calculs et de vérification.

Deux chapitres viennent finalement conclure le livre : la présentation de certains ouvrages spécifiques, comme les ouvrages hydrauliques ou les mines peu profondes, et le volet auscultation et assurance de la qualité.

Étant principalement basé sur l'expérience des deux auteurs, ce livre n'a pas la prétention d'aborder tous les aspects du génie civil en détail. En particulier, cette première édition met l'accent sur les tunnels au rocher. Les tunnels creusés dans les sols sont traités mais ils sont étayés par moins de retours d'expérience.

Plusieurs collègues nous ont soutenus, nous ont apporté leurs encouragements, leur contribution ou nous ont simplement aidés pour les illustrations : par ordre alphabétique un remerciement sincère à Marc Anic-Antic, Pascal Baraté, Sébastien Borde, Martin Cahn, Fahd Cuira, Joe Carvalho, Thierry Jussaume, Jean-Yves De Lamballerie, Hervé Lebissonnais, Benjamin Lecomte, Maud Macary, Nathalie Monin, Alexis Mouric, Magali Neymarc, Yann Rouillard, Adrien Saïtta, Magali Schivre et Jade Zghondi.

Comment ne pas avoir une pensée de remerciement à toutes ces autres personnes que nous croisons et avons croisées dans le cadre de nos activités, qui nous ont transmis la passion de ce métier, au travers de leur enseignement, leurs encouragements, les échanges et discussions – en particulier : Richard Beddoes, Jean Biarez, Jean-Louis Durville, Jean-Jacques Fry et Marc Panet.

Il est impossible de ne pas remercier nos deux éditeurs, basés sur deux continents différents, qui ont cru dans ce projet francophone et dont la ligne éditoriale colle parfaitement avec notre vision de ce qu'est un manuel d'ingénierie : les Presses de l'École des Ponts-et-Chaussées à Paris et les Presses de l'Université Laval à Québec. Mille mercis Marie-Hélène Boucher et Laurent Deschryver !

Nos derniers chaleureux remerciements vont à nos deux illustres préfaciers Mark Diederichs et Alain Guilloux, qui ont gentiment accepté de préparer quelques mots en guise d'introduction.

I.2. Lexique et terminologie

Creuser une cavité ou un tunnel génère une modification de l'état de contraintes *in situ* initial et, la nature ayant horreur du vide, un rééquilibrage des forces internes dans la roche ou

le sol. Ce rééquilibrage est associé à des mouvements, visibles sur les parois depuis l'intérieur du tunnel et qui se manifestent également dans le terrain en avant et autour de la zone en cours d'excavation. La Figure I-1 illustre les principaux déplacements autour d'un tunnel avec la terminologie associée.

Plus loin dans le livre, il sera question d'ouvrages superficiels ou d'ouvrages profonds. On utilise alors le ratio H/D avec H la profondeur et D le diamètre de l'ouverture réalisée. Même

si la limite n'est pas réglementée et qu'il n'y a pas de consensus à ce sujet, on peut considérer en première approximation qu'un tunnel est profond si $H/D > 5$. Cette notion est importante car, comme ce sera détaillé dans les prochains chapitres, bon nombre d'hypothèses, de risques et d'enjeux différent selon le type d'ouvrage souterrain considéré. Le Tableau 1 précise, de manière simplifiée, quelques différences importantes entre ces deux types d'ouvrages.

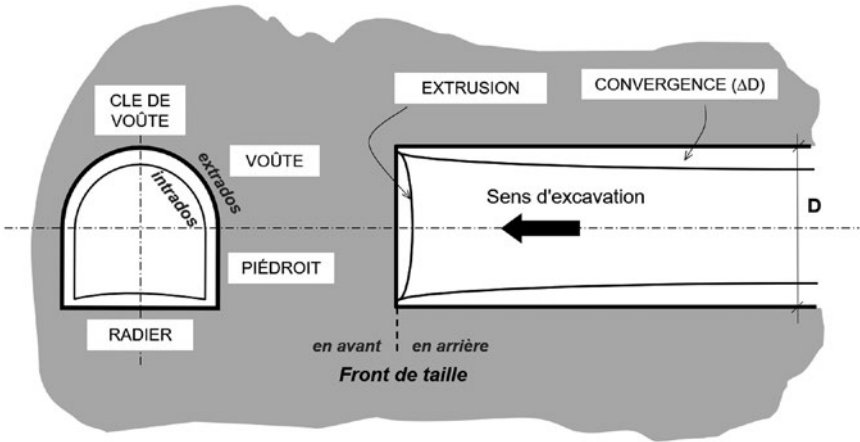


Figure I-1. Illustration de quelques termes utilisés en travaux souterrains

Tableau 1. Quelques différences entre tunnel superficiel et profond (grands principes)

	Tunnel superficiel	Tunnel profond
Tassements	Le tunnel est en interaction avec la surface. Les tassements peuvent être importants.	Le tunnel n'interagit pas ou peu avec la surface. Les tassements sont nuls ou négligeables, sauf exception (failles, fontis...).
État de contrainte <i>in situ</i>	Effet de la gravité non négligeable sur la hauteur du tunnel, comparativement à la contrainte <i>in situ</i> .	Effet de la gravité négligeable sur la hauteur du tunnel comparativement à la contrainte <i>in situ</i> (la gravité peut être négligée).
Type de terrains rencontrés	Majoritairement des sols Présence de structures anthropiques (réseaux, fondations, tunnels...).	Majoritairement des roches.
Modes de ruptures principaux	Éboulements, effondrements.	Chute de blocs ou de plaques, ruptures par excès de contraintes (cisaillement), plastification et endommagement.
Conception des soutènements	Stabilité généralement assurée par une structure rigide, disposée en paroi du tunnel.	Stabilité générale partiellement ou totalement assurée par le massif lui-même, avec un soutènement souple accompagnant les mouvements du terrain (boulons, béton projeté...).
Types de revêtements en béton	Revêtements peu comprimés – souvent renforcés d'acier.	Revêtements comprimés – souvent en béton non armé.
Étanchéité/drainage sous nappe	Étanchéité totale ou drainage.	Drainage.
Principaux impacts des travaux en surface	Tassements, vibrations, bruits.	Peu d'impacts.

Le Tableau 2 fournit une liste de termes qui sont spécifiques au monde des tunnels et travaux souterrains. Certains

termes sont uniquement utilisés en France, leur équivalent québécois ou suisse est également fourni.

Tableau 2. Terminologie spécifique aux travaux souterrains

Terme français	Équivalent québécois ou suisse (CH). Voir note*	Définition
Parties de tunnel		
Têtes	Portails	Extrémité d'un tunnel, zone de transition entre l'air libre et le souterrain.
Piédroits	Murs	Parties verticales ou quasi verticales entre la voûte et le radier (on dit « piédroit droit » et « piédroit gauche »).
Voûte	Toit <i>Back</i>	Partie supérieure du tunnel, le plus souvent de forme circulaire ou elliptique.
Épaulements		Zone de transition entre piédroits et voûte.
Radier	Plancher	Parie inférieure d'un tunnel où a lieu la circulation, le plus souvent horizontale.
Front de taille	<i>Face</i>	Zone où l'excavation se réalise, fin provisoire du tunnel en creusement. Le terme désigne la paroi verticale du terrain.
Volée	<i>Round</i>	Pas d'avancement d'un tunnel creusé à l'explosif. La volée correspond approximativement à la longueur de forage des trous pour les explosifs.
Travée – Pas d'avancement		Longueur de terrain excavée en une seule phase.
Décousu	Terrain non soutenu <i>Terrain lousse</i>	Zone de terrain excavée, proche du front de taille, non encore soutenue.
Profil		Ligne ou contour du tunnel.
Hors-profil	Surexcavation	Zone où l'excavation a dépassé le profil prévu.
Intrados/extrados	Côté visible/ Côté aveugle	Intrados : côté intérieur d'un élément du soutènement ou du revêtement (côté air). Extrados : côté extérieur d'un élément du soutènement ou du revêtement (côté terrain).
Calotte	Banc supérieur	Partie supérieure d'un tunnel dans une excavation par demi-sections (section supérieure).
Stross	Banc inférieur	Partie inférieure d'un tunnel dans une excavation par demi-sections (section inférieure).
Matériel		
Jumbo	Foreuse à flèches	Équipement mobile et motorisé pourvu d'1 à 3 bras de foration pour réaliser les trous de mine ou les trous de boulons.
Boulonneuse		Équipement mobile et motorisé spécifiquement conçu pour poser des boulons d'ancrage (foration et installation).
Machine à attaque ponctuelle	Haveuse	Équipement mobile et motorisé équipée spécifiquement pour l'excavation. Elle dispose d'une pièce en rotation (fraise), pourvue de pics.
Charge-et-roule	Chargeuse navette <i>Scoop</i> <i>LHD</i>	Équipement mobile et motorisé conçu pour le marinage. Sa particularité est d'avoir un châssis très bas, et une cabine perpendiculaire à la direction de circulation, permettant au pilote de conduire l'engin en marche avant et en marche arrière sans changer de position.
Brise-roche	Marteau Hydraulique <i>Tramac</i> <i>Plugger</i>	Équipement mobile et motorisé permettant d'excaver le roc au moyen d'un pic à percussion pneumatique ou hydraulique.
Pince à purger	Barre à écailler <i>Scaling bar</i>	Barre métallique légère équipée d'un pic, permettant la purge manuelle du rocher.
Tige – fleuret	<i>Rode</i>	Barre transmettant le mouvement de rotation et de percussion du moteur au taillant, dans les opérations de foration.
Taillant	Foret <i>Bit</i>	Outil situé à l'extrémité de la tige, permettant la foration du rocher.
Canar – ventube	Conduit de ventilation <i>Fan pipe</i>	Tuyau métallique ou plastique permettant de faire circuler l'air frais ou évacuer l'air vicié.

Terme français	Équivalent québécois ou suisse (CH). Voir note*	Définition
Soutènement – revêtement		
Soutènement	Support de terrain ou consolidation	Ensemble des éléments installés en tunnel pour garantir la stabilité du terrain, à court ou à long terme. Le soutènement peut aussi être nécessaire même si le terrain est stable (gestion de l'eau, esthétique, blocage des déformations, etc.).
Revêtement		Éléments installés en tunnel en complément du soutènement, lorsque ce dernier n'est pas prévu pour durer sur le long terme.
Gunite		Autre terme désuet pour désigner le béton projeté.
Rebond		Partie du béton qui tombe au sol lors de l'opération de projection.
Boulon d'ancrage	Boulon de consolidation Rebar (tige métallique) <i>Rockbolt</i>	Élément de soutènement linéaire installé dans un forage, depuis l'intérieur du tunnel. On parle plus simplement de « boulon » et aussi de « clou ».
Plaque	<i>Plate</i>	Pièce métallique installée sur la paroi du tunnel, à l'extrémité du boulon.
Cintre	Arches	Élément de soutènement constitué d'un profilé métallique normalisé, cintré selon la géométrie du tunnel.
Feuillard	Traverse de soutènement <i>Strap</i>	Pièce métallique longue et plate, percée à plusieurs endroits. Elle permet de relier plusieurs boulons entre eux en paroi de tunnel.
Grillage	Treillis flexible ou treillis entrelacé <i>Screen cage de poule</i>	Structure métallique flexible formée d'un ou plusieurs fils d'acier entrelacés (simple ou double torsion).
Treillis soudé	<i>Welded mesh</i>	
Blindage		Plaques métalliques ou planches en bois installés entre les cintres de soutènement.
Enfilage		Plaques métalliques ou planches en bois installés en voûte au niveau du découpu, afin de soutenir le terrain instable pendant ou juste après l'excavation.
Actions		
Purger	Écailler <i>Scaler</i>	Débarrasser la paroi de tous les éléments instables (blocs, pierres, plaques...) qui pourraient se détacher et créer un risque pour le personnel.
Excavation	Creuse (CH)	
Mariner	<i>Mucker</i>	Évacuation des déblais (les marins) formés par l'excavation d'un pas d'avancement.
Exhaure		Évacuation des eaux qui s'infiltreront naturellement dans le tunnel ou qui sont utilisées pour les besoins du chantier.
Ventiler		Apporter de l'air frais au niveau de la zone de travail (soufflage) et/ou évacuer l'air pollué (aspiration).
Débourrer	<i>Face qui coule</i>	Venue d'eau et/ou de matériaux meubles violente et inattendue suite à l'excavation du front de taille.
Déconfinement		Réorganisation des contraintes autour du tunnel, de part et d'autre du front de taille, des suites de l'excavation. On dit que le terrain est entièrement déconfiné lorsqu'il a atteint son équilibre final.
Confiner		Appliquer une pression sur les parois du tunnel, par le biais d'un soutènement principalement, dans le but de limiter les déplacements et le déconfinement du terrain.
Méthode conventionnelle à l'explosif	Forage et sautage	Méthode d'excavation utilisant les explosifs.

* En italique : terme utilisé uniquement à l'oral, souvent un anglicisme.

I.3. Définition de la géométrie et du tracé d'un ouvrage souterrain

I.3.1. Profil en travers

Avant toute chose, l'ingénieur qui démarre un projet d'ouvrage souterrain doit se poser la question du meilleur profil en travers. C'est un des choix les plus structurants pour la suite des études, et le coût du futur ouvrage en est très dépendant.

Une section de tunnel ou de caverne doit être compatible avec :

- ✦ Son usage : routier, ferroviaire, à 1 voie ou deux voies, centrale électrique, station de métro, mine ou carrière, conduite forcée...
- ✦ La géologie : terrain poussant ou roche très résistante, terrain isotrope ou terrain stratifié...

- ✦ L'économie du projet : le budget permet-il de prévoir de la réserve dans la section ou faut-il réduire au maximum les volumes de roche excavés ?
- ✦ La méthode de creusement : méthode conventionnelle ou mécanisée, pleine section ou section divisée...

Quelles que soient les contraintes, on cherchera dans la mesure du possible à se rapprocher de la forme circulaire ou ellipsoïde. Le cercle ou l'ellipse sont en effet les formes qui favorisent le plus l'effet de voûte dans le terrain et qui minimisent les concentrations de contrainte, donc le risque de rupture. Les profils de forme circulaire sont également ceux qui génèrent le moins de flexion dans les revêtements, et qui permettent souvent de s'affranchir d'armatures dans le béton (cf. 0).

La Figure I-2. présente les principales sections d'excavation utilisées, avec les données géométriques nécessaires à leur construction.

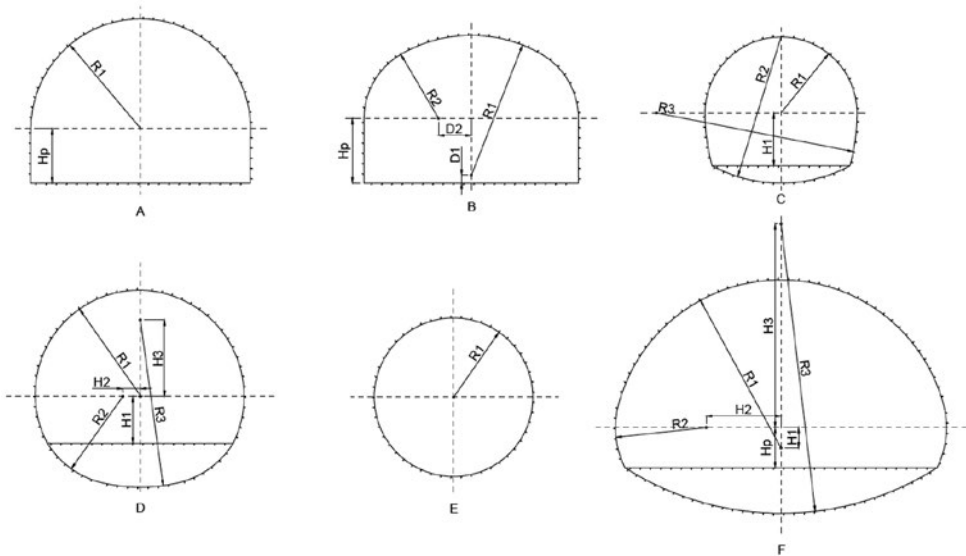


Figure I-2. Profils en travers type d'excavation

Le profil A est le profil typique des tunnels routiers ou autoroutiers français. Si la hauteur H_p est très petite, le tunnel s'apparente alors à une unique voûte « plein cintre ». Lorsque H_p est égale ou supérieure à R_1 , on parle de profil en « fer à cheval ». Ces derniers profils sont réservés aux galeries de petite section, comme les galeries de sécurité ou les galeries intertubes, et pour les bonnes géologies car les piédroits verticaux ont tendance à fléchir sous l'effet de la poussée des terres.

Le profil B est une extension du profil A avec deux rayons de courbure en voûte. Ils sont appelés section en anse de panier ou à voûte surbaissée. Ils permettent d'optimiser les volumes

intérieurs mais doivent être réservés aux tunnels excavés aux rochers.

Les profils C et D sont des sections entièrement circularisées avec la possibilité d'ajouter une contre-voûte en radier. Ils sont réservés aux terrains de mauvaise qualité ou aux ouvrages sous nappe parfaitement étanchés. Lorsqu'une contre-voûte est nécessaire pour des raisons de résistance (poussée des terres, poussée hydrostatique, gonflement, fluage...), on essaye le plus souvent d'avoir $R_2 < 2 \times R_1$. Un rayon R_2 trop grand générerait des efforts de flexion trop importants à la jonction avec les piédroits.

La section E est la section typique d'une excavation mécanisée, au tunnelier. Elle est adaptée à la pose de voussoirs préfabriqués et est idéale pour la reprise d'efforts géostatiques ou hydrostatiques.

Enfin la section F est la section des cavernes ou salles souterraines dans les terrains poussants. On la retrouve dans les zones d'intersection de tunnels profonds mais aussi pour les stations de métro réalisées en méthode conventionnelle. Pour ce dernier usage, le rayon R1 est plus important et le rayon R2 plus petit que sur la figure.

Il faut également signaler que certains détails constructifs obligent parfois à modifier l'inclinaison d'un piédroit. C'est le cas particulier des tunnels revêtus où la présence de drains en pied nécessite une surépaisseur de béton afin de conserver une épaisseur résistante suffisante.

1.3.2. Tracé

Pour des raisons évidentes de coût, un tracé d'ouvrage souterrain doit être le plus court possible. La structure géologique

et la présence d'accidents majeurs peuvent parfois influencer les tracés localement mais c'est souvent d'autres critères qui priment. Il y a en effet un certain nombre de spécificités et contraintes qu'il faut bien avoir en tête lorsqu'on dessine un projet d'axe de tunnel.

Pour les tunnels routiers, on se référera au Dossier Pilote Tunnel Géométrie (CETU [1990]) ou au manuel ARP (CEREMA, [2022]). Ce sont souvent des critères de visibilité associés à des distances d'arrêt qui définissent les rayons en plan et en long.

Pour les tunnels ferroviaires, on se référera aux Instructions Nationales de la SNCF et aux STI pour les réseaux européens (SNCF [1998]).

Pour les tunnels de transports guidés (métro, tramway, navettes-aéroports...), on se référera aux directives de chaque exploitant et aux limites du matériel roulant.

Le Tableau 3 suivant présente les principales contraintes de tracé liées à des aspects constructifs, avec quelques ordres de grandeur.

Tableau 3. Synthèse des différentes contraintes de tracé

Élément	Méthode mécanisée	Méthode conventionnelle	Autres contraintes
Rayon de courbure en plan / Rayons de raccordement profil en long	Le rayon minimum dépend du diamètre d'excavation et de la taille du bouclier rigide. Les rayons minimaux vont de 150 à 300 m. Certains tunneliers spéciaux articulés et certains tunneliers ouverts permettent de descendre en dessous de ces valeurs.	Il n'y a pas de contrainte hormis celle de pouvoir réaliser les volées de tir avec un jumbo (10 m minimum pour des petites galeries et 25 m pour des tunnels de type routiers).	Pour un marinage par tapis roulant ou si un tapis doit être installé à demeure, on privilégiera les rayons de courbure supérieurs à 500 m. Pour des tunnels empruntés par des engins de chantier ou véhicules légers hors réseau routier, le rayon sur profil en long peut être très faible mais il doit permettre de conserver un confort pour la conduite. En pratique il sera supérieur à 40 m.
Pente maximum	Les tunneliers à pression de terre ou à pression de boue peuvent travailler normalement jusqu'à 4 % de pente, et jusqu'à 12 % avec des adaptations mineures. Pour les tunneliers ouverts au rocher, les pentes peuvent être plus importantes mais nécessitent une conception spécifique.	La limite de pente est souvent celle des engins sur pneu, autour de 20 %. Au-delà il faut prévoir des engins à chenille ou avec système de treuillage.	
Pente minimale			Souvent fixée à 0,5 % pour un écoulement gravitaire de l'eau efficace.
Distance minimale entre deux tubes parallèles			À défaut, on gardera une largeur de terrain d'au moins 3 diamètres de tunnels. Pour des rochers compétents cette distance peut être optimisée.
Profondeur minimale	En l'absence d'informations sur les avoisinants, on choisira une hauteur de couverture d'au moins 1 fois et demie le diamètre d'excavation.		Les attaques de tunnel doivent être réalisées sous une couverture d'au moins 1 diamètre, à moins de prévoir un renforcement conséquent du terrain.

I.3.3. Points métriques

En travaux souterrains on utilise très souvent un repérage appelé point métrique (PM) qui permet de se repérer par rapport à une référence qui est souvent l'entrée du tunnel, à la clef de voûte.

Il ne faut pas confondre le Point Métrique chantier ou exploitant, correspondant à la mesure réelle en tunnel des

longueurs d'ouvrage, et le Point Métrique du tracé, correspondant à la distance cumulée d'ouvrage sur un plan horizontal projeté. Le premier est utilisé en phase chantier pour le repérage mais aussi pour le calcul des mètres d'avancement. Le second est utilisé par les projeteurs et géomètres sur les profils en long et les vues en plan (logiciels types COVADIS ou CIVIL 3D).