

Ouvrages souterrains ferroviaires

(sous module I.2)

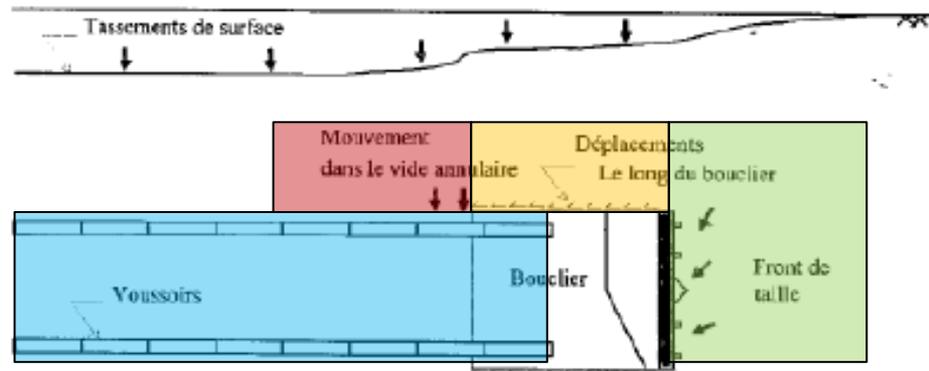
complément tunnelier

Animateur P. Le Frapper
Date 08/01/2016
Lieu Paris (visite tunnelier ligne 14)

Tassement des ouvrages souterrains

Epaisseur de la jupe
Performance du joint de queue

Guidage et vitesse du tunnelier
Rugosité de la jupe



Résistance des voussoirs
Agressivité du terrain

Nature du terrain
Charge hydrostatique
Hauteur de couverture
Maîtrise du confinement

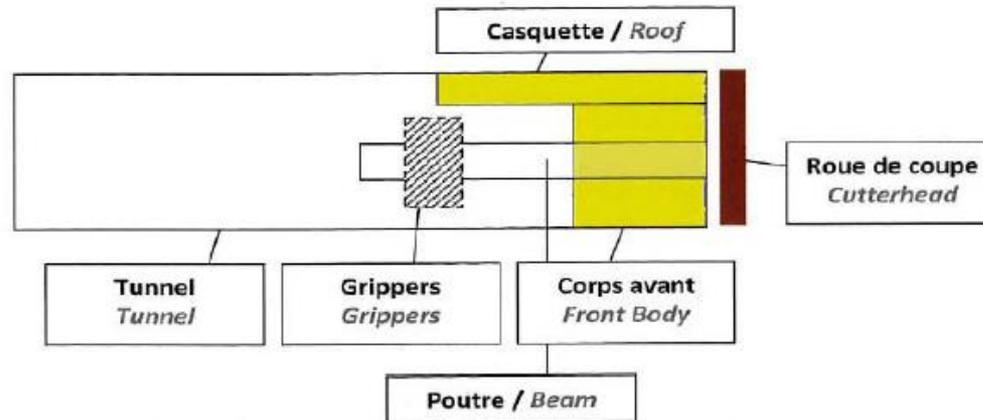
Tunnelier pleine section ?

Outil intégré=
Tête de forage circulaire
+ propulsion et d'appui
+ soutènement
+ marinage.

Tunnelier pleine section ?

La famille: Roche dure

-Tunnelier Roche dure (Hard Rock TBM) ;

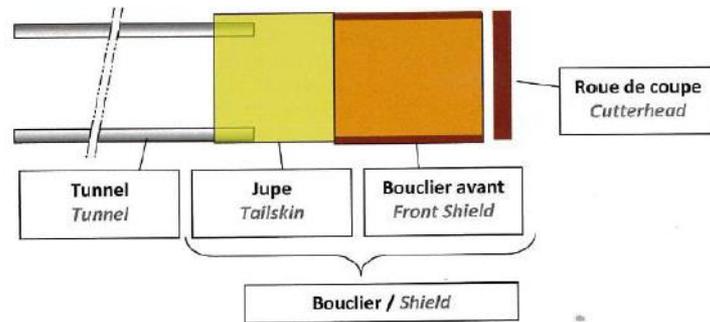


Tunnelier pleine section ?

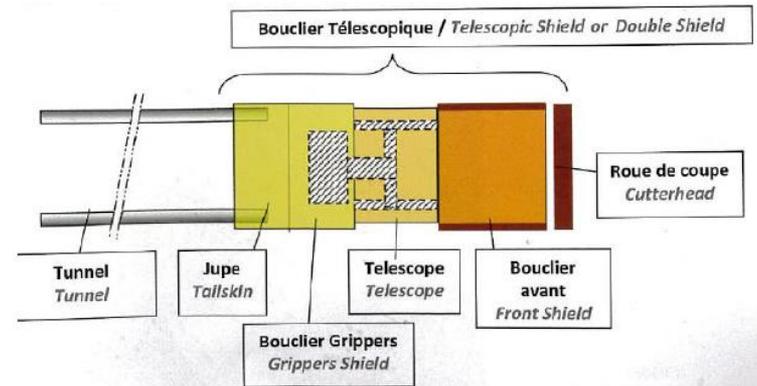
La famille: Bouclier

-Tunnelier à Bouclier :

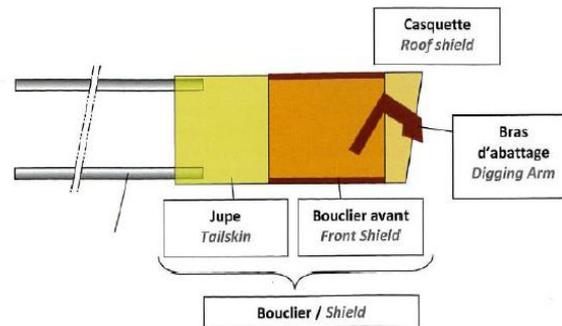
- simple jupe (TBM Single Shield) ;



- double jupe (TBM Double Shield) ;



- à bras d'abattage (TBM With Backhoe) ou de démantèlement (TDM : Tunnel Dismantling Machine);



Tunnelier Roches Dures

Roche imperméable, stable et résistante
(Quartz, Basalt, Granite...)



Front Ouvert

Roue de coupe massive
Grippers et Stocke
Pas de soutènement
Berline

Tunnelier à Bouclier



Roue de coupe : 1% de la longueur et 9% de la masse du tunnelier



12% de la longueur et 54% de la masse du tunnelier



Tunnelier= Roue de coupe + Bouclier + Train suiveur

bouclier avant

Bouclier

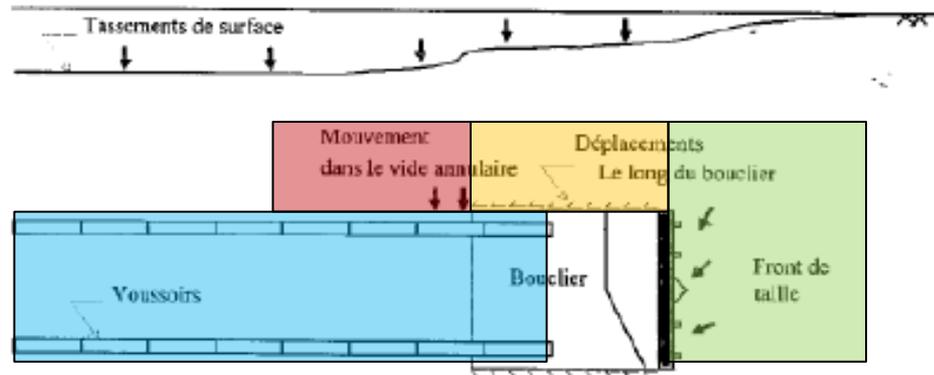


bâti de la roue de coupe et chambre de confinement



Siège de l'extraction et de la pose du revêtement

Jupe



sol + aquifère

Confinement du front de taille

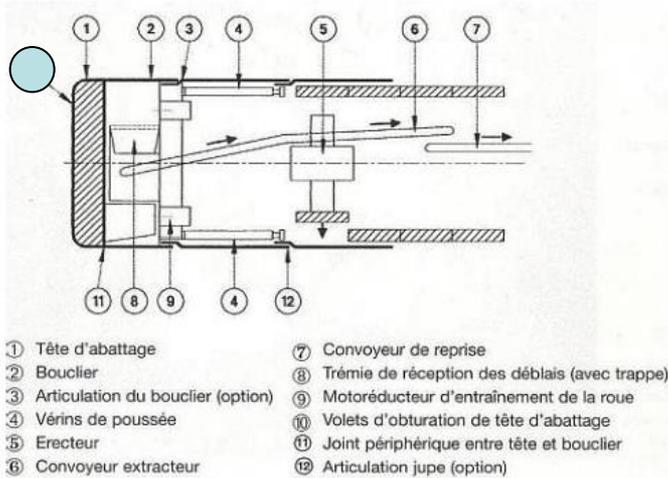
Injection de boue bentonitique

Injection d'un mortier de collage

Voussoir durable

Tunnelier Bouclier à Front FERME à pression mécanique

Sol meuble et homogène *faible perméabilité



Principe de soutènement du front de taille:

Mise sous pression des terres abattues dans la roue de coupe en faisant varier l'ouverture des volets

Roue de coupe équipée de volets

Vérins de poussée

Convoyeur à bande

Voussoir

*organique, argile et limon

Tunnelier Bouclier à Front FERME à pression d'air

Sol meuble et homogène *faible perméabilité



Principe de confinement du front de taille:

- Injection d'air comprimé dans la chambre d'abattage équipée de capteur de pression:
- Pression contrôlée depuis un poste de pilotage

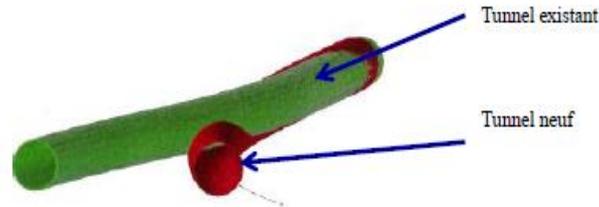


Bras d'abattage
Vérins de poussée
Convoyeur à bande
Voussoir

*organique, argile et limon

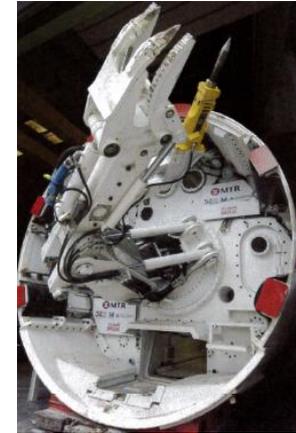
Tunnelier Bouclier à Front FERME à pression d'air ou OUVERT

(TDM: Tunnel Dismantling Machine)



Principe de démontage d'un tunnel:

- démolition au brise roche du 1^{er} voussoir
- saisi et évacuation des voussoirs;
- injection de béton en lieu et place de l'anneau déposé.



Bras de démolition et de dépose de voussoirs

Vérins de poussée

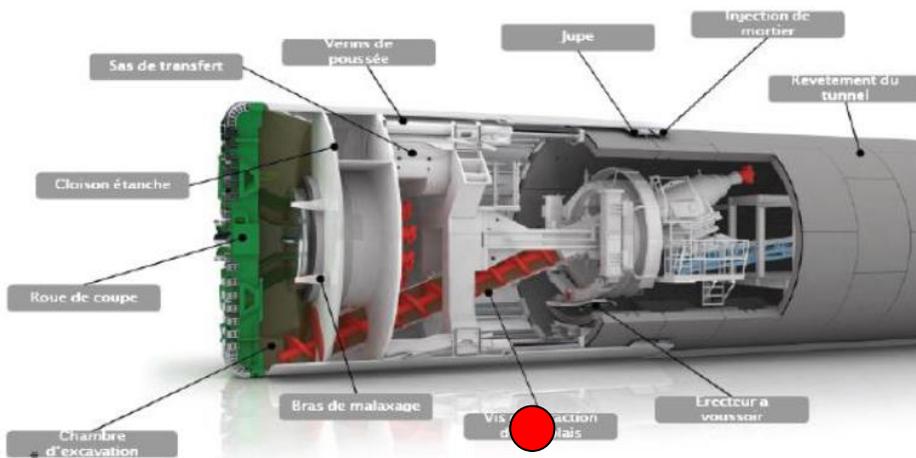
Convoyeur à bande

Béton projeté

Tunnelier Bouclier à Front FERME à pression de terre ou OUVERT (1/3)

(EPB shield : Earth Pressure Balance shield)

Sol organique à fin* imperméabilité



Principe de confinement du front de taille:

-variation du volume de terre abattue dans la chambre d'abattage équipée de capteur de pression:

-Pression réglée via le convoyeur à vis (débit d'évacuation du marin) ●

-Pression contrôlée depuis un poste de pilotage

Roue de coupe

Vérins de poussée

Convoyeur à bande

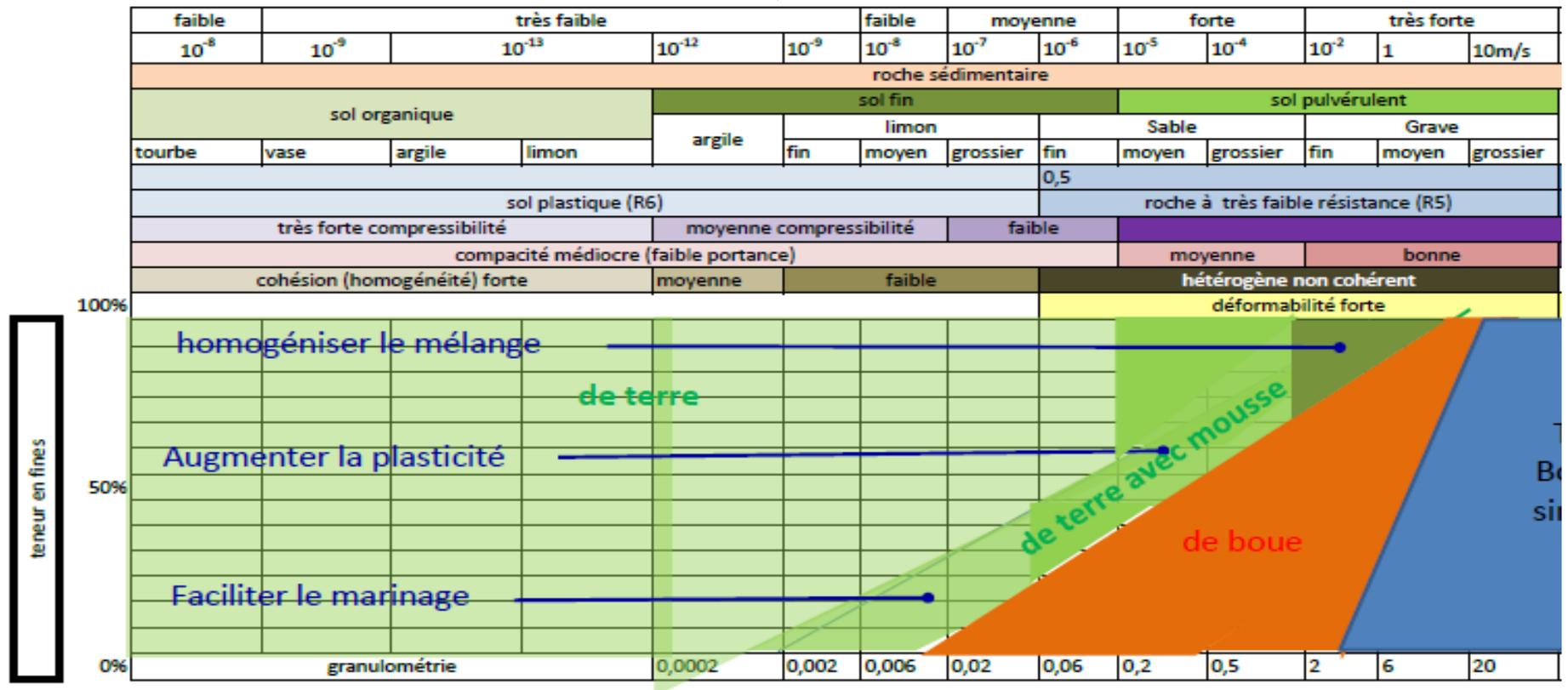
Voussoir

*organique, argile et limon

Tunnelier Bouclier à Front FERME à pression de terre ou OUVERT (2/3)

(EPB shield : Earth Pressure Balance shield)

Excaver aussi dans: **Sable et Gravel**



Base moussante (tensioactif + air + eau + coagulateur (polymère hydrosoluble))

Tunnelier Bouclier à Front FERME à pression de terre ou OUVERT (2/3)

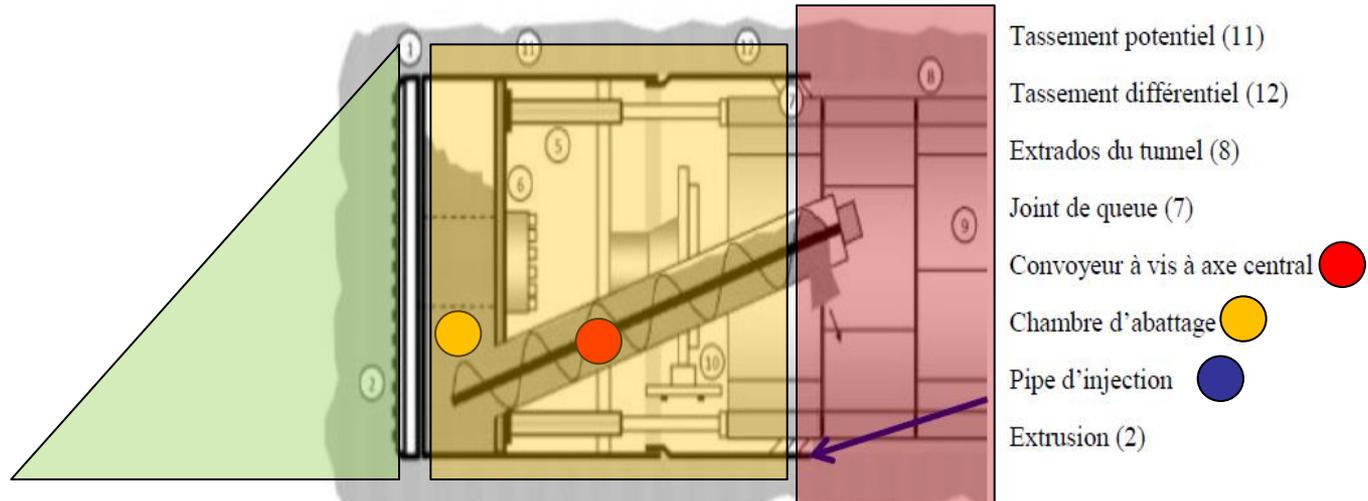
(EPB shield : Earth Pressure Balance shield)

Tassement le long du bouclier:

-Injection de bentonitique via une pompe fixe ou mobile

Tassement différentiel:

-Injection d'un mortier de collage via les pipes dans l'épaisseur de la jupe



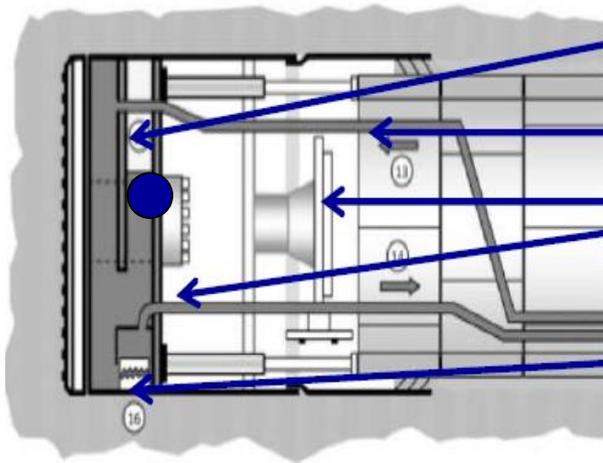
Tassement en avant du front de taille

-Pression dans la chambre d'abattage régulée par le convoyeur à vis (ou vis d'Archimède)

Tunnelier Bouclier à Front FERME à pression de boue (1/3)

(SS: Slurry shield)

Sol fin* moyenne à forte perméabilité



Chambre intermédiaire (bulle d'air)

Circuit d'alimentation en bentonite neuve

Erecteur

Circuit d'évacuation de la bentonite chargée

Mélangeur de bentonite et de matériaux excavés

Principe de confinement du front de taille:

-Injection d'une boue bentonitique dans la chambre d'abattage équipée de capteur de pression:

-Pression régulée via une bulle d'air sous pression

-Pression contrôlée depuis un poste de pilotage

Roue de coupe

Vérins de poussée

Convoyeur à bande

Voussoir

Centrale de fabrication et de traitement de la boue

Tunnelier Bouclier à Front FERME à pression de boue (1/3)

(SS: Slurry shield)

Gestion des déblais en surface



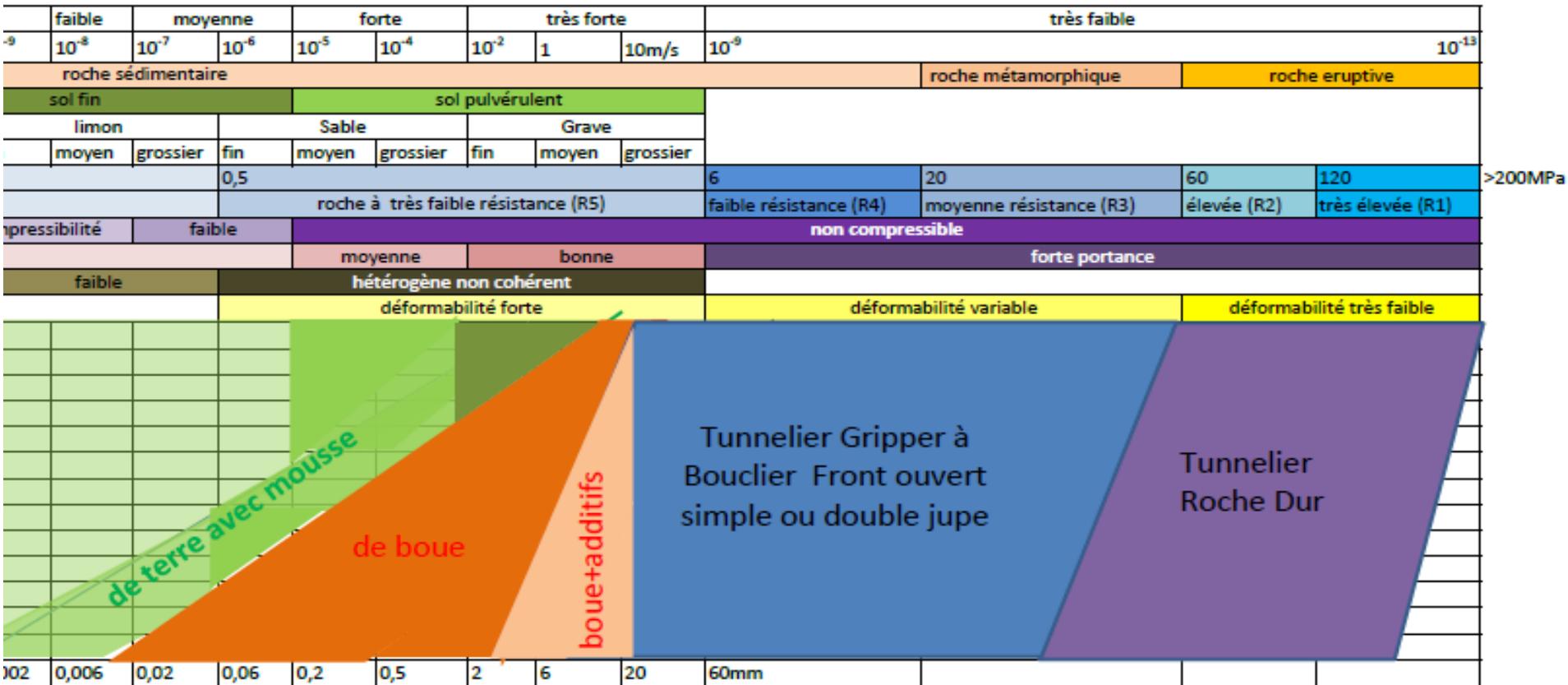
Tunnelier à Pression de Terre Tunnelier à Pression de boue

Volume de boue pompée = 10 X volume de matière excavée

- Nettoyage de la boue chargée via des séparateurs granulométriques;
- Clarificateur de l'eau avant de la réutilisée dans la fabrication de la boue bentonitique;
- Essorage du marin et évacuation de galette solide
- Centrale de pompage du circuit d'alimentation en boue neuve et du circuit de retour de la boue chargée en matière d'excavation.

Tunnelier Bouclier à Front FERME à pression de boue (3/3)

(SS: Slurry shield)



La rencontre d'un terrain de grave grossières à très forte perméabilité peut déstabiliser le front taille (diminution du gradient de stagnation):

-additif tel que l'argile mais aussi des polymères hydrosolubles, des granulés de bentonite...

Tunnelier: Organe de creusement ROUE DE COUPE (1/3)

- Support des outils de coupe + collecte des matériaux excavés



Tête en étoile

Terrain cohérent mais pas résistant
Couple faible: axe central



Périphérique (godet)

Terrain résistant

Couple important : couronne d'entraînement



Radiale

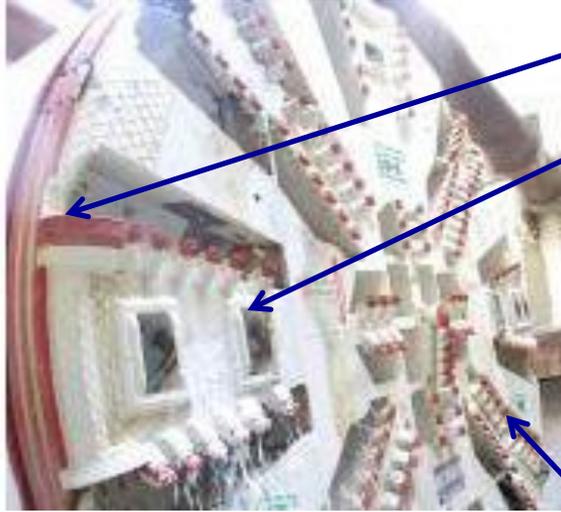
terrain meuble (confinement)

Sol fin (argile limon) vitesse de rotation rapide 15 à 30m/mn

Sable et grave vitesse lente 8 à 15m/mn



Tunnelier: Organe de creusement OUTIL ROUE DE COUPE (2/3)



Racleur : entraîne les déblais jusqu'à la chambre d'abattage

Sabot: stabilise la roue de coupe dans le trou foré.

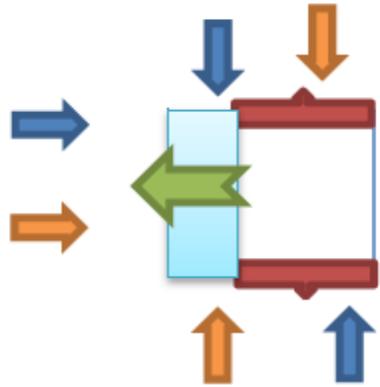


Couteau, pic ou dent : cisaille le terrain meuble

Disque ou molette : crée des sillons dans la roche

Le nombre, la dimension, la disposition et l'orientation des outils de coupe (molette et couteau) dépendent de la nature des différents terrains rencontrés.

Tunnelier: Organe de creusement APPUI ROUE DE COUPE (3/3)



Pressions statique du terrain s'opposent 3 forces
- PENETRATION + FROTTEMENT + CONFINEMENT .

Ces forces sont reprises :

-Terrain résistant par appuis radiaux et verticaux (gripper) et longitudinaux (stocke)



gripper radial



gripper vertical

-Terrain meuble par appuis longitudinaux (vérins de poussée)

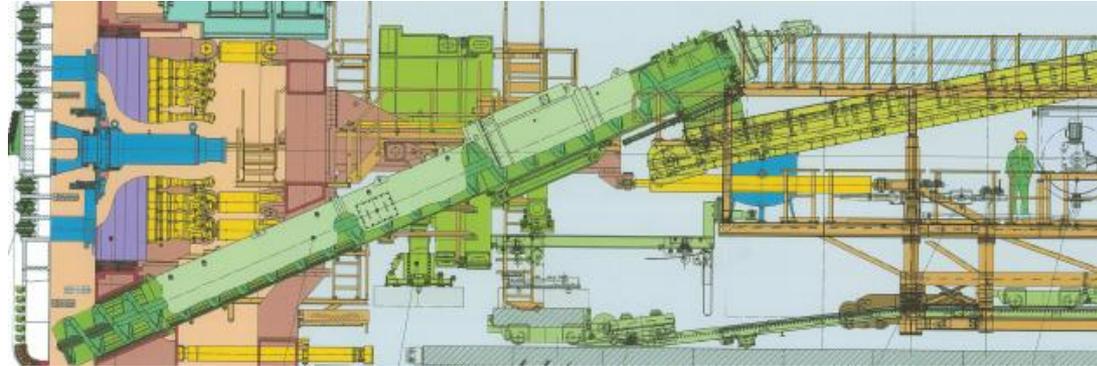


Tunnelier: Organe de gestion des déblais EXTRACTION(1/3)

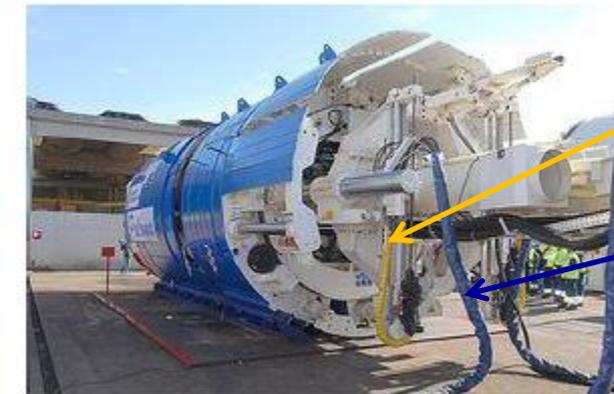
Elles sont dimensionnées (diamètre et longueur) en fonction:

- de la nature des terrains à rencontrer: vitesse critique minimale afin d'éviter le bouchon;
- du planning directeur du projet: vitesse d'avancement maximale.

Marin pâteux: Convoyeur à vis ou vis d'Archimède

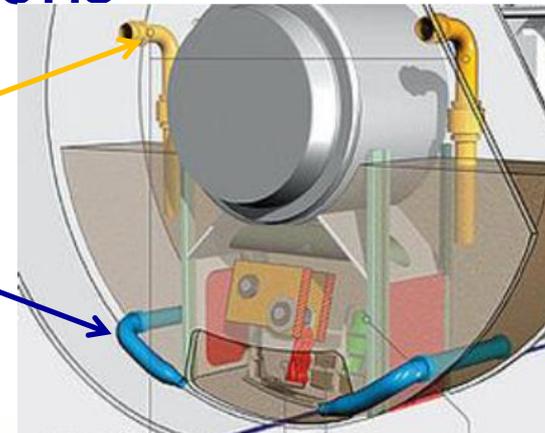


Marin hydraulique (boue chargée): Canalisations



Alimentation en boue neuve

Extraction boue chargée

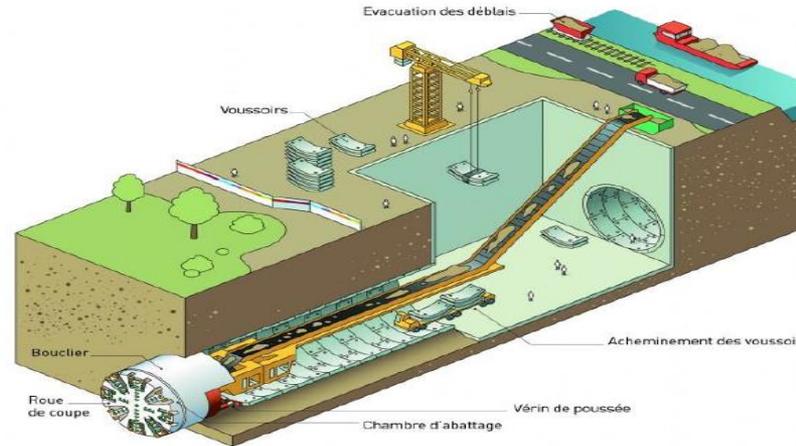


Tunnelier: Organe de gestion des déblais TRANSPORT(2/3)

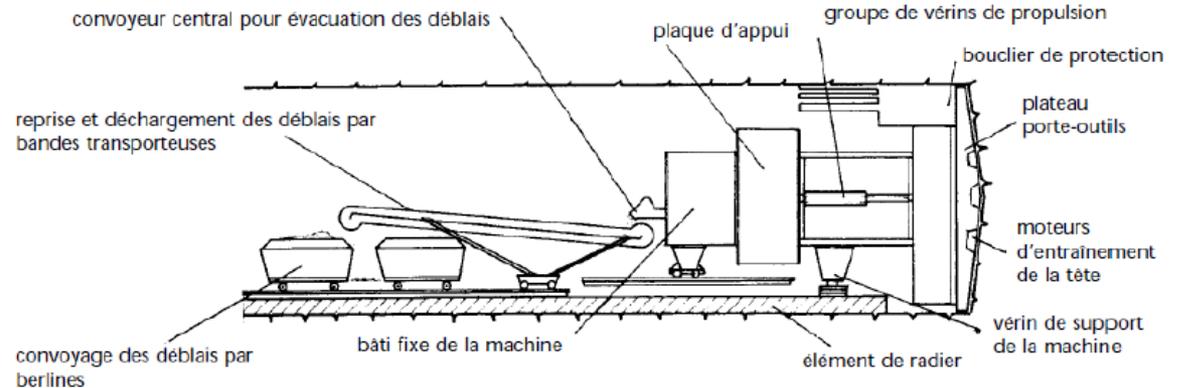
Tunnelier fermé et ouvert roche tendre: **Convoyeur à bande dans le tunnelier et dans le tunnel**



Construction du tunnel



Tunnelier ouvert et Roche Dure: **Berline (train de marinage) venant aux pieds de la roue de coupe**



Tunnelier: Organe de gestion des déblais EVACUATION(3/3)

Marin pâteux: Evacuation directe



Sortie du tunnel par un convoyeur à vis vertical

Transport dans un bac de stockage

Evacuer par voie routière ou fluviale

Marin hydraulique: Evacuation différée

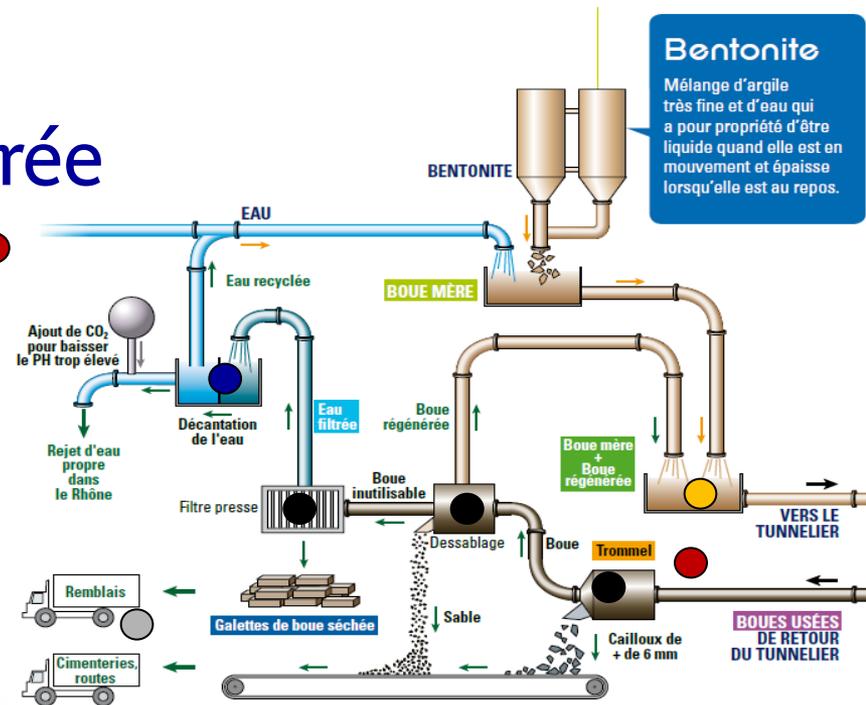
Sortie du tunnel par une canalisation d'une boue chargée ●

Séparation granulométrique (Trommel, hydrocyclone et filtre-presse) ●

Evacuation de galette solide (déblais) ○

Clarification de l'eau ●

Fabrication d'une boue avec de l'eau et de la boue régénérée de l'eau claire et de la boue « neuve » puis pompage vers la chambre d'abattage du tunnelier ○



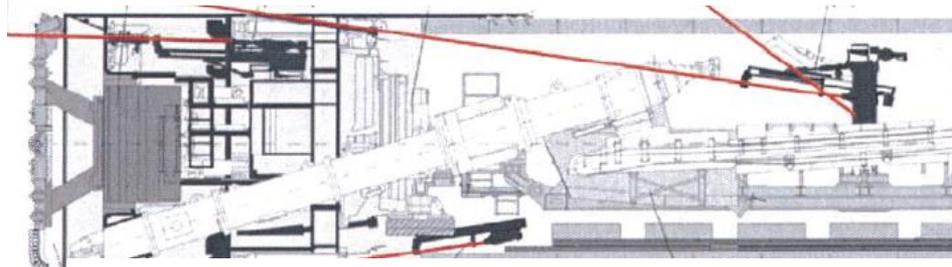
Tunnelier: Organe de soutènement RECONNAISSANCE (1/8)

En plus d'une reconnaissance géotechnique en amont des travaux (campagne géotechnique, essai en laboratoire...) des reconnaissances en phase travaux depuis le tunnelier sont possibles:



Sondeuse axiale

Sondeuse arrière



Sondeuse reconnaissance inférieure

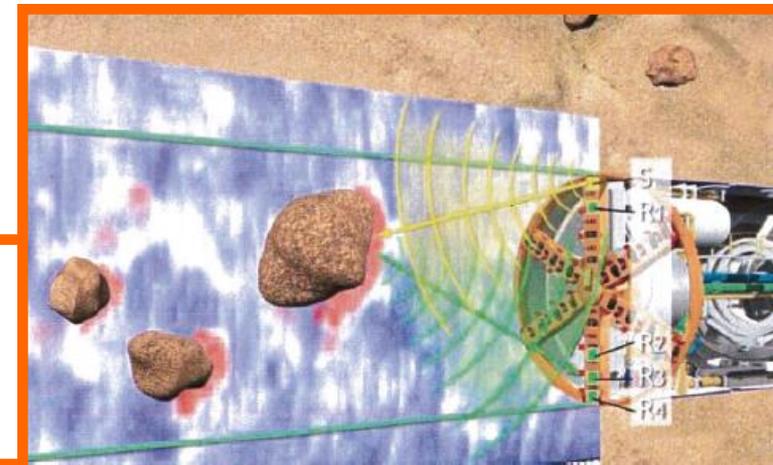


Méthode Directe:

Observation du front de taille
(tunnelier ouvert)
Paramètre machine
Forage de carottes et destructifs

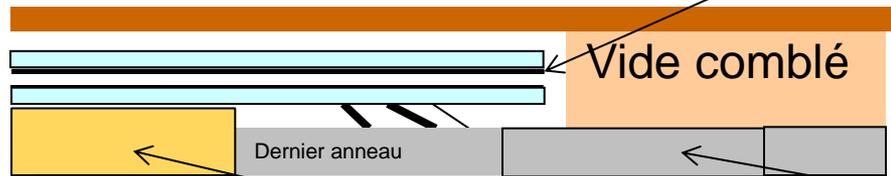
Méthode Indirecte:

Sismique
Radar
Résilience électrique



Tunnelier: Organe de soutènement INJECTION (2/8)

Comblement du vide* (environ 60m^3), différence entre le diamètre de l'excavation et le diamètre extérieur (extrados) du revêtement (anneau de voussoir du tunnel).

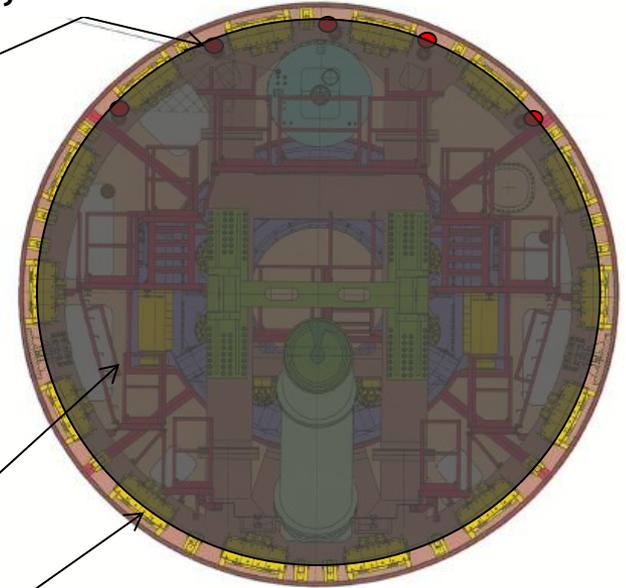


● Pipes d'injection

jupe

Voussoirs

vérins de poussée



Ce mortier (sable, ciment cendres volantes, chaux) ou un coulis (ciment et bentonite) de bourrage permettra:

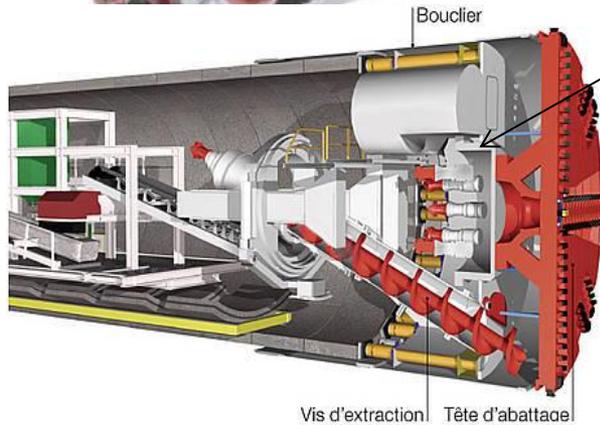
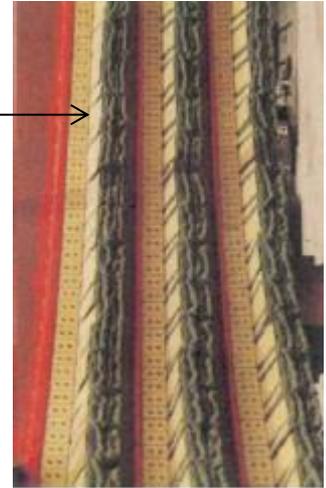
- remplir le vide afin d'éviter des tassements durant la phase de réalisation puis au cours de la phase d'exploitation du tunnel;
- transmettre de façon continue les efforts statiques du terrain afin éviter des points de déformation sur des voussoirs;
- contribuer à l'étanchéité du tunnel.

*Ce vide est nécessaire car il permet en phase de creusement d'éviter les efforts de frottement et réaliser des courbes

Tunnelier: Organe de soutènement JOINT D'ETANCHEITE (3/8)



-Joints DE QUEUE souples et renouvelable: brosses métalliques entre les lesquelles est injectée en permanence une graisse épaisse spéciale.



-Joint DE COURONNE souple où est injectée en permanence une graisse épaisse spéciale.



Ces joints assurent la protection de la zone de travail en évitant:

- une chute de la pression de confinement;
- un risque de débouillage (inondation du tunnelier)

Tunnelier: Organe de soutènement VOUSSOIR(4/8)

Le voussoir est conçu en fonction:

- du diamètre utile du futur tunnel;
- de la force nécessaire d'appui du tunnelier (absorption de la force des vérins de poussée);
- du terrain encaissant (pressions existantes, agressivité du milieu naturel, agressivité des pollution...)



Fabriquer dans moules spécifiques; ils sont en béton armé ou en béton avec de la fibre métallique.

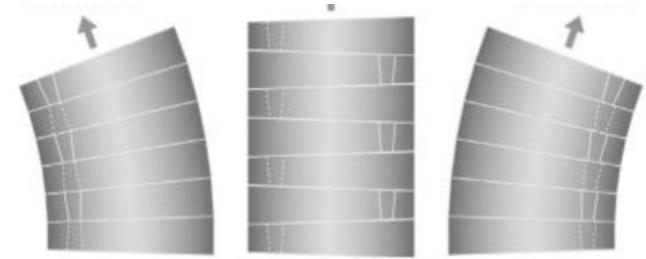
Un avancement classique d'un tunnelier à confinement est de 12m/ J soit environ 6 anneaux soit 42 voussoirs et 92 tonnes de terre à excaver.

L'emprise du chantier souvent réduite en ville est en mesurer mesure de stocker terre et voussoir durant 2 jours.



Tunnelier: Organe de soutènement VOUSSOIR (5/8)

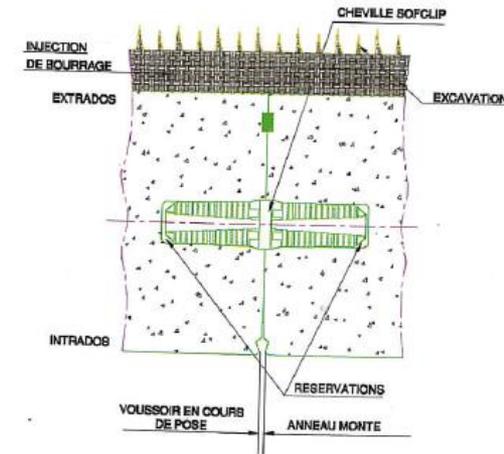
Le voussoir est avec pan incliné ou avec une largeur différente à chaque extrémité afin de permettre, lorsqu'il sont assemblés en anneau, d'avoir, par l'assemblage des anneaux entre eux, un tunnel droit ou en courbe.



Tenon Gorge Joint d'étanchéité Boulon courbe ou tire-fond courbe d'assemblage mécanique



Connecteur Connexion plastique entre anneau



Chaque voussoir est numéroté (n° d'ordre par rapport à un numéro d'anneau; n° du moule de fabrication, date et heure de fabrication); Il fait l'objet en usine, lors de sa livraison et avant sa pose de nombreuses vérifications qualité

Tunnelier: Organe de soutènement ERECTEUR A VOUSSOIR(6/8)



Les voussoirs descendus dans le puits sont acheminés par le tunnel jusqu'à la plateforme arrière du tunnelier par un train d'approvisionnement des voussoirs et du mortier de rechargement.

Les voussoirs sont placés par une grue sur des chariots à voussoirs ou transporteur à rouleaux ou à tapis.

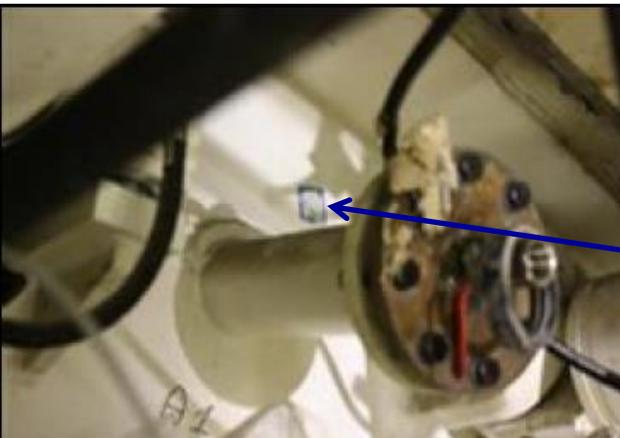
Les voussoirs d'un anneau arrivent au pied de l'érecteur

L'érecteur est un outil capable de se mouvoir en rotation au tour de son axe (360°), longitudinalement et radialement avec des mouvements rapides ou très lents.

La préhension du voussoir est soit par ventouse soit par clipage.

La pose d'un voussoir nécessite le retrait que d'un seul des vérins double.

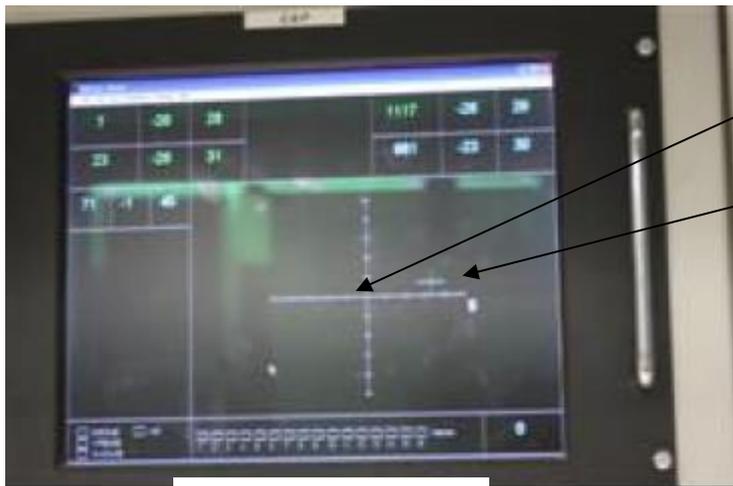
Tunnelier: Organe de soutènement GUIDAGE : NAVIGATION(7/8)



Deux théodolites (tunnelier et tunnel) -associés à un GPS (en surface)- pointent , toutes les 40s, leur laser sur une dizaine de prismes collés dans le tunnelier et dans le tunnel.



Les relevés en X,Y et Z sont transmis à un ordinateur (**paramètres topographiques** de la cabine de guidage) qui identifiera en temps réel les écarts entre la position théorique programmée et la position réelle.



Systeme CAP)

La tolérance accordée en de moins de 5 cm car le rattrapage de la trajectoire est long et engendrera des excavations plus importantes (plus de déblais plus de mortier de bourrage= coût plus élevé et risque plus probable...)

Tunnelier: Organe de soutènement GUIDAGE: PILOTAGE (8/8)



Le pilote en plus des paramètres topographiques dispose de **paramètres** :

- **mécaniques** (puissance consommée des moteurs électriques, pression hydraulique , température des organes mécaniques...caméras aux points stratégiques);
- **Interactions tunnel/terrain** (pression dans la chambre, dans la vis, injection mortier et boue, vitesse d'avancement, poussée des vérins..).

Le pilotage à une dimension de:

- **SURVEILLANCE** grâce aux analyses croisées des paramètres (*prévention et identification des anomalies susceptibles d'interférer sur la stabilité du front de taille, le respect des critères de tassement, la trajectoire, l'usure des outils de coupe ...*);
- **REDUCTION DES ECARTS** grâce notamment à l'asservissement du débit de la vis d'extraction à la vitesse d'avancement de la machine (*stabilité du front de taille*), aux boutons ● de régulation de la poussée des vérins (*trajectoire*), aux équipements de communication avec le personnel dans le tunnelier et en surface...

Tunnelier: Logistique TRAIN SUIVEUR (back-up)



Remorque 1:
-Cabine de guidage
-Puissance hydraulique de la roue de coupe
-Pompe et réservoir du mortier de bourrage

Remorque 3:
-Transformateur électrique
-Zone d'approvisionnement
-Ventilation

Remorque 2:
-Réfectoire
-grue à voussoir
-Zone refuge (en cas d'Incendie)
-Compresseur;
-établi et outillage



Les 3 remorques roulent sur des roues en polyuréthane (diamètre 0.35m).