

# Le béton dans les travaux souterrains

Les travaux souterrains permettent de réaliser, sous terre, des ouvrages destinés à la circulation des personnes, des véhicules et des marchandises (tunnels routiers et autoroutiers, tunnels ferroviaires, réseau de transport collectif urbain, métro-RER, voiries urbaines souterraines) ou des fluides (galeries et collecteurs d'adduction d'assainissement ou d'évacuation d'eau). Ils concernent aussi les ouvrages de stockage des véhicules (parcs de stationnement souterrains) et d'eau (tunnels réservoir, bassin de stockage d'eaux pluviales), d'exploitation de mines (galeries), de production d'énergie (galerie souterraine d'usines hydroélectriques, galeries hydrauliques, conduites forcées) ainsi que de nombreux autres ouvrages (zones commerciales et gares ferroviaires souterraines, laboratoires souterrains de recherche, stockage industriel souterrain, puits de grande profondeur, etc.).



© NFM - Technologies

Revêtement d'un tunnel en voussoirs préfabriqués en béton.

Les ouvrages souterrains constituent la solution la mieux adaptée à la création de nouvelles infrastructures en zone urbaine et au franchissement des zones montagneuses. En zone urbaine, le sous-sol devient une alternative quasi incontournable aux problèmes d'occupation et d'encombrement de surface. La réalisation des travaux en souterrain per-

met de s'affranchir des obstacles, d'utiliser au maximum l'espace souterrain quasi illimité et de libérer la surface au sol. En zone montagneuse, le développement de moyens de transports ferroviaires à grande vitesse et des réseaux de communication autoroutiers qui ne peuvent épouser le relief (tracé nécessitant de grands rayons de courbure en plan et

en profil en long, et de faibles pentes) impose la réalisation de tunnels.

Les techniques à base de **coulis**, de **mortiers** ou de **bétons** contribuent à la réalisation d'un grand nombre d'ouvrages souterrains. Elles sont utilisées soit pour permettre ou faciliter la réalisation des ouvrages (injection, soutènement en béton projeté, prévoûte en béton, calage de voussoirs en béton, etc.), soit pour constituer le revêtement définitif des tunnels et des galeries.

## ■ Les différentes méthodes d'exécution des tunnels

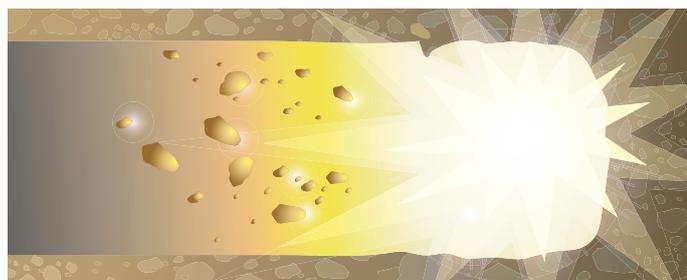
Quatre principales méthodes d'exécution des tunnels peuvent être utilisées. Le choix de la technique à employer résulte d'un compromis entre les exigences liées à la géométrie de l'ouvrage à réaliser, les caractéristiques du terrain à creuser, les spécificités du site et de son environnement et les contraintes géologiques et hydrogéologiques (présence ou non de la nappe phréatique).

- **Tunnel dans le rocher :**
  - méthode traditionnelle à l'explosif ;
  - méthode par attaque ponctuelle.
- **Tunnel en terrain difficile :**
  - méthode par prédécoupage mécanique ;
  - méthode de creusement au tunnelier.

Les progrès de ces dernières années dans les techniques de creusement, de soutènement et de revêtement permettent maintenant de réaliser des ouvrages dans tous les types de terrain.

### ● La méthode traditionnelle à l'explosif

Cette méthode est adaptée à une roche saine et homogène aux caractéristiques géotechniques élevées. L'abattage à l'explosif nécessite la perforation préalable de trous de mine (constituant la volée) à l'aide de marteaux perforateurs (robots de foration assistés par ordinateur permettant une automatisation intégrale des opérations). Le plan de tir doit être adapté aux caractéristiques du terrain afin d'assurer un découpage soigné de l'excavation et de limiter les ébranlements. Après excavation, la voûte est généralement renforcée par un soutènement, provisoire dans un premier temps à l'avancement des travaux, puis définitif lorsque l'ouvrage est entièrement creusé.



Le choix du soutènement provisoire est fonction de l'état des parois, suite aux dégradations provoquées par les tirs d'explosifs et aux déformations liées aux phénomènes de décompression du terrain.

Divers types de soutènement provisoire sont utilisés :

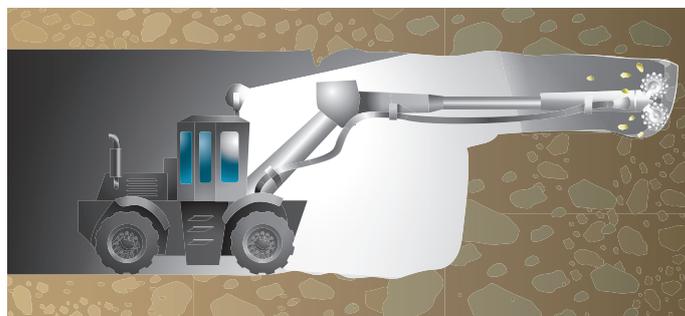
- boulonnage d'ancrage ;
- boulonnage associé à un treillis métallique ;
- boulonnage associé à une faible épaisseur de béton projeté (5 cm) renforcé par un treillis ;
- boulonnage associé à la mise en place d'un béton projeté jusqu'à 20 cm d'épaisseur ;
- mise en place de cintres métalliques.

La pose de soutènement est très souvent assurée par des robots. Le béton projeté à fibres métalliques se substitue, de plus en plus, au béton projeté associé au treillis soudé.

Le revêtement définitif est, en général, constitué par une voûte en béton armé, coulée en place sur un coffrage métallique.

### ● La méthode par attaque ponctuelle

Si la roche est friable, l'excavation est exécutée par une machine qui attaque ponctuellement et progressivement le sol (machine à attaque ponctuelle).

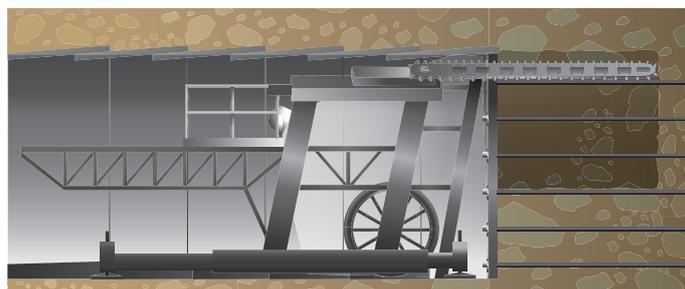


Ces machines automotrices sur pneus ou chenilles sont équipées de bras orientables, à l'extrémité desquels est placé l'appareil d'attaque (godet excavateur, brise-roche, tête de havage à axe longitudinal ou transversal). Les déblais sont évacués vers l'arrière. La paroi est équipée à l'avancement d'un soutènement provisoire. Cette technique est adaptée à tous les profils d'excavation.

### ● La méthode par prédécoupage mécanique

Cette méthode consiste à réaliser une succession de saignées d'épaisseur 15 à 30 cm et de 3 à 5 m de longueur dont le tracé suit le profil théorique de l'extrados de la voûte à réaliser, à l'aide d'une haveuse (machine de prédécoupage constituée d'un bâti support rigide auquel est fixé un chariot mobile pouvant se déplacer sur le contour de la section à excaver et équipé d'une scie spéciale).

La saignée est remplie de béton à prise rapide, mis en place par projection (béton projeté par voie sèche et éventuelle-



ment armé de fibres métalliques), afin de constituer une voûte porteuse dans le massif encaissant. Après durcissement, cette prévoûte en béton assure le soutènement de la cavité dont le terrassement peut-être entrepris en pleine section. Elle permet d'assurer, pendant les travaux, la sécurité des ouvriers.

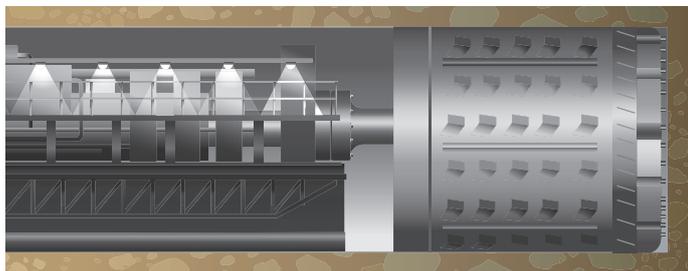
Chaque prévoûte à une forme légèrement tronconique pour permettre la réalisation de la prévoûte suivante (recouvrement entre voûtes successives: 0,50 m à 2 m).

**Nota:** cette méthode est développée par l'entreprise BEC PERFOREX (système breveté: prédécoupage du terrain avec mise en place de prévoûtes en béton performant).

Le béton utilisé est un béton à très haute résistance à court terme. Ces performances sont de l'ordre de 8 MPa à 4 heures et de 24 MPa à 24 heures.

### ● La méthode de creusement du tunnelier

Le creusement mécanisé des tunnels a connu des développements importants durant les vingt dernières années, en particulier grâce à l'apparition et aux évolutions technologiques des tunneliers. Ils ont permis d'élargir le domaine de réalisation des tunnels dans des conditions géologiques délicates, pour une grande gamme de diamètres et de terrains (sols meubles, roches tendres, argiles molles, terrains instables ou aquifères, etc.) en améliorant considérablement la productivité des chantiers.



**Le tunnelier** est une machine complexe qui assure en continu les fonctions suivantes :

- excavation du terrain;
- stabilisation et soutènement du front de taille;
- soutènement provisoire des parois du tunnel juste derrière le creusement;
- évacuation des déblais;
- mise en place du soutènement provisoire ou du revêtement définitif;
- guidage selon l'axe théorique prévu;
- avancement automatique à l'aide de vérins.

Il permet de creuser des tunnels de diamètre compris entre 2 et 15 mètres. Il est particulièrement adapté pour le creusement de terrains meubles sur de grandes longueurs (du fait de son coût d'investissement). Sa vitesse d'avancement est de l'ordre de 10 à 50 mètres par jour.

On distingue trois types de tunneliers, qui sont choisis en fonction de la nature du terrain à creuser.

- **Tunneliers avec machine d'attaque ponctuelle ou d'attaque globale** (tunneliers à appui radial, aléasseur). Ils sont utilisés dans le cas de terrain de tenue suffisante ne nécessitant pas de soutènement immédiat.



Partie avant du tunnelier.

- **Tunnelier à boucliers classiques** (à front ouvert, boucliers mécanisés à appui radial, à appui longitudinal, à appui mixte) qui assurent simultanément les fonctions d'excavation et de soutènement latéral du terrain. Ils comportent une structure cylindrique rigide (jupe) qui progresse au fur et à mesure du creusement et assure la stabilité du tunnel. Ils sont utilisés pour le creusement des terrains meubles.
- **Tunneliers à confinement** (ou à front pressurisé). Ces machines assurent simultanément un soutènement latéral et frontal du terrain. Elles sont utilisées dans les terrains alluvionnaires en présence d'eau (terrain meuble et aquifère). La partie avant du tunnelier (chambre d'abattage) peut être mise sous pression afin d'assurer la stabilité du front de taille. À l'intérieur de la chambre, une roue de coupe munie de dents au carbure de tungstène grignote le terrain. Les déblais sont évacués par marinage hydraulique à l'aide de conduite de marinage et de pompes. Selon le type de terrain, le confinement peut être assuré par de l'air comprimé, par pression de terre ou généralement par une boue bentonitique (la boue est formulée en fonction de la granulométrie et de la perméabilité du terrain). Le soutènement de



Vue générale d'un tunnelier.



Voussoir préfabriqué en béton, en cours de pose (vue du tunnelier).

l'excavation est exécuté par le tunnelier, soit par coulage de béton en place, entre le terrain et un coffrage intégré, soit plus fréquemment par la mise en place de voussoirs préfabriqués en béton. Le tunnelier avance en prenant appui sur la zone bétonnée réalisée à l'avancement.

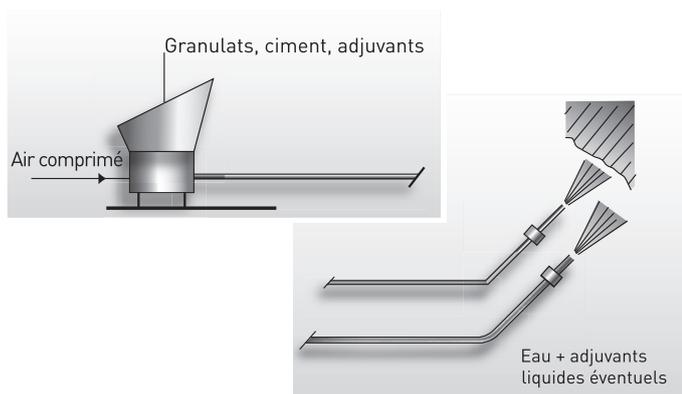
## Le béton projeté

Le **béton projeté** est un béton mis en œuvre à l'aide d'une lance, par projection sur une paroi sous l'impulsion d'un jet d'air comprimé.

Il existe deux techniques de projection : par voie sèche ou par voie humide. La différence entre les deux techniques est liée à la manière dont l'eau de gâchage du béton est introduite (soit lors de la fabrication du béton, soit lors de l'application du béton).

**Projection par voie sèche :** le mélange sec (granulats, ciment et éventuellement accélérateurs de prise et adjuvants) est fabriqué dans un malaxeur. Il est propulsé par de l'air comprimé le long d'une tuyauterie vers la lance de projection. L'eau arrive, séparément à la lance, en quantité nécessaire et réglable pour assurer l'humidification du mélange, juste au moment de la projection sur la paroi. Cette technique est utilisée, en particulier, pour des chantiers de faible importance

Projection par voie sèche

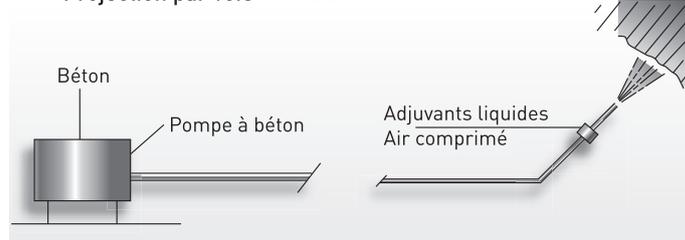


ou nécessitant des arrêts fréquents, ou lorsque la distance de transport entre la machine confectionnant le mélange et la lance de projection est importante.

**Projection par voie humide :** le mélange granulats-ciment-eau est malaxé dans une centrale puis stocké dans une trémie. Il est ensuite pompé le long d'une tuyauterie jusqu'à la lance de projection. La projection est assurée par de l'air comprimé, éventuellement associé à des adjuvants liquides. Cette technique est utilisée, en général, pour des chantiers nécessitant des rendements importants. Ce type de béton doit présenter une grande cohésion.

La technique du béton projeté permet de réaliser des couches de faibles épaisseurs, adhérentes au support, qui épousent parfaitement le profil de l'excavation. Elle est particulièrement adaptée à la réalisation d'ouvrages de sections variables ou d'intersections d'ouvrages et des chantiers sur lesquels il est difficile d'amener un outil coffrant.

Projection par voie humide



### Les applications du béton projeté

La technique du **béton projeté** est utilisée en travaux souterrains comme :

- **soutènement de parois de galeries ou de puits :** ce soutènement est mis en œuvre immédiatement après excavation du front de taille ou ultérieurement si le terrain est stable ;
- **soutènement provisoire du front de taille de tunnels en cours de creusement :** le béton projeté est, en général, utilisé en association avec des boulons, des cintres ou des treillis. Le béton peut, dans certains cas, être fibré.

**Le béton projeté est utilisé en travaux neufs ou en réparation d'ouvrages anciens** (réparations locales, confortements d'ouvrages, renforcement de structures).

### Les principaux modes de fonctionnement du béton projeté

Selon la nature du terrain et les caractéristiques géométriques de l'ouvrage, la technique du **béton projeté** peut assurer trois principaux types de soutènement.

- **Peau protectrice :** dans le cas d'ouvrages réalisés dans des terrains suffisamment résistants, le soutènement est constitué d'une faible épaisseur de béton projeté, mis en place à la surface de l'excavation et pouvant être renforcé par un treillis soudé ou des fibres.

Cette « peau protectrice » de 2 à 5 cm d'épaisseur ne joue pas de rôle structurant. La stabilité de l'excavation est assurée par le terrain seul, par un boulonnage du terrain ou par une coque plus épaisse en béton projeté mis en place ultérieurement. La peau protectrice a pour rôle de protéger les terrains en place contre une altération

superficielle (dessiccation du sol, migration d'eau interstitielle, etc.) en assurant le jointoiment des grains du sol. Les exigences de résistances mécaniques de ce type de béton sont faibles, mais il est indispensable que le béton présente une bonne adhérence au support et supporte son poids propre.

- **Peau résistante** : le béton projeté permet un renforcement local du terrain, dans le cas d'ouvrages réalisés dans des terrains peu résistants. Le béton s'oppose, dans ce cas, aux ruptures et déplacements locaux éventuels. Le soutènement est constitué d'une peau de béton projeté, associé à un treillis soudé, un boulonnage ou des cintres. Sa résistance mécanique à court terme doit être importante (de l'ordre de 10 MPa à 24 heures). Ces résistances élevées à court terme sont obtenues par utilisation d'accélérateur de prise au moment de la projection.
- **Anneau de structure** : le soutènement est constitué d'une coque épaisse en béton projeté. Cette coque joue un rôle structurel, participe à la stabilité d'ensemble de l'excavation. Le béton projeté est armé, fibré ou non armé. L'épaisseur minimale de l'anneau est fonction des contraintes d'exécution (hors profil, défauts d'excavation, etc.). La capacité de fluage du béton projeté au jeune âge lui permet de s'adapter aux déformations du terrain, en maintenant l'excavation en place.

### ● Les constituants du béton projeté

Le béton projeté est constitué d'un mélange :

- **de ciment** : le ciment conforme à la norme NF EN 197-1 est choisi en fonction de l'agressivité de l'environnement dans lequel est situé l'ouvrage. Les dosages courants sont compris entre 350 et 450 kg/m<sup>3</sup>.
- **de granulats** : le sable doit contenir le moins possible de grains plats. Le diamètre des plus gros granulats est limité à 15 mm.
- **d'eau** : le rapport E/C est, en général, compris entre 0,40 et 0,45.
- **d'adjuvants** : on utilise des adjuvants pour béton (superplastifiants) et des accélérateurs de prise ou des « raidisseurs » (silicate de soude) qui permettent d'assurer l'adhérence du béton sur le support, dès sa projection, et d'obtenir des résistances initiales élevées.
- **de fibres** : les fibres utilisées sont essentiellement métalliques (parfois synthétiques). Elles permettent, en particulier, d'améliorer la cohésion, la ductilité, la résistance et la tenue du béton projeté sur son support. Le dosage est de l'ordre de 35 à 50 kg/m<sup>3</sup>.
- **d'additions** : des fumées de silice sont parfois utilisées pour améliorer les performances du béton et faciliter la projection en rendant le béton plus collant.

La formulation du béton doit prendre en compte les pertes de matériau par « rebond » lors de la projection et être optimisée pour offrir une bonne aptitude à la projection. Il est préconisé d'augmenter, par rapport à la formulation théorique, le dosage en ciment de 10 à 20 % et pour les granulats, la proportion d'éléments fins.

Les performances, en général, spécifiées sont de l'ordre de 25 MPa pour la résistance à la compression à 28 jours.



© NFM - Technologies

Revêtement d'un tunnel en voussoirs préfabriqués en béton armé.

### ● La préparation du support

La préparation est fonction du type de support.

- **Projection sur le terrain** : il convient de décaper l'excavation des éléments instables et de projeter le béton le plus rapidement possible après l'excavation.
- **Projection sur béton projeté jeune** : la nouvelle projection doit être effectuée dans les 72 heures après la fin de la prise de la couche précédente.
- **Projection sur support existant en béton ou en maçonnerie** : la préparation consiste à repiquer le support afin d'éliminer les éléments instables puis à le nettoyer par projection d'eau à haute pression.

Dans tous les cas, il convient de mouiller le support juste avant la projection pour éviter qu'il n'absorbe une partie de l'eau du béton frais.

### ■ Les techniques de présoutènement

Les techniques de **présoutènement** permettent de traverser des zones difficiles, dans des terrains de faible cohésion.

Le **présoutènement** est un soutènement mis en place à la périphérie de la section à excaver en avant du front de taille. On distingue trois types de présoutènement.

- **La voûte parapluie** : c'est une voûte constituée de tubes métalliques disposés en couronne suivant le contour de la section à excaver et prenant appui sur des cintres.
- **La prévoûte** : c'est une voûte réalisée dans le terrain en avant du front de taille. Elle est constituée soit de béton mis en œuvre dans une saignée réalisée par prédécoupage mécanique, soit de colonnes de « jet grouting » juxtaposées.
- **L'anneau renforcé** : la technique consiste à renforcer un anneau de terrain, en avant de l'excavation, par des boulons injectés de coulis de ciment.



© NFM - Technologies

Revêtement d'un tunnel en béton coffré.

## ■ Les techniques de soutènement

Le creusement d'un tunnel peut nécessiter, selon la technique utilisée, la nature du terrain et les dimensions de l'ouvrage, la réalisation d'un soutènement de l'excavation.

Ce soutènement permet d'assurer la sécurité des ouvriers intervenant sur l'ouvrage, de limiter les déformations du terrain, de stabiliser les parois pendant la réalisation des travaux et de renforcer la stabilité définitive de l'excavation.

Les techniques les plus couramment utilisées sont :

- **des soutènements métalliques** : cintres métalliques, blindage, boulons ;
- **des soutènements en béton** : béton projeté, prévoûte en béton ;
- **des soutènements mixtes** : cintres réticulés associés à du béton projeté. Le cintre permet de suppléer la faiblesse de résistance du béton aux jeunes âges.

Une nouvelle méthode de soutènement s'est développée ces dernières années. Elle permet de garantir la stabilité de l'excavation en créant un anneau porteur mais déformable de terrain armé. L'excavation est réalisée en pleine section ou en demi-section. Le soutènement, mis en place immédiatement après le creusement, est constitué de boulons armant le terrain et d'une coque mince en béton projeté, armée d'un treillis soudé ou de fibres métalliques, et éventuellement de cintres. Ce soutènement léger présente une souplesse suffisante pour accepter les déformations du terrain.

Le revêtement de l'ouvrage est mis en œuvre ultérieurement par plots successifs.

## ■ Les revêtements en béton des tunnels

Le **revêtement d'un tunnel** ou d'un ouvrage souterrain est la structure résistante placée au contact de l'excavation. Il permet d'assurer la stabilité mécanique à long terme de l'ouvrage et de contribuer à son étanchéité (protection contre les venues d'eau dans le cas d'ouvrage réalisé dans des terrains aquifères). Il peut être visible de l'intérieur de l'ouvrage ou protégé par un habillage.

On distingue deux principales techniques de réalisation des revêtements selon le procédé d'excavation utilisé :

- **Revêtement en béton coffré non armé.**
- **Revêtement en voussoirs préfabriqués en béton armé.**

Le profil en travers type d'un revêtement est, en général, de forme circulaire (ce qui permet de résister le mieux possible en compression aux efforts exercés par le terrain).

Dans le cas d'un terrain présentant de bonnes caractéristiques mécaniques, d'autres types de sections sont possibles (section constituée d'une voûte, de piédroits et d'un radier).

### ● Revêtement en béton coffré non armé

Après excavation du terrain par la méthode traditionnelle à l'explosif, par attaque ponctuelle ou par prédécoupage mécanique, le revêtement est, en général, constitué d'une voûte en béton coulée en place.

Ce revêtement est généralement non armé (sauf éventuellement dans les zones particulièrement sollicitées : jonction radier piédroit). L'épaisseur du revêtement, fonction du type de terrain excavé, varie entre 30 et 45 cm.

Le béton a, en général, une résistance en compression de l'ordre de 30 MPa. Le bétonnage est réalisé par plots d'une dizaine de mètres de longueur après mise en place, au contact de l'excavation, d'un complexe d'étanchéité.

Les principales spécifications du béton portent sur la maniabilité à l'état frais, afin de garantir un parfait remplissage du coffrage et sur la compacité, afin de résister à l'agressivité du milieu ambiant. Ces performances mécaniques doivent permettre la réalisation d'un plot par jour (ordre de grandeur des résistances requises : 10 MPa à 24 heures).

La réalisation d'ouvrages à gabarit limité, d'accès difficile ou de géométries complexes, nécessite la mise en œuvre du béton par pompage. Dans ce cas, les critères de formulation du béton doivent prendre en compte sa pompabilité, son homogénéité et l'absence de ségrégation en extrémité de conduite ainsi que la durée pratique d'utilisation en fonction de la distance de pompage.

On utilise aussi, de plus en plus, des **bétons autoplaçants** qui facilitent la mise en œuvre du béton et permettent d'obtenir, sans vibration, un parfait remplissage des coffrages.

### ● Revêtement en voussoirs préfabriqués en béton armé

Le revêtement de tunnel, foré à l'aide d'un tunnelier, est composé d'une succession d'anneaux juxtaposés mis en place à l'arrière du bouclier pour assurer immédiatement la stabilisation des terres. Chaque anneau est constitué d'un assemblage d'éléments appelés **voussoirs préfabriqués en béton armé**, d'épaisseur courante de 20 à 30 cm.

Les anneaux, d'une longueur de 0,60 à 2 m ont des faces transversales parallèles (anneaux droits) ou non parallèles (anneaux universels). Les anneaux universels permettent, par rotation de la position d'un anneau par rapport au précédent, de suivre toutes les variations de tracé de l'excavation.

Les anneaux sont constitués de 5 à 10 voussoirs courants, de deux voussoirs de contre-clé et d'un voussoir de clé (de forme trapézoïdale). L'étanchéité entre voussoir est, en général, assurée par des profilés compressibles ou hydrogonflants.



© NFM - Technologies

#### Aire de stockage de voussoirs préfabriqués en béton.

Les voussoirs sont équipés de réservations qui permettent leur assemblage entre eux et aux anneaux adjacents par des boulons ou par des tire-fonds.

Les voussoirs préfabriqués peuvent être réalisés en bétons renforcés de fibres métalliques. Ce type de béton permet, en particulier, d'améliorer la résistance au choc et le comportement vis-à-vis de la corrosion des voussoirs, et de simplifier le processus de fabrication industrielle des voussoirs (simplification voire suppression des ateliers de façonnage et d'assemblage des armatures).

Pour des voussoirs de grande taille et soumis à des sollicitations élevées, les voussoirs peuvent être armés par une solution mixte (association de fibres métalliques et d'armatures traditionnelles).

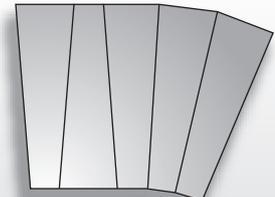
Des essais réalisés sur des bétons armés avec des fibres polypropylènes (à des dosages de 1,5 à 2 kg/m<sup>3</sup>) ont démontré l'efficacité de ces fibres pour diminuer les risques d'éclatement du béton lorsqu'il est soumis à des températures élevées.

Les ciments utilisés pour la confection des bétons des voussoirs sont, de préférence, de type CEM I. Dans le cas de tunnels réalisés dans les milieux agressifs, des ciments de caractéristiques complémentaires PM et ES sont conseillés. Le vide annulaire, situé entre l'extrados de l'anneau du revêtement et l'excavation, doit être soigneusement rempli par un produit de bourrage. Ce produit est destiné, à court terme, à caler le revêtement et à éviter les déplacements des voussoirs et le mouvement éventuel du terrain excavé. À long terme, il permet de répartir uniformément les efforts engendrés sur le revêtement par le terrain.

Cette opération s'effectue par **injection d'un coulis de ciment** (parfois associé à de la bentonite) simultanément à l'avancement du bouclier et à la mise en place des voussoirs. Ce coulis de bourrage est injecté au travers d'orifices localisés dans les voussoirs. Il doit être suffisamment fluide lors de la mise en œuvre pour remplir parfaitement le vide et sa cinétique de prise doit être adaptée aux conditions de chantier.

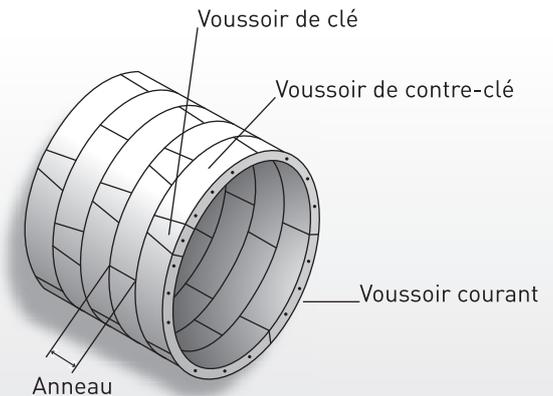


Anneau universel



Vue en plan

#### Succession d'anneaux universels.



#### Revêtement en voussoirs préfabriqués en béton armé : schéma de principe d'assemblage.

### ■ Les habillages des tunnels à l'aide de coque mince en béton

Les « **habillages** » des tunnels sont des structures légères destinées :

- **dans le cas des tunnels non revêtus** : à assurer la sécurité des usagers contre les chutes éventuelles de blocs du terrain ;
- **dans le cas de tunnels revêtus** : à améliorer l'esthétique de l'ouvrage et le confort des usagers, et à faciliter le nettoyage des parois.

Cet habillage peut être réalisé, en travaux neufs ou en travaux de réfection, à l'aide d'une coque mince en béton qui est, soit accrochée à la voûte, soit autostable et reposant sur des piliers en béton.

Les traitements architectoniques du béton de la coque permettent d'améliorer l'ambiance intérieure de l'ouvrage.

### ■ Les techniques de réparation des tunnels

Il existe de nombreuses techniques pour réaliser les travaux de réparation ou d'entretien des tunnels. Le choix de la technique est fonction du type d'ouvrage et de l'importance des dégradations.

- **Les injections** : pour la réhabilitation des ouvrages (l'étanchement des revêtements).
- **Le boulonnage** : pour l'amélioration par des armatures des caractéristiques du terrain.

- **Le béton projeté**: pour le renforcement des revêtements (béton projeté de fibres métalliques ou associé à un treillis soudé).
- **Le renforcement par anneaux séparés**: par la mise en place d'anneaux de voussoirs en béton armé dans les zones dégradées.
- **La reconstruction du revêtement**: par la mise en place d'un nouveau revêtement en béton coulé en place.
- **Le chemisage du revêtement**: par la mise en place de coques préfabriquées de faible épaisseur (liaison avec l'ancien revêtement à l'aide d'un coulis de ciment injecté).

## ■ Les perspectives de développement des travaux souterrains

Les travaux souterrains devraient, dans les prochaines décennies, se développer en France, en particulier pour répondre aux besoins considérables en équipement en matière **d'eau et assainissement** pour la réalisation :

- de stations d'épuration souterraines en site urbain ;
- de réseaux d'adduction et de collecte des eaux ;
- de tunnels réservoir ou de bassins d'eaux pluviales (pour lutter contre les inondations et retenir les pollutions dues aux matières en suspension, en cas d'orages).

L'urbanisation croissante, l'augmentation de la densité du tissu urbain et de la valeur de l'espace en zone urbaine, la raréfaction des espaces disponibles, le souci de réduire les nuisances des riverains lors des travaux, la sensibilité de la population à l'environnement vont imposer le développement de réseaux routiers urbains, de parkings et d'infrastructures de transports en souterrain.

Le recours aux techniques des travaux souterrains va s'imposer pour des raisons écologiques. D'abord par volonté de ne pas surcharger l'espace urbain, de supprimer les impacts sur l'environnement et de préserver les paysages naturels. Ensuite par souci de protection de l'environnement en surface, de réduction des nuisances en cours de travaux et de préservation des espaces verts.

Ces techniques permettent de répondre aux problèmes de plus en plus complexes posés par l'insertion d'ouvrages dans l'espace des grandes agglomérations urbaines, en



L'une des deux gares souterraines du RER E.

utilisant la protection naturelle (mécanique, thermique, hydraulique) apportée par le sol et en concevant, sans aucun obstacle physique, des ouvrages en trois dimensions.

Les techniques de reconnaissances géotechniques préalables, de suivi en cours de chantier et le développement des outils d'analyses mathématiques, permettent de limiter désormais les risques lors de la réalisation des ouvrages, de diminuer les incertitudes sur les coûts et de mieux maîtriser les aléas de chantier.

Les évolutions des techniques et des matériels de creusement (en particulier des tunneliers) permettent d'envisager le creusement de tunnels de plus en plus longs dans des conditions géologiques de plus en plus délicates (terrain hétérogène, sol meuble et aquifère, etc.) avec des cadences d'excavation de plus en plus élevées, une plus grande fiabilité et une plus grande sécurité pour les ouvriers. ●

### Documents de référence - Sources d'information

Dossier pilote des tunnels (CETU - juillet 1998)

Recommandations de l'AFTES: Tunnels et ouvrages souterrains

**CIM** béton

CENTRE D'INFORMATION SUR  
LE CIMENT ET SES APPLICATIONS



7, Place de la Défense 92974 Paris-La-Défense cedex - Tél. : 01 55 23 01 00 - Fax : 01 55 23 01 10

Email : [centrinfo@cimbeton.net](mailto:centrinfo@cimbeton.net) - Site Internet : [www.infociments.fr](http://www.infociments.fr)