



Les ouvrages souterrains

UNE MULTITUDE D'USAGES



Creuser est un acte instinctif observé chez de nombreux mammifères. Le but est le plus souvent de s'abriter ou de se protéger des prédateurs. Cette pratique se retrouve chez l'homme. On creuse, on excave et on perce des galeries à des fins diverses et variées. On enterre des déchets, des câbles mais également des routes afin de préserver la nature et le paysage. On creuse des parkings souterrains pour gagner de la place dans les villes. On perce des tunnels pour traverser mers et montagnes avec des moyens terrestres. L'avancée des techniques permet de construire des ouvrages toujours plus grands, dans des milieux toujours plus difficiles. Cependant, la sécurité et le bien-être des utilisateurs conduisent à prendre des mesures de plus en plus strictes.

LES DIFFÉRENTS OUVRAGES SOUTERRAINS

CLASSIFICATION

Durant les dernières décennies, les constructions souterraines ont pris un essor très important. L'encombrement grandissant des villes et des surfaces constructibles en général a poussé à explorer la dimension verticale. On a donc commencé à construire des grands buildings et à creuser de plus en plus profond. Autrefois réservés à l'extraction minière, les ouvrages souterrains se sont diversifiés. Voies de communication et de transport, espaces de stockage, usines, etc., sont de plus en plus souvent enterrés. On peut classer ces ouvrages de plusieurs manières : par leur usage (**galeries minières**,



galeries hydrauliques, cavités de stockage, tunnels routiers et ferroviaires, gares souterraines, centrales nucléaires souterraines, etc.) ; par leur niveau de sécurité ; par type de sol (sol meuble, aquifère, etc.). Toutes ces spécificités se repercutent sur la construction, la conception et les

moyens mis en œuvre, ce qui rend chaque ouvrage singulier.

Similitudes, différences

Les catégories citées précédemment ont chacune leur spécificité. Leur réalisation implique donc des contraintes particulières. On peut cependant discerner trois types d'ouvrages différents.

• Les ouvrages horizontaux : tunnels, métro, etc.



• Les ouvrages verticaux : puits, forages, etc.

• Les ouvrages à ciel ouvert : enfouissement de route, etc.

Chacun de ces trois types d'ouvrages fait appel à des techniques propres, qui de plus nécessitent des études préalables poussées et spécifiques à chaque ouvrage. On peut néanmoins résumer la construction des ouvrages souterrains en trois étapes : sonder, creuser, aménager. Chacune de ces trois étapes fait appel à des connaissances particulières, elle est donc conduite par une équipe d'ingénieurs et de techniciens différente.

LES CONTRAINTES DE CONSTRUCTION

CONTRAINTES GÉOLOGIQUES

Lors de la conception et de la construction d'un ouvrage souterrain, les contraintes les plus importantes sont évidemment celles imposées par le sol. Creuser un trou au fond de son jardin permet de se rendre compte de l'incertitude et de la diversité des couches de terre que l'on va trouver. On peut ainsi trouver des couches meubles, des couches dures, des couches argileuses, etc. Toutes les couches ne sont pas aptes à accueillir un ouvrage souterrain. La géologie et l'hydrogéologie du terrain jouent un rôle primordial dans l'étude préalable de



matériaux. Ces contraintes sont maîtrisées depuis longtemps maintenant et on utilise ainsi des camions spéciaux extrêmement rabaisés pour transporter les différents éléments d'un tunnel. La conception d'un ouvrage souterrain nécessite de nombreux calculs, permettant entre autres d'estimer les contraintes mécaniques que va subir la construction. Depuis l'avènement des ordinateurs, ces calculs en eux-mêmes ne sont plus un obstacle. Une difficulté reste

rencontrer une zone avec des failles ouvrant des réservoirs d'eau sous pression, ce qui a pour effet d'inonder les galeries.

Les zones sensibles aux séismes doivent aussi être déterminées car elles peuvent entraîner des efforts dans l'ouvrage conduisant à son effondrement. La stratification de la roche peut aussi causer des effondrements. L'équilibre des couches de terrain autour de la galerie n'est plus assurée du fait du retrait de matériau excavé. L'orientation de ces couches détermine la manière dont peut s'effondrer la galerie.

L'hydrogéologie est aussi un facteur extrêmement important lors de la conception d'un ouvrage souterrain. La présence de nappes d'eau à proximité d'une excavation peut entraîner son effondrement ou des déformations importantes à cause de la pression exercée par de tels réservoirs sur le sol. Dans les sols rocheux (en montagne particulièrement), l'eau peut arriver en abondance dans le tunnel au passage de zones fragiles ou de fissures dans la roche.

L'emplacement des têtes de tunnel (c'est-à-dire les entrées du tunnel) est aussi déterminé avec précaution car celles-ci ne doivent pas se situer en zones instables ou humides, par exemple. Il est donc très important de connaître la nature du terrain avant de creuser. Cela permet d'anticiper les problèmes cités précédemment et d'assurer au chantier continuité et sécurité.

CONTRAINTES TECHNIQUES

L'exiguïté des galeries d'accès – ou de l'ouvrage lui-même dans le cas des tunnels – empêche d'avoir une entière liberté de mouvement et de gabarit. Il faut donc mettre en œuvre des techniques et des moyens particuliers pour **acheminer hommes, matériels et**



matériaux. Ces contraintes sont maîtrisées depuis longtemps maintenant et on utilise ainsi des camions spéciaux extrêmement rabaisés pour transporter les différents éléments d'un tunnel. La conception d'un ouvrage souterrain nécessite de nombreux calculs, permettant entre autres d'estimer les contraintes mécaniques que va subir la construction. Depuis l'avènement des ordinateurs, ces calculs en eux-mêmes ne sont plus un obstacle. Une difficulté reste

pendant incontournable. Ce sont les hypothèses de calcul, c'est-à-dire les chargements qui vont être introduits dans le modèle afin de dimensionner les différentes couches de béton ou la taille des poutres en acier et d'évaluer leur comportement dans le temps. Il est impossible de déterminer ces chargements à l'avance de manière exacte. Ils ne seront connus qu'une fois l'ouvrage construit. Il faut donc émettre des hypothèses en fonction de la nature du terrain et de son comportement au fil du temps. Ces hypothèses reposent sur des données géologiques recueillies lors de la définition du tracé. L'adoption de très larges marges de sécurité dans le dimensionnement permet de compenser les approximations faites. Cet aspect de la conception d'un ouvrage renforce l'importance de la connaissance de la géologie et de l'hydrogéologie du sol, éléments déterminants pour les chargements sur l'ouvrage.

CONTRAINTES ENVIRONNEMENTALES

C'est un aspect de la construction qui prend une importance grandissante depuis quelques années. Le **tunnel de la voie rapide A86** Ouest, reliant Rueil-



Malmaison et le Pont Colbert en région parisienne, est une bonne illustration de la prise en compte de ce facteur. Dans ce projet, le respect de l'environnement tient une place essentielle car il est l'une des motivations principales à la construction de ce tunnel. Son but était en effet de boucler l'A86 tout en préservant les richesses écologiques, de la faune et de la flore ainsi que le cadre incroyable comprenant le parc du château de Versailles, l'arboretum de Chevreuloup, la forêt de la Malmaison, etc. Cependant, un tunnel a toujours un impact sur la surface, au niveau des têtes (entrées-sorties) et des puits de secours et de ventilation. Les échangeurs ont donc été dessinés pour être les plus compacts possibles et sont partiellement enterrés. Les puits d'accès devant se fondre dans le paysage, on a fait appel à des architectes dont la mission a été de chercher « une forme douce, lisse, unitaire, mimétique des tonalités qui l'entourent – un ton ocre brun, relativement sombre pour se fondre dans les bois ».

Un autre aspect du respect de l'environnement à prendre en compte est le bruit. L'ouverture d'un tunnel tend à diminuer le trafic urbain en surface pour le concentrer sous terre. Si l'on évite ainsi de créer du bruit supplémentaire le long du tracé de la route, il reste le problème du bruit au niveau des échangeurs et des **entrées**. Celles-ci sont le plus



souvent construites aux abords de grandes routes, à distance des zones d'habitation. De plus, le réarrangement du terrain autour de ces entrées est dessiné de manière à absorber au maximum le bruit. On prévoit donc que les riverains du tunnel verront le bruit ambiant de la circulation diminuer à son ouverture. C'est ainsi que l'on s'efforce d'intégrer au mieux dans le paysage de grands ouvrages, tels que le tunnel de l'A86, en respectant l'environnement, préoccupation majeure de notre temps.

LES MOYENS TECHNIQUES

LA RECONNAISSANCE DU TERRAIN

Comme nous l'avons vu, la reconnaissance du terrain est une étape primordiale de la construction d'un ouvrage souterrain. S'il est bien sûr impossible de connaître la structure exacte d'un sol sans creuser, il existe cependant plusieurs techniques permettant de recueillir les informations nécessaires à la conception de l'ouvrage. Le sondage par forage est l'une des plus anciennes techniques utilisées. Il permet de récolter directement toutes les données nécessaires. Cependant, le caractère ponctuel de cette technique ne permet pas de détecter les accidents de terrain, les failles par exemple. Les forages permettent néanmoins de recueillir des données essentielles à la bonne compréhension du terrain et de ses spécificités. Les techniques permettant de repérer les accidents de terrain sont multiples. Parmi elles, on trouve la méthode de gravimétrie qui consiste à détecter les cavités souterraines en mesurant les variations de la pesanteur. La prospection par magnétométrie permet de détecter des corps métalliques (les conduites enterrées principalement, les failles ou les intrusions éruptives) en mesurant le champ magnétique. Aucune technique universelle ne permet de connaître le terrain avec

Des projets titanesques

15 000 tonnes
C'est la force de poussée du tunnelier de l'A86 (1,5 fois le poids de la Tour Eiffel).

24,51 km
Longueur du tunnel de Lørstad en Norvège, le plus long tunnel routier.

57 km
Longueur du tunnel ferroviaire du Saint-Gothard en cours de construction. Il sera le tunnel le plus long au monde.

50 m
Hauteur séparant le tunnel sous la Manche du lit de la mer.

16 milliards d'euros



Coût de la construction du tunnel sous la Manche.

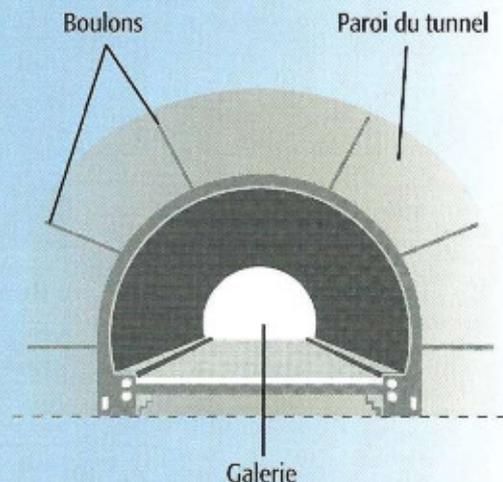
14
Nombre de voies de circulation de l'autoroute enterrée par le projet du « big dig » à Boston.

Le big dig



12 millions de m³ creusés pour enterrer une autoroute

Le soutènement par boulons



un seul type de mesure. Il faut combiner plusieurs méthodes, choisies en fonction du terrain et des données recherchées. En effet, selon le terrain et le type d'ouvrage à construire, des informations nécessaires sont différentes. On ne cherchera pas, par exemple, de faille sismique dans un secteur non sismique. Le choix des mesures à effectuer est réalisé à partir des données existantes fournies par les services locaux.

Pour certains tunnels, principalement autoroutiers ou dans des terrains de mauvaise qualité, il est courant de creuser au préalable une galerie de reconnaissance. La réalisation de ce type d'opération est extrêmement coûteuse mais présente l'avantage de fournir des informations nombreuses et très précises sur la nature du terrain et la présence d'eau en particulier.

LE CREUSEMENT

Mise à part la pioche, l'utilisation de l'explosif est la technique la plus ancienne pour creuser les tunnels. Encore utilisé aujourd'hui, le creusement à l'explosif est le travail de spécialistes. Il faut parvenir à découper la roche pour se rapprocher au maximum du profil désiré tout en infligeant le moins de dégâts et de fissurations à la paroi. Pour cela, on introduit dans la roche des charges explosives à l'aide de forages. Une partie de ces charges est répartie régulièrement sur le profil du tunnel ; l'autre partie est placée en son centre. L'artificier fait ensuite exploser ces charges en plusieurs séquences espacées généralement d'une demi-seconde en partant du centre du profil. La première explosion appelée tir du bouchon permet de créer une cavité initiale située au centre du profil. Celle-ci permettra à la roche de se détacher durant les étapes suivantes. Depuis un demi-siècle, l'explosif a été peu à peu remplacé par l'utilisation de machines à forer plus communément appelées tunneliers. Il en existe deux types : les machines à attaque globale et les machines à attaque partielle. Les machines à attaque partielle travaillent à la manière d'un mineur. Une tête située à l'extrémité d'un bras attaque la roche ponctuellement, à un

endroit désigné de la section du tunnel. Elles permettent d'obtenir une section quelconque et d'avoir accès au front de taille, c'est-à-dire au fond du tunnel. Les machines à attaque globale sont des tunneliers munis d'un bouclier circulaire. Celui-ci attaque la roche et crée ainsi une galerie circulaire au diamètre bien déterminé. Plusieurs types de boucliers sont utilisés en fonction de la nature du terrain. On en distingue deux en particulier : les boucliers rotatifs et les boucliers à boue sous pression. **Les boucliers rotatifs,**



utilisés pour attaquer les roches dures, sont équipés de molettes, disques roulant sur la roche en y exerçant une pression extrêmement forte. Cette pression fait éclater la roche et permet au tunnelier d'avancer. Les boucliers à boue sous pression sont plutôt utilisés pour les sols mous et aqueux. La boue exerce une pression sur le front de taille pour améliorer sa stabilité. Le tunnelier utilisé pour percer le tronçon est du tunnel de l'A86 est équipé de ces deux types de boucliers et passe de l'un à l'autre selon les sols dans lesquels il évolue.

LA CONSTRUCTION

Une fois la galerie creusée, il faut la consolider pour empêcher tout effondrement. On appelle cela le soutènement. Cette opération s'effectue généralement directement à la suite du tunnelier. Encore une fois, la nature du tunnel va déterminer la manière dont le soutènement va être effectué : avec des boulons, du béton projeté ou par anneaux intérieurs. Les boulons sont des tiges de plusieurs mètres insérées et scellées dans la paroi pour empêcher son effondrement. Comme son nom l'indique, le soutènement par béton projeté est une technique qui consiste à projeter du béton à prise accélérée sur la paroi

à l'aide d'une lance. Cette couche de béton est renforcée par un maillage d'acier mis en place au préalable sur la paroi. Le béton constitue alors une coque très solide recouvrant la paroi qui donne la rigidité nécessaire à la galerie.

Enfin, le soutènement par anneaux intérieurs peut prendre plusieurs formes. Il peut être constitué d'anneaux métalliques, se rapprochant ainsi du soutènement que l'on peut voir dans les anciennes mines. Le soutènement peut aussi se faire à l'aide de voussoirs préfabriqués. Les voussoirs sont des **anneaux de béton circulaires** qui



font fonction de revêtement définitif et de soutènement. Ils sont le plus souvent utilisés dans des tunnels creusés avec des machines à attaque globale. Un voussoir est composé d'une dizaine de morceaux assemblés sur la paroi dont un constitue la clé, à la manière des dés de voûte. La dernière innovation est l'utilisation de voussoirs biseautés et non cylindriques pour le tunnel de l'A86. Une des faces de chaque anneau est inclinée. Ceci permet à la galerie de prendre n'importe quelle courbe en n'utilisant qu'un seul modèle de voussoir. Avant cette invention, des voussoirs spéciaux étaient fabriqués pour permettre au tunnel de faire des virages.

LA SÉCURITÉ DES OUVRAGES

LES DIFFÉRENTS NIVEAUX DE SÉCURITÉ

On comprend facilement que la sécurité d'un ouvrage souterrain est définie en fonction de son

utilisation. Des ouvrages tels qu'une gare souterraine ou un tunnel autoroutier demandent des mesures de sécurité importantes alors que la sécurité d'une galerie provisoire ou d'une galerie minière est faible.

Le feu est le principal ennemi des galeries souterraines. En effet, le confinement fait monter la température très rapidement et empêche les fumées de s'échapper. Celles-ci s'accumulent et rendent l'air irrespirable. La survie d'une personne lors d'un incendie n'est alors que de quelques minutes si aucune installation n'existe.

Pour cette raison, des unités de ventilation et d'extraction de fumée sont installées dans les tunnels. On construit aussi des refuges pressurisés résistants à la chaleur et dont l'air est renouvelé à intervalles rapprochés pour permettre aux usagers de se mettre à l'abri. Cependant, les derniers accidents et en particulier l'incendie du **tunnel du Mont-Blanc** ont montré les lacunes



en matière de sécurité dans la législation. Cet incendie s'est produit le 24 mars 1999 et a été causé par un camion qui a pris feu spontanément, sans doute à la suite d'une surchauffe de son moteur. Quarante-cinq personnes y ont trouvé la mort en raison principalement de la forte concentration d'oxyde de carbone dans la fumée dégagée par le feu. Ces personnes sont le plus souvent mortes dans leur voiture sans avoir eu le temps de se mettre à l'abri. Le système de ventilation est donc le principal responsable dans cette tragédie. Sa capacité d'extraction de fumée est limitée par la configuration du tunnel. Il

est impossible de creuser des puits de ventilation au milieu de celui-ci car l'épaisseur de roche est de plus de 1 500 mètres.

Cet accident a eu des répercussions immédiates sur les normes de sécurité. À ce titre, le tunnel de l'A86 montre de très nombreuses innovations en matière de sécurité et en particulier contre les incendies, accidents les plus dangereux dans un tunnel. Le système de surveillance mis en place permet de détecter un incident en moins de 10 secondes.

De plus, un puissant système d'extraction, capable d'aspirer dix fois la fumée produite par un véhicule en feu, a été installé. L'aspiration se fait dans le sens de la circulation, ce qui permet de protéger les automobilistes arrêtés derrière le véhicule en feu. Ceci a été rendu possible par la séparation des deux voies de circulation dans le tunnel, construites l'une au-dessus de l'autre. De plus, les niches de secours construites tous les 200 mètres peuvent accueillir environ 100 personnes et permettent d'accéder aux deux étages. Ainsi, si un étage est en feu, on peut évacuer les usagers par le second.

Un autre moyen de protéger les usagers d'un tunnel est la construction d'une galerie technique, en plus de la galerie principale, permettant ainsi l'évacuation des personnes en cas de danger et l'arrivée des secours.

C'est la solution qui a été adoptée pour le **tunnel sous la Manche**, car il est



évidemment impossible de creuser des puits d'accès au milieu de la mer.

Les niveaux de sécurité dans un ouvrage souterrain

