

Tunneliers

par **Pierre GESTA**

Ingénieur de l'École Centrale de Paris

Ancien Directeur à la SOGEA

Président du Comité technique de l'Association Française des Travaux en Souterrains (AFTES)

1. Principaux types de tunneliers	C 5 570 - 3
1.1 Machines de creusement.....	— 3
1.1.1 Machines à attaque ponctuelle.....	— 3
1.1.2 Haveuses	— 4
1.1.3 Machines à attaque globale.....	— 4
1.2 Boucliers mécanisés à front ouvert.....	— 5
1.2.1 Boucliers à attaque ponctuelle (fraise ou godet)	— 5
1.2.2 Boucliers à attaque globale	— 5
1.3 Boucliers mécanisés à front confiné	— 7
1.3.1 Confinement par air comprimé	— 7
1.3.2 Confinement hydraulique	— 7
1.3.3 Confinement pâteux	— 9
2. Principaux organes des tunneliers	— 10
2.1 Organes de creusement.....	— 10
2.1.1 Tête de coupe.....	— 10
2.1.2 Outils de coupe	— 11
2.1.3 Appui arrière	— 12
2.2 Organes d'évacuation des déblais	— 12
2.2.1 Tapis transporteurs (machines à front ouvert).....	— 13
2.2.2 Marinage hydraulique (tunneliers à confinement de boue)	— 13
2.2.3 Marinage pâteux (vis d'extraction)	— 13
2.3 Équipements divers.....	— 15
2.3.1 Érecteurs à voussoirs	— 15
2.3.2 Injections de bourrage	— 15
2.3.3 Forages de reconnaissance et traitement de terrain	— 16
2.3.4 Joints d'étanchéité	— 16
2.3.5 Logistique embarquée	— 16
2.4 Guidage des boucliers.....	— 17
3. Quelques performances	— 18
4. Conclusion	— 19
Pour en savoir plus	Doc. C 5 570

L'essor des travaux souterrains au cours des vingt dernières années est dû, bien naturellement, à l'importance croissante des considérations d'environnement et à l'encombrement de la surface qui en ont généralisé le besoin ; il est dû aussi aux progrès réalisés dans la technologie de construction de ces ouvrages et, notamment, à l'apparition des tunneliers qui ont permis à la fois de réduire considérablement les risques de ces travaux et d'en améliorer de façon spectaculaire la productivité.

Alors que, à la fin du 19^e siècle, l'emploi de l'explosif dans les mines et les travaux souterrains a marqué vraiment une étape décisive pour le développement de ces travaux, il est vrai que l'une des préoccupations majeures des techniciens, aujourd'hui, est de s'affranchir des inconvénients liés à l'explosif qui sont essentiellement : l'ébranlement et la désorganisation du terrain encaissant, les hors profils, les risques d'accidents spécifiques, les coûts induits par ces inconvénients, notamment en matière de soutènement et de revêtement.

Mais le passage du creusement à l'explosif au creusement mécanique s'est très longtemps heurté à un obstacle économique majeur à cause du coût relativement faible de l'énergie chimique contenue dans l'explosif par rapport à l'énergie mécanique, dite noble. La raréfaction des équipes de mineurs, personnel très spécialisé, a accéléré l'évolution, alors qu'une meilleure connaissance théorique des conditions d'attaque du terrain par des outils mécaniques et les progrès dans la configuration des têtes d'abattage permettaient d'en élargir le champ d'application à des gammes de terrains de plus en plus variées et d'en améliorer le rendement.

C'est en 1881 que la première machine de creusement mécanique d'un tunnel a été conçue et réalisée par le Colonel de Beaumont, lors des premiers travaux de reconnaissance en vue de la construction du tunnel sous la Manche. Cette machine, mue à l'air comprimé et destinée à être utilisée dans un matériau à la fois tendre, cohérent et relativement homogène, à savoir la craie bleue du Pas-de-Calais, a creusé avec succès 2,5 km de galerie de 2,14 m de diamètre en 1882 et 1883.

Si l'on excepte le matériel minier, et notamment les haveuses, aucune tentative nouvelle n'est entreprise en matière de travaux publics avant 1954, date à laquelle apparaît aux États-Unis (galerie hydroélectrique d'Oache) le premier tunnelier destiné à fonctionner dans un terrain schisteux.

Ce n'est ensuite que lentement et progressivement que de nouveaux matériels vont être conçus pour élargir le champ d'emploi des tunneliers, d'une part vers des roches de plus en plus dures (gneiss compacts) tant aux États-Unis qu'en Suisse ou en Italie, d'autre part vers des terrains de moins en moins cohérents, voire meubles et aquifères (France, Allemagne, Angleterre et surtout Japon). On peut affirmer aujourd'hui que plusieurs milliers de tunneliers de types divers et de diamètres compris entre 1 et 12 m ont été construits et mis en service à travers le monde (figure A).



Figure A – Exemple de tunnelier

1. Principaux types de tunneliers

On peut distinguer deux grandes classes de tunneliers selon qu'il s'agit de simples **machines de creusement** ou de véritables **machines de construction de tunnels** intégrant toutes les fonctions correspondant à la réalisation d'un ouvrage terminé du point de vue du génie civil.

1.1 Machines de creusement

Ce sont des machines dont la conception est généralement directement héritée des équipements miniers et qui se divisent à leur tour en trois catégories, à savoir les machines à **attaque ponctuelle**, les **haveuses** et les machines à **attaque globale**. Dans tous les cas, il s'agit seulement d'assurer l'excavation et, éventuellement, le chargement des déblais, étant entendu que le soutènement provisoire et le revêtement définitif, s'ils sont éventuellement nécessaires, sont réalisés de façon distincte par d'autres moyens.

1.1.1 Machines à attaque ponctuelle

Elles sont en général montées sur un châssis automoteur à chenilles (figure 1). Ce châssis supporte un bras mobile éventuellement télescopique équipé d'une tête fraiseuse capable de balayer une surface de front plus ou moins importante autour de sa position moyenne. Dans les machines à **attaque radiale** (type Paurat, Dosco, Demag ou certaines Eickhoff), la fraise tourne autour d'un axe situé en prolongement du bras (figure 2). Dans les machines à **attaque transversale** (Alpine, Westfalia ou certaines Eickhoff), la fraise, appelée aussi tambour, tourne autour d'un axe perpendiculaire au bras et attaque tangentielllement la surface du front (figure 3). Dans le premier cas, le creusement de chaque volée commence par l'exécution d'une sorte de forage perpendiculaire à la surface du front (*sumping*) permettant à la fraise de pénétrer dans le terrain et se poursuit par un fraisage progressif des parois de ce pré-creusement. La fraise doit donc être équipée d'outils permettant ces deux modes successifs de creusement. Dans le deuxième cas, le creusement se fait en principe toujours par fraisage tangentiel à la surface cylindrique du « tambour ».

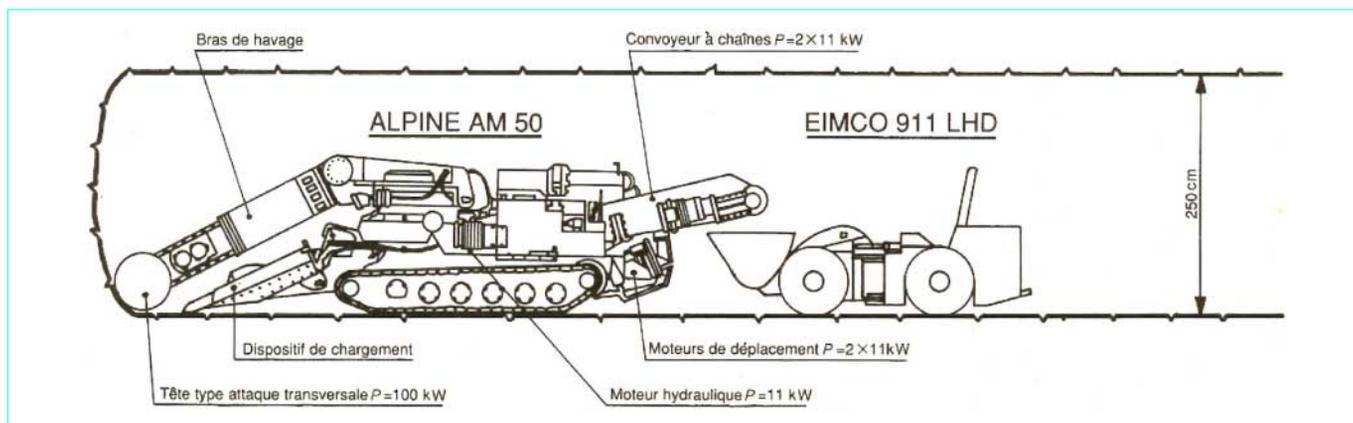


Figure 1 – Machine à attaque ponctuelle (Alpine)

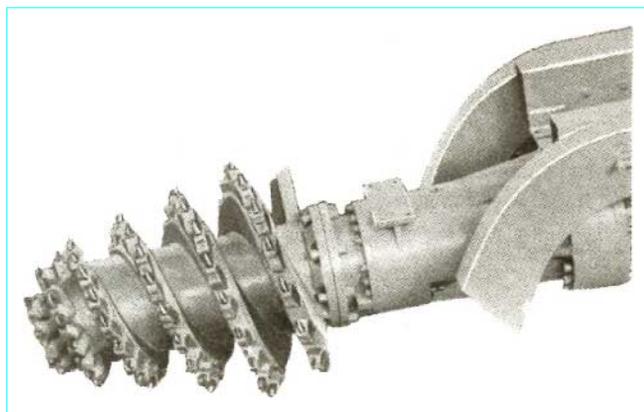


Figure 2 – Bras à attaque radiale (Eickhoff)



Figure 3 – Bras à attaque transversale (Alpine)

Les outils qui équipent les fraises sont des « pics » ou des « crayons » cylindroconiques.

La puissance d'abattage disponible en bout de bras varie suivant les types de 40 à 400 ch (30 à 300 kW) et la masse totale des machines de 5 à 60 t.

Le dispositif de ramassage des déblais est constitué, soit de chaînes métalliques continues à raclettes, soit d'une lame métallique équipée de « pinces de crabe » chargeant un tapis à chaînes et permettant l'alimentation directe de wagonnets ou d'un tapis arrière.

Suivant les modèles, la hauteur maximale d'attaque de la fraise par rapport au niveau de roulement peut varier entre 3,50 et 6,50 m.

Sauf dans les très rares cas où ces machines peuvent être équipées de vérins latéraux de blocage, la poussée maximale de la tête est obligatoirement limitée par la stabilité de la machine vis-à-vis des efforts horizontaux, c'est-à-dire par sa masse. De ce fait, leur domaine d'emploi est surtout celui des sols cohérents ou des roches tendres pouvant être désagrégées sans poussée excessive (résistance à la compression simple de quelques dizaines de MPa), mais ne nécessitant pas de soutènement immédiat du front de taille. Par contre, elles s'accommodent parfaitement de terrains hétérogènes et permettent la réalisation de toutes formes de sections en laissant libre l'accès au front.

1.1.2 Haveuses

Les haveuses sont des machines de prédécoupage mécanique, essentiellement françaises (Perforex) qui ont été utilisées avec succès depuis 1974 sur de nombreux chantiers, notamment de la RATP et de la SNCF, ainsi qu'en Italie.

La méthode consiste à réaliser, à proximité immédiate de l'extrados de l'ouvrage, une saignée de 8 à 35 cm d'épaisseur (suivant les terrains) avant même de procéder au creusement du tunnel lui-même.

La machine comporte une scie qui se déplace sur un châssis adapté à la forme de la section à excaver (figure 4). On procède par volées successives de 2 à 4 m de longueur.

En terrain dur et stable (R_c compris entre 20 et 80 MPa), on réalise des saignées de faible épaisseur (8 à 10 cm), l'excavation de la section proprement dite étant généralement effectuée à l'explosif. Les avantages consistent en la réduction des vibrations dues à l'explosif, en la réduction, en très forte proportion, des hors profils ainsi que de la densité du soutènement.

En terrain tendre, mais cohérent, la saignée est plus épaisse et elle est remplie de béton pour constituer une prévoûte résistante avant l'excavation du noyau. Dans ce cas, le prédécoupage mécanique permet généralement de réduire les tassements en limitant la décompression. À ce titre, l'emploi d'une haveuse peut être recommandé dans ce type de terrain lorsque le volume des travaux ne justifie pas l'investissement d'un bouclier mécanisé.

1.1.3 Machines à attaque globale

Elles sont caractérisées par le fait qu'elles possèdent une **tête d'excavation circulaire et rotative**, capable d'excaver en une seule opération la totalité de la section. Le revêtement définitif du tunnel n'étant pas mis en place à l'avancement, elles comportent obligatoirement une structure de réaction arrière permettant de reporter la poussée de la machine sur le terrain par l'intermédiaire de **grippeurs** ou **patins d'ancrage** latéraux qui prennent appui sur les parois de la galerie. Les grippeurs sont solidaires d'une structure d'appui qui est maintenue fixe pendant la phase d'excavation, la tête foreuse progressant alors en coulissant à l'intérieur de cette structure par l'intermédiaire de vérins longitudinaux (figure 5).



Figure 4 – Machine de prédécoupage pleine section. Méthode Perforex

Dans la phase suivante, les grippeurs étant repliés, et la tête de forage immobile, la structure est avancée de la longueur d'une travée (ou *stroke*) pour permettre l'exécution de la travée suivante.

Le **creusement** se fait donc de façon discontinue par phases successives dont l'amplitude dépend de la conception de la machine.

La tête de forage est souvent massive pour encaisser, sans déformation, lorsqu'il s'agit d'attaquer des formations rocheuses dures et compactes, les efforts de poussée très importants (plusieurs centaines à plus d'un millier de tonnes) nécessaires à la pénétration simultanée des outils dans le terrain.

L'**évacuation des déblais** se fait le plus souvent au moyen de godets périphériques qui se déversent dans une trémie centrale à la partie supérieure de la machine lors de chaque passage en position haute. La trémie alimente un tapis qui déverse les déblais à l'arrière.

Suivant la nature des terrains rencontrés, on peut associer à ce type de machines plusieurs sortes de matériels destinés à la mise en place de **soutènements provisoires** :

- foreuses radiales pour boulonnage des parois ;
- érecteurs de cintres métalliques pour mise en place de profilés de soutènement légers ou lourds.

On peut associer une ou plusieurs foreuses longitudinales pour la réalisation de forages de reconnaissance profonds en avant du front pendant l'arrêt (journalier) de la machine.

La réalisation d'un soutènement du type béton projeté à proximité immédiate de la machine est beaucoup plus rare à cause de la difficulté d'une protection efficace des organes sensibles vis-à-vis des retombées du béton projeté.

L'entraînement de la tête de forage se fait généralement par une série de moteurs hydrauliques (ou électriques) répartis le long d'une couronne d'entraînement. Les puissances nécessaires croissent évidemment en fonction du diamètre, des vitesses de creusement instantanées souhaitées (qui varient entre 2 et 6 cm/min) et de la résistance de la roche.

À titre d'exemple, on pourrait citer la quasi-totalité des machines (Robbins ou Wirth) utilisées en France depuis 1972 pour la réalisation de galeries hydro-électriques (Échaillon, la Coche, Belledonne, Bramefarine, Grandmaison...) ainsi que de nombreuses machines analogues en Suisse, aux États-Unis ou en Italie notamment.

1.2 Boucliers mécanisés à front ouvert

Ces machines se distinguent des précédentes par le fait qu'elles comportent obligatoirement un **bouclier**, c'est-à-dire une structure cylindrique rigide qui progresse au fur et à mesure du creusement et qui assure la stabilité des parois à proximité du front jusqu'à la pose du soutènement proprement dit.

Elles sont, en principe, destinées au creusement et à la construction de tunnels dont les parois peuvent nécessiter un soutènement ou même un revêtement définitif immédiat, mais dont le **front d'attaque est stable** pendant une durée suffisante pour ne nécessiter aucun soutènement ou seulement un soutènement mécanique de sécurité. En fait, il s'agit de terrains de caractéristiques mécaniques moyennes dans lesquels la pression hydrostatique ou l'irruption brutale de l'eau ne sont pas à craindre, soit que ces conditions existent naturellement, soit que le terrain ait été préalablement traité à cet effet.

Le soutènement peut être constitué, soit de cintres métalliques classiques, soit de boulonnage, soit de voussoirs préfabriqués en béton ou métalliques.

Quel que soit son type, **le soutènement est posé directement au contact du terrain** en arrière de la jupe du bouclier, ce qui suppose que la stabilité propre des parois est assurée sur une longueur et pendant un délai suffisants pour permettre la pose d'une travée de soutènement.

Cette disposition, lorsqu'elle est possible, entraîne plusieurs conséquences favorables sur la marche du chantier :

- le chantier de pose peut, dans certaines limites, être dissocié du chantier de creusement et ils peuvent fonctionner simultanément, ce qui procure plus de souplesse à l'organisation du chantier ;
- le soutènement est directement calé au terrain sans qu'il soit nécessaire de prévoir une injection ultérieure de blocage.

Dans ce cas, la réaction d'appui arrière doit, comme dans les cas précédents, être reprise soit par des patins latéraux solidaires de la structure principale, ce qui suppose que des efforts suffisamment importants puissent être développés dans le terrain sans déformation excessive, soit par un anneau de poussée bloqué au terrain par expansion.

Deux catégories de machines appartiennent à cette famille suivant que l'excavation proprement dite est réalisée par une ou plusieurs machines ponctuelles ou par une tête de forage excavatrice circulaire : les boucliers à attaque ponctuelle et les boucliers à attaque globale.

1.2.1 Boucliers à attaque ponctuelle (fraise ou godet)

C'est le cas des machines Zokor utilisées à Paluel et à Penly pour le creusement de galeries de rejet sous mer (figure 6) ou de la machine Grosvenor du métro de Singapour, ou encore de la série de « boucliers à lances » de Westfalia.

Ces machines sont en fait de conceptions sensiblement différentes bien qu'elles possèdent en commun les caractéristiques propres à cette famille, à savoir :

- soutènement continu des parois du tunnel ;
- pas de confinement du front ;
- creusement par engin ponctuel.

Les machines Zokor de Penly et Paluel ont un bouclier cylindrique prenant appui pour progresser, soit sur un anneau de poussée (Paluel), soit sur les voussoirs du revêtement (Penly). Le creusement se fait par un bras de pelle fixé à la structure du bouclier et équipé d'un godet en rétro.

La machine Grosvenor de Singapour a également un bouclier cylindrique prenant appui sur le dernier anneau de voussoirs préfabriqués constituant le revêtement. Mais ce bouclier comporte des « **lances** » **métalliques** en partie haute, qui peuvent être avancées individuellement pour assurer la protection du front et éviter, en cas de mauvais terrain, la formation d'éboulements en « cloche » et parer aux risques d'effondrements en surface. Il comporte aussi des plaques de blindage du front, à commande hydraulique, pour assurer le soutènement mécanique du front en cas de nécessité.

Les **boucliers à lances** de Westfalia, qui ont été utilisés notamment lors de la construction du métro de Francfort en Allemagne, ont recours à une autre méthode pour assurer la progression du bouclier sans prendre appui sur le revêtement arrière : le bouclier est constitué d'une série de lances parallèles et juxtaposées qui coulisent les unes par rapport aux autres et qui sont manœuvrées successivement et individuellement. Les vérins utilisés pour leur avancement prennent appui sur la structure, elle-même stabilisée grâce au frottement de l'ensemble des autres lances le long du terrain. Un tel dispositif peut être avantageux, notamment en cas de terrain hétérogène ; il n'est toutefois pas susceptible de cadences d'avancement très rapides.

Toutes ces machines à attaque ponctuelle s'accommodent de sections non circulaires (fer à cheval par exemple) et peuvent être associées à différents types de revêtement et de soutènement : boulonnage, cintres, béton coulé en place ou voussoirs métalliques ou béton.

1.2.2 Boucliers à attaque globale

Cette catégorie regroupe toutes les machines à **plateau rotatif** et à bouclier, mais sans confinement du front autre qu'un simple confinement mécanique exercé par le plateau lui-même.

Un tel confinement suppose néanmoins qu'en cas de forte poussée du front, l'ensemble plateau/bouclier puisse trouver, même à l'arrêt, une force de réaction suffisante (par appui direct ou par frottement) pour éviter le recul.

Les terrains convenables pour de telles machines sont sensiblement les mêmes que pour la catégorie précédente (terrains cohérents peu perméables ou hors nappe, ou roches tendres). Les cadences d'avancement obtenues avec de telles machines sont généralement supérieures à celles des boucliers à excavation ponctuelle, mais l'investissement est notablement plus élevé. Elles concernent donc des chantiers plus importants (longueurs à creuser de 1 km et davantage). Parmi les tunneliers utilisés, notamment en Europe, au cours des dernières années, plusieurs répondent à cette définition :

- tunneliers Robbins du tunnel principal SPS du CERN à Genève ;
- tunnelier Wirth du tunnel principal LEP pour le CERN à Genève (à double jupe) (figure 7) ;
- tunnelier Robbins du lot Châtelet-Gare de Lyon de la ligne A du RER à Paris ;
- et, plus récemment, les 4 machines James Howden/Decon et les 2 machines Robbins/Markham des attaques britanniques du tunnel sous la Manche.

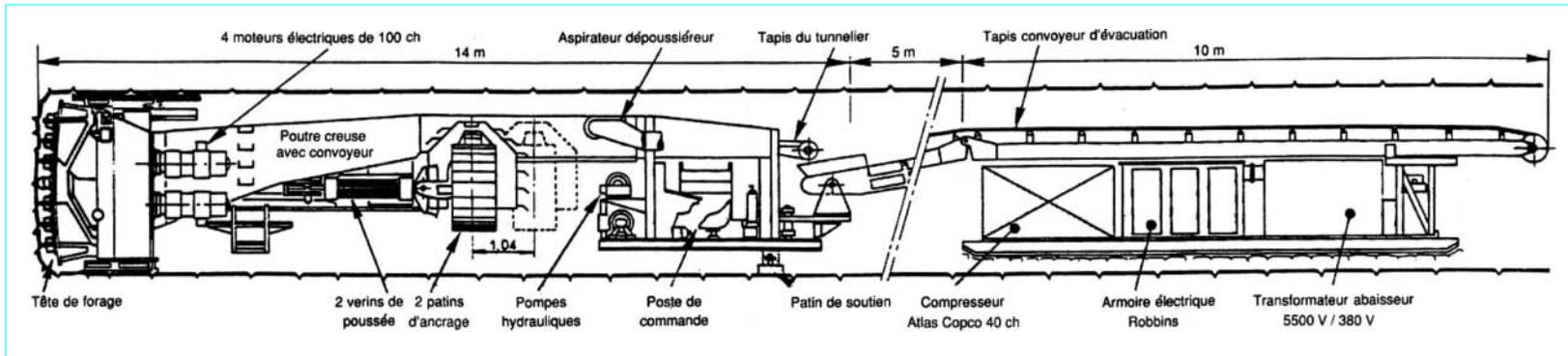


Figure 5 - Machine de creusement à attaque globale Robbins (La Coche. 1975)

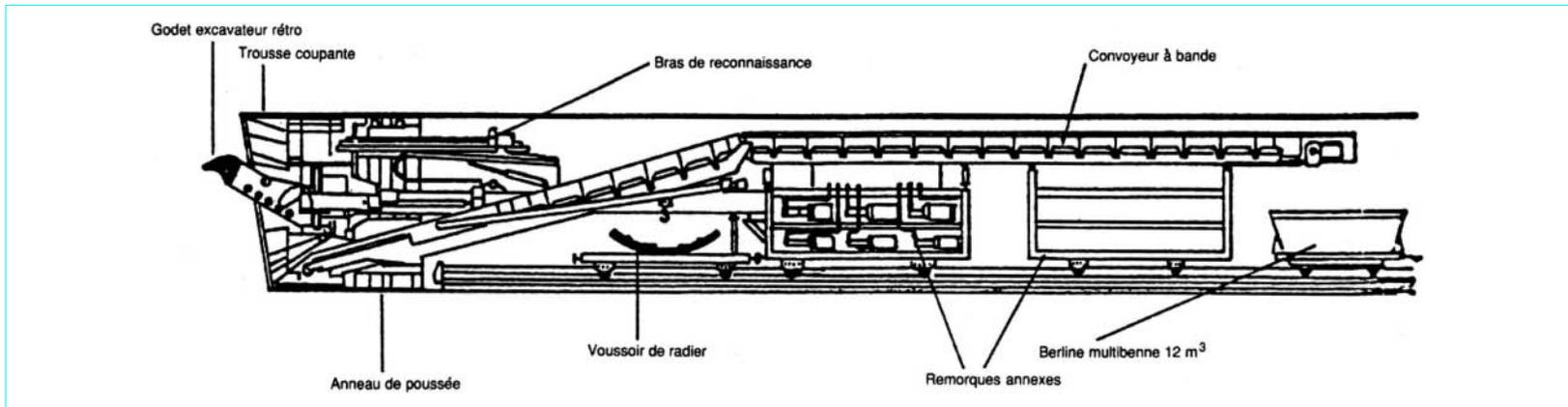


Figure 6 - Bouclier mécanisé à front ouvert à attaque ponctuelle Zokor (Paluel. 1982)

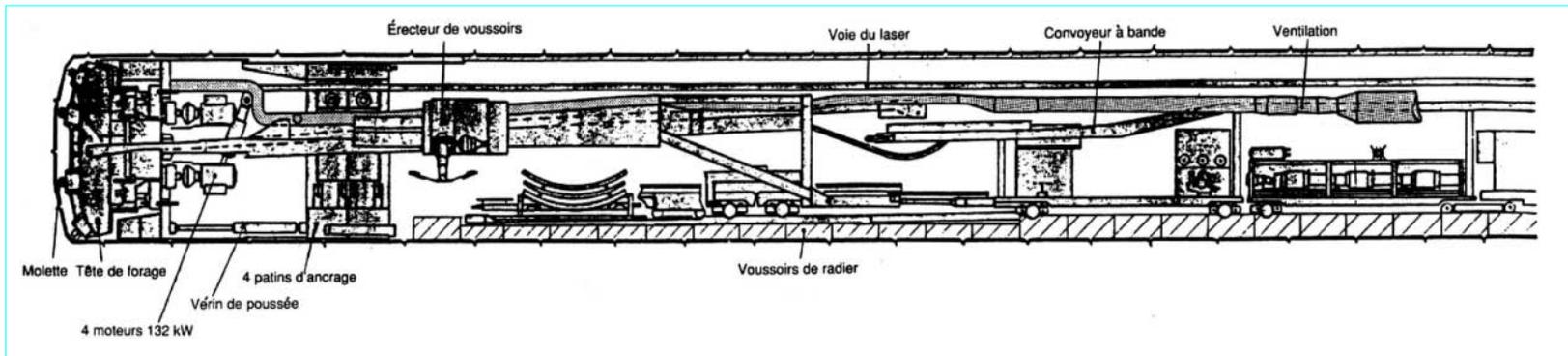


Figure 7 - Bouclier mécanisé à front ouvert à attaque globale Wirth (LEP du CERN à Genève. 1986)

Les tunneliers du CERN, qui creusaient dans les formations de molasse, posaient à l'arrière de la jupe un pré-revêtement en voussoirs béton de faible épaisseur, complété ensuite par un revêtement intérieur en béton coulé en place.

Le tunnelier du RER mettait en place un voussoir de radier et un pré-soutènement à base de cintres légers et de tôles, également complété ensuite par un revêtement coulé en place.

Les tunneliers de l'attaque britannique de TML (Transmanche Link) posaient, toujours en arrière de la jupe, donc à même la craie, le revêtement définitif composé de voussoirs préfabriqués en béton armé.

1.3 Boucliers mécanisés à front confiné

Les boucliers à front confiné constituent ce que l'on pourrait appeler la dernière génération des tunneliers, à savoir un matériel capable de faire face à des situations particulièrement difficiles et qui, en tout cas, jusqu'à leur apparition, nécessitaient la mise en œuvre de méthodes spéciales, longues et onéreuses, telles que traitement de terrain ou congélation. Il s'agit essentiellement du creusement en **terrain meuble et aquifère** (généralement formations sédimentaires des vallées).

Outre les caractéristiques des tunneliers de la précédente famille, ces tunneliers comportent, à l'avant, une **chambre étanche** dans laquelle sont installés les moyens d'excavation et qui peut être mise sous pression de façon à assurer l'équilibre du terrain le long de la surface verticale du front d'attaque, tant du point de vue hydraulique que du point de vue des pressions intergranulaires.

De même qu'il existe plusieurs méthodes d'excavation, il existe aussi plusieurs sortes de confinement pour assurer, partiellement ou totalement, l'équilibre des trois phases dont est constitué le terrain en place. Le confinement peut être gazeux (air comprimé), liquide (eau ou boue bentonitique) ou solide (confinement pâteux ou confinement de sol).

Compte tenu des caractéristiques mécaniques des terrains auxquels ils sont destinés, ces tunneliers sont obligatoirement associés à la pose d'un **revêtement à l'intérieur de la jupe du tunnelier**, de sorte que les parois de la galerie soient soutenues en permanence. Ce revêtement peut consister, soit en voussoirs béton préfabriqués, soit en voussoirs métalliques (fonte), soit en béton « extrudé » coulé en place à l'avancement.

Toutes choses égales par ailleurs, les poussées nécessaires pour assurer la progression du tunnelier sont nettement plus fortes que dans le cas des tunneliers à front ouvert car elles doivent inclure la pression de confinement qui s'exerce sur la paroi arrière de la chambre et qui tend à faire reculer le tunnelier.

1.3.1 Confinement par air comprimé

C'est le mode de confinement le plus ancien, très souvent utilisé dès le début du siècle, soit dans des caissons, notamment pour la construction de piles d'ouvrages en rivière, soit en tunnel (métros de Londres, Paris ou Berlin).

L'ensemble du tunnel était généralement mis en pression. Les ouvriers travaillaient alors en atmosphère comprimée, ce qui accroît considérablement la pénibilité de ces travaux et limite en conséquence la durée maximale de travail continu pour chaque équipe.

Par ailleurs, la nécessité de respecter des durées de décompression, d'autant plus longues que la pression est plus élevée, et le passage des déblais dans les sas réduisent considérablement les possibilités d'avancement journalier.

La roue excavatrice tourne dans la chambre remplie de boue et

Enfin, une même pression d'air ne saurait équilibrer exactement une pression hydrostatique qui croît du haut en bas du tunnel d'une valeur égale à la colonne d'eau correspondante (100 kPa pour 10 m de hauteur). On règle généralement la pression d'air à une valeur correspondant à la pression moyenne au niveau de l'axe du tunnel, de sorte que, si le terrain est relativement perméable, l'air a tendance à s'échapper dans le terrain en partie haute et l'eau à pénétrer dans le tunnel en partie basse.

Quoi qu'il en soit, la mise sous pression d'air de la chambre avant d'un tunnelier mécanisé peut être favorablement envisagée si certains de ces inconvénients sont annulés ou réduits.

La première application de ce principe a été mise en œuvre dès 1967 lors de la construction du lot Étoile-Neuilly de la ligne A du RER à Paris (figure 8). Il s'agissait d'un tunnelier Robbins de 10 m de diamètre à plateau excavateur rotatif. Les déblais étaient évacués par tapis et sortis en atmosphère normale par l'intermédiaire de deux trémies sas fonctionnant alternativement. Du fait même de la mécanisation des opérations de creusement et de la limitation de l'air comprimé au seul front d'attaque, les inconvénients liés au travail de la main-d'œuvre en air comprimé étaient considérablement réduits puisqu'il s'agissait du seul personnel d'entretien dont les interventions étaient, en principe, épisodiques. La pose du revêtement en voussoirs de béton préfabriqués était effectuée en atmosphère normale dans la partie arrière de la jupe.

D'autres applications plus récentes de l'air comprimé au front, mais pour des tunneliers à excavation par machine ponctuelle, ont été réalisées dans le cas des différentes machines CSM Bessac et Westfalia utilisées en France et notamment lors de la construction du collecteur de Caudéran-Naujac à Bordeaux.

Le dispositif était complété par la possibilité de projection de boue bentonitique en vue d'améliorer l'imperméabilité du terrain le long du front de taille, notamment lors des arrêts de la machine, pour réduire les risques de fuites d'air dans le terrain et leurs conséquences vis-à-vis de l'environnement.

De telles machines peuvent constituer une bonne solution pour des chantiers petits ou moyens car les investissements restent limités, mais les performances demeurent obligatoirement modestes.

1.3.2 Confinement hydraulique

Le développement, au cours des années 60, et les perfectionnements des applications des propriétés thixotropiques de la **boue bentonitique**, notamment pour la construction de parois moulées de grande hauteur, ont amené tout naturellement les concepteurs de tunneliers à envisager l'emploi de la boue pour la stabilisation du front de taille. Dans ce cas, la chambre avant du tunnelier est remplie d'une boue bentonitique maintenue à une pression telle qu'elle puisse à la fois équilibrer la pression hydrostatique interstitielle du terrain et exercer sur les grains qui le constituent une pression suffisante pour les maintenir en place au fur et à mesure de la progression du front. La pression minimale nécessaire pour assurer cet équilibre est évidemment d'autant plus élevée que les caractéristiques mécaniques du sol (angle de frottement interne, cohésion) sont faibles et que la pression géostatique initiale (liée à la profondeur) est forte.

Les propriétés thixotropiques de la bentonite et sa capacité à déposer un **film imperméable** (cake) le long du front d'attaque dès qu'il est dégagé permettent d'éviter la pénétration de la boue profondément dans le terrain, même s'il est relativement perméable. La surpression de la boue peut ainsi s'exercer sur les grains qu'elle stabilise.

Suivant la perméabilité du terrain et la qualité de la boue, le cake peut être, soit de type « membrane » très imperméable et très mince, soit de type « imprégnation » à la fois plus perméable et plus épais (20 à 50 cm).

les matériaux extraits se mélangent à elle.

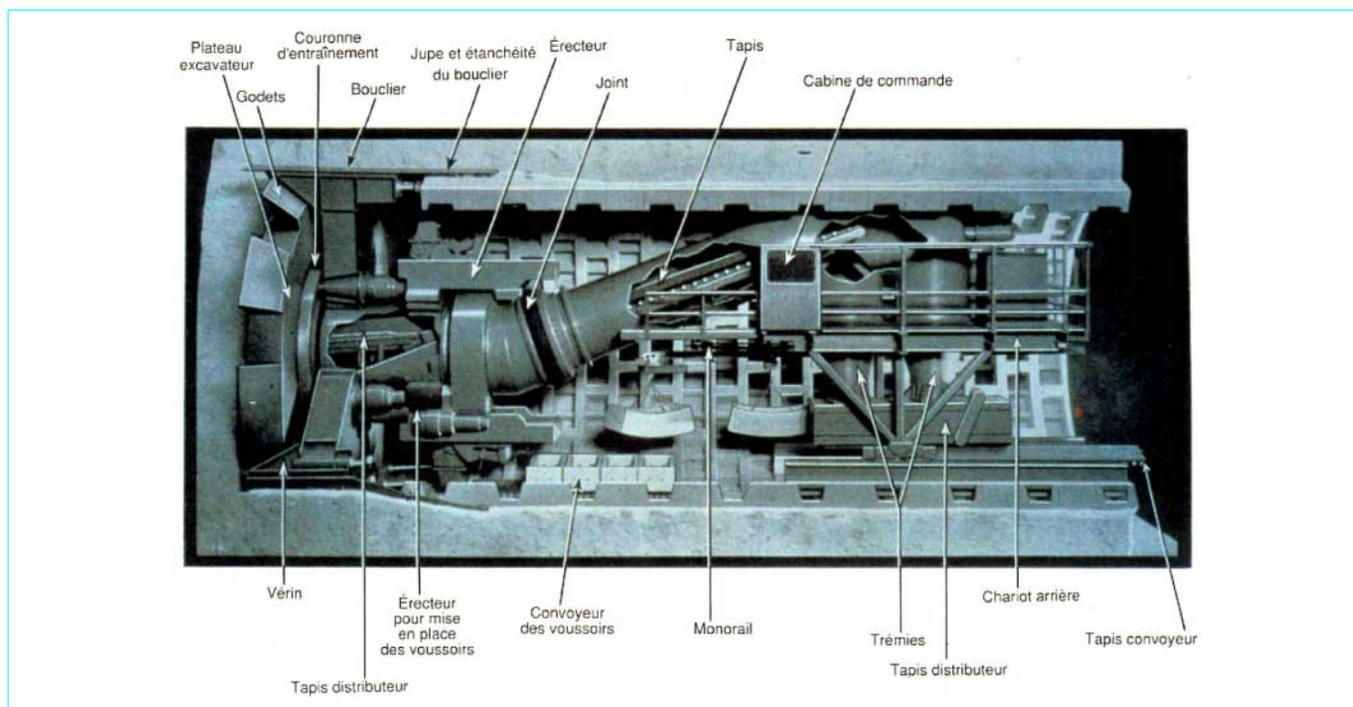


Figure 8 – Bouclier à front confiné à l'air comprimé Robbins (RER Paris. 1967)

Pour assurer la continuité du système, il suffit d'extraire en permanence, au moyen de pompes hydrauliques, la boue chargée de déblais que l'on remplace simultanément par un flux continu de boue neuve. On assure ainsi un flux permanent de renouvellement de boue.

Le transport des matériaux se fait hydrauliquement. La boue chargée est amenée à une station de traitement, généralement à l'extérieur du tunnel, où les matériaux sont séparés au moyen de cyclones et, éventuellement, par centrifugation et/ou filtres presses s'il s'agit de matériaux à très fine granulométrie (silts ou argiles). Après addition de bentonite, si nécessaire, la boue régénérée est pompée vers le front.

L'une des conditions du succès de ces tunneliers est le maintien d'une pression réellement constante dans la chambre pendant toute la phase de creusement. Les variations brutales de pression sont en effet susceptibles d'entraîner des éboulements du front et, par voie de conséquence, des désordres en surface.

Chez les constructeurs allemands, la régulation se fait par l'intermédiaire d'une **cuve supérieure à niveau constant** où la surface de la boue est sous pression constante d'air. Il s'agit à la fois de réguler le niveau de la boue, en agissant sur les pompes d'amenée et d'exhaure, et la pression de l'air.

Chez les constructeurs japonais, la régulation se fait directement par **capteurs de pression de boue** dans la chambre agissant directement sur les pompes hydrauliques. Différents dispositifs complémentaires sont nécessaires pour réduire les conséquences d'irrégularités éventuelles le long des canalisations d'aller et de retour de la boue (figure 9).

La composition de la boue dépend très directement de la nature du sol à excaver. S'il s'agit d'un matériau très fin, contenant une forte proportion de silt ou d'argile, l'apport de bentonite pourra être très réduit ou même nul. La difficulté principale consistera alors en la séparation de ces matériaux fins dans la **station de traitement**, à moins que la boue ne puisse être rejetée telle quelle, ou avec un

traitement très sommaire pour être décantée naturellement. S'il s'agit de matériau très grossier et perméable, l'action thixotropique de la boue pourra être insuffisante pour éviter sa pénétration dans le sol et le maintien d'une surpression dans la chambre sera difficile. C'est bien ce qu'a montré la réalisation de la ligne B du métro de Lyon (tunnelier Bade dans les alluvions du Rhône sous très faible couverture). Ce chantier a néanmoins été mené à bien avec succès grâce à la mise en place au fond du Rhône et de la Saône d'un matelas d'argile et à l'utilisation de boues très épaisses.

À l'occasion d'autres chantiers, notamment au Japon, ainsi que dans le cadre du Programme de Recherches Français « Tunnels 85-90 », de nouvelles expérimentations ont été conduites faisant appel à l'emploi d'ajouts tels que le ciment, les copeaux ou les confettis de bois, les granulés de bentonite, les polymères hydro-solubles [CMC (carboxyméthylcellulose)]. Ces derniers permettent notamment d'accroître, même à faible dosage, le seuil de cisaillement de la boue, donc sa capacité de soutènement. Les granulés de bentonite peuvent aussi donner d'excellents résultats dans les terrains très perméables.

Enfin, dans le cas de terrains hétérogènes comportant, soit des bancs rocheux, soit des blocs, il est nécessaire d'interposer un **concasseur** à la sortie de la chambre car la granulométrie des matériaux acceptables par les pompes et les tuyauteries de refoulement est évidemment limitée par le diamètre de ces dernières. On admet généralement que la dimension maximale des granulats acceptables doit être limitée au tiers du diamètre des canalisations (environ 80 mm pour des canalisations de diamètre 250 mm).

Les interventions manuelles dans la chambre avant sont nécessaires, soit en cas d'incident, soit pour les opérations d'entretien, de dégagements éventuels de blocs ou de changement d'outils de la roue de coupe. Elles sont possibles après vidange de la boue par mise sous air comprimé du volume de la chambre. Le maintien de la pression d'air est facilité par le fait que le film de boue déposé sur les parois assure, au moins pendant quelques heures et jusqu'à sa dessiccation, l'étanchéité de ces parois et limite la pénétration de

l'air. En cas d'opérations de longue durée, il peut être nécessaire de renouveler le film de boue par remplissage, puis nouvelle vidange de la chambre.

1.3.3 Confinement pâteux

Les sujétions liées à l'emploi de la boue, notamment la nécessité de retraitement des boues, ainsi que les limites de leur emploi en cas de terrains très hétérogènes (avec présence de blocs) ou très perméables, ont conduit les entreprises et les constructeurs de machines à s'interroger sur la possibilité d'un confinement du front

par les matériaux extraits eux-mêmes, sans passer par l'emploi de boue liquide ou d'air comprimé.

Ces recherches ont conduit à la conception des tunneliers à « pression de sol » ou à confinement pâteux qui sont essentiellement caractérisés par l'extraction contrôlée des matériaux hors de la chambre avant au moyen d'une vis d'Archimède dont le débit doit être asservi à la pression moyenne régnant dans la chambre avant et qui doit être maintenue aussi constante que possible. Cette pression est elle-même fonction de la force exercée par les vérins longitudinaux de la machine pour assurer sa pénétration dans le terrain et du débit d'extraction des matériaux par la vis (figure 10).

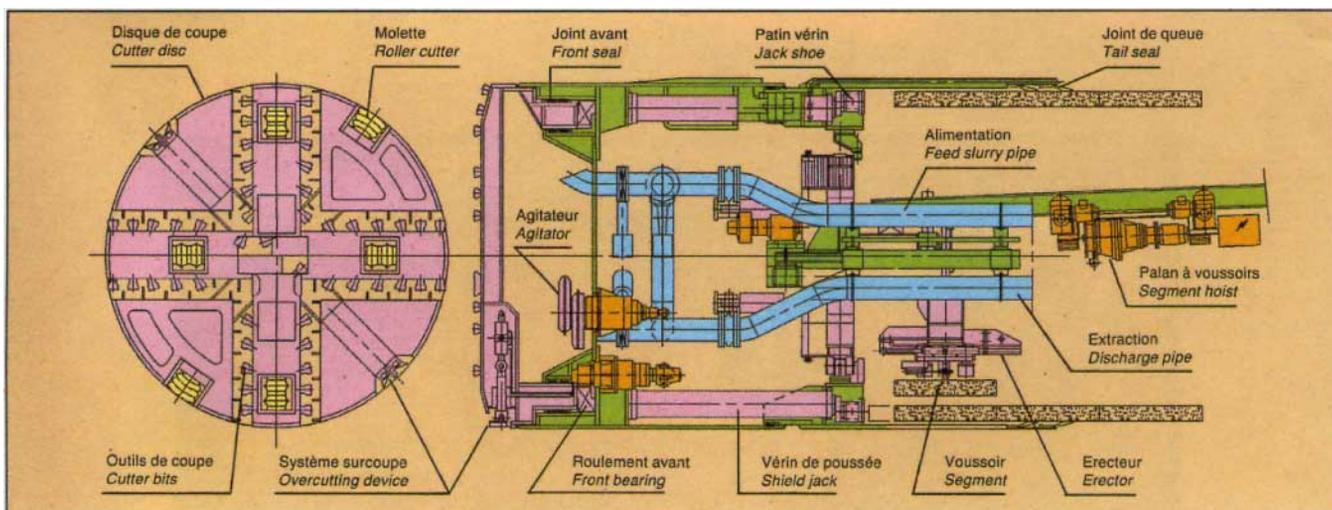


Figure 9 – Bouclier à confinement hydraulique FCB-Kawasaki

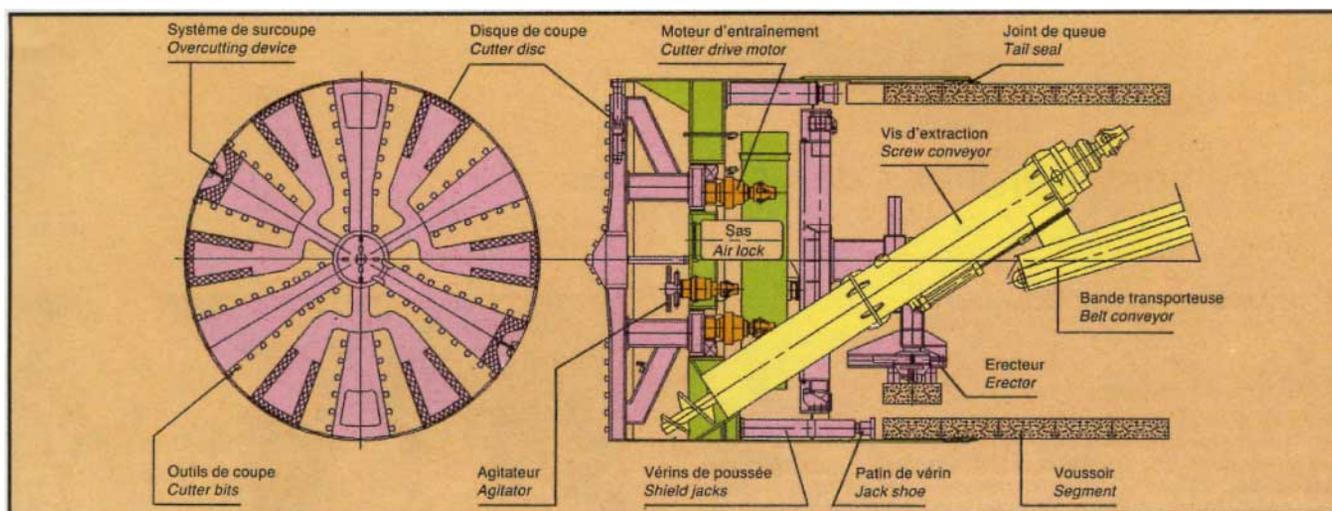


Figure 10 – Bouclier à confinement pâteux FCB-Kawasaki

Pour que le système puisse fonctionner correctement, il faut que les matériaux présents dans la chambre offrent à la fois :

- une maniabilité suffisante pour leur permettre d'occuper à tout instant tout le volume de la chambre sans opposer une trop forte résistance au plateau excavateur : ils doivent se comporter comme une boue épaisse ou comme un béton dans son malaxeur ;
- 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 pour éviter sa décohéation au voisinage du front.

Suivant la nature des terrains rencontrés, il pourra donc être nécessaire d'injecter dans la chambre des ajouts appropriés qui peuvent être, soit une argile, soit de la bentonite, soit un polymère hydro-soluble pour corriger les caractéristiques mécaniques des déblais naturels en améliorant leur imperméabilité, leur maniabilité ou l'ensemble des deux paramètres.

Dans son principe, ce type de confinement est évidemment plus satisfaisant que le confinement liquide (ou à la boue), dans la mesure où il agit directement sur la pression totale du terrain au voisinage du front (pression intergranulaire et interstitielle) et où il n'est pas tributaire de la bonne formation d'un cake superficiel.

Le confinement pâteux permet aussi d'éviter le retraitement des boues souvent coûteux et encombrant. Enfin, il s'accommode plus facilement de la présence de blocs dans la mesure où leur dimension est compatible avec les caractéristiques de la vis d'extraction (blocs de quelques dizaines de centimètres au lieu de quelques dizaines de millimètres dans le cas des tunneliers de grand diamètre).

Dans la pratique, le fonctionnement de ce type de confinement peut s'avérer délicat si la conception de la vis ne permet pas une parfaite maîtrise de la pression dans la chambre. Dans le cas de fortes pressions hydrostatiques, il est nécessaire d'allonger la longueur de la vis ou de disposer deux vis en série pour augmenter les pertes de charge entre la chambre et la sortie, et freiner la progression des matériaux tout en évitant les blocages intempestifs.

Dans les cas extrêmes, la sortie peut être équipée, soit d'un déchargeur rotatif, soit d'un distributeur à piston, qui permettent le contrôle volumétrique direct de la quantité de matériaux extraits. Les recherches sont actuellement poursuivies pour accroître la fiabilité des vis et de leurs dispositifs annexes. Quoiqu'il en soit, l'un des avantages essentiels des tunneliers à confinement pâteux est leur faculté plus grande de travailler, suivant le cas et sans modification fondamentale, soit en mode fermé (terrains aquifères perméables), soit en mode ouvert (terrains non aquifères ou imperméables) et de s'accommoder de terrains hétérogènes, en un mot, leur plus grande souplesse d'emploi.

Ces avantages sont surtout déterminants dans le cas de tunneliers de diamètres moyens. Ils sont beaucoup moins sensibles dans les tunneliers de faible diamètre où le confinement à la boue est très généralement préféré à cause de la facilité offerte par l'évacuation hydraulique des déblais. Par ailleurs, l'emploi du confinement pâteux pour les très grands diamètres (supérieurs à 10 m) suppose résolu le problème délicat de l'homogénéisation des pressions sur une très grande surface de front.

2. Principaux organes des tunneliers

2.1 Organes de creusement

2.1.1 Tête de coupe

La tête de coupe rotative est l'organe qui porte les outils. Elle doit assumer les fonctions de **découpe du terrain** et de **ramassage des déblais**. Elle est à la fois poussée contre le terrain grâce aux

véris longitudinaux et animée d'un mouvement de rotation par ses moteurs d'entraînement qui peuvent être hydrauliques ou électriques. Les moteurs électriques ont, en principe, un meilleur rendement, mais leurs conditions de fonctionnement présentent beaucoup 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.

La tête de coupe est dite **télescopique** si elle peut être avancée de la longueur d'un « stroke » (cycle d'avancement) alors que la jupe du bouclier reste fixe.

Des **ouvertures** sont pratiquées dans la tête pour permettre le passage des matériaux extraits. Trois configurations sont possibles :

- ouvertures **périphériques** avec ramassage des matériaux par des godets disposés au voisinage des ouvertures (figure 11) et qui se vident en partie supérieure à chaque tour de roue : les matériaux tombent alors dans une trémie qui alimente en partie centrale un tapis distributeur ;
- ouvertures **radiales** : les matériaux tombent vers l'arrière dans 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. Les ouvertures sont d'autant plus étroites que l'on souhaite disposer de matériaux de faible granulométrie (figure 12) ;
- tête **en étoile** constituée de bras (généralement 6 à 8) de faible largeur séparés par des vides très importants (figure 13).

Les ouvertures périphériques sont utilisées s'il s'agit de terrains rocheux relativement homogènes. Les ouvertures radiales conviennent aux terrains meubles nécessitant un certain confinement. Les étoiles conviennent aux terrains cohérents mais peu résistants.

La transmission du mouvement de rotation peut se faire, soit par un **axe central** (la valeur maximale du couple est alors limitée), 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 largement calculée car c'est d'elle que dépend en grande partie l'aptitude de la machine à se sortir des situations difficiles et à éviter les blocages.

Dans le cas de **terrain rocheux**, le couple maximal peut être évalué théoriquement en fonction des caractéristiques mécaniques du terrain, de la profondeur souhaitée pour chaque passe d'outil et du nombre des outils (étude de MM. Wanner et Aeberli présentée au 4^e Congrès de Mécanique des Roches à Montreux en 1979) [1].

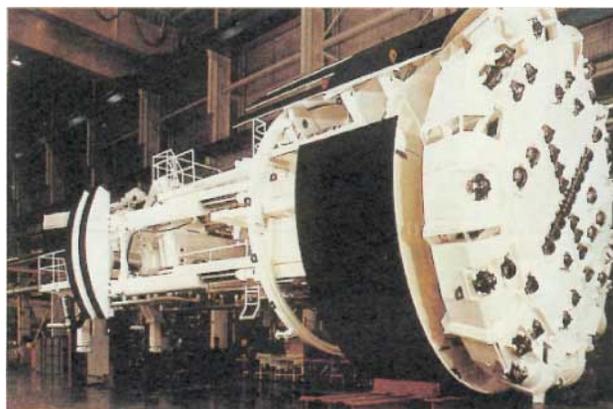


Figure 11 – Ramassage par godets périphériques Robbins (Grandmaison)

Pour les tunneliers à **terrain meuble**, une approche moyenne peut être obtenue par la formule empirique suivante [2] :

$$C = D^3 \alpha$$

avec C (t · m) couple nécessaire,
 D (m) diamètre extérieur du tunnel,
 α coefficient qui dépend de la nature du terrain et du mode de confinement éventuel.

S'il s'agit de tunneliers sans confinement ou à confinement par air comprimé ou boue :

$\alpha = 0,4$ à $0,6$ pour le silt ou l'argile ;
 $\alpha = 1,0$ à $1,4$ pour les sables et les graviers.

S'il s'agit de tunneliers à confinement pâteux :

$\alpha = 1,8$ à $2,0$.

La **vitesse de rotation** du plateau doit généralement pouvoir être modifiée pour ajuster le couple disponible aux conditions réelles du terrain. La vitesse moyenne doit être telle que la vitesse linéaire des outils périphériques soit comprise entre 15 et 30 m/min s'il s'agit d'argile ou de silt et entre 8 et 15 m/min s'il s'agit de sable ou de gravier.



Figure 12 - Tête à ouvertures radiales FCB-Kawasaki (Lille. 1987)



Figure 13 - Tête en étoile Mitsubishi (tunnel sous la Manche. 1990)

2.1.2 Outils de coupe

Plusieurs types d'outils peuvent être installés sur les têtes des tunneliers. Dans les machines « pleine face », on utilise, soit des disques, soit des pics.

Les **disques** (ou **molettes**) sont analogues aux molettes de vitrier (figure 14a). Ils sont portés par un palier radial de façon à tracer sur le front des cercles concentriques.

Leur implantation sur le plateau et leur angle de pénétration sont tels que les sillons décrits à chaque tour de roue par l'ensemble des disques soient suffisamment proches les uns des autres pour provoquer la rupture de la portion de roche restant entre les sillons (figure 15).

Le nombre de molettes est compris entre 10 et 18 par mètre de rayon de la section excavée, ce qui correspond à un écartement des sillons compris entre 6 et 10 cm.

Les disques conviennent à l'attaque des formations rocheuses, même homogènes et résistantes. On utilise généralement des disques d'un diamètre de 12 ou 15 pouces (≈ 300 ou 380 mm). L'évolution récente a vu l'apparition de molettes de plus en plus grandes et supportant des poussées de plus en plus élevées (jusqu'à 19 pouces soit 483 mm de diamètre pour une poussée unitaire de 32 t). De telles molettes sont capables de pénétrer dans des granits extrêmement durs dont la résistance à la compression peut dépasser 250 MPa. Les molettes peuvent, dans certains cas, être munies de picots au carbure de tungstène. Il existe aussi des molettes à double disque (figure 14b).

Les **pics** ou les **dents** travaillent à la façon des dents de ripeurs en raclant le terrain dans lequel ils pénètrent (figure 16). 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.

Certains de ces outils peuvent être placés à la périphérie de la tête pour réaliser une « surcoupe » réglable ou fixe à la périphérie de la jupe, de façon à réduire les frottements ou à faciliter l'inscription dans les courbes.

Pour répondre à la tendance actuelle d'utilisation des tunneliers dans des formations variées ou hétérogènes, il est fréquent de disposer sur la tête de coupe à la fois des disques qui désagrègent les parties rocheuses et des pics qui fragmentent les zones de terrains moins cohérents.

Les molettes et les pics doivent pouvoir être changés depuis l'arrière de la tête pour éviter le travail à l'avant de la tête (très dangereux en terrain instable) et pour réduire la durée de ces opérations.

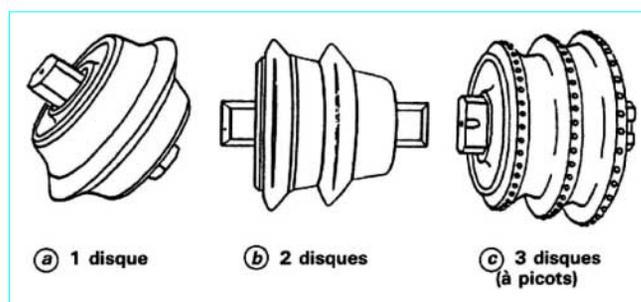


Figure 14 - Molettes

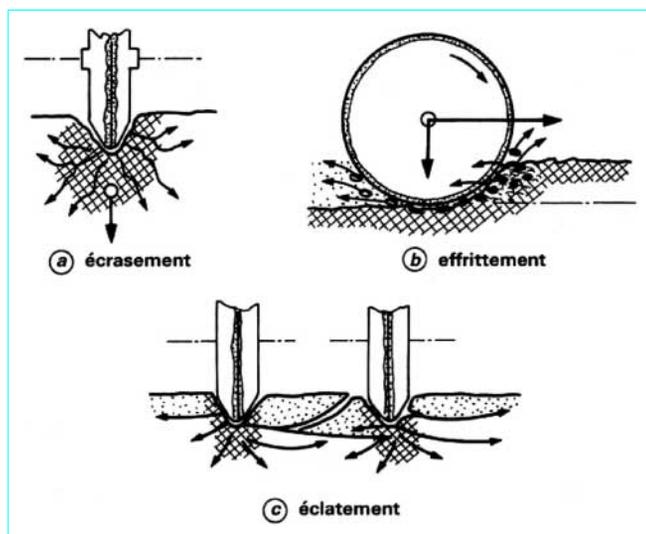


Figure 15 – Mécanisme d'action des molettes

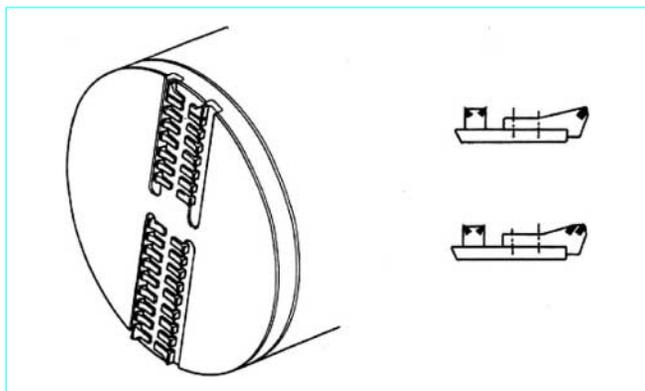


Figure 16 – Exemple de pics

Enfin, signalons que les tambours des machines à attaque ponctuelle peuvent être munis, soit de pics, soit de crayons cylindriques à pointe conique qui travaillent à la fois en percussion et en ripage lorsque le tambour tourne.

2.1.3 Appui arrière

Pour progresser, tout tunnelier doit pouvoir disposer vers l'arrière d'une réaction d'appui suffisante pour vaincre la somme des forces longitudinales qui s'opposent à cette progression.

Ces forces dépendent de la nature du terrain et de l'architecture du tunnelier. Il existe, en principe, plusieurs catégories de forces :

- les forces qui doivent être exercées sur la tête d'abatage et sur ses outils pour assurer sa pénétration ;
- les forces de frottement du terrain le long de la jupe, s'il s'agit d'un tunnelier à jupe (variables en fonction du terrain et de la surcoupe éventuelle) ;
- les forces de confinement du front (air comprimé, boue ou confinement pâteux), ces forces incluant elles-mêmes la pression hydrostatique éventuelle de l'eau incluse dans le terrain.

L'ensemble de ces forces peut atteindre plusieurs milliers de tonnes s'il s'agit de tunneliers de grand diamètre munis de jupes et d'un dispositif de confinement du front (6 000 t dans le cas des tunneliers des galeries principales d'un diamètre de 7,65 m au creusement du tunnel sous la Manche).

Il existe deux modes de reprise de ces forces par l'arrière de la machine, suivant qu'elles sont transmises au terrain encaissant ou au revêtement.

Dans le premier cas, la partie arrière du tunnelier peut être bloquée au terrain au moyen de **patins radiaux** rétractables (ou *grippers*) et la partie avant se déplace longitudinalement en prenant appui sur la structure arrière pendant la phase de creusement. Lorsque les vérins longitudinaux ont atteint leur allongement maximal, les grippers sont rétractés et la structure arrière avance pour permettre la réalisation du cycle suivant. C'est ce système qui équipe généralement les tunneliers pour roche dure. Il nécessite en effet à la fois que le terrain encaissant présente une résistance mécanique suffisante pour supporter l'appui des grippers sans rupture ou déformation excessive, et que les parois du tunnel ne soient pas immédiatement revêtues pour que les grippers puissent y trouver leur appui.

Dans le deuxième cas, le tunnelier prend appui longitudinalement sur la dernière **tranche de revêtement** réalisée, au moyen d'une série de vérins longitudinaux périphériques. Ce système suppose évidemment que le tunnel est revêtu et que le revêtement est posé directement à l'arrière de la machine au fur et à mesure de l'avancement. C'est le cas général des tunneliers pour terrain meuble et aquifère comportant une jupe dans laquelle le revêtement est posé. Ce revêtement peut être constitué de voussoirs préfabriqués en béton ou, éventuellement, de voussoirs en fonte ou même, dans le cas de la ligne D du métro de Lyon, de « béton extrudé ». Dans ce dernier cas, l'appui se fait par l'intermédiaire du coffrage.

Les voussoirs préfabriqués en béton armé [3] forment des anneaux cylindriques juxtaposés. Chaque anneau est en général constitué de 5 à 8 voussoirs (figure 17). Si le revêtement doit être étanche, les voussoirs sont assemblés les uns aux autres au moyen de boulons métalliques ou de tirefonds et les joints sont équipés de garnitures compressibles en *Néoprène* placées dans des engravures sur les quatre faces de chaque voussoir.

Grâce à la qualité du béton préfabriqué, à la précision dimensionnelle exceptionnelle des faces en contact et à la conception des garnitures de joints, de tels revêtements sont capables de faire face à des pressions hydrostatiques très élevées (100 mètres d'eau, soit 1 000 kPa, dans le cas du tunnel sous la Manche).

En règle générale, lorsque l'appui arrière se fait sur le revêtement, le tunnelier fonctionne de façon séquentielle, c'est-à-dire que les opérations de creusement et de revêtement ne peuvent pas être simultanées, mais successives.

Dans le cas du tunnel sous la Manche, les tunneliers britanniques prenaient appui par grippage sur le terrain, alors que les tunneliers français prenaient appui sur le revêtement préfabriqué. Cette différence était justifiée par la meilleure qualité de la craie du côté britannique qui n'imposait pas, comme du côté français, la pose immédiate du revêtement à l'intérieur même de la jupe des tunneliers.

2.2 Organes d'évacuation des déblais

Le mode d'évacuation des déblais dépend directement du mode de creusement et notamment du type de confinement, s'il existe. En effet, l'état physique des déblais est très différent suivant les cas et certains modes de confinement imposent une méthode d'évacuation qui leur soit compatible.

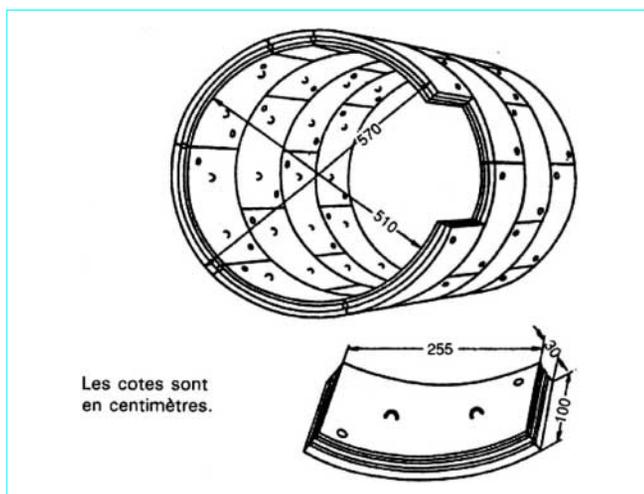


Figure 17 – Disposition générale et voussoir courant

2.2.1 Tapis transporteurs (machines à front ouvert)

Dans les machines à front ouvert (pour roches ou terrains cohérents non aquifères), les déblais sont collectés par les godets périphériques de la tête de coupe et déversés dans une trémie alimentant, en partie centrale, un tapis distributeur.

Un tapis ascendant récolte les déblais pour les amener vers l'arrière par l'intermédiaire d'un ou plusieurs tapis successifs jusqu'à un tapis suspendu à la voûte du tunnel qui les distribue dans les berlines en attente de chargement. La longueur des tapis est conditionnée, d'une part, par la longueur des traîneaux arrière de la machine qu'il faut franchir et, d'autre part, par la longueur des trains de berlines qui sont souvent dimensionnés pour pouvoir absorber la totalité des déblais correspondant à un cycle d'avancement.

Dans quelques cas (RER Étoile-Neuilly, collecteur au Canada), l'évacuation jusqu'à l'extérieur a été effectuée par tapis. Il s'agit alors de tapis qui peuvent être allongés au fur et à mesure de l'avancement.

Lorsque la teneur en eau des déblais dépasse un seuil critique qui dépend de leur granulométrie et de leur composition, ou lorsque la pente est trop forte, l'emploi de tapis n'est plus possible. Lorsque l'on a affaire à des **galeries fortement inclinées** attaquées en montant, le marinage peut se faire gravitairement sur le radier ou dans une goulotte métallique. Le mouvement des déblais peut être accéléré, si nécessaire, par apport d'eau en tête. La pente minimale permettant ce type de marinage est de 40 à 45 %. Dans le cas de certaines galeries inclinées de l'aménagement de Grandmaison dans les Alpes, les déblais étaient ensuite criblés à la base du puits, les éléments fins extraits par pompage et les éléments grossiers transportés par berlines.

Citons enfin pour mémoire le cas des machines à confinement par air comprimé qui sont justiciables des mêmes méthodes, complétées seulement par un dispositif de sas (vis d'extraction ou double sas à ouvertures alternées) permettant le passage de l'air comprimé à l'atmosphère.

2.2.2 Marinage hydraulique (tunneliers à confinement de boue)

Dans les tunneliers à confinement de boue, les déblais sont, dans la chambre avant, dilués dans une très forte proportion de boue. Ils ne peuvent donc être transportés jusqu'à la station de traitement que par voie hydraulique. Ainsi, cette solution présente l'avantage d'éviter toute discontinuité entre l'abattage et l'évacuation des matériaux.

On applique ici la technique du transport hydraulique des matériaux, technique qui fait l'objet de nombreuses applications industrielles, notamment dans le domaine du charbon ou du minerai.

Mais, l'installation doit, dans le cas des tunneliers à la boue, satisfaire la condition supplémentaire du nécessaire maintien d'une pression constante au front pour assurer son soutènement.

De l'expérience française de l'emploi des tunneliers à la boue (une dizaine de chantiers dans la période 1985/1991), on peut dégager deux types de techniques différentes, suivant l'origine des tunneliers utilisés :

- la technique dite « allemande » (Lyon et Villejust) suivant laquelle les canalisations constituent une boucle simple qui s'allonge au fur et à mesure de l'avancement grâce à des éléments coulissants permettant, lorsqu'ils ont atteint leur allongement maximal, l'insertion de tronçons supplémentaires de tubes. La régulation de la pression dans la chambre est assurée par un **coussin d'air comprimé** en communication avec la partie supérieure de la chambre avant. La pression au front dépend à la fois du niveau de la boue et de la pression de l'air, ces deux paramètres faisant l'objet de la régulation ;
- la technique dite « japonaise » (Lille, Toulouse, Val-de-Marne) qui comprend deux boucles imbriquées. La boucle avant, qui se referme sur un by-pass, a une géométrie fixe indépendante de l'avancement et son débit peut être réglé pour permettre le maintien de la pression au front sans être directement tributaire de l'évacuation des déblais. La régulation s'effectue grâce à des **électrovannes** et par l'asservissement de la vitesse de rotation des pompes à la pression mesurée dans la chambre. La densité des boues est souvent plus élevée dans la canalisation de retour de la boucle arrière que dans la boucle avant (1,30 à 1,40 au lieu de 1,10 à 1,20).

Le dimensionnement des canalisations est conditionné par le nécessaire respect d'une **vitesse critique** minimale pour éviter le dépôt de matériaux au fond des canalisations et assurer leur charriage.

Par ailleurs, une vitesse trop élevée correspondant à des pertes de charge rapidement croissantes et donc à une plus grande dépense d'énergie, il est nécessaire de se situer dans une fourchette relativement étroite.

La vitesse critique dépend de la nature et de la granulométrie des matériaux.

Ainsi, dans le cas de Villejust (figure 18) (sables très fins de Fontainebleau), les vitesses réelles de circulation se situaient entre 1,5 et 3,7 m/s pour un débit de 500 à 1 200 m³/h (canalisations Ø 350 mm). Les boues chargées étaient relativement légères (densité 1,10 à 1,25) et transportées sur une distance pouvant atteindre 5 000 m.

La figure 19 donne le schéma d'une usine de traitement des boues (lot n° 3 du métro de Lille) comprenant cyclonage et centrifugation et capable de traiter 600 m³/h de boue (craie) sans addition de bentonite.

2.2.3 Marinage pâteux (vis d'extraction)

Les vis d'Archimède destinées à la régulation et à l'extraction des matériaux sont, dans les tunneliers à confinement pâteux, l'un des éléments essentiels conditionnant le rendement et la sécurité de ce type de machines (figure 20).

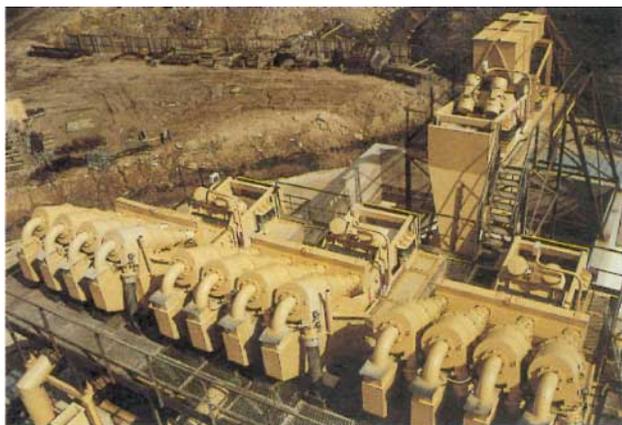


Figure 18 – Exemple de centrale de traitement de boue.
Batterie de cyclones (TGV Villejust. 1988)

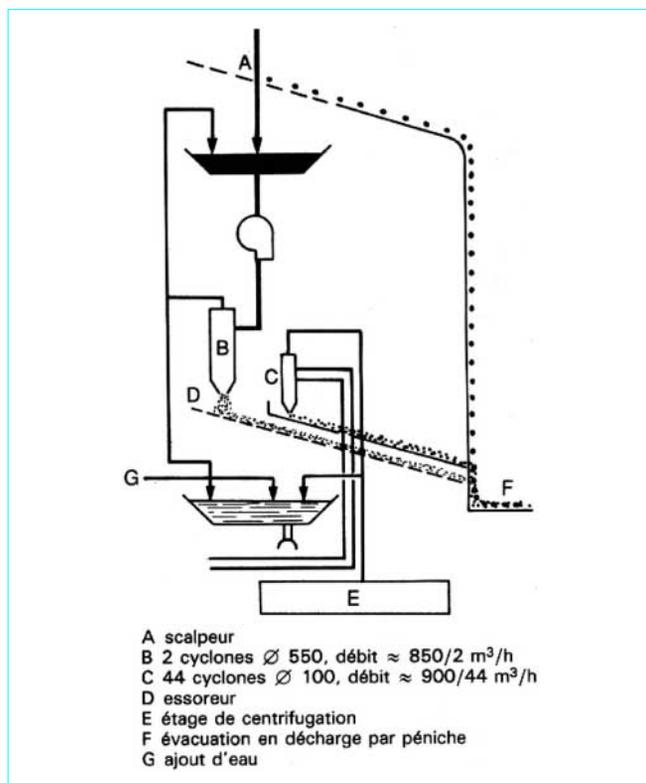


Figure 19 – Schéma de fonctionnement
d'une centrale de traitement de boue (Lille, lot n° 3)

Le transport des matériaux par vis est utilisé dans l'industrie et notamment dans les cimenteries.

Toutefois, comme dans le transport hydraulique, des différences notables existent avec les types d'utilisation jusqu'ici connus, à savoir :

— la vis doit pouvoir fonctionner correctement avec des matériaux dont les caractéristiques (granulométrie, caractère plus ou moins

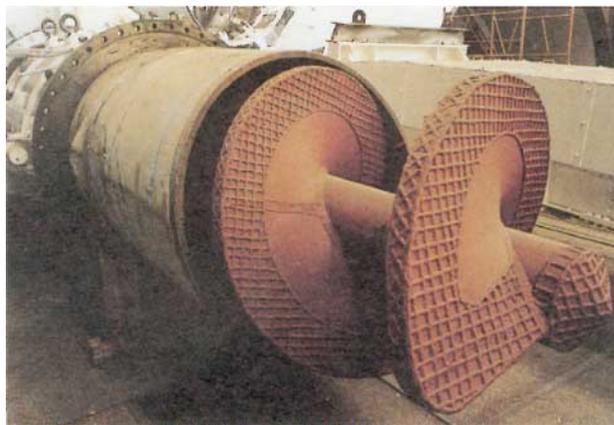


Figure 20 – Vis d'extraction, en cours de montage

collant...) peuvent varier pour un même chantier en fonction des terrains rencontrés qui peuvent être **hétérogènes** et contenir éventuellement des blocs ;

— la vis doit pouvoir **réguler le débit** en fonction de l'avancement du tunnelier, quelle que soit la pression de l'eau dans la chambre (terrains aquifères ou sous la nappe phréatique plus ou moins perméables). Dans ce cas, elle doit pouvoir freiner les matériaux pour éviter le débouillage brutal.

Ces conditions ont amené les constructeurs à développer certains dispositifs qui leur sont souvent propres et qui permettent de répondre, plus ou moins complètement, à un « challenge » particulièrement difficile.

C'est ainsi que, pour admettre des blocs de plus grosses dimensions que la vis classique à axe central, on utilise très souvent des vis dont la partie amont est constituée d'une vis sans axe (ou vis ruban) dont l'effet d'entraînement ou de freinage est certes moins efficace que celui de la vis à axe, mais qui peut admettre des blocs dont la dimension peut atteindre 50 à 60 % de son diamètre au lieu de 30 à 35 %. Une trappe est souvent disposée juste avant le début de la vis à axe pour recueillir les blocs avant leur entrée dans cette deuxième partie.

Pour se prémunir contre le risque de débouillage, deux types de solutions sont possibles :

— soit que l'on favorise, le long du parcours de la vis, la formation d'un « **bouchon** » plus compact qui ralentit le transit. On peut y parvenir en disposant deux **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. On peut aussi prévoir la possibilité d'**imprimer au tube** (ou à une partie du tube) un **mouvement de rotation** dans le même sens que la vis, ce qui équivaut, si les vitesses de rotation sont égales, à annuler sur la longueur concernée, l'effet d'entraînement de la vis ;

— soit que l'on installe, au débouché de la vis à l'air libre, un appareil qui régule le volume des matériaux effectivement rejetés. Ce peut être un **déchargeur rotatif** (système japonais) ou une **pompe volumétrique** à piston (système Robbins).

Les tunneliers du tunnel sous la Manche (côté France) ont tous été équipés de l'un ou l'autre de ces dispositifs, aussi bien pour les attaques côté terre que côté mer.

La **longueur de la** (ou des) **vis** dépend essentiellement de la pression maximale prévue dans la chambre. On estime généralement que, dans les conditions moyennes, 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 (70 à 80 % de son diamètre).

La **vitesse de rotation de l'hélice** varie généralement entre 0 et 30 tr/min. Le diamètre est compris entre 0,40 et 1,50 m en fonction du débit instantané maximal à évacuer. On admet généralement qu'il est souhaitable que la vis ait une pente ascendante comprise entre 5 et 20°. La **position du départ de la vis** n'est pas indifférente : une entrée au centre de la section permet un meilleur équilibre de la pression dans la chambre, mais la position basse est très souvent préférée car elle est plus favorable à la formation du bouchon à cause des plus grandes densité et viscosité des matériaux. C'est la seule position possible lorsqu'il est nécessaire de travailler tantôt en mode fermé, tantôt en mode ouvert.

Dans les cas habituels, le **couple de rotation** nécessaire pour faire tourner la vis est de l'ordre de $30 \text{ m} \cdot \text{kg}$ ($0,3 \text{ m} \cdot \text{kN}$) par m^3/h de déblais à évacuer. Toutefois, dans les cas difficiles, et si l'on craint des risques de blocages, le couple peut être largement supérieur à ces valeurs ($30 \text{ m} \cdot \text{t}$ ou $300 \text{ m} \cdot \text{kN}$ pour $220 \text{ m}^3/\text{h}$ dans le cas des tunneliers du Storebelt au Danemark, soit $1,4 \text{ m} \cdot \text{kN}$ par m^3/h). L'ensemble des organes doit être évidemment, dans ce cas, renforcé pour supporter les efforts correspondants.

La teneur en eau des matériaux extraits peut varier notablement selon les conditions de fonctionnement de la vis. Elle est très souvent assez proche de la limite de liquidité s'il s'agit de matériaux plastiques. C'est pourquoi l'évacuation est généralement effectuée dans des bennes étanches. Le transport par pompage peut être envisagé mais il nécessite un traitement préalable d'homogénéisation. C'est ce qui a été réalisé dans le cas du tunnel sous la Manche côté France à partir du fond du puits de Sangatte jusqu'à l'aire de dépôt.

2.3 Équipements divers

2.3.1 Érecteurs à voussoirs

Lorsque le revêtement est constitué de voussoirs préfabriqués en béton armé, leur approvisionnement et leur mise en place sont obligatoirement mécanisés. Il s'agit d'éléments dont la masse peut varier, suivant le diamètre du tunnel, de quelques centaines de kilos à une dizaine de tonnes et qui doivent être manipulés avec précaution et précision. La garantie de pérennité et d'étanchéité du revêtement est en effet liée à la conservation du bon état des faces et notamment des faces de joints.

Dans les cas les plus courants, les voussoirs sont approvisionnés par wagons. Les trains de berlins comportent des wagons spéciaux qui portent l'ensemble des pièces et accessoires nécessaires à la construction d'un anneau complet, ainsi que le mortier nécessaire à l'injection de remplissage d'extrados.

Les voussoirs sont déchargés par un portique ou un palan porté par l'une des plateformes arrière de la machine. Ils sont déposés sur un transporteur à tapis ou à rouleaux qui les amène jusqu'à l'avant où ils sont repris par l'érecteur (figure 21) dont la fonction consiste à amener le voussoir à sa position définitive dans l'anneau. Pour remplir ce rôle, l'érecteur est doté de nombreux mouvements, à la fois dans le sens longitudinal du tunnel, en rotation autour de son axe, ainsi que dans le sens radial. Il doit pouvoir effectuer à la fois des mouvements rapides pour l'approche, et des mouvements lents et précis pour le positionnement final.

La préhension des voussoirs par les différents appareils peut être effectuée, soit par ventouses (cas des tunnels sous la Manche), soit par clipage à l'aide de boulons ou d'alvéoles réservés dans les voussoirs lors de la préfabrication. La rotation des érecteurs peut s'effectuer, soit autour d'un axe central, soit par roulement à l'intérieur d'une couronne. On dispose quelquefois de deux érecteurs pour réduire la durée de la pose d'un anneau. Comme les deux érecteurs ne peuvent ni se croiser ni travailler simultanément dans le même secteur, le gain n'est effectif que si le nombre de voussoirs d'un anneau est supérieur à 6 ou 7.

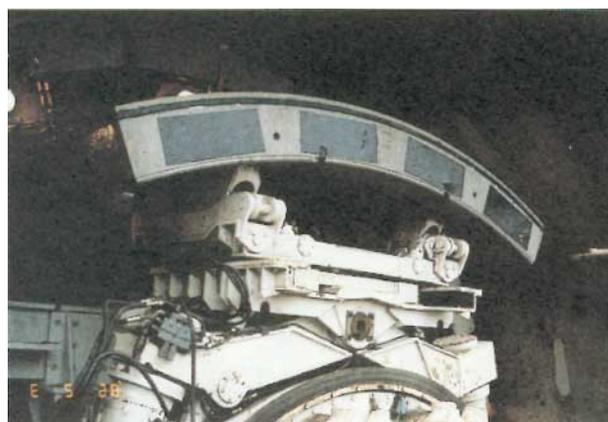


Figure 21 – Érecteur à voussoirs

2.3.2 Injections de bourrage

Lorsque le revêtement est posé à l'intérieur de la jupe du tunnelier, une injection de bourrage est nécessaire pour remplir le vide laissé par la jupe. De sa qualité et de la rapidité de son exécution dépendent bien souvent la qualité du revêtement lui-même, la limitation de son ovalisation ainsi que des tassements du terrain encaissant.

Il existe deux modes de réalisation de cette injection :

- soit radialement au travers de l'un des derniers anneaux en place (par des trous spécialement aménagés) ;
- soit longitudinalement par des tubulures réservées dans la jupe du tunnelier (en extrados ou dans l'épaisseur même grâce à une double jupe).

L'**injection radiale** est plus simple mais elle peut s'avérer insuffisamment efficace parce qu'elle laisse nécessairement un vide incomplètement rempli pendant toute la phase de creusement.

L'**injection longitudinale** est plus délicate mais plus efficace parce qu'elle peut être effectuée de façon continue et sur toute la périphérie de l'anneau au fur et à mesure de l'avancement.

Le **matériau de remplissage** doit, tout à la fois :

- remplir parfaitement le vide pour assurer un contact continu et contrôler la déformation des voussoirs ;
- résister au délavage qui risque de se produire si la pression de confinement dans la chambre avant est trop élevée ;
- présenter, à court terme, des caractéristiques mécaniques et de perméabilité du même ordre que celles du terrain encaissant ;
- présenter, à long terme, une résistance suffisante pour transmettre l'effort de confinement entre le terrain et le revêtement.

La composition des mortiers est adaptée à chaque cas. À titre d'exemple, dans le cas des **tunnels de Villejust** (sable de Fontainebleau sans cohésion), on a utilisé un mélange ternaire de sable extrait des déblais avec de la bentonite et du ciment avec plastifiant. L'injection était réalisée radialement à partir de l'anneau n° 2.

Dans le cas des **tunnels sous la Manche** (attaques françaises côté mer), on a utilisé un matériau à deux composantes stables mélangées seulement au moment de l'injection :

- un mortier de sable, ciment, cendres volantes, chaux et retardateur ;
- un coulis de ciment fondu avec filler et bentonite.

L'injection était faite à partir de pipes longitudinales, sous pression de $1\ 100 \text{ kPa}$ et à raison de $20 \text{ m}^3/\text{h}$. Elle était complétée, à l'arrière de la machine, par des injections radiales plus classiques.

2.3.3 Forages de reconnaissance et traitement de terrain

Dans les cas où il existe des risques importants de rencontre d'accidents géologiques non localisés dans les reconnaissances préalables, on équipe les machines de foreuses profondes pouvant réaliser, dans des conditions compatibles avec l'encombrement des organes du tunnelier, des forages de reconnaissance profonds correspondant, par exemple, à l'avancement d'une journée (plusieurs dizaines de mètres). Il s'agit en général de forages destructifs.

On dispose aussi des tubes destinés à permettre le traitement éventuel par injection d'une auréole de terrain en avant du front.

2.3.4 Joints d'étanchéité

Dans les tunneliers à jupe cylindrique, il est indispensable de réserver un jeu (généralement de 4 à 8 cm) entre l'extrados de la jupe et la paroi de l'excavation, pour réduire les efforts de frottement qui s'opposent à l'avancement et pour permettre le guidage et l'inscription du bouclier dans les courbes.

Lorsqu'il s'agit de tunneliers à confinement, il est donc indispensable, pour maintenir la pression au front, que le revêtement soit monté à l'intérieur même de la jupe et qu'un dispositif d'étanchéité soit installé pour obturer le **joint existant entre l'extrémité de la jupe et l'extrados** du revêtement.

Ce joint remplit une double fonction puisqu'il est également destiné à éviter le retour du produit de bourrage vers l'intérieur du tunnel en avant du dernier anneau de revêtement posé. Il est soumis à des conditions de fonctionnement particulièrement sévères car, suivant l'orientation du tunnelier, il peut être l'objet de phénomènes de coincement sur une partie de la périphérie alors que l'épaisseur du joint est augmentée dans d'autres zones. Il doit donc être résistant, capable d'une amplitude de déformation relativement importante et remplaçable avec des risques minimaux et dans des délais réduits.

Suivant les cas, la pression différentielle qu'il s'agit de supporter peut varier de 0,1 à 1 MPa.

Plusieurs dispositifs sont actuellement utilisés. Ils consistent très généralement en pièces flexibles fixées à l'intérieur de la jupe au voisinage de son extrémité arrière et disposées en 2, 3 ou 4 rangées successives formant autant de barrages partiels successifs.

Chacun de ces barrages peut être constitué, soit de lames métalliques, soit de lames en *Néoprène*, soit d'une combinaison de ces deux matériaux. L'inconvénient de ces dispositifs est leur sensibilité à la rupture ou à l'arrachement en cas d'incident de conduite et leur risque de blocage par le ciment si l'injection de bourrage parvient jusqu'à eux. Ils s'accommodent mal d'une injection immédiate du vide au fur et à mesure de l'avancement.

C'est pourquoi la tendance actuelle consiste à utiliser des joints souples et renouvelables (système japonais) constitués d'une série de brosses métalliques (figure 22) entre lesquelles on injecte en permanence une graisse épaisse spéciale. Ainsi c'est la graisse elle-même, constamment renouvelée, qui constitue la matière du joint et qui évite à la fois, à condition que sa pression d'injection soit supérieure à celle du compartiment confiné, la chute de la pression de confinement et l'intrusion du matériau de bourrage.

Au plan économique, le coût de cette consommation de graisse est évidemment un élément dont il faut tenir compte.

Il existe, pour ces mêmes tunneliers, un deuxième joint qui doit être étanché : c'est le **joint** qui existe obligatoirement **entre le roulement cylindrique d'entraînement du plateau** excavateur **et la paroi arrière** fixe du compartiment pressurisé.

L'équipement de ce joint est en effet essentiel, non seulement pour maintenir la pression au front, mais aussi pour éviter le passage dans le roulement lui-même, de matériaux du front susceptibles de le détériorer. Contrairement au joint de queue de la jupe du bouclier, ce joint n'est, en principe, soumis qu'à de très faibles distorsions. Sa conception est donc très sensiblement différente et il est constitué, dans la plupart des cas, de plusieurs séries de bavettes en *Néoprène*, en forme de peignes, fixées sur la partie tournante. Le joint est graissé de façon permanente au moyen d'ajutages débouchant au travers des bavettes (figure 23).

2.3.5 Logistique embarquée

Le fonctionnement des tunneliers mécanisés récents nécessite une logistique complexe, d'autant plus complexe que les fonctions du tunnelier sont plus nombreuses et plus mécanisées.

Cette logistique est embarquée à bord de **plateformes roulantes** qui sont traînées par le tunnelier lui-même et qui peuvent s'étirer sur des longueurs qui peuvent atteindre 100 à 200 mètres (figure 24).

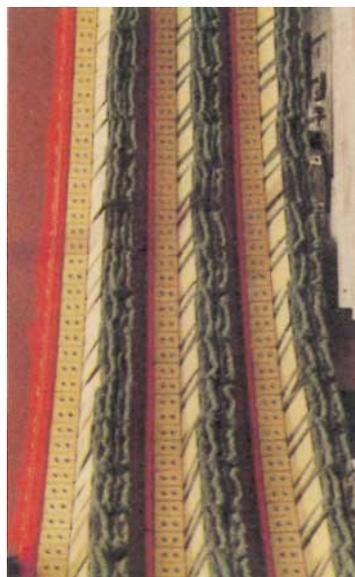


Figure 22 – Joint de queue à brosse, 3 rangs, FCB-Kawasaki

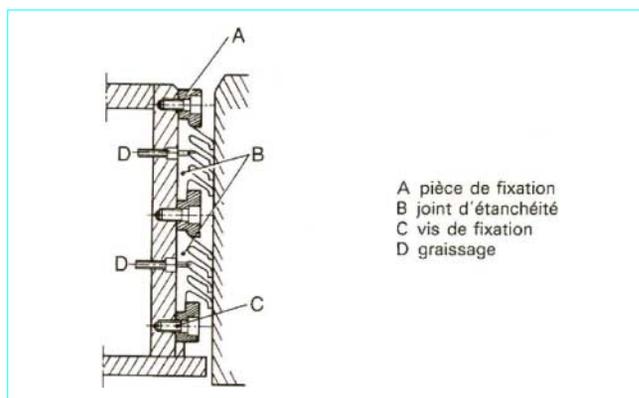


Figure 23 – Exemple de joint du roulement principal de la tête de forage



Figure 24 – Partie de logistique embarquée

Le train suiveur, appelé aussi « back up », peut comprendre, par exemple dans le cas d'un tunnelier à confinement pâteux, de l'avant vers l'arrière :

- une remorque de **pilotage** portant la cabine, les armoires de puissance électrique, le roto-distributeur de mortier de bourrage, les pompes d'exhaure ;

- une remorque de **puissance** portant le groupe des pompes hydrauliques alimentant les principaux organes du tunnelier (vérins, érecteurs, vis et, éventuellement, tête de forage), ainsi que les pompes de graissage du joint de queue ;

- une remorque d'**injection** du produit de bourrage portant la centrale d'injection ;

- une remorque d'**injection de boue lourde** dans la chambre avant (si elle est nécessaire), portant les pompes et bâches de stockage. Cette remorque peut aussi porter un réfectoire pour le personnel au front, ainsi que la centrale d'air comprimé ;

- une remorque portant les **transformateurs électriques** (MT/BT) et la cellule BT ; l'alimentation se fait par exemple en 10 kV pour une distribution en 380 V ;

- une remorque de **ventilation** secondaire du front portant les enrouleurs de tuyauteries d'alimentation et d'exhaure. C'est généralement dans ce secteur que peut se situer l'installation de rejet du convoyeur à bande pour assurer le chargement des berlines ;

- une remorque de stockage des **tuyauteries** portant également les **enrouleurs** à câbles, notamment pour l'électricité moyenne tension.

Toutes ces remorques en forme de portiques roulent sur une voie d'un écartement suffisant pour que les trains d'approvisionnement et d'évacuation des déblais puissent progresser jusqu'au point de chargement et de déchargement.

Dans le cas de tunneliers dont les fonctions sont plus simples (tunneliers au rocher sans confinement du front), la logistique peut être très notablement simplifiée et le train suiveur peut comporter seulement une ou deux remorques qui sont alors posées sur skis ou sur patins.

2.4 Guidage des boucliers

La précision du guidage est souvent un critère essentiel de la qualité de l'ouvrage. En effet, lorsqu'il s'agit de tunnels routiers ou ferroviaires, les tolérances de positionnement par rapport à l'axe théorique peuvent être faibles (par exemple ≈ 5 cm). Par ailleurs, lorsqu'une déviation est constatée, une grande longueur est souvent nécessaire pour effectuer le rattrapage et revenir à la trajectoire imposée.

C'est pourquoi la tendance actuelle est favorable aux méthodes de contrôle permanent de la position du tunnelier (au moins à chaque cycle, ou *stroke*) et parfois aux méthodes de conduite automatique.

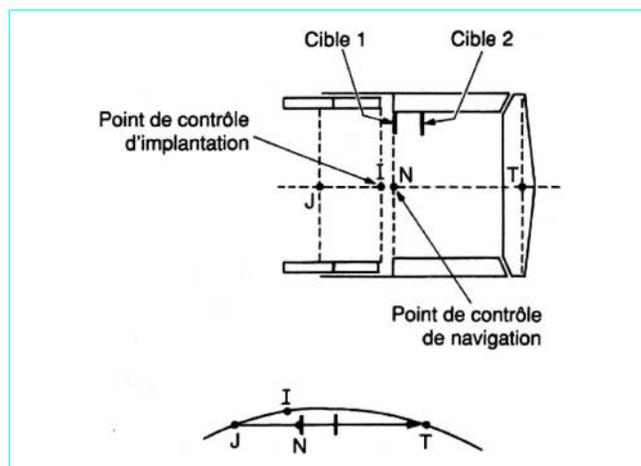


Figure 25 – Contrôle de la navigation

Le guidage des tunneliers comporte deux opérations distinctes que, par analogie avec les opérations maritimes, on désigne par :

- la **navigation**, qui est une opération de repérage topographique ;
- le **pilotage**, qui est la conduite proprement dite.

Le bouclier étant repéré par la position d'un point de son axe et la direction de cet axe, la **navigation** consiste à :

- relever la position et la direction (dans l'espace) ;
- les comparer aux données prévues ;
- en déduire les consignes pour la phase de pilotage.

Les points de repère nécessaires à ces relevés sont installés dans le tunnel tous les 100 m à 250 m en utilisant les moyens topographiques classiques de triangulation (article *Topographie. Géodésie. Topométrie*. [C 5 010] dans ce traité).

Au moyen d'un rayon laser rattaché à ces bases et de deux cibles installées à l'arrière et vers la partie médiane du bouclier, on peut connaître en permanence sa position et sa direction (figure 25). 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 (système ZED).

Les consignes de **pilotage** consistent essentiellement 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.

Si le revêtement est constitué d'une succession d'anneaux, il s'agit de définir la succession des anneaux (droits, biais ou universels) correspondant à cette trajectoire.

Pour agir sur les vérins, on les divise le plus souvent en plusieurs groupes (4 à 8), correspondant chacun à un secteur circulaire, dans lesquels des pressions hydrauliques différentes peuvent être appliquées. On peut ainsi obtenir entre ces secteurs des différences d'allongement qui doivent correspondre aux valeurs données par le calcul.

Toute modification de la direction du bouclier est évidemment entravée par les réactions du terrain encaissant, à moins que l'on ait affaire à un terrain très compressible ou que l'on ait réalisé une « surcoupe », c'est-à-dire une excavation d'un diamètre supérieur au diamètre extérieur du bouclier, grâce à des outils périphériques (souvent rétractables) installés sur la tête.

La commande des vérins de poussée peut faire l'objet d'une **automatisation**. Ainsi, dans le système CAP, des limiteurs ou réducteurs de pression peuvent être installés sur les vérins de poussée. Ils agissent directement en fonction des consignes de pilotage, qui sont elle-mêmes établies de façon automatique à partir des impacts des lasers sur les cibles ou/et des transmetteurs d'allongement également installés sur les vérins de poussée. Dans les systèmes

les plus sophistiqués, on peut aussi tenir compte de l'optimisation des efforts de réaction sur le revêtement (répartition plane des poussées) et de la limitation de la poussée maximale totale en fonction du couple de rotation du plateau pour éviter les risques de blocage.

3. Quelques performances

Les performances obtenues varient énormément d'un chantier à l'autre. Il apparaît de façon constante que l'on ne doit pas sous-estimer la durée de la période de rodage et de mise en route, tant pour le matériel que pour le personnel. Ainsi, bien naturellement, les meilleures performances seront obtenues sur les chantiers de grande longueur où l'influence du démarrage se fait moins sentir.

On trouvera, dans le tableau 1, à titre d'exemple, quelques résultats de divers chantiers réalisés par des entreprises françaises dans des conditions très différentes les unes des autres. Ces renseignements sont tirés de la documentation rassemblée par l'Association Française des Travaux Souterrains (publiés dans la revue *Tunnels et Ouvrages Souterrains*) et pour le Projet National Tunnel 85-90.

Il serait très hasardeux d'en tirer des conclusions par extrapolation dans d'autres cas, tant chaque chantier doit obligatoirement faire l'objet d'une étude spécifique prenant en compte, à la lumière de l'expérience passée, la totalité de ses paramètres propres.

Signalons enfin, en ce qui concerne les dimensions des sections, que le domaine d'utilisation des tunneliers a tendance à s'étendre, à la fois vers les petits diamètres, grâce aux micro-tunneliers entièrement automatisés dont le diamètre peut descendre jusque vers 0,50 m, et vers les très grands diamètres puisqu'un tunnelier de 14 m de diamètre (à confinement hydraulique) doit être mis en service au Japon en 1993.

Tableau 1 – Résultats de divers chantiers

Désignation	Année d'achèvement	Maître d'ouvrage	Entreprises	Constructeur	Diamètre excavé (m)	Longueur (m)	Nature du terrain	Soutènement	Avancement moyen (m/j)	Avancement pointe (m/j)
Tunneliers ouverts										
Échaillon (galerie d'aménée hydro-électrique)	1973	EDF	SEGALT	Wirth	5,80	4 362	Gneiss, trias	Cintres-BP	13,3	34
RER Châtelet-Gare de Lyon	1974	RATP	Borie/Dumesny	Robbins	7,00	5 000	Calcaire	Cintres + Tôle	Tube 1 : 10,8 Tube 2 : 16,7	37
Grandmaison (galerie d'aménée hydro-électrique)	1982	EDF	SGE TPI	Robbins	7,70	5 400	Gneiss	Boulons	10,9	26,9
LEP Genève	1986	CERN	Eurolep	Wirth	4,50	6 100	Molasse	Voussoirs béton	23,4	59,1
Lubéron (galerie d'irrigation)	1987	SCP	Sotrabas/Spie	Wirth	3,40	2 787	Calcaire altéré	Cintres/Boulons	20,7	49,9
Tunneliers à confinement hydraulique										
Métro de Lyon	1987	SEMALY	Dragages/CB	Bade	6,50	2 × 1 230	Alluvions modernes	Béton extrudé	Tube 1 : 3,3 Tube 2 : 8,3	17,6 20,0
Lille, lot 8	1987	CUDL (1)	Bouygues	FCB/Kawasaki	7,65	880	Craie fissurée	Voussoirs béton	Tronçon 1 : 5,8	19,0
Lille, lot 3	1988	CUDL (1)	Montcocol	Herrenknecht	7,70	3 535	Silt et sables	Voussoirs béton	8,6	25,2
TGV Atlantique Villejust	1988	SNCF	Sogea/Spie/Franki	Bade	9,25	2 × 4 780	Sable de Fontainebleau	Voussoirs béton	Tube 1 : 7,5 Tube 2 : 15,3	25,5 35,7
Tunneliers à fonctionnement mixte (ouvert + confinement pâteux)										
Tunnel sous la Manche (côté France)										
T1 (service mer)	1990	EURO-TUNNEL	TML (2)	Robbins	5,74	15 617	Craie fissurée	Voussoirs béton	14,9	53,2
T4 (service terre)	1989	EURO-TUNNEL	TML (2)	Mitsubishi	5,60	3 251	Craie très fissurée	Voussoirs béton	10,5	40,6
T3 (ferroviaire, mer)	1991	EURO-TUNNEL	TML (2)	Kawasaki/Robbins	8,70	18 860	Craie fissurée	Voussoirs béton	23	51,2

(1) CUDL Communauté Urbaine de Lille.

(2) TML Transmanche Link.

4. Conclusion

Les tunneliers constituent un outil aujourd'hui irremplaçable pour le creusement d'ouvrages linéaires dans des situations géologiques extrêmement diverses.

Ils ont complètement transformé l'organisation même de ces chantiers parce qu'ils ont obligé à une analyse plus rigoureuse des tâches de chacun des membres de l'équipe. Ces tâches se sont trouvées à la fois allégées physiquement, mais aussi responsabilisées, à l'image de ce que l'on constate dans les autres branches de l'industrie.

En même temps, on y trouve l'application pratique de certaines techniques de pointe qui devraient transformer radicalement l'image de marque de la profession, notamment vis-à-vis des jeunes générations.

Cet article ne peut avoir la prétention de dresser le catalogue exhaustif de l'ensemble des aménagements qui peuvent trouver place dans un tunnelier et qui font de chacun d'eux un ensemble spécifique. Nous avons tenté seulement d'y faire figurer par catégories, ceux que l'on trouve le plus souvent dans les machines les plus récentes issues d'une industrie en évolution constante.

La sophistication des appareils et les performances atteintes ne doivent pas faire oublier l'importance des hommes qui les conduisent et qui doivent garder en permanence à l'esprit les risques inhérents à un milieu toujours imparfaitement connu avant d'y avoir pénétré.

En face d'une demande toujours accrue, l'utilisation des tunneliers devrait certainement se développer dans les années à venir, concurremment à celle des méthodes plus classiques.

Tunneliers

par **Pierre GESTA**

Ingénieur de l'École Centrale de Paris

Ancien Directeur à la SOGEA

Président du Comité technique de l'Association Française des Travaux en Souterrains (AFTES)

Bibliographie

Références

- [1] WANNER et AEBERLI (U.). – *Tunnelling machine performance in jointed rock*. Compte rendu du Congrès International de Mécanique des Roches, Montreux (Société Internationale de Mécanique des Roches), vol. 1, p. 573 et s. (1979).
- [2] TAKAHASI (H.) et YAMAGAKI (H.). – *Slurry shield method in Japan*. RETC Proceeding, chapter 16, p. 261 et s. (1976).
- [3] *Recommandations sur les revêtements pré-fabriqués des tunnels circulaires creusés au tunnelier*. Revue Tunnels et Ouvrages Souterrains (TOS) n° 86, Texte repris dans TOS n° spécial de mai 1988.

Ouvrages

- MARIN (G.). – *Les expériences industrielles de creusement au tunnelier par Electricité de France*. Cahiers de l'Industrie Minérale, déc. 1980.
- MARIN (G.). – *Le creusement au tunnelier des puits inclinés de grande longueur*. Compte rendu du Congrès de l'Association Française des Travaux Souterrains (AFTES), Nice (1981).
- TAQUET (B.). – *Le concours tunnelier lancé par EDF : adaptations des tunneliers aux terrains difficiles*. Tunneliers et Ouvrages Souterrains (TOS), sept.-oct. 1989.
- BOUYAT (C.). – *Le soutènement à pression de boue*. TOS, juil.-août 1991.

CHAPON (J.), BEFINI (H.), GESTA (P.) et PÉRA (J.). – *Présentation des résultats du Projet National Tunnel 85.90*. TOS, juil.-août 1991.

Revues

- Tunnels et Ouvrages Souterrains** SEDIP Communication.
- Advances in Tunnelling Technology and Sub-surface Use** (Revue de l'Association Internationale des Travaux en Souterrain). Pergamon Press.
- World Tunnelling and Subsurface Excavation** (The Mining Journal Ltd).
- Tunnels and Tunnelling** Morgan - Grampian pie. Gallerie - Grandi Opere Sotterranee

Réglementation

Recommandations de l'Association Française des Travaux en Souterrain

Propositions relatives aux mesures et essais réalisés dans le cadre d'un chantier de creusement mécanisé. Revue Tunnels et Ouvrages Souterrains TOS n° 5. Texte repris dans TOS n° spécial de juillet 1982.

Coefficients d'utilisation et de disponibilité, indice de fiabilité des machines à pleine section. Revue Tunnels et Ouvrages Souterrains TOS n° 16. Texte repris dans TOS n° spécial de juillet 1982.

Recommandations sur les installations électriques en chantiers de travaux souterrains. Revue Tunnels et Ouvrages Souterrains TOS n° 61. Texte repris dans TOS n° spécial de mai 1988.

Recommandations sur le choix d'un type de tunnelier ou de bouclier mécanisé. Revue Tunnels et Ouvrages Souterrains TOS n° 75. Texte repris dans TOS n° spécial de mai 1988.

Recommandations sur les revêtements préfabriqués des tunnels circulaires creusés au tunnelier. Revue Tunnels et Ouvrages Souterrains TOS n° 86. Texte repris dans TOS n° spécial de mai 1988.

Recommandations sur la standardisation des profils des tunnels circulaires. Revue Tunnels et Ouvrages Souterrains TOS n° 88.

Fiches de chantiers mécanisés. Revue Tunnels et Ouvrages Souterrains TOS (divers numéros).

Constructeurs

Atlas Copco France (Sté) (Jarva Mark et matériel Eickhoff).
 Borotec Inc.
 CSM Entreprise Bessac SA (Creusement et Soutènement Mécanisé).
 Decon Engineering Co.
 Dosco Overseas Engineering Ltd.
 Eickhoff (Groupe Atlas Copco).
 FCB (Fives Cail Babcock) (licences Kawasaki).
 Herrenknecht GmbH.
 Hitachi Zosen Corp.
 Howaldtswerke Deutsche Werft AG.
 James Howden and Co.
 Euro Iseki Ltd.
 Iseki Inc.

Kawasaki Heavy Industries Ltd.
 Komatsu Civil Construction Machinery Division.
 Lovat Tunnel Equipment Ltd.
 Markham and Co Ltd.
 MFI (Matériel de Fond et d'Industrie) (Groupe Westfalia Lünen).
 Mitsubishi Heavy Industries Ltd.
 NFM (Neyrpic Framatome Mécanique) (licence Mitsubishi).
 Perforex.
 Robbins Co. (The).
 Voest Alpine AG, Mining and Tunnelling Technology (matériel Demag et Bade).
 Wayss und Freytag AG.
 Wirth Maschinen- und Bohrgeräte-Fabrik GmbH.

Organismes

Syndicat Professionnel des Entrepreneurs de Travaux Souterrains de France.
 Association Française des Travaux en Souterrain (AFTES).

Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM).
 Centre d'Études des Tunnels (CETU) (ministère de l'Équipement).