

**Ecole Nationale des Ponts et
Chaussées
Master Système Transport
Ferroviaire**

Module Génie civil : Les tunneliers

08/01/2016

LE-FRAPPER Patrick

Avertissement

Ce document est une simple illustration de Monsieur B Demay, professeur à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC-CEBAP Ouvrages souterrains les tunneliers_à.doc/ Révision 1/12/11).

Il s'appuie également sur des publications de l'AFTES et d'échanges professionnels avec des réalisateurs de travaux souterrains.

Ce document ne demande qu'à s'enrichir. Je vous remercie donc d'avance de me transmettre vos retours d'expériences, vos remarques, vos suggestions et vos compléments d'informations à mon adresse courriel : patrick.le-frapper@ratp.fr

Historique des modifications

Version	Date	Modifications effectuées
1	23 décembre 2015	Création du document

Référence des documents

Référence
Ouvrages souterrains les tunneliers, B Bema, ENPC-CEBAP, 01/12/2011.
Nomenclature simplifiée des tunneliers, Groupe de travail AFTES GT4, novembre 2013
Inventaire des tunnels ferroviaires de France, itff@hotmail.fr

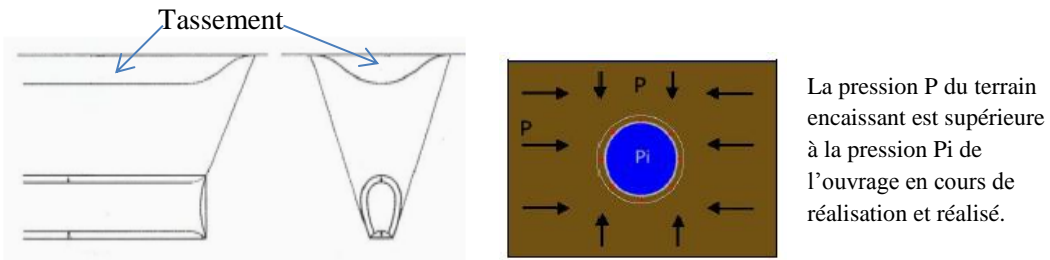
Table des matières

1 Tassement des ouvrages souterrains	1
2 Définition d'un tunnelier	2
3 Les tunneliers	4
3.1 Tunneliers Roche Dur à grippers	4
3.2 Tunneliers à Boucliers.....	6
3.2.1 Principe	6
3.2.2 Tunnelier à bouclier à front ouvert	8
3.2.3 Tunnelier à bouclier à front fermé	9
3.2.3.1 Tunnelier à bouclier mécanique	9
3.2.3.2 Tunnelier à Pression de terre	10
3.2.3.3 Tunnelier à Pression de boue	14
3.2.3.4 Tunnelier à Pression d'air	17
3.3 Organes de creusement	19
3.3.1 Tête de coupe	19
3.3.2 Outil de coupe	19
3.3.3 Appuis arrière	19
3.4 Organes d'évacuation des déblais.....	20
3.4.1 Tapis transporteur	20
3.4.2 Marinage hydraulique	20
3.4.3 Extraction par vis	21
3.5 Equipement divers.....	21
3.5.1 Erecteur à voussoir	21
3.5.2 Injection de bourrage	21
3.5.3 Reconnaissance et traitement à l'avancée.....	22
3.5.4 Joint d'étanchéité	22
3.5.5 Outil de surcoupe	22
3.5.6 Logistique embarquée.....	22
3.5.7 Guidage des tunneliers.....	23

1. Tassement des ouvrages souterrains

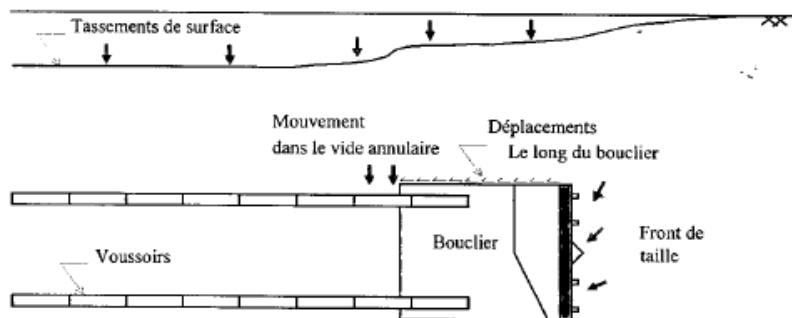
La nature ayant horreur du vide, le creusement d'un ouvrage souterrain perturbe le champ initial des contraintes du terrain encaissant.

L'excavation d'un ouvrage souterrain crée dans sa zone d'influence (cône d'influence) des déséquilibres (tassements) liés à des pertes de volume (interaction tunnel/terrain).



Ces déséquilibres se produisent dans différentes zones :

- Tassement en avant du front de taille (extrusion) ;
- Tassement au droit du bouclier (tassement potentiel) ;
- Tassement en arrière du joint de queue (tassement différentiel) ;
- Déformation du revêtement (convergence)



L'extrusion (pouvant provoquer un fontis) est associée à la nature du terrain (notamment à sa déformation), à la pression hydrostatique (charge d'eau/ au radier du tunnel) à la hauteur de couverture (1 à 2 fois le diamètre du tunnel) mais aussi au temps d'apprentissage nécessaire à la maîtrise par le pilote du confinement.

Le tassement potentiel, qui correspond à un tassement de déplacement le long du bouclier, est lié à la conicité plus ou moins importante du bouclier, à la rugosité de la jupe et au mauvais guidage du tunnelier (surcoupe) et vitesse d'avancement (lenteur et arrêt du tunnelier)

Le tassement différentiel (ou vide annulaire : différence de diamètre entre l'excavation et l'extrados du tunnel revêtu) est associé à l'épaisseur de la jupe, la performance du joint de queue et la rigidité des voussoirs (capacité à ne pas se déformer sous la pression des vérins de poussée).

La déformation dans le temps du revêtement est associée au terrain (compétence (altérabilité) ; sa capacité de déformation..), à l'environnement naturel (pollution, agressivité du sol...) et à l'usage et l'entretien de l'ouvrage.

2. Définition d'un tunnelier

Il existe deux techniques de creusement en souterrain:

- par abattage continu ou simultané (tunnelier);
- par abattage séquencé ou cyclique (traditionnelle : attaque ponctuelle ou à l'explosif).

L'utilisation d'un tunnelier "pleine section" (ou "à attaque globale" ou "pleine face") est justifiée :

- par la longueur de tunnel à réaliser (retour sur investissement à partir de 1,5km) ;
- par le temps projet consacré à la réalisation du tunnel (lié aux conditions hydro géotechniques et géologiques du terrain encaissant, lié aux ouvrages existants et avoisinants en surface et sous terre...).

Le tunnelier "pleine section" est soit une machine :

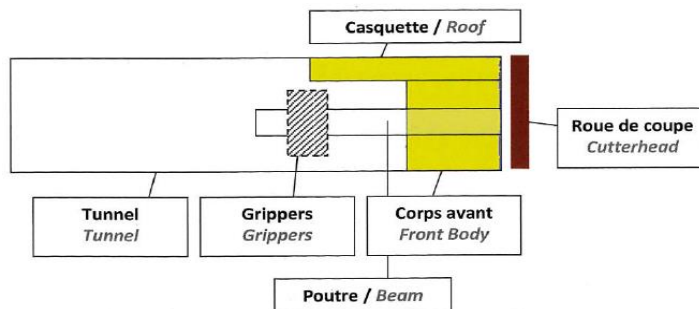
- foreuse excavant en une seule fois ou en plusieurs fois (à bras d'abattage) la section du tunnel circulaire à creuser : TBM (Tunnel Boring Machines) ;
- de retrait démontant un tunnel circulaire existant (TDM (Tunnel Dismantling Machine)).

Le déroulement entre l'abattage et l'évacuation du marin (déblais) est réalisé de façon continue ; Le tunnelier « pleine section » est caractérisé par :

- une tête de forage ou plateau porte-outils de forme circulaire ;
- un bâti fixe dans lequel sont repris les efforts de poussée de la tête sur le front de taille et le moment résultant du travail de découpe du terrain ;
- un système de propulsion et d'appui ;
- un système de soutènement de la zone excavée ;
- un système de marinage (évacuation des déblais du front de taille).

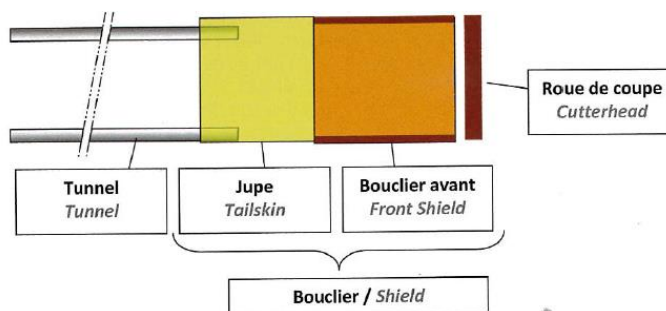
Il existe 2 grandes familles de tunnelier "pleine section" :

-Tunnelier Roche dure (Hard Rock TBM) ;

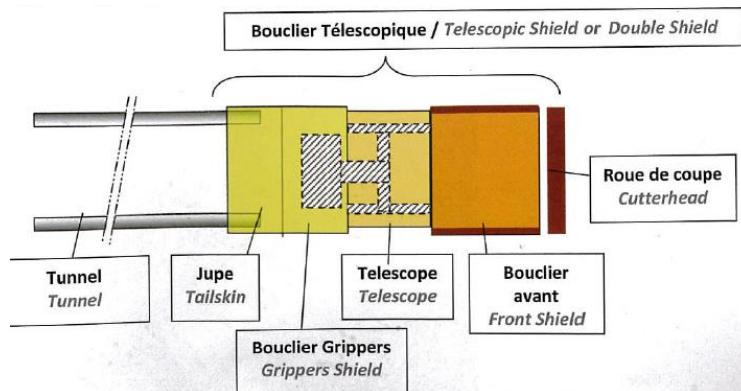


-Tunnelier à Bouclier :

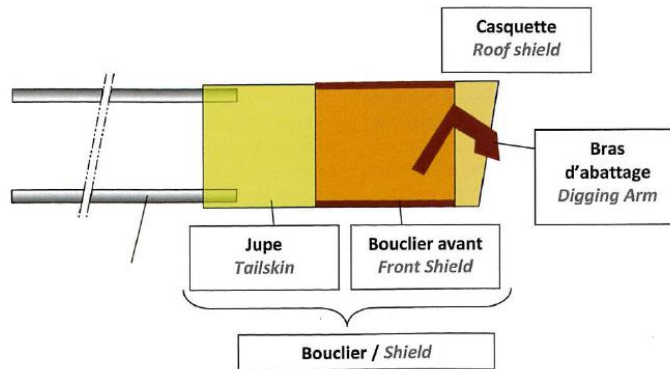
- simple jupe (TBM Single Shield) ;



- double jupe (TBM Double Shield) ;



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



3. Les tunneliers

3.1. Les tunneliers roche dure à Grippers (Shielded Hard Rock Rotary Machine)

3.1.1 Tête de forage ou plateau porte-outils.

La tête de forage est :

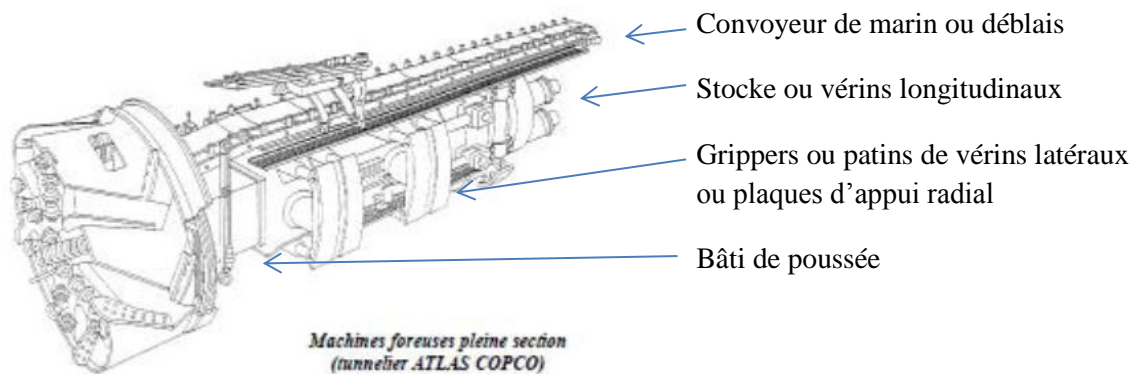
- circulaire, rotative et massive (80% de la masse du tunnelier) ;
- équipée de molettes (disque en acier trempé)
- protégée parfois par une casquette.



3.1.2 Appui et propulsion

L'abattage du terrain se fait en deux temps :

- temps de déplacement (propulsion) : la tête foreuse est arrêtée, les grippers se replient et les vérins longitudinaux (stocke) se déplient ;
- temps de creusement (appui) : les grippers solidaires d'un bâti de poussée prennent appui radialement (grippers radiaux) sur la roche et sur le radier (grippers verticaux)



gripper radial



gripper vertical

3.1.3 Soutènement

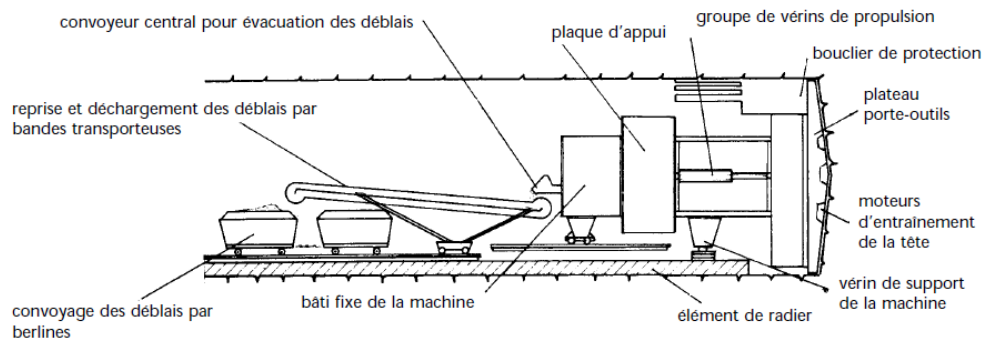
Le tunnelier Roche dure est sans confinement : le front de taille est ouvert. Elle ne crée pas de soutènement de l'excavation car **le soutènement est naturel**. Toutefois, la rencontre d'une zone moins compact peut amener à un soutènement ponctuelle de la zone excavée proche du front de taille (boulonnage ou /et cintres métallique, béton projeté).

3.1.4 Revêtement

Le tunnelier à Grippers ne pose pas de revêtement préfabriqué. Il a possibilité, toutefois, de poser des voussoirs de radier.

3.1.5 Marinage

L'évacuation des déblais se fait le plus souvent au moyen de godets périphériques qui se déversent dans une trémie centrale.



▲ Fig. 4.9.1

Schéma général constitutif d'une machine pleine section

- 3 -

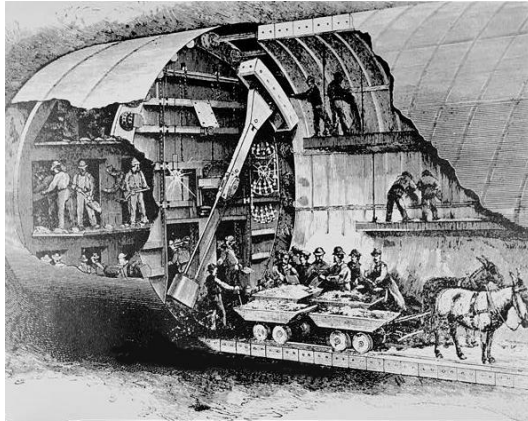
3.1.6 Application

Le Front étant ouvert sans soutènement la roche doit être **compact** (imperméable). La roue de coupe ne disposant que de molettes la géologie doit être **homogène**. Le massif rocheux doit être **stable** (sans grand accident géologique : poussée de la roche par un phénomène de « flambage » des couches (entraînant le blocage du tunnelier) ; formation de blocs rocheux à forte teneur en quartz (arrêt du tunnelier afin de changer les molettes prématurément usées).) et **résistant** (Très élevée : **Quartz, Basalte, Granites** (200 MPa) ; Elevée : Grès et calcaire de haute résistance (120 MPa)).

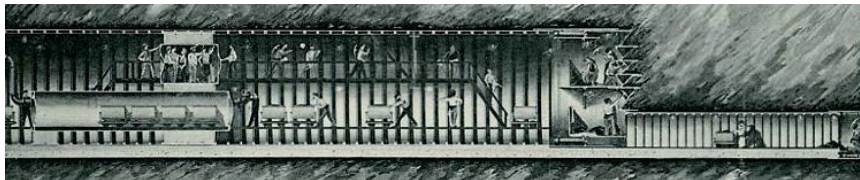
3.2. Les tunneliers à Boucliers

3.2.1. Principe

Le principe du bouclier est ancien (XIX siècle) :



Le premier bouclier a été utilisé entre 1825 et 1843 afin de creuser une galerie piétonne sous la Tamise. Il s'agissait d'un bouclier ouvert avec soutènement en bois et un avancement au moyen de vérin à vis s'appuyant sur les revêtement en briques.



Le bouclier est composé de deux parties : le bouclier avant et la jupe.



Le bouclier avant est une virole métallique :
- sur laquelle la roue de coupe est fixée et mue ;
- constituant la chambre d'abatage par laquelle la terre excavée est évacuée
- où se produisent des frottements et des cisaillements en clé (tassement).

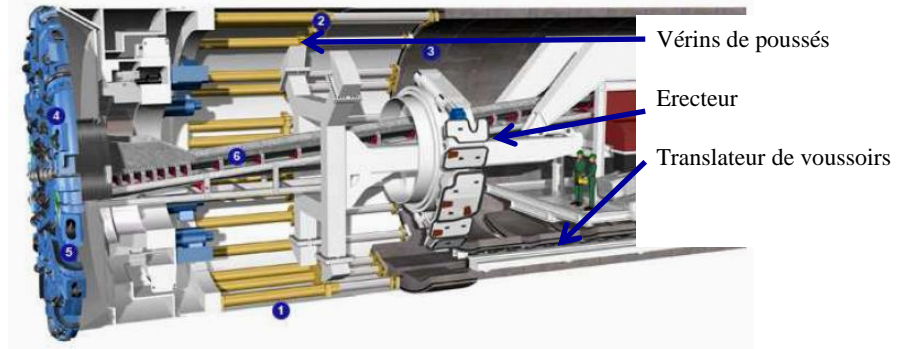


La jupe est une virole métallique :
- protégeant les tâches d'extraction des déblais et de pose du revêtement ;
- protégeant les tâches de propulsion et du lieu de la convergence (tassement)

Les tunneliers à bouclier:

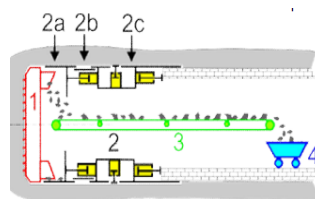
- permettent de protéger les compagnons d'un terrain encaissant non stable;
- sont indépendants du mode de marouflage ;
- sont utilisés en mode avec (front de taille fermé) ou sans (front de taille ouvert) confinement.

- 2.2.1.1 Les tunneliers « réalisateur » permettent la pose de revêtements préfabriqués (voussoirs) à l'abri d'une jupe soit :
- Hors de la phase de creusement (**Bouclier simple jupe** et Bouclier à bras d'abattage) ; Dans ce cas le temps d'abattage se répartit en:
 - 80% de creusement (rotation et avancement (via les vérins de poussée) de la roue de coupe) ;
 - 20% de pose des voussoirs via l'érecteur et le translateur.



Bouclier simple jupe

- Durant la phase de creusement (**Bouclier double jupe** dit « à tête télescopique ») les voussoirs sont posés en parallèle.



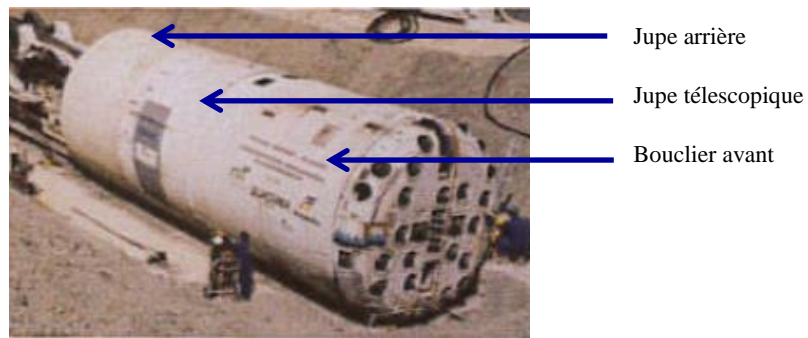
Coupe schématique de bouclier ouvert à tête télescopique

1. Tête de coupe
2. Boucliers
 - 2.a Bouclier avant
 - 2.b Bouclier télescopique
 - 2.c Bouclier arrière et grippeur
3. Convoyeur à bande
4. Train d'évacuation des déblais

Deux temps en une seule :

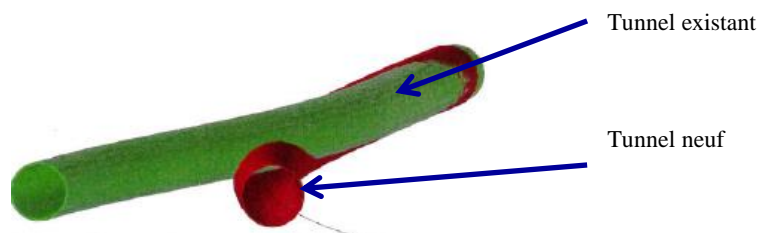
- La jupe arrière (2c) « s'appuie » sur l'anneau posé : phase de pose des voussoirs.
- Le bouclier avant (2a) avance via la jupe télescopique (2b) : phase de creusement.

Le bouclier double jupes a une cadence de réalisation de l'ouvrage de 20% plus élevé qu'un bouclier simple jupe.



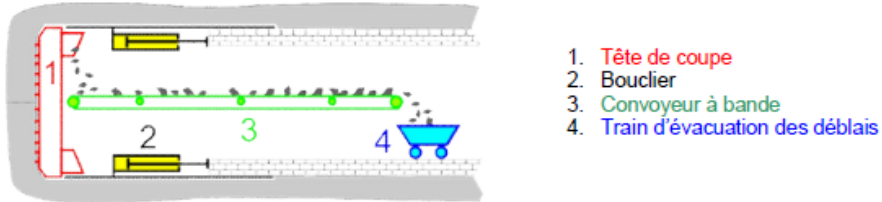
Bouclier double jupe ou télescopique

- 2.2.1.2. Les tunneliers « démonteur » permettent en retirant des voussoirs d'un tunnel circulaire existant de se raccorder à un ouvrage neuf (ouvrage annexe, tunnel ou station).

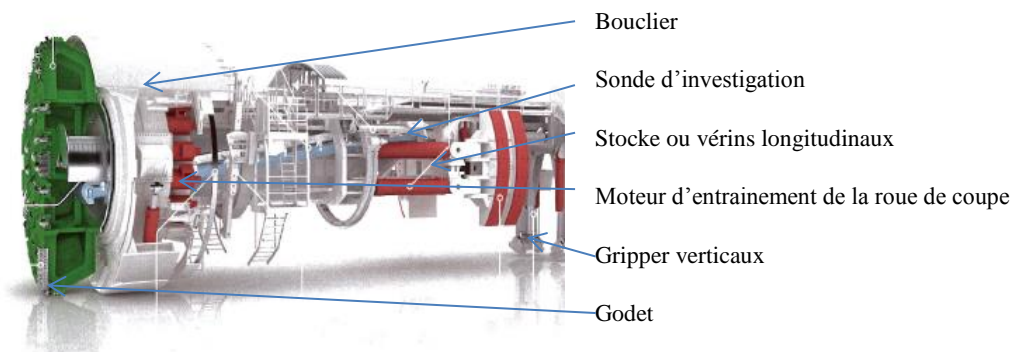


3.2.2. Tunnelier à bouclier à front ouvert

Le **bouclier** assure mécaniquement la stabilité de la zone excavée non revêtue mais pas du front de taille (front d'attaque stable sans charge hydrostatique). Le front de taille est visible et accessible.

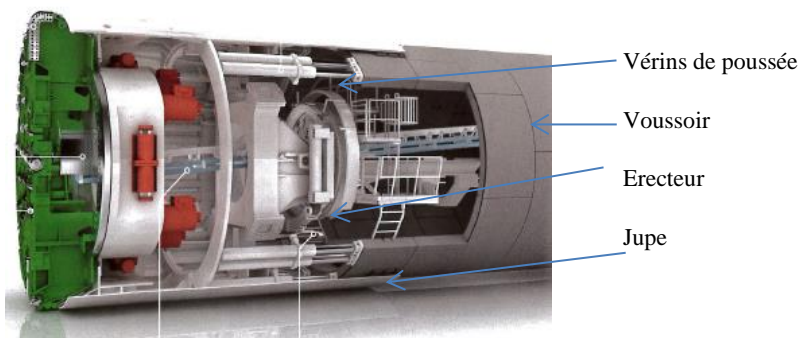


L'abattage s'effectuant à la pression atmosphérique, ce tunnelier ouvert est donc réservé aux terrains cohérents mais pas trop résistants (d'où l'utilisation de bouclier) et imperméables (**roches tendres/sols indurés**)

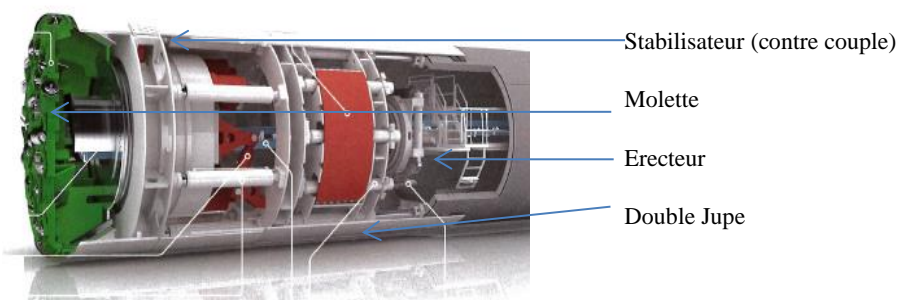


Ils peuvent être équipés de simple ou de double jupe.

Pour toutes sortes de roches mais fragiles (d'où l'utilisation de jupe puis de voussoirs) , le tunnelier sera équipé d'une simple jupe afin de permettre un avancement élevé.



Pour toutes sortes de roches mais instables (d'où l'utilisation de jupes puis de voussoirs) , le tunnelier sera équipé d'une double jupe afin de permettre un avancement élevé.



3.2.2. Tunnelier à bouclier à front fermé

La fermeture du front de taille est une mise sous pression (confinement) du terrain à excaver – une sorte de pré-soutènement. La chambre d'abattage (cloison et joint d'étanchéité), située derrière la roue de coupe, est le lieu où se confinent le terrain et l'air. Le front de taille n'est pas visible ; Il sera accessible via un sas de décompression reliant la chambre d'abattage à la jupe (Le temps de travail -de l'entrée à la sortie du sas- est limité à deux)

Ce pré-soutènement est réalisé par confinement :

- des terres abattues devant la roue de coupe (confinement mécanique) ;
- des terres contenues dans la chambre d'abattage (confinement à pression de terre, de boue ou d'air).

Ces tunneliers fermés sont adaptés :

- à des sols plus ou moins stable et plus ou moins homogène;
- à un milieu aquifère.

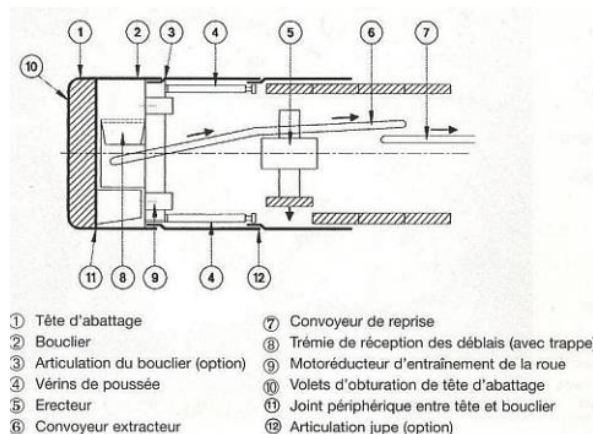
Ils peuvent être équipés :

- de simple jupe (confinement mécanique ou à pression) ;
- de double jupe (confinement à pression de terre ou d'air).

3.2.3.1. Tunnelier à bouclier mécanique (ou aveugle)

Le soutènement du front de taille est obtenu par la mise en pression des terres abattues contenues devant la tête d'abattage en faisant varier le degré d'ouverture des volets disposés sur la tête de coupe.

Ce système, pouvant être total (ensemble du plateau) ou partiel (secteur circulaire « breasting plate »), est à considérer plus comme un soutènement passif du front de taille que comme un confinement. En effet, l'ensemble roue de coupe/bouclier ne sera pas en mesure d'éviter le recul du tunnelier, même à l'arrêt, face à la pression du terrain en exerçant une force de réaction (par appui direct ou par frottement).



Il est à noter que l'étanchéité entre la tête de coupe et le bouclier avant ne se fait pas par l'intermédiaire d'une chambre d'abattage mais par un joint périphérique (11).

Le tunnelier à bouclier mécanique sera limité dans son utilisation à :

- des terrains meubles ;
- plutôt homogène ;
- aquifère.

Au vue du terrain concerné, il est nécessaire de pérenniser l'excavation par un revêtement ; Les voussoirs sont soit en béton préfabriqué, métalliques (fonte), en béton « extrudé » coulé en place à l'avancement.

3.2.3.2 Tunnelier à pression de terre (EPB shield : Earth Pressure Balance shield)

a) Principe

Le tunnelier à pression de terre dispose d'équipements lui permettant de:

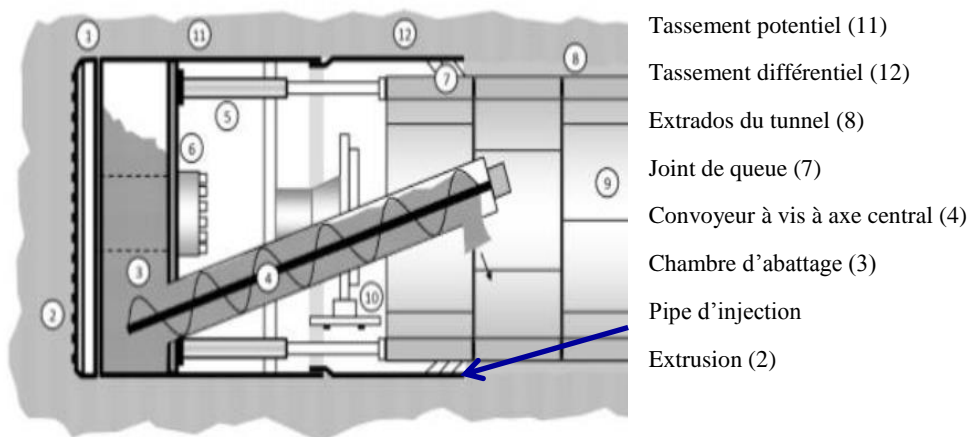
- Soutenir le front de taille (limitation de l'extrusion) ;
- Limiter les tassements potentiels et différentiels (convergence) ;
- Facilite l'extraction et le marinage des sols fins (granulométrie > 80 microns) ;
- Travailler en mode fermé ou en mode ouvert (1).

Dans sa fonction de soutènement :

- du front de taille, est obtenu par la variation du volume de terre abattue maintenu dans la chambre d'abattage mais aussi à la pression des vérins de poussée;

- le tassement potentiel au passage de la jupe (perte de charge d'avant en arrière) long du bouclier est limité par **des prises radiales sur la jupe** voire par l'injection de boue bentonitique via une petite centrale mobile ou fixe;

-le tassement différentiel en arrière du joint de queue de la jupe (différence de diamètre de la roue de coupe et de l'extrados du tunnel revêtu) est limité par l'injection d'un mortier de collage et de remplissage du vide annulaire via des pipes (canalisations longitudinales) situées dans l'épaisseur de la jupe.



Le convoyeur à vis (ou vis d'Archimède) est l'organe essentiel d'un tunnelier à pression de terre; Servant à l'extraction des matériaux, le convoyeur à vis doit :

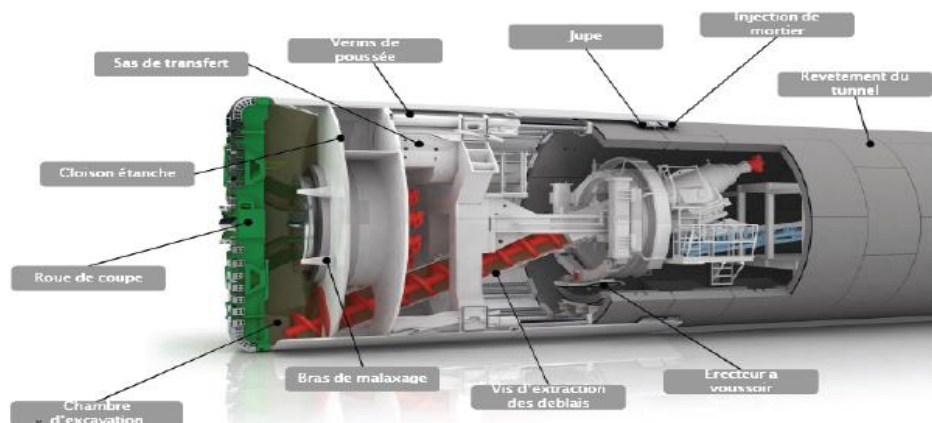
- être **résistant** notamment au passage de cailloux et de sables très abrasifs (1) et continuer à fonctionner même lors de rencontre de sol collant (argile et limon). Afin d'éviter le blocage ou le freinage non souhaité du convoyeur, celui-ci peut être équipé en avant d'une trappe ou d'une vis sans axe (vis à ruban : admission de blocs dont le diamètre peut atteindre 50 à 60 % du diamètre du convoyeur au lieu de 30 à 35 % pour une vis à axe central) ;

-être d'une longueur (le gradient de pression le long de la vis est de l'ordre de 20 kPa (0,2 bar) pour chaque pas de l'hélice avec une pente ascendante de 5 à 20°) suffisante afin d'obtenir des pertes de charge le long de celle-ci compatibles avec la pression admissible dans la chambre d'abattage et une évacuation régulière à faible pression des matériaux ;

-être en position basse dans la chambre afin de favoriser la formation du bouchon à cause des plus grandes densités et viscosités des matériaux. Cette position permet au tunnelier de travailler tantôt en mode fermé ou en mode ouvert (2).

-notamment en cas d'augmentation de la perméabilité globale ou de la traversée de poche sableuse fortement alimentées **freiner les matériaux afin d'éviter un débouillage brutal (inondation du tunnelier)**. Le convoyeur est muni d'un sas situé dans la chambre permettant un isolement quasi instantané en cas de problème et par ailleurs de dispositif (évitant les pertes de charge dans la vis) soit :

- régulant le volume des matériaux rejetés au débouché de la vis à l'air libre (déchargeur rotatif, pompe volumétrique à piston, trappe..);
- favorisant la formation d'un bouchon plus compact le long du parcours de la vis : systèmes à double vis (vis en série dont l'une au moins peut se déplacer longitudinalement dans son tube pour former entre les deux vis un intervalle plus ou moins long dans lequel les matériaux sont freinés par leur frottement sur les parois du tube)



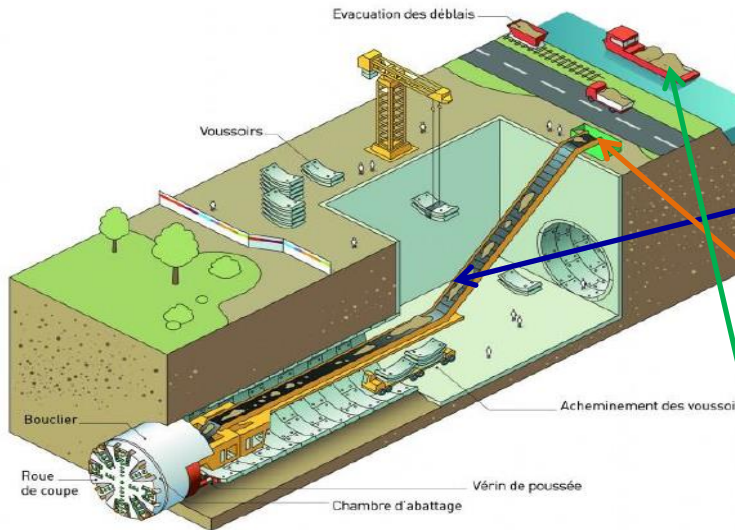
- en fonction de la vitesse de creusement **contrôler le débit** d'extraction du marin afin d'éviter une perte de pression dans la chambre d'abattage (source d'instabilité du front). Le contrôle de la pression se fait par l'intermédiaire de capteurs situés dans la chambre d'abattage et dans le convoyeur à vis. Le poste de pilotage analysant les différents paramètres (mécanique, topographique et d'interaction) est en mesure :

- en temps réel d'identifier des écarts entre le prévisionnel et le réalisé ;
- mettre en œuvre des actions correctives (asservissement du débit de la vis d'extraction à la vitesse d'avancement du tunnelier ; régulation de la poussée via la pression de la chambre...).

- (1) La roue de coupe équipée d'outil avec une extrémité en carbure de tungstène (molette : sol dur et pic ou couteau : sol meuble ; racleur) doit être accessible bien que confinée. Pour cela le tunnelier à pression de terre dispose d'un sas de décompression reliant la zone sous pression atmosphérique de la zone sous pression (de 0 à 4 bars).
- (2) Un tunnelier à pression de terre peut fonctionner sans que pour cela sa chambre soit complètement remplie. Ce mode de fonctionnement ouvert est conditionné par un terrain en place stables et de venues d'eau limitées. Ce passage de façon quasiment instantanée d'un mode à un autre est un avantage certain par rapport au tunnelier à pression de boue. Toutefois, l'énergie nécessaire à un tunnelier à pression de terre (puissance roue de coupe, couple de rotation du convoyeur à vis..) est supérieure à celui d'un tunnelier à pression de boue constamment baigné dans un liquide (pas de frottement)

b) Marinage

Construction du tunnel



Les déblais (ou marin) pâteux sont :

- transportés dans le tunnelier puis dans le tunnel réalisé jusqu'à la surface par des convoyeurs à bande ;
- stockés dans des bacs de rétention
- évacués par camions ou péniches (correspond au volume de 20 camions)

c) Application

Pour que le confinement à pression de terre puisse fonctionner correctement, il faut que les matériaux présents dans la chambre présentent à la fois :

- Une maniabilité suffisante pour leur permettre d'occuper à tout instant le volume de la chambre sans opposer une trop forte résistance au convoyeur à vis: ils doivent se comporter comme une boue épaisse ou un béton dans son malaxeur (3) ;
- Une imperméabilité suffisante pour s'opposer à l'afflux brutal de l'eau depuis le front de taille et maintenir dans le terrain une pression interstitielle suffisante

Une solution de base moussante (4) (tensioactifs + eau + air voire de polymères hydrosolubles ayant pour effet de « coagulé » les éléments liquides contenus dans le marinage) injectée et mélangée au terrain dans la chambre d'abattage permet :

1. De jouer sur la consistance du sol en lui conférant un état pseudo plastique (**notion de bulles dures**) apte à transmettre des pressions et d'empêcher colmatage et l'adhérence sur la roue de coupe ;
2. De rendre le terrain abattu moins perméable (mais avec une meilleure cohésion) afin de faciliter son marinage ;
3. D'homogénéiser le mélange de matériaux abattus ;
4. De limiter les frottements internes des matériaux (réduction du couple de coupe, lubrification et réduction de l'usure des parties métallique notamment le convoyeur à vis).

- (3) Un sol relativement mou, ayant les propriétés d'un liquide très épais ou d'une pâte, est le plus approprié pour un fonctionnement optimal d'un bouclier à pression de terre. Selon certains constructeurs, le mélange idéal en sortie de vis doit être assimilable à une argile dont l'indice de consistance serait compris entre 0.5 et 0.7 (argile dite ferme). Une règle couramment admise est que le sol se prêtant naturellement bien à un fonctionnement par pression de terre

doit contenir de 20 à 30 % d'éléments inférieurs à 80 μ (allant du limon léger sableux au sable argileux).

- (4) La mousse est caractérisée par la composition de la solution de base et par son taux d'expansion (rapport entre le volume produit et le volume de liquide initial). L'absorption de la mousse par le terrain est caractérisée par le F.I.R (Foam Injection Ratio) qui est le rapport entre le volume de mousse consommé rapporté au volume de terrain excavé. Ce ratio varie couramment entre 20 et 50 % en fonction de la granulométrie et de la porosité du terrain (valeur minimale pour faible porosité) mais il est susceptible d'atteindre des valeurs supérieures à 100 % en cas de terrains très ouverts.

3.2.3.3 Tunnelier à pression de boue (SS :Slurry shield)

a) Principe

La boue permet :

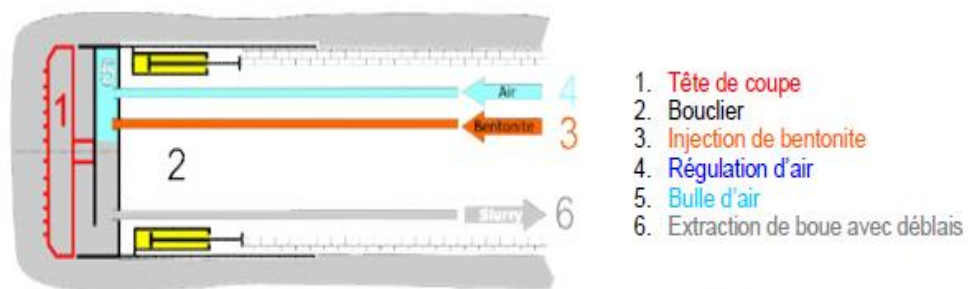
- Soutènement du front de taille (limitation de l'extrusion) ;
- Limiter les tassements potentiels et différentiels (convergence) ;
- Facilite l'extraction et le marinage des sols fins (granulométrie < 80 microns)

Dans sa fonction de soutènement :

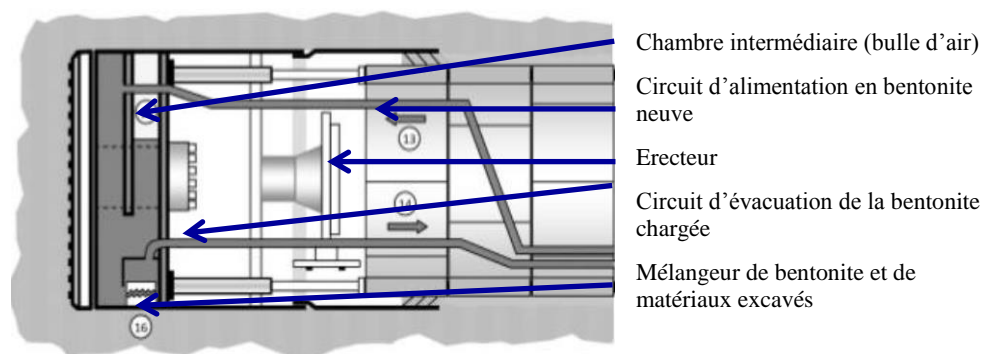
- du front de taille, la boue bentonitique (1) permet de maintenir le terrain de façon similaire au maintien de la fouille d'un écran de paroi moulée ;
- le tassement potentiel au passage de la jupe (perte de charge d'avant en arrière) long du bouclier est limité par l'injection de boue bentonitique via les prises de vannes périphériques de la jupe ;
- le tassement différentiel en arrière du joint de queue de la jupe (différence de diamètre de la roue de coupe et de l'extrados du tunnel revêtu) est limité par l'injection d'un mortier de collage et de remplissage du vide annulaire via des buses (canalisations longitudinales) situées dans l'épaisseur de la jupe.

Dans sa fonction de déplacement des sols fins du front de taille à la surface (voirie), l'argile de la boue permet à des matières en suspension dans l'eau de s'agglomérer (floculation).

Compte tenu que la boue, en tant que liquide, est incompressible, la régulation fine de la pression de boue est facilitée par l'utilisation d'une bulle d'air comprimé située dans une chambre intermédiaire: même en cas de variations significatives des volumes de boue la bulle d'air évite l'altération de la stabilité du front de taille. Cette bulle d'air sous pression permettra également d'accéder à la roue de coupe (maintenance) dont la chambre d'abattage aura été vidée totalement de sa boue (intervention hyperbares).



Coupe schématique de bouclier fermé à pression de boue



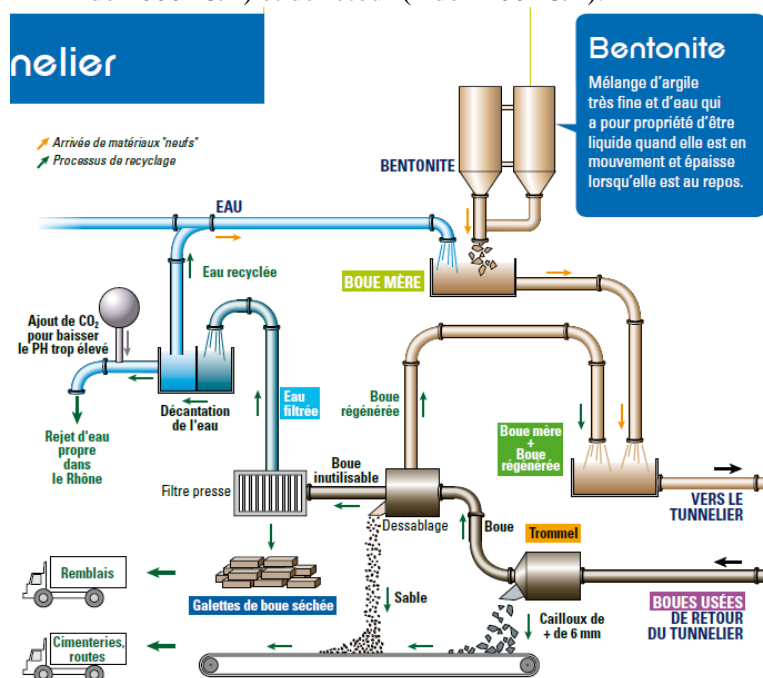
b) Marinage



La roue de coupe tourne dans la chambre remplie de boue et les matériaux abattus se mélangent (agitateur en partie basse de la chambre) à celle-ci. Puis un concasseur ramène la granulométrie des déblais à du sol fin compatible avec un transport hydraulique.

La boue chargée (eau + bentonite + matériaux abattus) est amenée à la station de fabrication et de traitement en surface où les matériaux sont séparés à l'aide de :

- Trommels (séparation primaire : grave), Hydrocyclone (séparation secondaire : sable limoneux à argileux), filtres-presses ou filtres-bande (séparation tertiaire : de limon sableux à sable argileux) mais aussi d'un circuit de régénération (addition de bentonite) associé à un système d'analyse de la qualité. Les boues devenues « neuves » sont réincorporées dans le circuit d'alimentation du tunnelier ;
- Clarificateur, l'eau est nettoyée et réutilisée puis rejetée dans le réseau d'assainissement au bout d'un certain nombre d'utilisations ;
- Essoreur, la matière devenue sèche est évacuée sous forme de galette solide ;
- Centrale de pompage puissante avec ces pompes du circuit d'alimentation (2 de 1000m³/h) et de retour (4 de 1400m³/h).



Cette station de fabrication et de traitement de la boue dans son dimensionnement et sa disponibilité est le point de fragilité du tunnelier à pression de boue. Afin d'obtenir un avancement journalier de 12m /jour avec une section de tunnel de 70m² (9m de diamètre) il faudra assurer un débit de boue de l'ordre de 1000m³ /heure (le volume de boue pompée est de l'ordre de 10 fois le volume de terrain excavé (2)).

c) Application

Par ailleurs, il est quasiment impossible (même avec une succession de filtres-presse) de séparer les matériaux de sols très fin (<5 microns : argile très lourde à limon (3)) ; Cette rencontre avec les argiles (très lourdes, lourdes, lourde sableux et argile) entrainera :

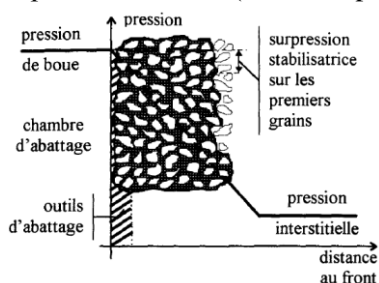
- une augmentation du coût des déblais associé à plus de camions (déblais plus lourds car moins secs) et à des camions étanches (pas de rejet à l'égout d'eau non-conforme) surtout si la centrale était dimensionnée au plus juste ;
- une augmentation du coût du confinement (volume plus important de bentonite neuve) ;
- des probables arrêts de chantier (collage des argiles même avec l'emploi de tensioactifs).

Enfin, lors d'un passage dans un terrain très grossier (bloc) et perméable (>10), il peut être impossible d'obtenir un gradient de stagnation suffisant pour stabiliser le front par l'utilisation seul de la boue bentonite ; Il est alors nécessaire de lui adjoindre des additifs tels que de l'argile, des polymères hydrosolubles, des copeaux de bois, des confettis, des granules de bentonite... ce qui compliquera et augmentera le coût de la méthode.

- (1) La bentonite est une argile spéciale (l'argile augmente la cohésion ou la consistance : il solidifie un terrain dont la teneur en eau est élevée) qui a la capacité de gonfler fortement en présence d'eau et donc d'exercer une contre-pression sur le terrain.

De plus, le caractère thixotropique de la boue lui permet de ne pas pénétrer profondément dans le terrain, mais de colmater les pores, ce qui a pour effet de former un film imperméable (cake « membrane ») capable de transmettre une surpression (différence de pression entre la pression de boue et la pression des terres au front) sur les grains qu'elle stabilise et ceux de façon uniforme sur le front : la pression s'approche de l'état initial des contraintes du sol non perturbé.

Afin que le cake ne soit pas détruit au passage des outils de la roue de coupe, il faudra que la pression au front soit supérieure à la pression hydrostatique du terrain (la surpression permettra à la boue de continuer à s'infiltrer (percolation) dans le terrain et ainsi augmenter l'épaisseur du cake (cake « imprégnation »)).



- (2) La boue neuve est acheminée vers de front de taille avec une densité comprise entre 1,05 et 1,15 et retourne chargée avec une densité maximale de 1,30 ; Ce rapport dépend à la fois des facteurs naturels (densité et teneur en eau du terrain) et de facteurs déterministes (paramètre de fonctionnement et dimensionnement de la centrale de traitement et de fabrication de la boue)
- (3) Ce qui limite, concomitamment, l'application des tunneliers à pression de boue à des sols fortement perméable (10 m/s à 10^{-2}), perméable (10^{-2} m/s à 10^{-6}), à semi perméable (10^{-6} m/s à 10^{-7})

3.2.3.4 Tunnelier à pression d'air

3.2.3.4.1 Tunnelier réalisateur de tunnel

a) Principe

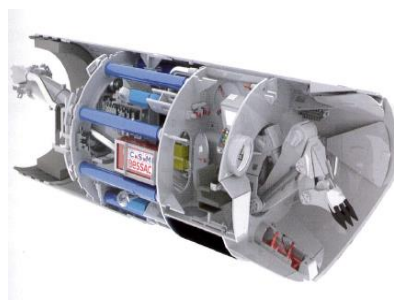
Le confinement du front de taille est obtenu par la mise en pression de l'air contenu dans la chambre d'abattage via des compresseurs.

Les tunneliers sont équipés soit d'une tête d'abattage à attaque globale soit, plus généralement, de bars excavateurs similaires à ceux des machines à attaque ponctuelle



Pour limiter les fuites d'air comprimé à travers la vis d'extraction, il faut :

- Contrôler la pression dans la chambre d'abattage via des capteurs de pression ;
- Maintenir en permanence un niveau et une composition du mélange des déblais abattus au-dessus de l'orifice d'entrée de la vis.



b) Marinage

L'extraction des déblais est effectuée par un dispositif de convoyeur à vis permettant d'amener les matériaux extraits de la pression de confinement à la pression atmosphérique régnant dans le tunnel.

c) Application

De telles machines peuvent constituer une très bonne solution pour des chantiers de taille petite à moyenne car les investissements restent limités en comparaison des tunneliers à plateau rotatif.

Toutefois, la pression d'air comprimé reste délicate en terrain de faible cohésion (sables et graviers) et de perméabilité supérieure à 10^{-5} m/s. En effet, dans de tels terrains, on constate de nombreuses fuites d'air engendrant des chutes de pression telles qu'il devient très difficile de gérer et maîtriser correctement la contre-pression indispensable au front (Loi de Dracy : le débit d'air fuyant à travers le terrain est 60 fois supérieur au débit équivalent d'eau).

L'emploi d'additifs projetés à front pour imperméabiliser le terrain pendant l'excavation permet d'abaisser cette limite.

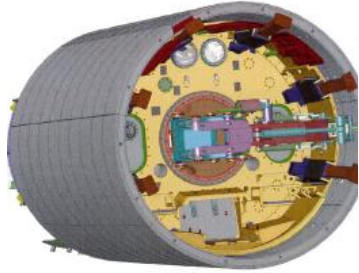
3.2.3.4.2 Tunnelier de démontage de tunnel (TDM: Tunnel Dismantling Machine)

a) Principe

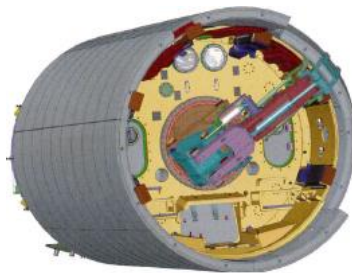


Le TDM est dimensionné pour pouvoir s'inscrire dans un tunnel existant afin de démonter des anneaux sans perturber le terrain encaissant et l'équilibre structurel de l'ouvrage.

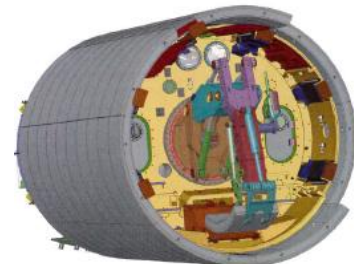
Le démontage se déroule en quatre étapes :



Le brise roche (BRH) démolie le premier voussoir



La pince saisit le voussoir démol

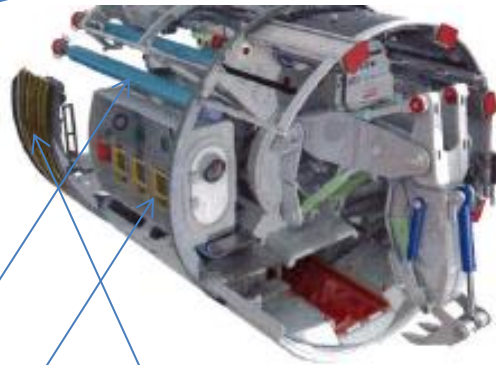
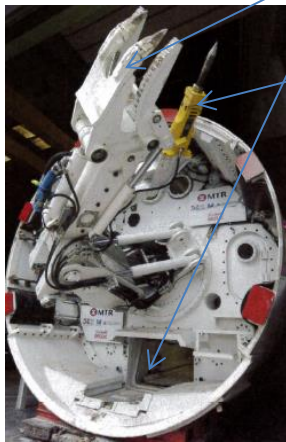


La pince évacue par le sas le voussoir déposé.

Une dernière étape consiste à remplacer l'anneau démonté par un anneau de béton projeté.

Sur la face avant, il dispose :

- d'un bras articulé de démolition et de préhension et d'un brise roche escamotable ;
- d'une ouverture permettant d'accéder au sas d'évacuation.



Derrière la cloison, le TDM dispose :

- de vérins de poussée qui permettent la propulsion et le contrôle du recul ;
- d'un poste de pilotage.

b) Application

Lorsque le TDM est mode fermé (démontage de tunnel urbain ou à contraintes hydro géotechnique). Le confinement est obtenu par pression d'air. L'étanchéité entre les voussoirs

du tunnel et le bouclier du TDM est assurée par un joint à brosses.



3.4. Les organes de creusement

3.4.1. La tête de coupe

La tête de coupe est l'organe qui porte les outils. Elle doit assumer les fonctions de découpe (abattage) du terrain et de collecte des déblais.

Elle peut être mue par des moteurs électriques ou hydrauliques. Les moteurs électriques ont en principe un meilleur rendement mais ils présentent moins de souplesse en ce qui concerne la variation possible du couple et de la vitesse de rotation nécessaire notamment dans le cas de terrains hétérogènes.

Des ouvertures sont pratiquées dans la tête pour permettre le passage des matériaux extraits.

On distingue 3 configurations :

- **Ouvertures périphériques** avec ramassage des matériaux par des godets disposés au voisinage des ouvertures, les matériaux tombent dans une trémie qui alimente en partie centrale un convoyeur à bande (cas des tunneliers « roches dures »)
- **Ouvertures radiales** : les matériaux tombent vers l'arrière de la chambre et sont repris soit par une vis en partie basse ou centrale, soit par les pompes d'extraction suivant le mode de confinement (terrains meubles nécessitant confinement)
- **Tête en étoile** constituée de bras de faible largeur séparés par des vides très importants (terrains cohérents mais peu résistants) La transmission du mouvement se fait soit par un **axe central** (mais couple limité dans ce cas) soit plus généralement par une **couronne d'entraînement** dont le diamètre est compris entre la moitié et les deux tiers du diamètre du tunnel.

La **puissance nominale** nécessaire pour la rotation doit être dimensionnée largement car c'est d'elle que dépend en grande partie l'aptitude de la machine à se sortir des situations difficiles, à éviter les blocages et à exercer un confinement efficace, notamment dans le cas des tunneliers à pression de terre.

3.4.2. Les outils de coupe

Plusieurs types d'outils peuvent être installés sur les têtes des tunneliers.

Dans les machines pleine face on utilise soit des **molettes** (disques), soit des **dents**. Les molettes sont analogues aux molettes de vitrier, elles sont portées par un palier radial de façon à tracer des cercles concentriques sur le front. Leur implantation dans le plateau et leur angle de pénétration dans le terrain sont tels que les sillons décrits à chaque tour de roue par l'ensemble des disques soient suffisamment proches pour provoquer la rupture de la portion de roche restant entre les sillons. L'écartement des sillons est généralement compris entre 6 et 10 cms.

Les molettes sont l'outil de référence pour les formations rocheuses. Les molettes ont des tailles allant d'un diamètre de 12 pouces à des diamètres de 19 pouces voire au-delà, qui sont capables d'attaquer des granites de résistance à la compression de 250 MPa.

Les molettes peuvent également être munies de picots au carbure de tungstène. Il existe aussi des molettes à double disque.

Les pics ou les dents travaillent à la façon des dents de rippers en raclant le terrain dans lequel ils pénètrent. Ils conviennent pour des terrains meubles ou cohérents et sont alors disposés sur les bras ou le long des fentes radiales de la tête de coupe.

Il est de plus en plus fréquent de voir juxtaposés sur une même tête de coupe des molettes et des outils-pics ou dents, afin de s'adapter à différents types de terrains.

Les molettes et les outils doivent impérativement pouvoir être changés depuis l'arrière de la tête afin d'éviter absolument tout travail entre le terrain et la tête (très dangereux en terrain instable).

On utilise le double effet du poinçonnement des outils dans le rocher du front de taille par l'intermédiaire des vérins de poussée et du mouvement circulaire de la tête de forage sur laquelle sont montés les outils. La position des molettes ou disques sur la tête est telle que les sillons décrits à chaque rotation soient suffisamment proches (de 6 à 10 cm) pour provoquer la rupture de l'arête rocheuse. Les molettes sont maintenant capables de pénétrer dans des

terrains extrêmement durs tels que les granites (200 MPa) ; dans les terrains meubles on utilise des pics ou dents en nombre plus important.

La progression s'effectue "en chenille" par reprise des appuis solidaires du corps de la machine.

La course unitaire de forage est variable suivant le type de machine et les caractéristiques du terrain :

- de l'ordre de 1 à 1,50 m dans les terrains durs à tendres ne nécessitant pas de soutènement,
- de la valeur d'un espacement de cintres ou d'une largeur de voussoirs quand la machine progresse par réaction contre l'anneau du revêtement d'un voussoir.

3.4.3. Les appuis arrière

Nous rappellerons ici les 2 concepts d'appui radial (grippers) et d'appui longitudinal destinés à fournir les réactions d'appui suffisantes pour exercer les forces de plusieurs milliers de tonnes que nécessite le fonctionnement du tunnelier :

- Forces devant être exercées sur la tête d'abattage et ses outils pour assurer la pénétration de la machine dans le terrain ;
- Forces liées au frottement du terrain le long de la jupe dans le cas des boucliers ;
- Forces liées au confinement du front, y compris la contre-pression hydrostatique.

Dans le cas des **appuis radiaux**, le terrain encaissant doit présenter une résistance mécanique suffisante pour supporter une pression élevée sans poinçonnement ni déformation sous les patins des grippers. Dans le cas des **appuis longitudinaux**, le tunnelier s'appuie sur la dernière tranche de revêtement (voussoirs) au moyen de vérins longitudinaux périphériques. Les opérations de creusement et de pose du revêtement ne peuvent donc pas être simultanées. La formulation des bétons de voussoirs, ainsi que le ferrailage de ceux-ci doivent être conçus de façon à ce qu'ils puissent résister sans dommage aux fortes pressions localisées exercées par les vérins de poussée.

3.5 Les organes d'évacuation des déblais

3.5.1. Les tapis transporteurs

Dans les machines à front ouvert les déblais sont collectés par les **godets périphériques** de la tête de coupe et déversés dans une trémie centrale qui a son tour alimente un tapis distributeur.

Ensuite une succession de convoyeurs situés sur le train suiveur distribue les déblais dans des **berlines** en attente de chargement.

L'évacuation des matériaux se fait de plus en plus souvent par des **convoyeurs à bande** allant jusqu'à l'extérieur du tunnel, ces convoyeurs sont allongés au fur et à mesure de l'avancement.

L'emploi des convoyeurs est limité par la consistance et la teneur en eau des déblais évacués, en particulier dans le cas des tunneliers à pression de terre ou

Très souvent on ajoute aux matériaux de la chambre des additifs (voir chapitre 4).

Dans le cas du tunnelier à pression de terre le **pesage des matériaux** par bascule intégratrice située sur le convoyeur à bande est un outil très utile pour le pilotage du tunnelier, notamment vis-à-vis de la prévention des fontis.

3.5.2. Le marinage hydraulique

Les déblais sont dilués dans la chambre avant avec une très forte proportion de boue pour créer les conditions du transport hydraulique.

A cause des propriétés thixotropiques de la boue, le dimensionnement des canalisations est conditionné par le nécessaire respect d'une **vitesse critique** minimale pour éviter le dépôt et l'accumulation des matériaux dans les conduites.

On distingue les systèmes à **bouclé unique** et les systèmes à **doublé boucle**; dans ce dernier système, la boucle avant se referme sur un by-pass et

Possède une géométrie fixe indépendante de l'avancement. Son débit peut être

Règle pour permettre le maintien de la pression à front sans être tributaire de

L'évacuation des déblais. Les usines de traitement des boues doivent pouvoir être capables de traiter essentiellement par **cyclonage** et **centrifugation**, des débits dépassant 1000 m³ /h.

3.5.3. L'extraction par vis

Le transport par vis est très régulièrement utilisé dans l'industrie, mais généralement avec des produits calibres.

Dans le cas des tunneliers à pression de terre ou pression d'air, la vis doit pouvoir fonctionner quel que soit le type de matériau, provenant de terrains hétérogènes, et s'accommoder de granulométries très variables (pas de concasseur en entrée). La vis doit être dimensionnée en conséquence, en diamètre et en puissance d'entraînement.

La vis doit également pouvoir réguler le débit en fonction de l'avancement du tunnelier, quel que soit la pression dans la chambre, en freinant les matériaux pour éviter un débouillage brutal.

Pour ce faire, les constructeurs ont développé deux techniques:

- La formation d'un « bouchon de matériaux » ralentissant le transit, obtenu soit au moyen de 2 vis en séries dont l'une coulisse longitudinalement dans son enveloppe, soit par un enveloppe tournante dans le même sens que la vis réduisant l'effet d'entraînement de la vis ;
- L'installation au débouche de la vis à l'air libre d'un appareil régulant le volume de matériau rejeté : distributeur rotatif ou pompe volumétrique à piston

La longueur de la vis dépend de la pression maximale prévue au bas de la chambre. On estime généralement que dans des conditions moyennes le gradient de pression le long de la vis peut être estimé à 20 KPa pour chaque pas de l'hélice (en général 70 à 80 % du diamètre). Le diamètre est en général compris entre 0.40 m et 1.50 m suivant le débit à évacuer (ce qui conditionne bien sur la vitesse maximale d'avancement du tunnelier).

Le couple de rotation nécessaire pour faire tourner la vis est en moyenne de l'ordre de 0.3 n.m / par m³/h de déblais à évacuer, mais en fonction de la granulométrie des terrains à excaver on peut aller jusqu'à 1.5 n.m / m³/h et au-delà.

La vitesse de rotation de l'hélice est comprise entre 0 et 30 tr/mn, l'inclinaison de la vis est généralement comprise entre 10 et 30°.

Les organes de la vis doivent bien sur être prémunis contre une usure prématurée en cas de matériaux abrasifs.

3.6 Equipements divers

3.6.1. Les voussoirs / l'érecteur à voussoirs

Les voussoirs sont des éléments préfabriqués en béton armé, à haute densité de ferrailage, pouvant peser près d'une dizaine de tonnes dans le cas des tunnels de grand diamètre. Leur approvisionnement et mise en place sont donc obligatoirement mécanisés.

L'approvisionnement à front est fait par train et wagons spéciaux. Les voussoirs sont déchargés par un portique ou un palan sur un convoyeur qui les amène à l'érecteur qui les met en position définitive. La préhension des voussoirs peut être effectuée soit par ventouse soit par un doigt de préhension fonctionnant par clissage, situé sur l'érecteur. L'érecteur est doté de nombreux mouvements, à la fois rapides pour l'approche, et lents et précis pour le positionnement définitif.

Généralement, les voussoirs sont ensuite boulonnés entre eux manuellement.

3.6.2. Injections de bourrage

Le revêtement étant posé à l'intérieur de la jupe du tunnelier, il existe une possibilité de vide annulaire entre le terrain et le revêtement en voussoirs. Le diamètre extérieur du revêtement en voussoirs est en effet nécessairement inférieur au diamètre intérieur de la jupe par construction, et il est augmenté pour permettre au tunnelier d'effectuer des courbes en altimétrie et planimétrie.

Ce vide est rempli par une injection de mortier de bourrage. La qualité de cette injection influence directement sur la qualité du revêtement (ovalisation du revêtement, des affleurements des voussoirs) et la maîtrise des tassements en surface.

Il existe deux modes d'injection :

- L'**injection radiale**, désolidarisée de l'avancement, au travers de l'un des derniers anneaux en place ;
- L'**injection longitudinale** au travers de tubulures réservées dans la jupe du tunnelier

L'injection radiale, nécessairement inégale, est de plus en plus abandonnée au profit de l'injection longitudinale répartie uniformément sur toute la périphérie de l'anneau.

La composition du mortier de bourrage est adaptée à chaque cas mais comprend généralement du sable, un liant (ciment, cendres volantes) un plastifiant et de la bentonite. Elle doit permettre une mise en place aisée par pompage et l'obtention de bonnes caractéristiques mécaniques de résistance et de déformation à court / moyen terme (tassements).

3.6.3. Forages de reconnaissances ou de traitement de terrain

Le tunnelier peut être équipé d'une (ou plusieurs) foreuse(s) permettant d'effectuer des forages longitudinaux destructifs longitudinaux ou déviants.

Ces forages posent souvent le problème d'avoir à traverser la chambre sous pression ce qui induit l'utilisation d'un sas d'étanchéité.

La déviation du train de tiges est chose fréquente, car le matériel de sondage embarqué est généralement léger.

Il existe aussi des tubes destinés à permettre le traitement éventuel par injection d'une auréole de terrain en avant du front (concept théorique très peu mis en pratique).

La tendance actuelle concernant les reconnaissances à front irait vers l'utilisation de méthodes géophysiques (sismique réflexion) au moyen de sources et

Récepteurs fixes sur la tête du tunnelier, et interprétation en temps réel des signaux.

3.6.4. Joints d'étanchéité

Un premier joint d'étanchéité (**joint de queue**) doit exister entre la jupe et l'extrados du revêtement en voussoirs pour éviter le retour du mortier de bourrage vers l'intérieur du tunnel.

La technologie des joints/ anneau en néoprène a été abandonnée au profit de l'instauration de joints à brosses métalliques entre lesquelles on injecte en permanence une graisse épaisse spéciale. C'est la graisse elle-même, constamment renouvelée, qui constitue la matière du joint et résiste ainsi aux efforts et distorsions imposés en permanence dans cette zone.

Un deuxième joint joue un rôle fondamental, c'est le joint (**joint de roulement**) qui existe obligatoirement entre le roulement cylindrique d'entraînement du plateau excavateur et la paroi arrière fixe du compartiment pressurisé. Son bon fonctionnement est essentiel pour d'une part maintenir la pression au front et d'autre part éviter le passage dans le roulement de matériaux du front de taille susceptible de le détériorer. Ce joint n'est en principe soumis qu'à de très faibles distorsions et donc il peut cette fois être composé de plusieurs séries de bavettes en néoprène, en formes de peigne, fixées sur la partie tournante et graissées en permanence par des ajutages débouchant au travers des néoprènes.

3.6.5. Outils de surcoupe

Certains outils sont placés à la périphérie de la tête du tunnelier pour réaliser une « **surcoupe** » réglable ou fixe à la périphérie de la jupe, de façon à réduire les frottements et à faciliter l'inscription dans les courbes (cf. 3.3.7).

3.6.6. Logistique embarquée

Le fonctionnement d'un tunnelier nécessite une logistique complexe, embarquée à bord de plateformes roulantes trainées par le tunnelier et constituant ce que l'on appelle le **train suiveur** (ou « **back-up** ») pouvant atteindre 200m de long.

Le train suiveur comprend par exemple dans le cas d'un tunnelier à pression de terre :

- Une remorque de pilotage (cabine, armoires électriques, roto distributeur de mortier de bourrage, pompes d'exhaure) ;
- Une remorque de puissance (pompes et systèmes hydrauliques) ;
- une remorque d'injection du produit de bourrage ;
- Une remorque « utilitaires » avec réfectoire, compresseurs, outillages ;
- Une remorque portant les transformateurs électriques et les cellules BT (alimentation primaire 20 kV / courant secondaire en 380 V) ;
- Une remorque de ventilation

- Une remorque de stockage des tuyauteries / enrouleurs a câbles

Les trains d'approvisionnement des voussoirs et consommables doivent pouvoir circuler à travers ces remorques ayant une forme de portique prenant appui via des roues sur les voussoirs.

3.6.7. Le guidage des tunneliers

Les tolérances de positionnement du tunnel réalise par rapport à l'axe théorique sont très faibles (de l'ordre de +/- 5 cm). La précision du guidage est donc essentielle.

Le guidage comporte deux opérations distinctes :

- La **navigation**, qui est une opération de repérage topographique
- Le **pilotage**, qui est la conduite proprement dite

Le bouclier étant repère par la position d'un point de son axe et la direction

De son axe, la navigation consiste à :

- Relever la position et la direction dans l'espace
- Les comparé aux données théoriques prévues
- En déduire les consignes pour la phase pilotage

Les points de repère nécessaires a ces relevés sont installés dans le tunnel tous les 100 à 250 m en utilisant les moyens classiques de triangulation.

Au moyen d'un rayon laser rattache à ses bases et de deux cibles installées a l'arrière et a la partie médiane du tunnelier, on peut connaitre en permanence sa position et sa direction. On peut pour cela utiliser des cibles sensibles connectées à un calculateur qui donne en temps réel les écarts par rapport à la position théorique

Les consignes de pilotage consistent d'abord à définir les actions à entreprendre sur les vérins de poussée pendant la phase de forage pour maintenir ou ramener le bouclier sur sa trajectoire théorique.

Le pilotage est couple avec l'utilisation d'un plan de positionnement des voussoirs dans l'espace autour de l'axe du tunnel : le système de l'anneau universel (voussoirs à faces droites non parallèles) permet d'aligner les anneaux de façon à prendre les courbes souhaitées.

Pour agir sur les vérins, on les divise en groupes (de 3,4...) correspondant à des secteurs circulaires différents ou l'on applique différentes pressions hydrauliques, obtenant ainsi des différences d'allongement correspondant aux valeurs données par le calcul. Il faut bien sur vaincre les réactions du terrain encaissant et pour ce faire on utilise souvent les outils de surcoupe permettant d'élargir légèrement l'excavation.

La commande des vérins de poussée peut également faire l'objet d'une automatisation, notamment dans le cadre de la maîtrise du confinement à front (Système CAP) et du contrôle général du fonctionnement du système mécanique d'entraînement.