



INVENTAIRE des TUNNELS FERROVIAIRES de FRANCE

iff.contact@orange.fr

LES TUNNELS - 2

Les techniques de percement des tunnels vont pratiquement rester figées jusqu'après la deuxième guerre mondiale. Ce n'est que dans le milieu des années 1950 qu'un ingénieur français polytechnicien, pratiquement méconnu du grand public, Albert Caquot (1881 > 1976), posa les bases qui servent encore aujourd'hui à la construction des grands tunnels et, notamment, des grandes percées ferroviaires actuelles pour les Lignes Grande Vitesse.

LA CAQUOÏDE :

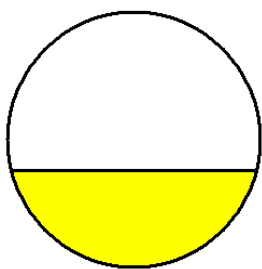
Génial touche à tout qui s'illustra dans des domaines aussi variés que l'aéronautique, l'hydrodynamique, les barrages, les écluses, les ponts et autres matières, Albert Caquot s'intéressa aussi aux tunnels. Il s'étonna de la mauvaise tenue des souterrains anciens à section classique en fer à cheval, dont les piédroits avaient souvent tendance à céder ou à se rapprocher, et les radiers à bomber sous l'effet des pressions latérales et sous-jacentes.

En effet, lors du creusement des anciens tunnels, les ingénieurs ne considéraient que les pressions supérieures s'exerçant sur la voûte et ne prenaient pas suffisamment en compte l'importance des pressions latérales et inférieures car, c'est bien connu, la nature a horreur du vide et les terrains encaissant une galerie ont tendance à vouloir écraser celle-ci pour réoccuper l'espace. Le mérite d'Albert Caquot fut donc de révéler l'importance de ces contraintes et qu'il fallait une section en courbure continue pour pouvoir y faire face avec efficacité.

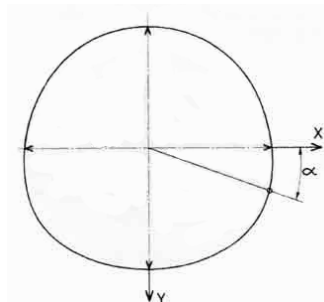
La meilleure section est, de ce point de vue, la section pleinement circulaire qui répartit uniformément toutes les pressions sur les parois de la galerie et les annule entre elles. Mais, à une époque où les modernes tunneliers n'existaient pas encore, creuser de telles galeries posait trois gros problèmes :

- Tout d'abord extraire un volume de roche presque double de celui qui était habituellement nécessaire. D'où une durée de creusement accrue et un coût en conséquence.
- Des difficultés d'accès au chantier en raison de la forme concave de la partie basse de la galerie.
- Enfin, après construction du revêtement interne, nécessité de remblayer un bon tiers du volume (**partie jaune sur le croquis ci-dessous**) pour pouvoir établir le radier définitif.

C'est pourquoi, pour compenser les défauts liés à l'usage de la section circulaire, Albert Caquot mit au point un autre modèle de section à courbure continue : la caquoïde.

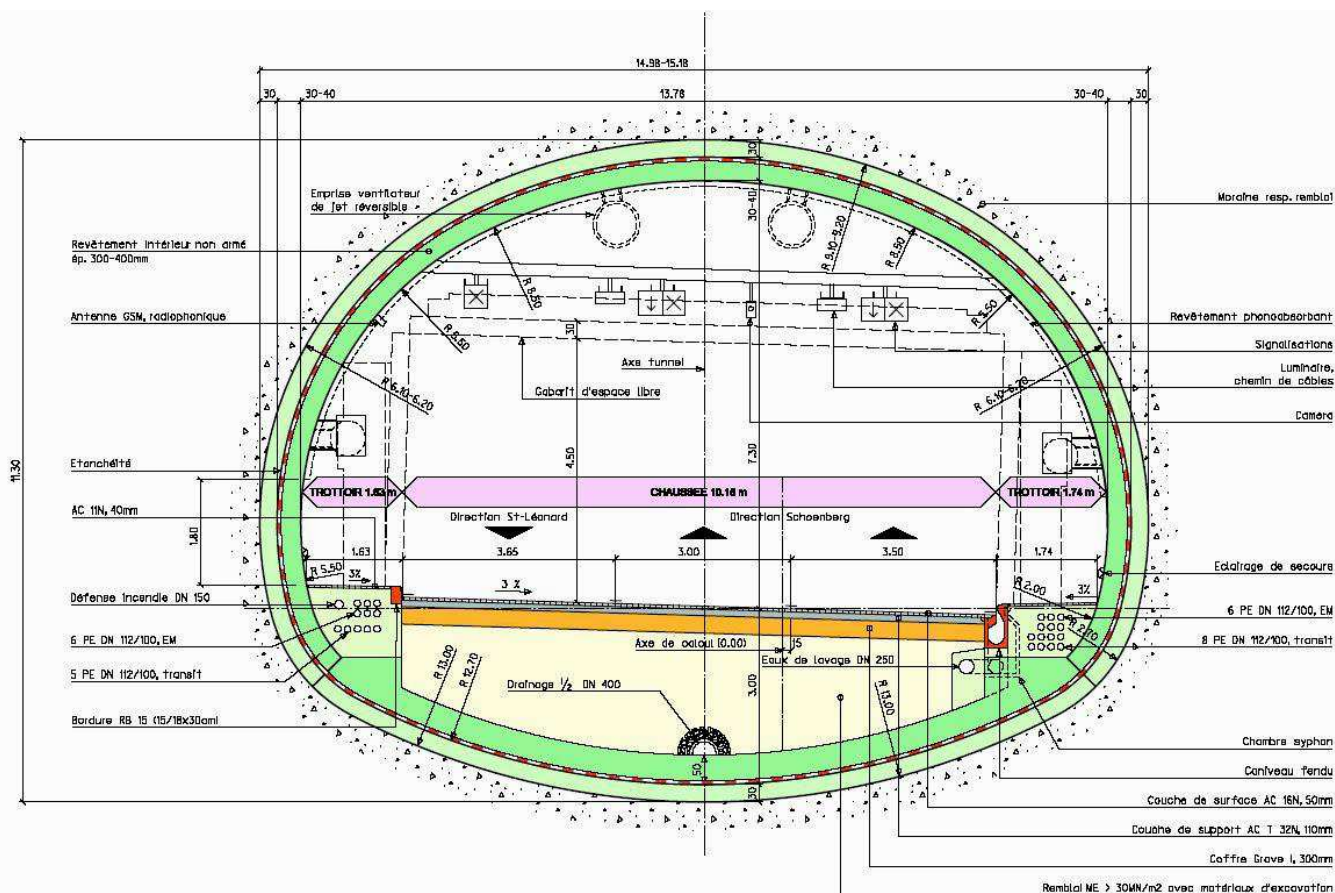


Le tunnel idéal à section circulaire



Et le tunnel à section caquoïdale

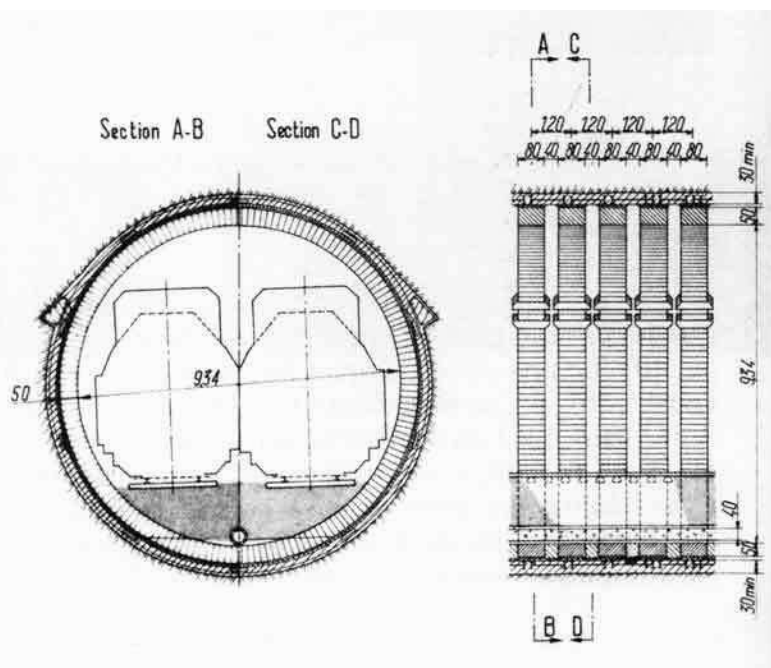
Ce type de section dont le fond est légèrement aplati, est plus économique mais n'en conserve pas moins les mêmes avantages que la section circulaire en donnant une stabilité accrue aux souterrains. C'est selon ce modèle que sont aujourd'hui creusés tous les grands tunnels routiers ou ferroviaires qui ne font pas appel à des tunneliers.



Coupe caquoïdale d'un tunnel routier moderne

Mais Albert Caquot a aussi apporté une autre solution originale pour des tunnels creusés en terrains très instables et susceptibles de se déformer.

Des tassements pouvant donc ovaliser la section, courber l'axe longitudinal ou même provoquer des ruptures de parois, Albert Caquot propose une section circulaire bien supérieure au gabarit utile, dans laquelle, à l'abri d'une première voûte mince en parapluie, est posé un revêtement intérieur formé d'anneaux indépendants de 0,80 m de longueur. Ces anneaux sont constitués de voussoirs en béton plaqués contre le premier revêtement. Très armés, ils sont néanmoins élastiques et susceptibles de se déformer. Mais ils sont surtout séparés par des couloirs de 0,40 m de large qui forment des zones de moindre résistance où se produiront les ruptures probables. En raison du gabarit surdimensionné, des cintres correctifs peuvent alors être placés dans les couloirs, sans interrompre la circulation ferroviaire, pour remettre en ordre tout ou partie du revêtement déformé.



LES NOUVEAUX TUNNELS :

Avec la mise au point des Trains à Grande Vitesse (TGV), une nouvelle conception des chemins de fer est apparue. La vitesse et le gain de temps exigent en effet la construction de radiales européennes capables de franchir les obstacles naturels les plus imposants : bras de mer ou montagnes.

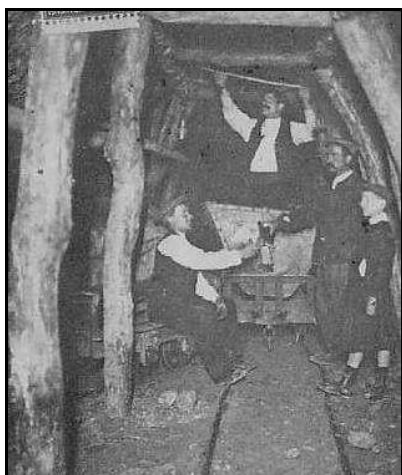
De ce fait, voit-on apparaître de nouveaux tunnels qui s'inspirent des préceptes d'Albert Caquot :

- Des tunnels classiques monotubes pour les obstacles de faible importance dont le percement n'exige pas une longueur supérieure à 10 km. De section caquoïdale, leur creusement s'effectue selon des techniques nouvelles qui dérivent néanmoins des méthodes du passé.
- Des tunnels « de base » lorsque l'obstacle exige un percement supérieur à 10 km. Ces derniers sont souvent bi ou tri tubes pour des raisons de facilité des travaux, d'entretien ultérieur et de sécurité.

Leur percement fait par contre appel à une nouvelle technologie révolutionnaire : l'emploi de puissantes machines automatisées, les tunneliers, qui ont en outre l'avantage de creuser des galeries de section circulaire, c'est-à-dire des tunnels idéaux.

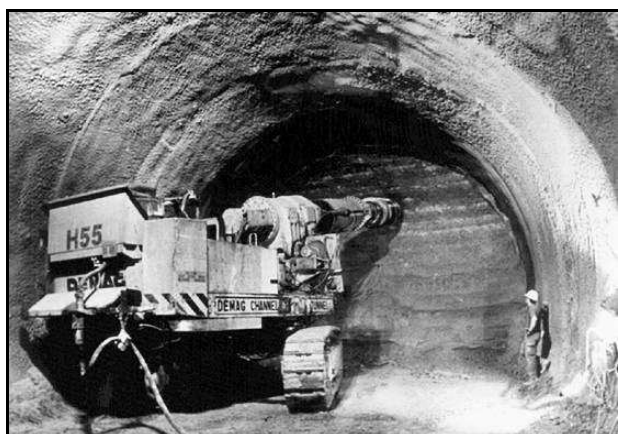
TECHNIQUES NOUVELLES DE PERCEMENT :

Le percement des tunnels classiques s'inspire en grande partie des techniques anciennes. Sauf qu'elles ont été grandement modernisées, entièrement mécanisées et que l'on taille maintenant en pleine section sans galerie pilote. L'usage des perforatrices autopilotées pour creuser les trous de mine est aujourd'hui systématique. Et les déblais sont chargés mécaniquement sur des trains complets tirés par de puissants locotracteurs électriques. En outre, des moyens de ventilation performants pourvoient à l'évacuation des poussières et des gaz toxiques dus aux explosions. L'homme ne se trouve plus, en principe, en contact direct avec la roche.



Sur ces deux photos, 150 ans d'histoire tunnelière

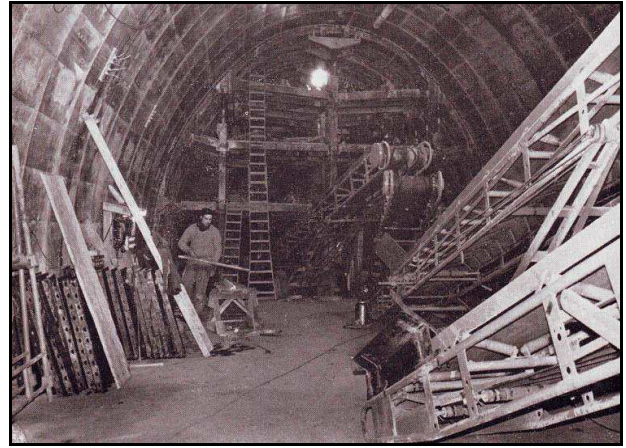
La perforatrice, à droite, possède deux bras articulés capable de forer des trous de mine. La nacelle permet aux artificiers de poser les charges d'explosif et leur détonateurs électriques.



Autre perforatrice



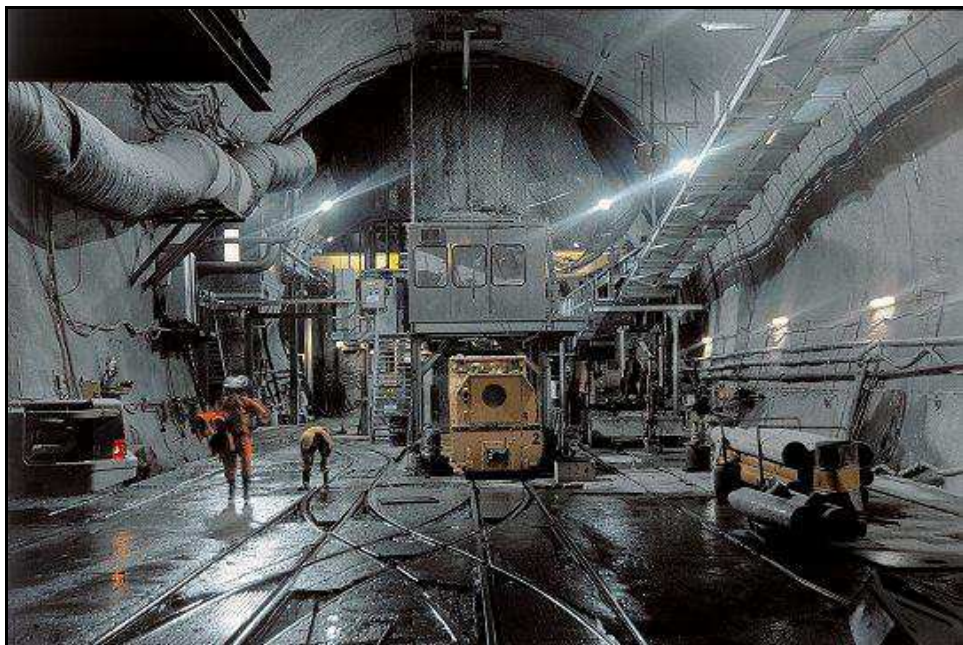
Chargeuse souterraine



Convoyeurs à bande



Locomotive et wagon de fort tonnage pour évacuer les déblais



Le percement des tunnels d'aujourd'hui : de vraies usines souterraines

LES TUNNELIERS :

Mais le plus spectaculaire reste le percement des nouveaux tunnels de base à l'aide de puissantes machines appelées « tunneliers ». Ces derniers sont des pièces à usage unique spécialement réalisées pour le tunnel qu'elles ont à creuser. Ce qui explique leur coût très élevé et le fait qu'elles ne puissent être utilisées que pour les tunnels les plus longs.

LE TUNNELIER FERMÉ

Confinés par air comprimé, par pression de terre ou pression de boue, les tunneliers fermés permettent la construction d'ouvrages souterrains dans les sols les plus délicats.

Principe de fonctionnement

En s'appuyant sur les anneaux posés, le tunnelier (ici à pression de terre) fore le terrain. Le marin est évacué via une vis d'extraction et un convoyeur à bandes. Le train suiveur approvisionne le tunnelier en voussoirs. Ceux-ci sont ensuite mis en place par un érecteur.

Train suiveur : installation située à l'arrière du tunnelier qui assure les fonctions logistiques

Marin : débris de sol et roche provenant de l'excavation

Convoyeur à bandes : transporteur de déblais utilisant une bande convoyeuse

Patins de vérins : pièce assurant la répartition de l'effort de l'appui d'un vérin, en général au contact avec les voussoirs

Erecteur : dispositif mécanique permettant la mise en place du soutènement provisoire ou définitif

Molette : outil tournant librement sur un arbre solidaire de la tête d'abatage qui, sous l'action de la poussée, trace des saignées dans le sol

Le tunnelier

Jupe : partie arrière du bouclier à l'abri de laquelle est mis en place le revêtement voussoirs

Bouclier : système de protection complet ou partiel à l'abri duquel s'effectue le terrassement voire le soutènement ou le revêtement

Tête d'abatage : Partie qui porte les outils de creusement du terrain

Les diamètres

14,90 m



diamètre du tunnelier à pression de boue
• tunnel du Groene Hart (Pays-Bas)

7,77 m



diamètre du tunnelier à pression de terre
• lot n°2 du métro de Toulouse

2,20 m



diamètre du tunnelier à pression d'air et attaque ponctuelle
• siphon Richard Lenoir (Paris)

Course de forage : longueur de creusement réalisable sans déplacement du système de forage du tunnelier

Injection de bourrage : injection de remplissage du vide annulaire entre le terrain et l'extrados de l'anneau

Mousse : additif de forage permettant de lubrifier les déblais et de stabiliser la pression dans la chambre

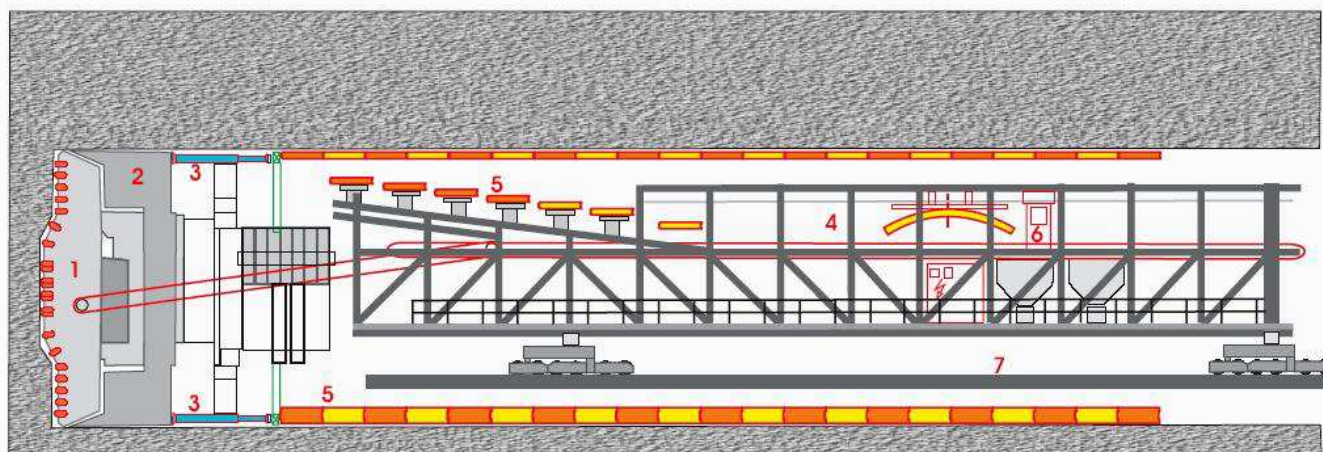
Vis d'extraction : Vis sans fin assurant l'extraction des déblais de la chambre

Sol désagrégé : c'est le terrain éventuellement mélangé à des additifs qui assurent le confinement de la chambre

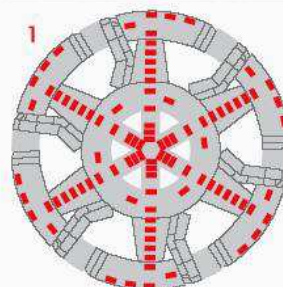
Les anneaux universels



Grâce à leurs bords non parallèles, les anneaux universels permettent, en jouant sur la position de la clé (en orange), de revêtir les courbes du tunnel.



- 1 Tête de forage
- 2 Bouclier
- 3 Vérins de poussée
- 4 Train suiveur
- 5 Voussoirs en béton préfabriqués
- 6 Cabine de commande
- 7 Rail pour déplacement du train suiveur



Un tunnelier peut se décrire comme étant un gros cylindre blindé et creux dont l'avant est munie d'une tête d'abattage tournante (6 tours / minute) équipée de molettes et de dents qui strient et broient la roche. Son poids est d'environ 600 tonnes.

La poussière de roche récupérée est mélangée à de l'eau et réinjectée en partie comme lubrifiant abrasif devant la tête d'abattage pour faciliter son action. L'autre partie étant évacuée vers l'arrière sous forme de boues par des convoyeurs à vis ou à bande afin d'être chargée dans les trains d'évacuation.

Par ailleurs, dans sa partie arrière, le tunnelier possède des organes de manutention qui lui permettent de mettre en place les dalles de béton cintrées (voussoirs) qui constitueront le revêtement final de la galerie définitive.

Ces dalles sont apportées par un « train suiveur » qui comporte aussi tous les organes vitaux du tunnelier : centre de commande, transformateurs, centrale électrique, pompes hydrauliques, pompes d'assèchement, centrale à béton pour injections et enrobage, convoyeurs d'évacuation, etc...

Pour avancer, le tunnelier prend appui sur de puissants vérins postérieurs qui s'assoient sur les derniers voussoirs mis en place.

Pour modifier son orientation et négocier des courbes, il prend aussi appui sur des vérins latéraux (grippers) qui permettent de le désaxer. Sur les tunneliers les plus modernes, la trajectoire est directement gérée, au centimètre près, par ordinateur et GPS.



Vérins de poussée et voussoirs

La flèche verte indique le sens de progression du tunnelier dont on voit l'arrière à gauche.



Gripper latéral

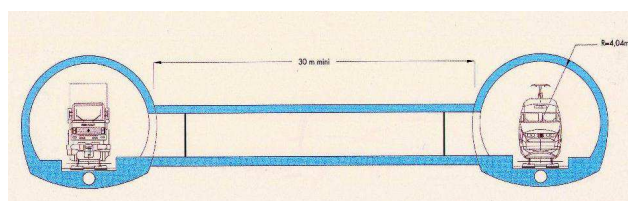


Tunnelier avec sa tête de coupe, son train suiveur et ses vérins géants

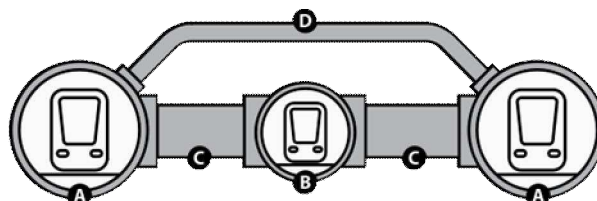


NOUVELLE ARCHITECTURE TUNNELIERE :

Comme on l'a vu, les nouveaux grands tunnels de base sont donc bi ou tri tubes. Ces derniers sont reliés entre eux, de place en place, par des galeries de raccordement ou des rameaux de pistonement.



Tunnel bitube
avec galerie de raccordement



Tunnel tri tube
avec galerie de service (au centre)
et rameaux de pistonement (au-dessus)

Cette disposition particulière est dictée par la facilité des travaux, l'entretien ultérieur et les impératifs de sécurité si l'une des galeries est mise hors service par un incident quelconque.

Comme le lecteur peut le constater, ces galeries sont largement surdimensionnées afin de faciliter les importants déplacements d'air provoqués par les trains à grande vitesse. Les rameaux de pistonement aménagés dans certains tunnels tri tubes sont destinés au même usage. L'air refoulé par un train dans l'une des galeries de circulation, passe ainsi dans l'autre galerie. Ce mouvement diminue la résistance à l'avancement du train et favorise l'aération.



Galerie de circulation d'un nouveau tunnel de base
Notez les trottoirs d'évacuation.

TUNNELS MAJEURS :

Pour terminer, nous donnons ci-après la liste de tous les tunnels ferroviaires de plus de 2 km de long construits en France.

Les ouvrages en rouge correspondent aux tunnels frontaliers situés partiellement sur le territoire français et en territoire étranger.

Tunnels ferroviaires de plus de 2 000 m

Nom	Longueur	Ligne
Paris RER Souterrain	76 500 m	Réseau de tunnels interconnectés
Mont d'Ambin	52 110 m	LTF Lyon > Turin
Eurotunnel / Chunnel	50 450 m	LGV Nord Europe
Fréjus / Mont Cenis	13 688 m	Modane > Italie
Bussang	8 287 m	Non percé, inachevé, creusé sur 4300 m
Perthus	8 171 m	Perpignan > Espagne
Tende	8 099 m	Tende > Italie
Somport	7 874 m	Non exploité
Marseille	7 834 m	LGV Méditerranée
Sainte-Marie-aux-Mines	7 014 m	Routier
Fourcherie	6 628 m	Non percé, inachevé, creusé sur 1750 m et noyé
Mont d'Or	6 098 m	Labergement Sainte Marie > Suisse
Col de Braus	5 939 m	Nice > Breil sur Roya
Boulainvilliers	5 415 m	Paris Petite Ceinture RER C
Puymorens	5 414 m	Toulouse > Latour de Carol
Villejust	4 805 m	LGV Atlantique
Nerthe	4 634 m	Paris > Marseille
Echarmeaux	4 155 m	Paray le Monial > Givors
Blaisy Bas	4 112 m	Paris > Lyon
Crêt d'Eau	4 008 m	Bellegarde > Longerey Léaz
Vizzavona	3 916 m	Bastia > Ajaccio
Mont Grazian	3 891 m	Nice > Breil sur Roya
Col de Cabre	3 764 m	Livron > Veynes Dévoluy
Colle de Saint-Michel	3 459 m	Nice > Digne
Rilly la Montagne	3 441 m	Reims > Epernay
Meudon	3 363 m	Paris > Versailles
Roux	3 336 m	Routier. Jamais mis en service ferroviaire
Chantenay	3 100 m	Nantes > Savenay
Epine	3 076 m	La Tour du Pin > Chambéry
Monte Carlo	3 012 m	Nice > Menton
Sauvages	2 939 m	Le Coteau > Saint Germain au Mont d'Or
Saint André d'Hébertot	2 929 m	Abandonné
Villecresne	2 793 m	LGV Méditerranée
Arzviller	2 690 m	Nancy > Strasbourg

Galaure	2 686 m	St. Quentin > St. Marcel
Présailles	2 626 m	Percé mais inachevé
Mussuguet	2 625 m	Aubagne > La Seyne sur Mer
Cergy	2 623 m	Paris RER A
Rolleboise	2 613 m	Mantes la Jolie > Vernon
Mornay	2 569 m	Bourg en Bresse > Bellegarde
Motte	2 560 m	Lisieux > Mézidon
Carénage / Prado Carénage	2 483 m	Routier
Tartaiguille	2 438 m	LGV Méditerranée
Caluire	2 404 m	Collonges > Lyon Saint Clair
Tracol	2 395 m	Abandonné
Montplaisir	2 385 m	Brive > Varen Lexos
Clichy	2 301 m	Paris RER C
Aéroport Charles de Gaulle	2 233 m	Roissy 2 LGV
Grand Pissy Poville	2 205 m	Malaunay > Motteville
Sainte Irénée	2 109 m	Paris > Marseille
Fix Saint Geneys	2 109 m	Saint Georges d'Aurac > Darsac
Savine	2 083 m	Bourg en Bresse > Bellegarde
Croix de l'Orme	2 081 m	Saint Etienne > Firminy
Sevran	2 075 m	Paris RER E
Monaco	2 064 m	Nice > Menton
Massy	2 014 m	LGV Atlantique
Sauze	2 000 m	Percé et noyé dans le lac de Serre-Ponçon

★ ★ ★