



www.aftes.asso.fr

**ASSOCIATION FRANÇAISE DES TUNNELS
ET DE L'ESPACE SOUTERRAIN**

Organisation nationale adhérente à l'AITES

Recommandations de l'AFTES

Choix des techniques d'excavation mécanisée

GT4R3F1

AFTES

RECOMMANDATIONS RELATIVES AUX

CHOIX DES TECHNIQUES D'EXCAVATION MECANISEE

L'A.F.T.E.S. recueillera avec intérêt toute suggestion relative à ce texte.

Version 1 - 2000 - approuvée par le Comité Technique du 23/11/99

Texte présenté par

P. LONGCHAMP, animateur du Groupe de Travail n° 4 - Directeur Technique Ouvrages Souterrains - BOUYGUES T.P.

Assisté par

A. SCHWENZFEIER, CETU

et les responsables des sous-groupes

J.M. DEMORIEUX, SETEC - F. MAUROY, SYSTRA - J.M. ROGEZ, RATP - J.F. ROUBINET, GTM

Ont participé à l'élaboration du document :

A. AMELOT, SPIE BATIGNOLLES - D. ANDRE, SNCF - A. BALAN, SNCF - H. BEJUI[†], AFTES -

F. BERTRAND, CHANTIERS MODERNES - F. BORDACHAR, QUILLERY - P. BOUTIGNY, CAMPENON BERNARD SGE -

L. CHANTRON, CETU - D. CUELLAR, SNCF - J.M. FREDET, SIMECSOL - J.L. GIAFFERI, EDF-GDF -

J. GUILLAUME, PICO GROUPE RAZEL - P. JOVER, S.M.A.T. - Ch. MOLINES, FOUGEROLLES BALLOT -

P. RENAULT, PICO GROUPE RAZEL - Y. RESCAMPS, DESQUENNE ET GIRAL

Sont remerciés pour leur participation à la relecture du document :

M. MAREC, MISOA - M.C. MICHEL, OPPBTP - P. BARTHES, AFTES

INTRODUCTION

La précédente recommandation, publiée en 1986 concernant le choix des techniques d'excavation mécanisée traitait pour l'essentiel des tunneliers à roche dure.

Le marché français a changé grandement de physionomie. L'aménagement hydro-électrique, pionnier puis grand utilisateur de l'excavation mécanisée, arrivant à son terme, a décliné, pour faire place en terme de tunnel à des ouvrages généralement urbains de toutes natures : émissaires, métros, ferroviaires et routiers.

L'essentiel de nos grands centres urbains étant construits en plaine et souvent le long d'un cours d'eau, la technique d'excavation a basculé de la roche dure vers les terrains meubles ou tendres avec ou sans présence d'une nappe aquifère.

Pour répondre à ces besoins, la France a suivi les courants de l'Est (Allemagne et Japon).

La géologie de ce pays étant extrêmement variée, les techniques étrangères ont été adaptées à ces conditions nouvelles à une vitesse prodigieuse par les maîtres d'œuvre, entreprises, bureaux d'Ingénierie et fournisseurs.

Aujourd'hui, cette nouvelle culture technique française sait s'exporter partout dans le monde (Allemagne, Egypte, Angleterre, Australie, Chine, Italie, Espagne, Venezuela, Danemark, Singapour ...).

C'est sur la base de cette expérience que ces recommandations ont été rédigées par un groupe de 25 professionnels issus des instances citées ci-avant.

Très vite, ce groupe a compris que, devant les nombres de paramètres et critères de

choix, il n'était pas possible de bâtir une méthode de choix de type analytique mais plutôt un document consistant à :

- 1) clarifier les différentes techniques en les classifiant et les décrivant par familles et catégories
- 2) analyser l'influence des paramètres de choix (géologique, de projet, d'environnement ...)
- 3) mettre en exergue les spécificités propres à chaque technique, d'indiquer son domaine d'emploi courant ainsi que les techniques d'accompagnement possibles.

Ainsi, le lecteur comprendra que cette nouvelle recommandation n'est pas un livre de recettes toutes faites mais plutôt un guide pour un choix raisonné et basé sur la combinaison d'un nombre important de facteurs techniques.



Perforatrice Beaumont construite en 1882 pour la première tentative de percement du tunnel sous la Manche (Société de Construction des Batignolles)

SOMMAIRE

	Pages	Pages
1 - OBJET DE LA RECOMMANDATION	9	
2 - LES TECHNIQUES D'EXCAVATION MECANISEE	9	
2.1 Définition et limites	9	
2.2 Les fonctions de base	9	
2.2.1 Abattage	9	
2.2.2 Soutènement et maîtrise de la charge hydrostatique	9	
2.2.3 Marinage	9	
2.3 Avantages et risques principaux des techniques d'excavation mécanisée	9	
3 - CLASSIFICATION DES TECHNIQUES D'EXCAVATION MECANISEE	10	
4 - DEFINITION DES DIFFERENTES TECHNIQUES D'EXCAVATION MECANISEE CLASSIFIEES DANS LE CHAPITRE 3	10	
4.1 Machines n'assurant pas de soutènement	10	
4.1.1 Généralités	10	
4.1.2 Machine à attaque ponctuelle	10	
4.1.3 Tunnelier à appui radial	10	
4.1.4 Aléseur	11	
4.2 Machines assurant un soutènement latéral	12	
4.2.1 Généralités	12	
4.2.2 Bouclier mécanisé ouvert à appui radial	12	
4.2.3 Bouclier mécanisé ouvert à appui longitudinal	12	
4.2.4 Bouclier mécanisé ouvert à appui mixte	13	
4.3 Machines assurant simultanément un soutènement latéral et un soutènement frontal	13	
4.3.1 Généralités	13	
4.3.2 Bouclier mécanisé à soutènement mécanique	13	
4.3.3 Bouclier mécanisé à confinement d'air comprimé	14	
4.3.4 Bouclier mécanisé à confinement de boue	14	
4.3.5 Bouclier mécanisé à confinement de terre	15	
4.3.6 Bouclier mécanisé à confinement mixte	15	
5 - EVALUATION DES PARAMETRES DE CHOIX DES TECHNIQUES D'EXCAVATION MECANISEE	16	
5.1 Généralités	16	
5.2 Evaluation de l'influence des paramètres élémentaires de choix vis à vis des fonctions de base des techniques d'excavation mécanisée	16	
5.3 Evaluation de l'influence des paramètres élémentaires de choix pour les solutions de techniques d'excavation mécanisée	17	
6 - SPECIFICITES RELATIVES AUX TECHNIQUES D'EXCAVATION	18	
6.1 Spécificités des machines n'assurant pas de soutènement	18	
6.1.1 Spécificités des machines à attaque ponctuelle	18	
6.1.2 Spécificités des tunneliers à appui radial	18	
6.1.3 Spécificités des aléseurs	18	
6.2 Spécificités des machines assurant un soutènement latéral	18	
6.2.1 Spécificités des boucliers mécanisés ouverts à appui radial	18	
6.2.2 Spécificités des boucliers mécanisés ouverts à appui longitudinal	19	
6.2.3 Spécificités des boucliers mécanisés ouverts à appuis mixtes	19	
6.3 Spécificités des machines assurant un soutènement frontal et latéral	19	
6.3.1 Spécificités des boucliers mécanisés à soutènement mécanique	19	
6.3.2 Spécificités des boucliers mécanisés à confinement d'air comprimé	19	
6.3.3 Spécificités des boucliers mécanisés à confinement de boue	20	
6.3.4 Spécificités des boucliers mécanisés à confinement de pression de terre	20	
7 - DOMAINE D'EMPLOI DES TECHNIQUES D'EXCAVATION MECANISEE	21	
7.1 Machines n'assurant pas de soutènement	21	
7.1.1 Machines à attaque ponctuelle	21	
7.1.2 Tunneliers à appui radial	21	
7.1.3 Aléseurs	21	
7.2 Machines assurant un soutènement latéral	21	
7.2.1 Boucliers mécanisés ouverts à appui radial	21	
7.2.2 Boucliers mécanisés ouverts à appui longitudinal	21	
7.2.3 Boucliers mécanisés ouverts à appuis mixtes	21	
7.3 Machines assurant un soutènement frontal et latéral	22	
7.3.1 Boucliers mécanisés à soutènement mécanique	22	
7.3.2 Boucliers mécanisés à confinement d'air comprimé	22	
7.3.3 Boucliers mécanisés à confinement de boue	22	
7.3.4 Boucliers mécanisés à confinement de pression de terre	22	
8 - LES TECHNIQUES D'ACCOMPAGNEMENT DES TUNNELIERS	22	
8.1 Reconnaissance préalable depuis la surface	22	
8.1.1 Etude d'impact	22	
8.1.2 Conditions de terrain	22	
8.1.3 Moyens mis en œuvre	23	
8.2 Reconnaissance à l'avancement	23	
8.3 Traitement de terrain	23	
8.4 Guidage	23	
8.5 Additifs	24	
8.6 Enregistrement de paramètres de fonctionnement des machines	24	
8.7 Revêtement et injections de bourrage	24	
8.7.1 Généralités	24	
8.7.2 Revêtement	25	
8.7.3 Injections de bourrage	25	
9 - HYGIENE ET SECURITE	25	
9.1 Conception des machines de creusement	25	
9.2 Mise en œuvre des machines de creusement	25	
ANNEXE 1		26
ANNEXE 2		27
ANNEXE 3		29
ANNEXE 4		30

1 - OBJET DE LA RECOMMANDATION

Cette recommandation succède et remplace la précédente version publiée en 1986. Celle-ci traitait pour l'essentiel des tunneliers pour roche dure dit «tunnelier à appui radial».

La présente version a élargi son champ d'application à l'ensemble des machines (ou presque) abattant le terrain de façon mécanique.

Son objet est de servir de guide technique pour le choix difficile et souvent irréversible d'une machine, en adéquation avec les conditions géologiques et hydrogéologiques, l'environnement et la nature d'un projet.

Une classification par famille, catégorie et type est tout d'abord proposée. Toutes les techniques ayant la caractéristique commune d'excaver mécaniquement le terrain, le premier critère de classification s'est trouvé naturellement être la capacité ou non de la machine à soutenir l'excavation

Puis le lecteur trouvera la liste des paramètres qu'il convient d'analyser pour faire un choix, leur degré d'influence sur les techniques d'excavation mécanisée et une série de commentaires de base les concernant.

Le décisionnaire combinerà ces paramètres pour établir un choix optimal.

Ensuite, le groupe de travail a mis en exergue les principales spécificités relatives aux différentes familles et catégories de techniques et a donné les domaines d'emploi de base de celles-ci.

Enfin, les techniques d'accompagnement, souvent communes à plusieurs techniques et par ailleurs indispensables au fonctionnement de la machine, ont été citées et décrites. A ce propos, il faut noter le progrès remarquable que les enregistrements et restitutions de paramètres ont permis de faire dans l'analyse technique des problèmes rencontrés.

L'hygiène et la sécurité étant un souci permanent en travaux souterrains, un chapitre s'y rapporte.

2 - LES TECHNIQUES D'EXCAVATION MECANISEE

2.1 - DEFINITION ET LIMITES

Sont considérées comme techniques d'excavation mécanisée (en opposition aux

méthodes dites conventionnelles), toutes techniques de creusement de tunnel dont l'abattage est réalisé mécaniquement à l'aide de dents, pics ou molettes. On trouvera donc dans ce document, toutes les catégories (ou presque) de machines allant de la plus simple (machine à attaque ponctuelle par godet excavateur) à la plus compliquée (bouclier mécanisé à confinement).

N'ont pas été introduites dans ce document, les techniques d'excavation mécanisée des puits qui en sont parfois dérivées.

Pour l'établissement des contrats de machine, le contractant pourra se référer à la recommandation du GT 17 : «Pratiques contractuelles dans les travaux souterrains ; contrat de fourniture d'un tunnelier» (TOS n° 150 novembre/décembre 1998).

2.2 - LES FONCTIONS DE BASE

2.2.1 - Abattage

C'est la fonction première de ces techniques.

Les deux techniques d'abattage sont :

- Abattage par attaque ponctuelle
- Abattage par attaque globale (ou pleine face)

Pour la première, l'équipement d'abattage couvre la totalité de la section du tunnel par balayages successifs du front.

Dans la deuxième, une tête d'abattage, généralement rotative, excave globalement la totalité de la section du tunnel.

2.2.2 - Soutènement et maîtrise de la charge hydrostatique

Le soutènement succède à l'abattage dans la hiérarchie de la classification.

On entend ici par soutènement, celui qui est directement assuré par la machine.

On distingue les techniques qui assurent uniquement un soutènement des parois latérales de l'excavation (soutènement latéral) des techniques qui assurent en complément un soutènement du front d'excavation (soutènement latéral et frontal).

On notera deux types de soutènement : passif et actif :

Le premier dit «à mode ouvert» subit la décompression du terrain en s'opposant à celle-ci de façon passive.

Le deuxième dit «à pression de confinement» exerce un maintien actif de l'excavation.

Le soutènement définitif entre parfois directement dans le processus de fonctionnement de la machine (cas des voussoirs par exemple). Etant étudié dans le cadre d'autres recommandations AFTES, celui-ci n'a pas été traité dans la présente.

L'évolution récente des techniques d'excavation mécanisée permet maintenant de réaliser des tunnels dans des terrains instables, perméables et aquifères sans traitement préalable.

Il convient dans ce cas de maîtriser la charge hydrostatique et les venues d'eau potentielles de façon continue. Seules les techniques à pression de confinement peuvent répondre à cette contrainte.

2.2.3 - Marinage

Le marinage en tunnel à proprement parlé n'est pas traité dans les présentes recommandations. Toutefois, il convient de mentionner que celui-ci peut être affecté fortement par la technique d'excavation retenue.

Les contraintes d'exploitation du marinage ou traitement des déblais pourront avoir parfois une influence sur le choix de la technique.

Les techniques de base du marinage sont :

- Le transport par dumper camion ou assimilé
- Le transport par train
- Le marinage hydraulique
- Le pompage (moins fréquent)
- Le convoyeur à bande.

2.3 - AVANTAGES ET RISQUES PRINCIPAUX DES TECHNIQUES D'EXCAVATION MECANISEE

Les avantages sont multiples, on notera principalement :

- L'amélioration des conditions d'hygiène et de sécurité pour les travailleurs,
- L'industrialisation de l'activité avec une réduction significative des délais d'exécution et des coûts,
- La possibilité de franchir de façon économique et sûre des milieux géologiques et hydrogéologiques complexes,
- La qualité du produit fini, (massif encaissant moins altéré, préfabrication en usine du revêtement...).

Les risques, ne sont toutefois pas nuls, car le choix d'une technique est souvent irrév-

versible car le changement de technique est souvent impossible ou au prix d'un bouleversement profond du projet et/ou de son économie.

Une analyse minutieuse des conditions du projet doit réduire très significativement ce risque ; la présente recommandation constitue une aide précieuse à ce titre ; l'expérience et le niveau technique des opérateurs constituent aussi un important facteur d'atténuation.

3 - CLASSIFICATION DES TECHNIQUES D'EXCAVATION MECANISEE

Une classification officielle est apparue comme indispensable pour uniformiser le vocabulaire des appellations des techniques d'excavation mécanisée les plus courantes.

Le tableau ci-après répond à cet objectif, les définitions correspondantes à ces appellations sont données au chapitre 4.

Ce tableau donne une classification par famille (par ex : machine à attaque ponc-

tuelle) à partir d'un premier classement établi à partir du type de soutènement réalisé ou non par les techniques d'excavation mécanisée (sans, latéral, latéral et frontal).

Enfin, en vue de détailler plus précisément la description des techniques, les familles sont décomposées en catégorie et type.

4 - DEFINITION DES DIFFERENTES TECHNIQUES D'EXCAVATION MECANISEE CLASSIFIEES DANS LE CHAPITRE 3

4.1 - MACHINES N'ASSURANT PAS DE SOUTENEMENT

4.1.1 - généralités

Machines pour lesquelles la nature des terrains n'exige pas un soutènement immédiat et continu de l'excavation.

4.1.2 - Machine à attaque ponctuelle

Les machines à attaque ponctuelle sont des machines équipées d'un bras excavateur à l'extrémité duquel est monté un outil (ou tête) d'abattage. Elles excavent le front de taille par balayages successifs du bras excavateur. Ainsi les géométries de front peuvent être variées, et/ou variables. l'effort de pénétration des outils dans le front est repris par le seul poids de la machine.

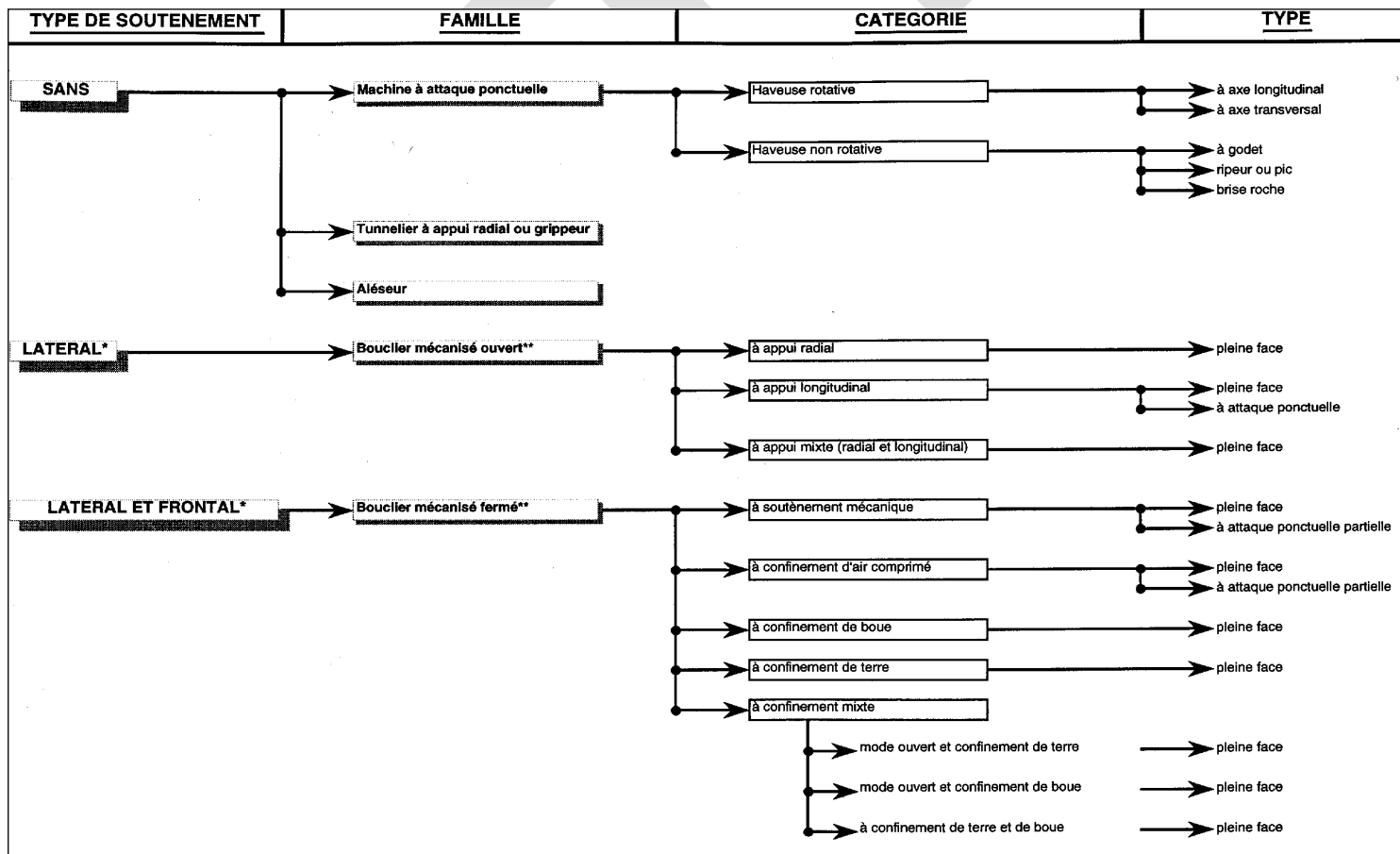
Trois types d'outil d'abattage équipent les machines de cette famille :

- Godet excavateur, ripeur ou brise-roche
- Tête de havage à axe longitudinal
- Tête de havage à axe transversal

Fiches techniques AFTES : N° 8 - 14 (Schéma et photo 4.1.2).

4.1.3 - Tunnelier à appui radial

Un tunnelier à appui radial est une machine équipée d'une tête d'abattage qui excave globalement le front de taille en une seule fois (pleine section).



*Pour les microtunneliers (diamètre inférieur ou égal à 1200 mm) on se reportera aux travaux de la FSTT.

**Les machines de fonçage horizontal ou pousse-tube sont comprises dans ces familles

CLASSIFICATION DES TECHNIQUES D'EXCAVATION MECANISEE

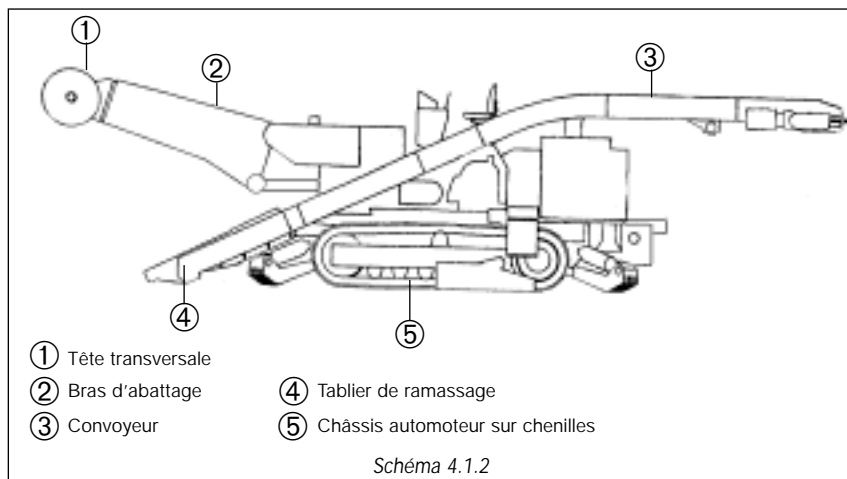


Photo 4.1.2 - Machine à attaque ponctuelle

L'effort de poussée sur la tête d'abattage est mobilisé par des patins de vérins s'appuyant radialement et directement sur le parement naturel de l'excavation.

L'avancement de la machine est séquentiel selon les deux phases suivantes :

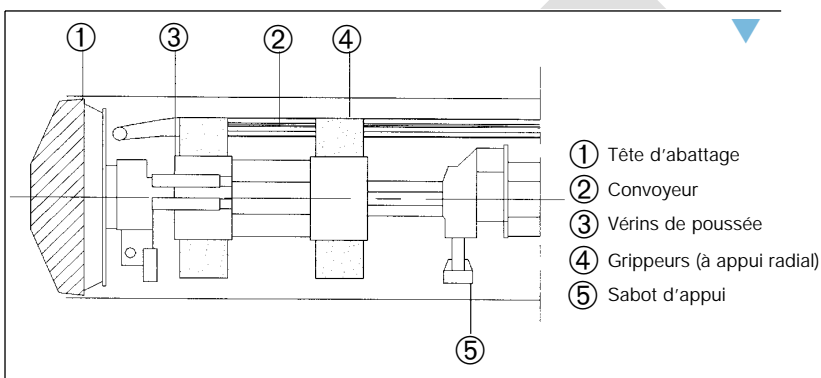
- Excavation (la structure d'appui est fixe)
- Reprise d'appui.

Les déblais sont ramassés et évacués par la machine elle-même.

Ce type de machine ne participe pas au soutènement de l'excavation.

Fiches techniques AFTES : N° 1 à 7, 10 à 13, 15 à 24, 26 à 30, 67 (Schéma et photo 4.1.3).

Photo 4.1.3 - Tunnelier à appui radial
Lesotho Highland Water Project (Lesotho)



4.1.4 - Aléseur

L'aléseur est une machine qui a les mêmes fonctions qu'un tunnelier à appui radial. Il réalise une section définitive à partir d'un avant trou axial (galerie pilote) dans lequel il trouve ses appuis radiaux.

(Schéma et photo 4.1.4).

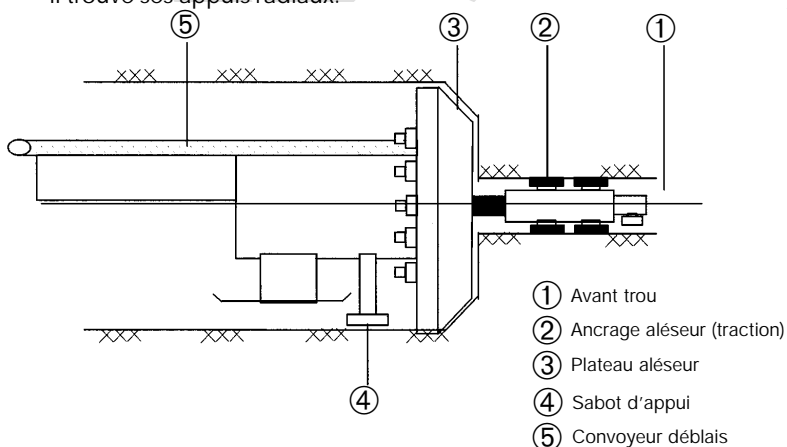


Photo 4.1.4 - Aléseur - Tunnel de Sauges (Suisse)

4.2 - MACHINES ASSURANT UN SOUTÈNEMENT LATÉRAL

4.2.1 - Généralités

Ces machines appartiennent à la famille des boucliers mécanisés ouverts.

Ce sont des tunneliers qui assurent simultanément les fonctions d'abattage et de soutènement latéral de l'excavation. Le front d'attaque du tunnel n'est pas soutenu

On distingue les types de boucliers suivants :

Bouclier simple composé d'une virole monolithique

Bouclier composé de deux viroles ou plus, reliées entre elles par des mécanismes d'articulation

Les diverses configurations de tunneliers à soutènement latéral sont précisées ci-après.

4.2.2 - Bouclier mécanisé ouvert à appui radial

Un bouclier mécanisé à appui radial est un tunnelier tel que défini en § 4.1.3 mais monté à l'intérieur d'une virole cylindrique intégrant les appuis radiaux.

Dans ce cas, le bouclier assure un soutènement latéral et passif de l'excavation.

Fiches techniques AFTES : N°25 (Schéma et photo 4.2.2).

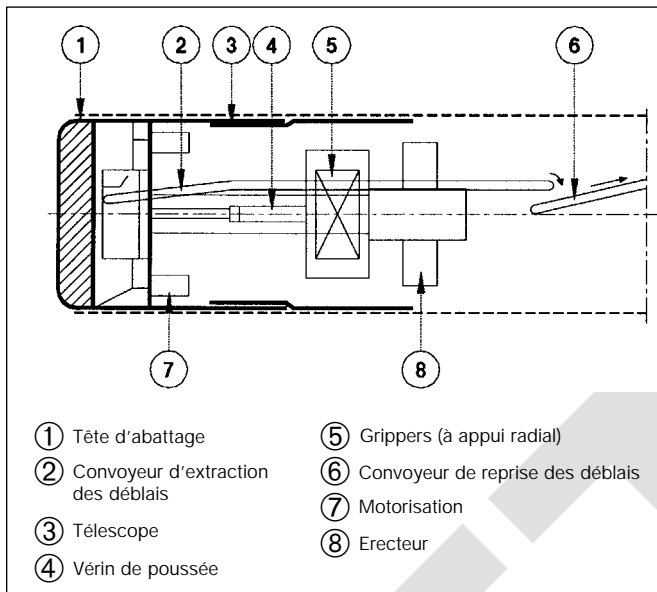


Photo 4.2.2 - Bouclier mécanisé ouvert à appui radial Tunnel Principal du CERN (France-Suisse)

4.2.3 - Bouclier mécanisé ouvert à appui longitudinal

Un bouclier mécanisé ouvert à appui longitudinal est une machine équipée soit d'une tête d'abattage qui excave globalement le

front de taille (pleine section) soit d'un bras excavateur similaire à ceux des machines à attaque ponctuelle. La progression de la machine est assurée par des vérins de poussée prenant appui longitudinalement sur un soutènement mis en

œuvre à l'arrière de la machine à l'aide d'un érecteur.

Fiches techniques AFTES : N° 31 - 32 - 41 - 66

(Schéma et photo 4.2.3).

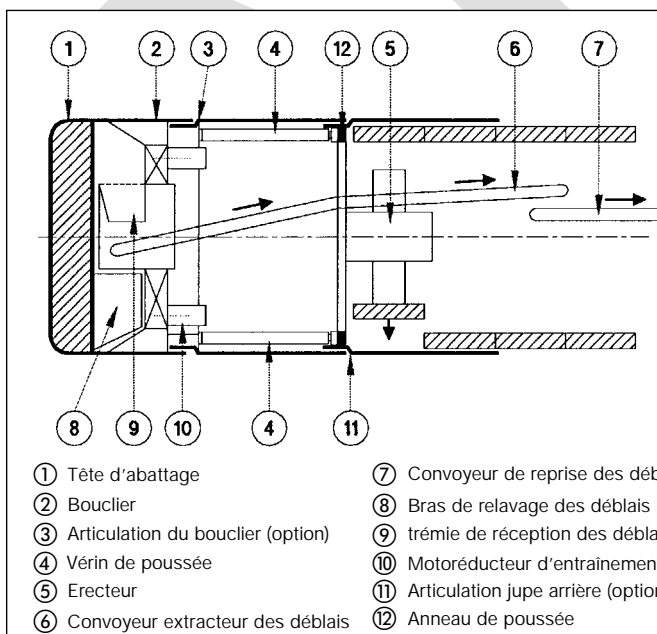


Photo 4.2.3 Bouclier mécanisé ouvert à appui longitudinal Métro d'Athènes (Grèce)

4.2.4 - Bouclier mécanisé ouvert à appui mixte

Un bouclier à appui mixte est une machine équipée d'une tête d'abattage, qui excave globalement le front de taille (pleine section).

Cette machine est équipée à la fois d'appuis radiaux et d'appuis longitudinaux utilisés en fonction des terrains rencontrés. Le mode d'appui d'avancement longitudinal requiert la mise en œuvre à l'avancement, d'un soutènement de voussoirs.

Le bouclier est équipé de trois viroles ou plus reliées entre elles par des mécanismes d'articulation et d'un bloc intermédiaire télescopique pour assurer le relais d'appui entre le système d'appui en cours d'utilisation et la tête de forage.

Fiches techniques AFTES : N° 65 – 68 – 71 (Schéma et photo 4.2.4).

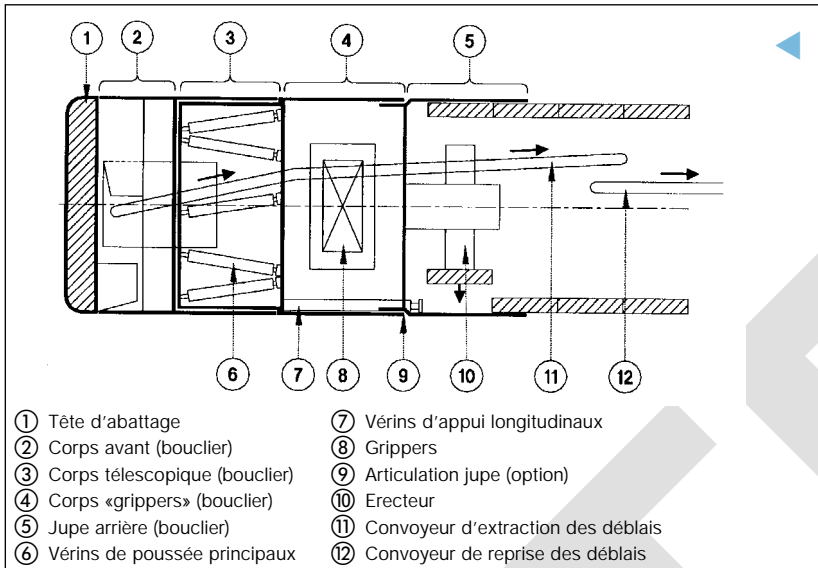


Photo 4.2.4 - Bouclier mécanisé ouvert à appui mixte
Aménagement hydraulique de Salazie (Ile de la Réunion)

4.3 - MACHINES ASSURANT SIMULTANEMENT UN SOUTÈNEMENT LATÉRAL ET UN SOUTÈNEMENT FRONTAL

4.3.1 - Généralités

Ces machines appartiennent à la famille des boucliers mécanisés fermés.

Ce sont des tunneliers qui assurent simultanément les fonctions d'abattage, de soutènement latéral et frontal de l'excavation.

Ils sont, à l'exception des boucliers à soutènement mécanique, pourvus à l'avant

d'une chambre dite «d'abattage» isolée de l'arrière du tunnel par une cloison étanche et dans laquelle est maintenue une pression de confinement destinée à soutenir activement l'excavation et/ou équilibrer la charge hydrostatique développée par la nappe phréatique.

Le creusement est réalisé par un organe d'abattage travaillant dans celle-ci.

La progression est assurée par des vérins de poussée prenant appui longitudinalement sur le revêtement en voussoirs monté à l'abri d'une jupe arrière à l'aide d'un érecteur.

4.3.2 - Bouclier mécanisé à soutènement mécanique

Le bouclier mécanisé à soutènement mécanique est un tunnelier équipé d'une tête d'abattage à attaque globale et dont le soutènement frontal est réalisé par mise en pression des terres abattues contenues devant la tête d'abattage.

Les déblais sont extraits par des orifices disposés sur la tête et équipés de volets à ouverture ajustable en temps réel.

Fiches techniques AFTES : N° 38 – 39 – 40 – 51 – 58 – 64

(Schéma et photo 4.3.2).

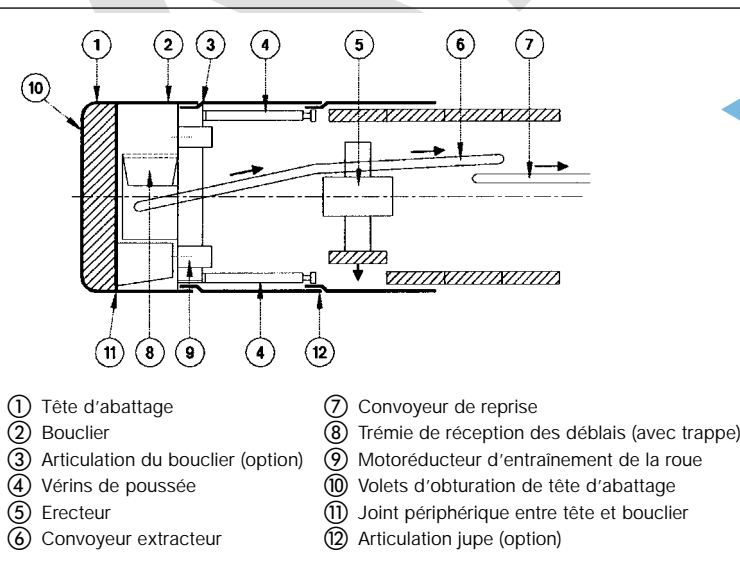


Photo 4.3.2
Bouclier mécanisé à soutènement mécanique - Ligne 2, RER Paris

4.3.3 - Bouclier mécanisé à confinement d'air comprimé

Le bouclier mécanisé à air comprimé est un tunnelier équipé soit d'une tête d'abatage à attaque globale soit de bras excavateurs similaires à ceux des machines à attaque

ponctuelle. Le confinement est réalisé par mise en pression de l'air contenu dans la chambre d'abatage.

L'extraction des déblais est assurée par un dispositif de décharge, continu ou discontinu, permettant d'amener les matériaux

extraits de la pression de confinement à la pression atmosphérique régnant dans le tunnel.

Fiches techniques AFTES : N° 37 - 42 - 43 - 53 - 54 - 70

(Schéma et photo 4.3.3) ▼

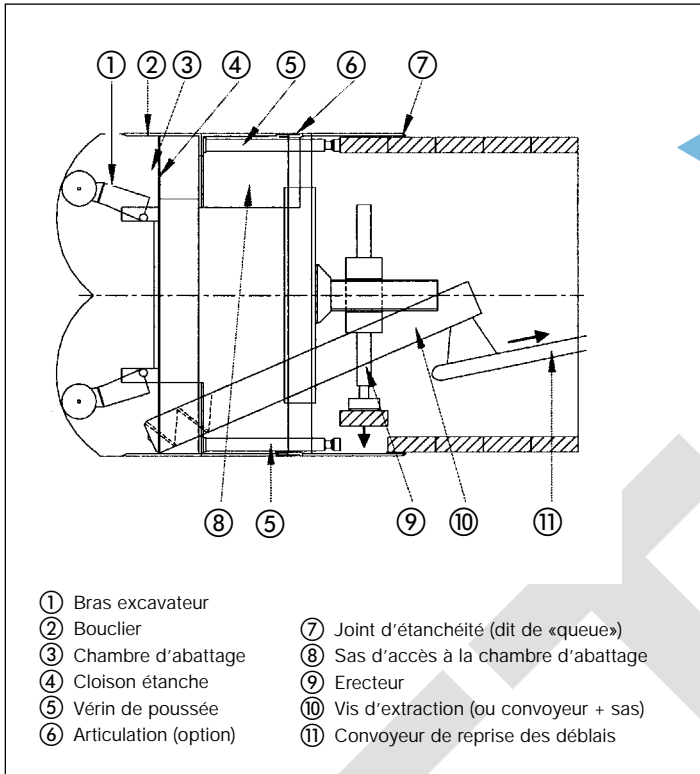


Photo 4.3.3 - Bouclier mécanisé à confinement d'air comprimé
Emissaire, Moscou (CEI)

4.3.4 - Bouclier mécanisé à confinement de boue

Le bouclier mécanisé à pression de boue est un tunnelier équipé d'une tête d'abatage à attaque globale. Le confinement est réalisé par mise en pression d'un fluide de forage dans la chambre d'abatage. La circulation du fluide dans celle-ci permet d'extraire les déblais et de maintenir une

pression constante par régulation directe ou indirecte des débits.

Fiches techniques AFTES : N° 33 - 34 - 35 - 36 - 44 - 50 - 52 - 56 - 57 - 60 - 62 - 63 - 69 - 76 - Le Caire - Sydney

(Schéma et photo 4.3.4) ▶

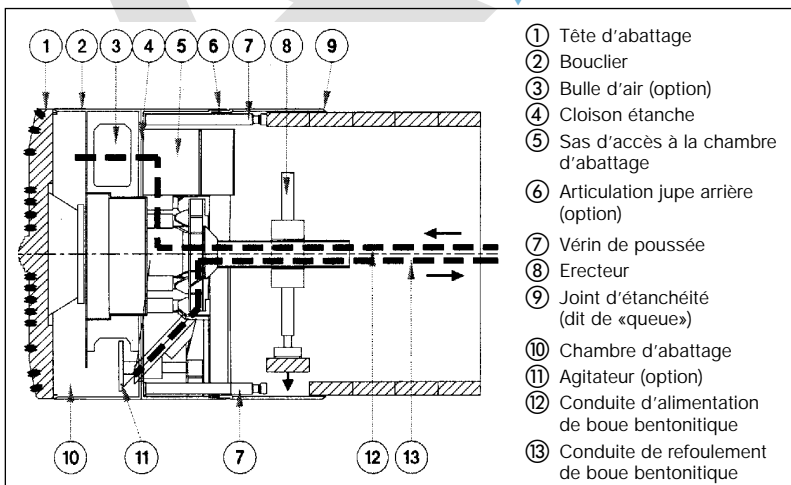


Photo 4.3.4
Bouclier mécanisé à confinement de boue - Ligne 2, Métro du Caire (Egypte)

4.3.5 - Bouclier mécanisé à confinement de terre

Le bouclier mécanisé à confinement de terre est un tunnelier équipé d'une tête d'abattage à attaque globale. Le confinement est réalisé par mise en pression dans la chambre de coupe des matériaux excava-

vés. Ceux-ci sont extraits par l'intermédiaire d'un dispositif de décharge, continu ou discontinu permettant de ramener les matériaux extraits de la pression de confinement à la pression atmosphérique.

Ces boucliers peuvent fonctionner en mode ouvert et, sous confinement d'air

comprimé s'ils sont munis d'un équipement spécifique,

Fiches AFTES : N° 45 - 46 - 47 - 48 - 49 - 55 - 59 - 61 - 72 - 73 - 74* - 77 à 85

* Machines fonctionnant également en confinement d'air comprimé

(Schéma et photo 4.3.5) ▼

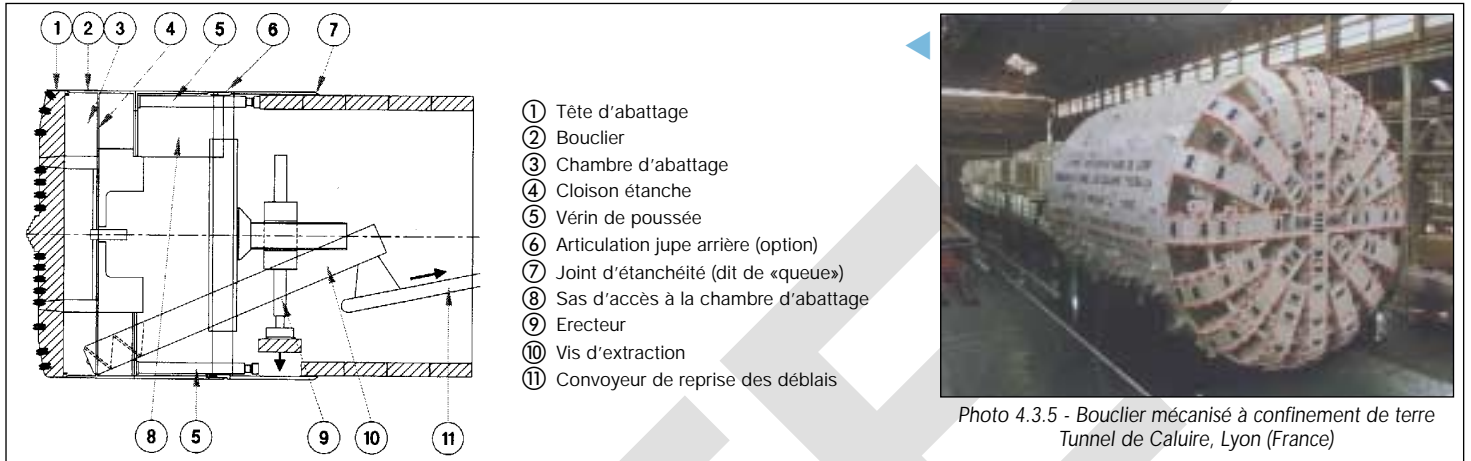


Photo 4.3.5 - Bouclier mécanisé à confinement de terre Tunnel de Caluire, Lyon (France)

4.3.6 - Bouclier mécanisé à confinement mixte

Les boucliers mécanisés à confinement mixte sont des machines équipées d'une tête d'abattage à attaque globale qui peuvent fonctionner soit en mode ouvert ou fermé, soit selon plusieurs modes de confinement.

Le passage d'un mode de fonctionnement à un autre nécessite une intervention mécanique pour modifier la configuration de la machine.

Les systèmes d'extraction des déblais sont spécifiques à chacun des modes de travail.

Trois catégories principales de machines sont utilisées :

- Les machines capables de fonctionner en mode ouvert avec une extraction des déblais assurée par un convoyeur à bande et de réaliser un confinement de terre à l'aide d'un convoyeur à vis.
- Les machines capables de fonctionner en mode ouvert avec une extraction des déblais à l'aide d'un convoyeur à bande et de réaliser un confinement de boue à l'aide

d'un système de marinage hydraulique (après isolement du convoyeur à bande).

- Les machines capables de réaliser un confinement de terre et un confinement de boue.

Ces boucliers sont en général limités aux machines de grand diamètre en raison de l'espace nécessaire aux équipements spécifiques à chacun des modes de confinement.

Fiches techniques AFTES (à paraître) : A86 Ouest (Socatop), Métro de Madrid lots 2 et 4, KCR 320 (Hong Kong).



Photo 4.3.6a
Bouclier mécanisé à confinement mixte Tunnel de l'Ouest Parisien, A86



Photo 4.3.6b - Bouclier mécanisé à confinement mixte Métro de Madrid (Espagne)

5 - EVALUATION DES PARAMETRES DE CHOIX DES TECHNIQUES D'EXCAVATION MECANISEE

5.1 - GENERALITES

Il est apparu utile d'évaluer le degré d'influence des paramètres élémentaires de toute nature dans une étude relative au choix entre des techniques d'excavation mécanisée.

Les objectifs de cette évaluation sont de :

- Hiérarchiser l'importance des paramètres élémentaires de choix, avec indication des fonctions de base concernées.

- Permettre aux concepteurs de projet envisageant une solution d'excavation mécanisée de contrôler que les éléments de choix sont réunis.

- Permettre aux entrepreneurs, avant réalisation d'un projet dont l'excavation est envisagée avec une solution mécanisée, de contrôler qu'il est en possession de tous les éléments utiles pour valider la technique retenue.

Cette évaluation est présentée sous la forme de deux tableaux 1 et 2.

Le tableau 1 (§5.2.) donne, pour chacun des paramètres élémentaires de choix, un degré d'influence pour chacune des fonctions de base des techniques d'excavation mécanisée (toutes techniques confondues).

Le tableau 2 (§5.3) donne, pour chacun des paramètres élémentaires de choix, un degré d'influence pour chacune des solutions de technique d'excavation mécanisée.

Les tableaux d'évaluation sont assortis de commentaires complémentaires figurant en annexe.

La liste des paramètres est celle établie par le groupe de travail n° 7 pour l'établissement des recommandations AFTES «Choix des paramètres et essais géotechniques utiles à la conception, au dimensionnement et à l'exécution des ouvrages creusés en souterrain», auxquelles on pourra se reporter. Cette liste a été complétée par des aspects autres que géotechniques.

5.2 - EVALUATION DE L'INFLUENCE DES PARAMETRES ELEMENTAIRES DE CHOIX VIS A VIS DES FONCTIONS DE BASE DES TECHNIQUES D'EXCAVATION MECANISEE

Paramètres Elémentaires	Fonction de base		MAITRISE DE LA CHARGE HYDROSTATIQUE	ABATTAGE	MARINAGE EXTRACTION TRANSPORT MISE EN DEPOT
	Frontal	Latéral			
	A	B	C	D	E
1. CONTRAINTES NATURELLES	2	2	SO	1	0
2. PARAMETRES PHYSIQUES					
2.1 Identification	2	1	2	2	1
2.2 Appréciation (globale de la qualité)	2	2	0	1	0
2.3 Discontinuités	2	2	2	1	0
2.4 Altérabilité	1	1	SO	1	1
2.5 Chimie des eaux	1	0	SO	0	1
3. PARAMETRES MECANIQUES					
3.1 Résistance Sol	2	2	SO	1	0
Roche	1	1	SO	2	0
3.2 Déformabilité	2	2	SO	0	0
3.3 Potentiel de liquéfaction	0	0	0	0	0
4. PARAMETRES HYDROGEOLOGIQUES	2	2	2	1	0
5. AUTRES PARAMETRES					
5.1 Abrasivité – Dureté	0	0	0	2	1
5.2 Aptitude au collage	0	0	0	2	2
5.3 Frottement terrain/machine	0	1	0	0	0
5.4 Présence de gaz	0	0	0	0	0
6. CARACTERISTIQUES DU PROJET					
6.1 Dimensions géométrie section	2	2	2	1	2
6.2 Profil en long	0	0	0	0	2
6.3 Tracé en plan	0	0	0	0	1
6.4 Environnement					
6.4.1 Sensibilité aux tassements	2	2	2	0	0
6.4.2 Sensibilité aux nuisances et contrainte de travaux	0	0	0	0	2
6.5 Anomalies dans le terrain					
6.5.1 Hétérogénéité de terrain dans la section	1	1	0	2	0
6.5.2 Obstacle naturel artificiel	0	0	0	1	0
6.5.3 Cavités	2	2	2	0	0

2 : Déterminant

1 : Influent

0 : Non influent

SO : Sans objet

Voir commentaires de ce tableau en ANNEXE 1

Tableau 1

5.3 - EVALUATION DE L'INFLUENCE DES PARAMETRES ELEMENTAIRES DE CHOIX POUR LES SOLUTIONS DE TECHNIQUES D'EXCAVATION MECANISEE

Solution Paramètres élémentaires	Machine n'assurant pas de soutènement		Machine assurant un soutènement latéral		Machine assurant un soutènement latéral et frontal					
	Machine à attaque ponctuelle	Alésure et tunnelier à appui latéral	Bouclier mécanisé ouvert à appui radial	Bouclier mécanisé ouvert à appui longitudinal		Bouclier mécanisé à soutènement mécanique	Bouclier mécanisé à confinement d'air comprimé		Bouclier mécanisé à confinement de terre	
				A attaque pleine face	A attaque ponctuelle		A attaque pleine face	A attaque ponctuelle		
1. CONTRAINTES NATURELLES	0	2	2	2	2	2	1	2	1	1
2. PARAMETRES PHYSIQUES										
2.1 Identification	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2.2 Appréciation globale de la qualité	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1
2.3 Discontinuités sol/roche	1/2	1/2	SO/2	1/2	1/2	1/2	2/2	2/2	2/2	1/2
2.4 Altérabilité	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2.5 Chimie des eaux	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1
3. PARAMETRES MECANIQUES										
3.1 Résistance										
Pour les sols	2	2	SO	2	2	2	1	2	1	1
Pour les roches	2	1	1	SO	2	1	1	2	1	1
3.2 Déformabilité	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3.3 Potentiel de liquéfaction	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4. PARAMETRES HYDROGEOLOGIQUES	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
5. AUTRES PARAMETRES										
5.1 Abrasivité – dureté	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1 ou 2
5.2 Aptitude au collage	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
5.3 Frottement terrain/machine	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1
5.4 Présence de gaz	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1
6. CARACTERISTIQUES DU PROJET										
6.1 Dimensions – géométrie section	0	2	2	2	2	2	2	2	1	1
6.2 Profil en long	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
6.3 Tracé en plan	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0
6.4 Environnement										
6.4.1 Sensibilité aux tassements	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1
6.4.2 Sensibilité aux nuisances et contrainte de travaux	1	1	1	1	1	1	1	1	1 à 2	1
6.5 Anomalies dans le terrain										
6.5.1 Hétérogénéité dans le terrain	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1 à 2
6.5.2 obstacle naturel artificiel	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1 à 2
6.5.3 Cavités	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

2 : Déterminant
1 : Influent
0 : Non influent
SO : Sans objet

Voir commentaires de ce tableau en ANNEXE 2

Tableau 2

6 - SPECIFICITES RELATIVES AUX TECHNIQUES D'EXCAVATION

6.1 - MACHINES N'ASSURANT PAS DE SOUTÈNEMENT

6.1.1 - Spécificités des machines à attaque ponctuelle

a) Généralités :

Ces machines sont adaptées généralement aux sols à forte cohésion et aux roches tendres. Elles sont constituées d'un bras excavateur monté sur un châssis automobile. Elles sont sans relation directe avec la section de l'ouvrage à excaver ; les sections réalisées peuvent être variées et variables. A tout moment, l'accès direct au front de taille est possible. Ces machines trouvent leur appui directement en radier qui doit satisfaire aux conditions de portance.

b) Abattage :

Ces machines sont équipées d'un bras mobile généralement support d'une haveuse (ou fraise de havage) qui assure l'abattage du front par balayages successifs. La poussée maximale sur la fraise est directement limitée par la masse de la machine. L'outil d'abattage fonctionne soit transversalement (perpendiculairement au bras), soit axialement (dans le prolongement du bras). Les déblais à front sont le plus souvent ramassés par un tablier lié à la machine et convoyés vers l'arrière. Ce mode d'abattage génère de la poussière qu'il est impératif de traiter (aspiration, aspersion, dépoussiérage...).

Dans certains cas, la fraise d'abattage peut être remplacée par un godet, ripeur ou un brise-roche.

c) Soutènement et maîtrise de la charge hydrostatique

Le soutènement ne fait pas partie de la machine. Il est nécessaire de lui associer une méthode de soutènement spécifique à la géométrie de la galerie et aux terrains rencontrés (cintres, boulons, béton projeté,....).

Ce type de machine ne permet pas de maîtriser la charge hydrostatique. Des solutions d'accompagnement (traitement de terrain, rabattement,...) peuvent être nécessaires.

d) Marinage

Le marinage peut être traité avec ou indépendamment de ce type de machine. Il peut intervenir directement à front.

6.1.2 - Spécificités des tunneliers à appui radial

a) Généralités

Les réactions de poussée sur le plateau porte-outils sont reprises par l'intermédiaire de patins radiaux ou grippeurs sur 1 ou 2 lignes qui s'appuient directement sur le parement de l'excavation. A l'arrière de la machine, un train suiveur porte les équipements nécessaires au fonctionnement de celle-ci et à la logistique associée. Un matériel de reconnaissance à l'avancement équipe généralement ce type de machine. L'accès au front est possible lors des arrêts de fonctionnement et après recul du plateau.

Le mode d'avancement est séquentiel (foration, reprise des appuis)

b) Abattage

Ces machines à attaque globale sont caractérisées généralement par une tête d'abattage rotative pleine face permettant de réaliser la totalité de la section en continu. Elle est équipée d'outils (molettes, couteaux,...). L'évacuation des déblais est assurée généralement par une série de racleurs et de godets de relevage ; le marin est déversé sur un convoyeur qui le transporte vers l'arrière de la machine. Une aspersion d'eau à front est généralement mise en place : elle limite l'échauffement des outils et évite la dispersion des poussières.

c) Soutènement et maîtrise de la charge hydrostatique

Le soutènement est indépendant de la machine (cintres, boulons, béton projeté,...), mais peut être mis en œuvre par l'intermédiaire d'équipements auxiliaires solidaires du bâti et/ou du train suiveur. Le soutènement depuis le bâti doit tenir compte du déplacement et du pas des appuis. La tête d'abattage n'a généralement pas pour rôle le soutènement du front de taille. Parfois, une casquette ou une virole permet d'assurer la protection des personnels vis à vis de chute de blocs.

La charge hydrostatique ne peut être maîtrisée par ce type de machine. Des solutions d'accompagnement s'imposent dans le cas de charge ou de débit important (rabattement, drainage, traitements de terrain...).

d) Marinage

Le marinage s'effectue généralement par berlines ou convoyeur à bande. Il est lié directement au cycle d'avancement du tunnelier.

6.1.3 - Spécificités des aléseurs

a) Généralités :

Le fonctionnement de ce type de machine est semblable à celui des tunneliers à appui radial. Par contre, la tête de coupe est traccée par grippage d'un corps de traction situé en avant de la machine, dans une galerie pilote. L'entraînement de la tête s'effectue par une série de moteurs hydrauliques ou électriques. L'alésage de la galerie peut être réalisé par une succession de plateaux de diamètres croissants ou par réalésages successifs.

b) Abattage

Voir chapitre 6.1 ; 2 § b «tunnelier à appui radial».

c) Soutènement et maîtrise de la charge hydrostatique

Le soutènement mis en œuvre dans l'avant trou doit impérativement être destructible lors du passage de l'alésage, (boulons fibre) ou démontable (cintres). Le soutènement définitif est indépendant de la machine, mais peut être mis en place à partir du train suiveur.

Voir chapitre «tunnelier à appui radial pour la maîtrise de la charge hydrostatique».

d) Marinage

Voir chapitre 6.1.2.§ d «tunnelier à appui radial».

6.2 - SPECIFICITES DES MACHINES ASSURANT UN SOUTÈNEMENT LATERAL

6.2.1 - Spécificité des boucliers mécanisés ouverts à appui radial

a) Généralités

Le bouclier mécanisé ouvert à appui radial est un tunnelier à appui radial muni d'une virole cylindrique.

Les réactions de poussée appliquées sur la tête d'abattage sont reprises par l'intermédiaire de patins radiaux (ou grippeurs) qui s'appuient directement sur le parement de l'excavation soit à travers la virole, soit à l'arrière immédiat de celle-ci. A l'arrière de la machine, un train suiveur porte les équipements nécessaires au fonctionnement de la machine et à la logistique associée.

Le bouclier ne prend pas appui sur le soutènement.

b) Abattage

Voir chapitre «tunnelier à appui radial».

c) Soutènement et maîtrise de la charge hydrostatique

Le bouclier assure un soutènement latéral passif. Il permet d'assurer aussi la protection des personnels vis à vis de la chute des blocs. Le soutènement éventuel est ensuite assuré soit par des anneaux voussoirs (mis en place à l'aide d'un érecteur monté sur la machine), soit par un soutènement indépendant du bouclier.

Ce type de machine ne permet pas de maîtriser la charge hydrostatique. Des solutions d'accompagnement (traitement de terrain, rabattement,...) peuvent être nécessaires pour franchir des zones aquifères ou instables.

d) Marinage

Voir chapitre « tunnelier à appui radial ».

6.2.2 - Spécificités des boucliers mécanisés ouverts à appui longitudinal

a) Généralités

Un bouclier mécanisé à appui longitudinal est une machine équipée soit d'une tête d'abattage qui excave globalement le front de taille soit d'un bras excavateur similaire à ceux des machines à attaque ponctuelle. La progression de la machine est assurée par des vérins de poussée prenant appui longitudinalement sur un revêtement mis en œuvre à l'arrière de la machine.

b) Abattage

Généralement, le mode d'avancement est séquentiel :

- 1) foration réalisée avec poussée par les vérins longitudinaux prenant appui sur le revêtement.
- 2) rétraction des vérins de poussée et pose du revêtement.

c) Soutènement et maîtrise de la charge hydrostatique

Le bouclier assure un soutènement latéral et passif. Il permet d'assurer aussi la protection de personnels vis à vis de chute de blocs.

Le front de taille doit être autostable. La présence d'une tête d'attaque pleine face ne peut contribuer à un soutènement du front que dans des situations exceptionnelles (par exemple : limitation des éboulements à l'arrêt).

Le soutènement est assuré par un revêtement provisoire ou définitif mis en place à l'aide d'un érecteur monté sur la machine. C'est sur ce revêtement que prennent appui les vérins ; ils permettent ainsi la progression de la machine.

Ce type de machine ne permet pas de maîtriser la charge hydrostatique. Des solu-

tions d'accompagnement (traitement de terrain, rabattement,...) peuvent être nécessaires pour franchir des zones aquifères ou instables.

d) Marinage

Il s'effectue généralement par berlines ou tapis, il est directement lié au cycle d'avancement du bouclier.

6.2.3 - Spécificités des boucliers mécanisés ouverts à appuis mixtes

Le bouclier mécanisé ouvert à appui mixte combine la présence d'appuis radiaux sur le terrain et de vérins longitudinaux d'appui sur le revêtement. Un corps intermédiaire télescopique permet de combiner le forage et la pose des voussoirs.

Le creusement est effectué par exemple de la manière suivante :

Le corps arrière du bouclier est en appui sur le terrain par des gripeurs, le corps avant excave le terrain, propulsé par les vérins principaux situés entre les deux corps du bouclier (pose de l'anneau pendant cette phase). Ensuite, vient la phase de reprise des appuis : les vérins longitudinaux (auxiliaires) en appui sur les voussoirs poussent le corps arrière vers le corps avant.

6.3 - SPECIFICITES DES MACHINES ASSURANT UN SOUTÈNEMENT FRONTAL ET LATERAL

6.3.1 - Spécificités des boucliers mécanisés à soutènement mécanique

a) Généralités

Le principe de fonctionnement des tunneliers à soutènement mécanique consiste à assurer la stabilité de l'excavation en retenant en avant de la tête les matériaux excavés par la fermeture partielle de volets montés sur celle-ci.

b) Abattage

L'abattage des terrains s'effectue par l'intermédiaire d'une tête d'abattage à attaque « pleine face ».

c) Soutènement et maîtrise de la charge hydrostatique

L'ajustement en temps réel des ouvertures de la tête d'abattage permet de réaliser une rétention du matériau abattu contre le front.

Le soutènement frontal est assuré par le matériau retenu en avant de la tête d'abattage.

Le soutènement latéral est assuré de façon passive par la jupe du bouclier.

Le revêtement est :

- Soit posé à l'intérieur de la jupe arrière du tunnelier, l'étanchéité est assurée à ce niveau par un joint de queue et un mortier de bourrage injecté,
- Soit posé à l'extérieur de la jupe arrière (voussoirs expansés, voussoirs avec injection de gravette puis injection proprement dite).

Ces machines ne permettent pas en général le maintien de charge hydrostatique. Des solutions d'accompagnement (traitement de terrain, rabattement,...) peuvent être nécessaires pour franchir des zones aquifères ou instables.

d) Marinage

Le marinage s'effectue généralement par berlines ou tapis.

6.3.2 - Spécificités des boucliers mécanisés à confinement d'air comprimé

a) Généralités

Avec ce type de tunnelier, seule la mise en pression d'air de la chambre d'abattage permet d'assurer la maîtrise de la charge hydrostatique au front.

La pression de confinement d'air comprimé est quasi uniforme sur la hauteur de la section excavée. En revanche, le diagramme des poussées dues à l'eau et au terrain sur le front, est de forme trapézoïdale. Il en résulte des écarts dans l'équilibre des pressions sur la hauteur de l'excavation. La solution retenue en général consiste à équilibrer la charge d'eau avec la pression de confinement au point le plus bas de l'excavation. Plus le diamètre est grand, plus le différentiel de pression résultant est important ; c'est la raison pour laquelle le confinement d'air comprimé en tunnel de grand diamètre doit être étudié avec une attention toute particulière.

Ces tunneliers sont en général utilisés avec des charges hydrostatiques modérées (soit inférieures à 0.1 Mpa).

b) Abattage

L'abattage des terrains s'effectue par une tête d'abattage munie d'outils, le calibrage des matériaux étant assuré par les ouvertures de celle-ci.

L'extraction des matériaux peut être réalisée par une vis (faible charge hydrostatique) ou par un convoyeur blindé équipé d'un sas.

c) Soutènement et maintien de la charge hydrostatique

Les soutènements frontal et latéral des terrains sont assurés mécaniquement et respectivement par la tête d'abattage et par la jupe du tunnelier.

Le maintien de la charge hydrostatique est assuré par l'air comprimé.

d) Marinage

Les matériaux sont évacués en général, soit par convoyeur, soit par matériels roulants (trains ou camions...).

6.3.3 - Spécificités des boucliers mécanisés à confinement de boue

a) Généralités

Le principe de fonctionnement des tunneliers à boue consiste à assurer la stabilité de l'excavation au moyen d'une boue mise en pression dans la chambre d'abattage et à extraire les déblais par circulation de cette boue dans la chambre.

Le revêtement est posé à l'intérieur de la jupe arrière du tunnelier, l'étanchéité étant assurée à ce niveau par un joint appelé «joint de queue».

Un mortier de bourrage est injecté, à l'avancement, derrière le revêtement.

b) Abattage

L'abattage des terrains s'effectue par l'intermédiaire d'une tête d'abattage munie d'outils. L'ouverture de la tête, complétée éventuellement par un concasseur placé en amont de la première pompe d'aspiration, permet de calibrer les matériaux avant leur extraction par pompage.

c) Soutènement et maintien de la charge hydrostatique

Les deux soutènements, frontal et latéral des terrains sont de même nature, ils sont assurés par la pression de boue générée par le circuit de marinage hydraulique.

En terrain perméable ($K \geq 5 \times 10^{-5}$ m/s) La mise en pression de la chambre est autorisée par la formation d'un cake d'étanchéité généré par une boue ayant des propriétés thixotropiques (bentonite, polymère...) de densité généralement comprise entre 1.05 et 1.15.

La présence du cake rend aussi possible les interventions dans la tête sous air comprimé à partir d'un sas pour interventions hyperbares.

Le passage en mode ouvert est possible mais nécessite des transformations lourdes.

De même que pour le soutènement, le maintien de la charge hydrostatique s'effectue par la formation d'un cake qui contri-

bue à la formation d'un gradient hydraulique entre, d'une part la pression hydrostatique dans le terrain, et d'autre part, la pression de boue régnant dans la chambre d'abattage.

La maîtrise de la charge hydrostatique est, avec celles de la stabilité de l'excavation et des tassements, un élément dimensionnant de la pression de confinement ; la régulation de celle-ci est assurée soit par la régulation directe du débit des pompes d'amenée et d'extraction du fluide de marinage, soit par une «bulle d'air» dont le niveau et la pression sont pilotés au moyen d'un compresseur et de clapets de décharge. L'utilisation d'une «bulle d'air» dans la chambre de coupe assure la mesure et la régulation de la pression de confinement avec de très faibles fluctuations.

d) Marinage

L'évacuation des déblais s'effectue par pompage dans les tuyaux reliant le tunnelier aux installations de séparation et de traitement des déblais.

Le traitement des déblais est réalisé le plus souvent à l'extérieur du tunnel, dans une centrale de séparation permettant de recycler la boue ; il existe des risques liés à la nature des terrains à traiter (colmatage des installations, problèmes d'évacuation des boues résiduelles).

Le débit de pompage ainsi que la capacité de traitement de la centrale de séparation déterminent les performances d'avancement de la machine.

6.3.4 - Spécificités des boucliers mécanisés à confinement de pression de terre

a) Généralités

Le principe de fonctionnement des tunneliers à pression de terre consiste à assurer la stabilité de l'excavation par mise en pression des matériaux excavés contenus dans la chambre d'abattage en vue d'équilibrer les pressions sollicitantes. Les déblais foisonnés sont rendus plastiques, si nécessaire, à l'aide d'additifs injectés à partir d'orifices situés sur la tête d'abattage, la cloison étanche et la vis d'extraction des déblais. Ces additifs contribuent en réduisant les frottements, à réduire le couple nécessaire au brassage des matériaux et à libérer un couple plus important pour l'abattage des terrains. Ils contribuent aussi à favoriser le maintien d'une pression de confinement constante au front de taille.

L'extraction est assurée par un convoyeur à vis associé, ou pas, à d'autres dispositifs de décharge.

Le revêtement est posé à l'intérieur de la jupe arrière du tunnelier, l'étanchéité étant assurée par un joint de queue. Un mortier de bourrage est injecté, à l'avancement, derrière le revêtement.

b) Abattage

L'abattage des terrains s'effectue par l'intermédiaire d'une roue d'abattage munie d'outils.

Le calibrage des matériaux est assuré par les ouvertures de la roue qui sont déterminées par la capacité dimensionnelle du convoyeur à vis.

La puissance installée sur la tête d'abattage est importante en raison du brassage des matériaux abattus dans la chambre. Cependant des additifs de foration permettent en les plastifiant de limiter le couple résistant.

c) Soutènement et maintien de la charge hydrostatique

Le soutènement frontal des terrains est homogène. Il est assuré par les matériaux excavés et des additifs dont la densité est généralement comprise entre 1 et 2. Le soutènement latéral peut être amélioré par des injections de produits à travers la jupe du bouclier.

Pour pouvoir intervenir dans la chambre d'abattage, il peut être nécessaire de réaliser un cake d'étanchéité par substitution contrôlée (c'est à dire sans perte de confinement), des matériaux remplissant la chambre d'abattage par de la boue bentonitique.

Le maintien de la charge hydrostatique est assuré par la formation de bouchon de sol confiné dans la chambre et la vis d'extraction ; le gradient de pression entre le front et la sortie des déblais est équilibré par pertes de charge dans le dispositif d'extraction et de décharge.

La mesure et le contrôle de la pression dans la chambre nécessitent des précautions dans la définition et le choix de l'emplacement des capteurs.

d) Marinage

Au-delà de la vis d'extraction des déblais, les matériaux sont évacués en général soit par convoyeurs, soit par matériels roulants (trains - camions).

Les déblais sont généralement «pelletables» sans traitement complémentaire avant mise en décharge ; toutefois, des études de biodégradabilité des additifs peuvent être nécessaires en cas d'environnement sensible (décharge).

L'architecture de ce type de tunnelier permet un passage rapide du mode fermé en mode ouvert.

7 - DOMAINE D'EMPLOI DES TECHNIQUES D'EXCAVATION MECANISEE

7.1 - MACHINES N'ASSURANT PAS DE SOUTÈNEMENT

7.1.1 - Machines à attaque ponctuelle

Ces machines sont adaptées généralement aux sols à forte cohésion et aux roches tendres. La limite d'emploi correspond aux terrains présentant une résistance à la compression maximale de 30 à 40 Mpa soit de classe R3 à R5 de la classification jointe en Annexe 3 (selon le degré de fracturation ou foliation). La puissance mobilisable de ces machines est directement liée à leur poids propre.

En présence de terrain aquifère, l'utilisation de ces machines nécessite l'emploi préalable de technique de traitement de terrain permettant de s'affranchir des grandes venues d'eau.

L'attaque de faciès argileux en présence d'eau peut entraîner un phénomène de collage ou de colmatage des outils-d'abatage ; dans ce contexte, une étude de définition très précise des outils s'impose. L'emploi de bras excavateur peut être recommandé.

Ces techniques sont particulièrement bien adaptées lors de la réalisation d'ouvrages de sections variables sur de faibles linéaires ou lorsque la section doit être excavée en section divisée.

Le soutènement accompagnant cette méthode d'excavation est indépendant de la machine employée. Celui-ci sera spécifique aux conditions de sites (terrains rencontrés, environnement, ...) et à la géométrie de l'excavation.

7.1.2 - Tunneliers à appui radial

Ces machines sont particulièrement adaptées pour assurer l'excavation de section continue dans les terrains rocheux de classe de résistance R1 à R4. (voir classification des roches en annexe 3).

Pour les classes de faibles résistances (R3b-R4), les surfaces d'appui des grippeurs sur le terrain seront généralement augmentées afin d'éviter tout poinçonnement. En cas de risque d'altération du radier en présence d'eau, l'emploi de radier en béton mis en place à l'avancement, facilitera la cir-

culution du train suiveur. Pour stabiliser à court terme les parements excavés, des dispositifs de mise en œuvre rapide de soutènement indépendants de la machine mais néanmoins compatible avec elle, seront nécessaires.

Pour les classes de résistances élevées (R1-R2a), l'ensemble des paramètres de forabilité doit être pris en considération pour le dimensionnement de la machine :

Dans les massifs durs et abrasifs en particulier, il est recommandé de prendre toutes dispositions pour assurer les changements de molettes en toute sécurité.

Un système d'aspersion d'eau à front permet le refroidissement des outils et la neutralisation des poussières. Il est complété par des écrans anti-poussières et une ventilation par aspiration et une filtration.

Des dispositifs de reconnaissance à l'avancement par forages destructifs avec enregistrement des paramètres sont généralement installés sur ces machines, les reconnaissances sont faites lors des périodes d'arrêt.

Du fait de leur conception, ces machines ne permettent pas de soutenir à l'avancement les terrains sans cohésion, ni de maîtriser la charge hydrostatique. C'est pourquoi, des mesures d'accompagnement telles que le drainage et/ou le confortement préalable du terrain s'imposent, lorsqu'un tunnelier à appui latéral doit traverser un accident géologique. Le tunnelier doit alors être équipé pour reconnaître ce type d'accident et il doit permettre de traiter lorsque nécessaire le terrain à l'avant de la tête d'abatage.

7.1.3 - Aléseurs

Cette technique est bien adaptée pour la réalisation de galeries horizontales ou inclinées, de sections très importantes (au delà de 8 m de diamètre), dans les terrains rocheux (R1 à R3, parfois R4 et R5).

Sa mise en œuvre à partir d'une galerie pilote présente par rapport à un tunnelier, les avantages suivants :

- Reconnaissance préalable des terrains lors de la réalisation de la galerie pilote.
- Possibilité de consolidation anticipée de zone de terrains de mauvaises tenues.
- Drainage du massif à excaver.
- Utilisation de la galerie pilote pour l'exhaure et la ventilation.
- Mise en place d'un soutènement provisoire, indépendant de la machine, adapté à la dimension de la section.

7.2 - MACHINES ASSURANT UN SOUTÈNEMENT LATERAL

7.2.1 - Boucliers mécanisés ouverts à appui radial

Le bouclier mécanisé ouvert à appui radial est particulièrement bien adapté au creusement au rocher dont la classe de résistance est située entre R1 et R3.

La présence d'un bouclier permet de réaliser un soutènement des terrains excavés et/ou d'assurer une protection contre les chutes de blocs.

La présence d'une jupe peut aider à s'affranchir de certaines difficultés géologiques en évitant le recours à la mise en place d'un soutènement juste à l'arrière de la tête d'abatage.

L'emploi de cette technique peut être limité par la capacité du terrain à reprendre l'effort des appuis radiaux.

Voir également considérations générales exprimées en 7.1.2 qui sont valables dans ce cas.

7.2.2 - Boucliers mécanisés ouverts à appui longitudinal

Le bouclier mécanisé ouvert à appui longitudinal nécessite la présence d'un revêtement ou d'un soutènement sur tout le linéaire de l'ouvrage à construire, ce revêtement servant d'appui pour la progression de la machine.

Son domaine d'emploi est celui des roches tendres (classe de résistance R4 et R5) et terrains nécessitant un soutènement dont le front est naturellement stable.

Voir également considérations générales exprimées en 7.1.2 qui sont valables dans ce cas.

Ce type de bouclier permet de franchir certaines hétérogénéités du terrain. Par ailleurs il permet une certaine industrialisation du soutènement du chantier. A contrario, la présence du revêtement et de la jupe du bouclier peut poser problème pour le franchissement d'obstacles tels les accidents géologiques, en gênant l'accès au front pour traitement ou confortement du terrain.

7.2.3 - Boucliers mécanisés ouverts à appuis mixtes

Le bouclier mécanisé ouvert à appui mixte combine les avantages et inconvénients liés à la présence d'appuis radiaux et de vérins longitudinaux d'appui sur le revêtement : il est nécessaire de disposer d'un

revêtement ou d'un terrain permettant la reprise d'appui.

Cette plus grande complexité technique est aussi choisie, lorsqu'un revêtement est nécessaire, pour réaliser simultanément le forage et la pose du revêtement.

7.3 - MACHINES ASSURANT UN SOUTÈNEMENT FRONTAL ET LATERAL

7.3.1 - Boucliers mécanisés à soutènement mécanique

Le bouclier à soutènement mécanique diffère du bouclier mécanisé ouvert à appui longitudinal par l'équipement sur la tête d'abattage :

- De volets à ouverture réglable.
- D'un joint périphérique d'étanchéité avec le bouclier.

Le soutènement du front est obtenu par le maintien des matériaux abattus en avant de la tête d'abattage, en faisant varier le degré d'ouverture des volets. En ce sens, il ne s'agit pas d'un véritable confinement mais plutôt d'un soutènement passif du front.

Son domaine d'emploi spécifique est donc celui des roches tendres et des terrains consolidés hors nappe (ou sous faible charge d'eau).

7.3.2 - Boucliers mécanisés à confinement d'air comprimé

Les tunneliers à air comprimé sont particulièrement adaptés aux terrains de faible perméabilité et ne présentant pas de discontinuités importantes (pertes d'air brutales).

Les terrains traversés doivent nécessairement comporter une couche imperméable en couverture.

Ils sont plutôt utilisés pour le creusement de galeries de petites sections.

Ils ne sont pas recommandés en présence de terrains hétérogènes répartis dans la hauteur de la section (terrains instables en calotte pouvant conduire au soutirage) Ils sont à exclure impérativement en présence de terrains organiques où le risque d'incendie est présent.

Dans le cas de galerie de petit diamètre, il peut être envisagé de placer sous air comprimé la totalité du tunnel.

7.3.3 - Boucliers mécanisés à confinement de boue

Ces tunneliers sont bien adaptés aux sols pulvérulents (sables, graviers,...) et aux terrains hétérogènes, mais conviennent aussi aux autres terrains, même avec passage rocheux.

Des risques de colmatage et des problèmes de séparation des déblais des boues peuvent survenir en cas de présence d'argile dans les terrains excavés.

Ces tunneliers sont adaptés aux terrains présentant une perméabilité élevée, (jusqu'à 10^{-2} m/s). Cependant, en présence d'un aquifère puissant, il est nécessaire d'utiliser une boue spéciale pour former un cake d'étanchéité.

(Leur utilisation est usuellement limitée à des charges hydrostatiques de quelques dixièmes de Mpa.)

D'une manière générale, une bonne maîtrise de la qualité de la boue et de la régularité de la pression de confinement permet de limiter très fortement les tassements de surface.

La rencontre de terrains pollués (ou d'eau très agressive) peut poser des problèmes et nécessiter d'adapter la composition de la boue.

La présence de méthane dans les terrains ne présente pas de difficulté avec ce type de tunnelier.

La rencontre le long du tracé de terrains contrastés et hétérogènes, peut présenter des difficultés d'extraction et de traitement des déblais.

7.3.4 - Boucliers mécanisés à confinement de pression de terre

Ces tunneliers sont particulièrement adaptés aux sols susceptibles de présenter après malaxage, une consistance favorable à la transmission des pressions dans la chambre d'abattage et à la création d'un bouchon dans la vis d'extraction des déblais (terrains argileux, silts, sables fins argileux, craie tendre, marnes, schistes argileux).

Ils s'accommodent de sols dont la perméabilité est assez élevée entre (10^{-3} et 10^{-4} m/s). Ils sont aussi bien adaptés aux terrains présentant des discontinuités ponctuelles nécessitant un confinement local.

En présence de terrains durs et abrasifs, des adjuvants ou des dispositions particulières comme la protection de la tête d'abattage et de la vis au moyen de plaques rapportées ou rechargements en métal dur, peuvent être indispensables.

A noter, qu'en terrain perméable, les visites pour maintenance dans la chambre d'abat-

tage sont rendues très délicates en raison de la nécessité de réaliser, au préalable et sans perte de confinement, un cake d'étanchéité sur le front d'abattage.

8 - LES TECHNIQUES D'ACCOMPAGNEMENT DES TUNNELIERS

8.1 - RECONNAISSANCE PREALABLE DEPUIS LA SURFACE.

8.1.1 - Etude d'impact

Dès l'avant projet, une étude d'impact doit être envisagée afin de bien apprécier les caractéristiques dimensionnelles envisageables pour l'ouvrage projeté, en particulier sa section et la couverture possible.

Par ailleurs, la sensibilité aux tassements, en zone urbaine surtout, doit faire l'objet d'une attention toute particulière. Ce point constitue un critère déterminant dans le choix de la méthodologie d'excavation et de soutènement et dans le choix du tracé et de la section de l'ouvrage.

L'étude d'impact doit être complète et tenir compte de la densité de l'existant et de la diversité de son comportement.

Pour les existants en souterrains, une analyse spécifique permettra d'estimer la compatibilité ou l'adaptation nécessaire (méthodes d'accompagnement ou traitements particuliers) des méthodes d'excavation et de soutènement envisagées.

8.1.2 - Conditions de terrain

L'objectif des reconnaissances préliminaires n'est pas seulement de permettre la conception et le dimensionnement des ouvrages provisoires et définitifs mais aussi de vérifier la faisabilité du projet en termes d'exécution, c'est-à-dire d'abattage, de marinage et de stabilité à court et long terme.

Le dimensionnement des ouvrages passe par la définition de la géométrie, des coupes géologiques, des caractéristiques physiques et mécaniques des terrains rencontrés par l'ouvrage et du contexte hydrogéologique du projet dans son ensemble.

La faisabilité du projet est déterminée par les réactions potentielles du massif, dans le détail des formations traversées et dans la globalité du massif, eu égard aux sollicitations induites par les travaux, et donc au mode d'excavation - confinement choisi.

La synthèse des résultats des reconnaissances traitera donc, selon le contexte et les exigences propres au projet, de chacun des objets d'étude qui sont détaillés dans le texte de recommandation pour le choix des paramètres et essais géotechniques, quel que soit le contexte géologique (cf. : T.O.S N° 28 ; 1978 ; réédité 05/93 – révision en cours et T.O.S N° 123 ; 1994).

Dans le cas où le choix du mode d'excavation - soutènement n'est fait qu'au stade de l'offre, et suivant le mode de confinement choisi par l'entreprise, des reconnaissances complémentaires seront menées afin de valider les options prises en la matière.

8.1.3 - Moyens mis en œuvre

Selon l'ampleur du projet et sa complexité, les reconnaissances préalables, traditionnellement fondées sur des investigations par sondages et essais, pourront recourir à une observation « en grand » du comportement du massif, grâce à des puits et galeries d'essais.

Cette période d'essai sera utilement mise à profit pour tester les méthodes d'excavation et de soutènement, ainsi que les traitements associés.

Enfin, si des reconnaissances à l'avancement sont prévues, un étalonnage de la (des) méthode (s) de forage et d'investigation doit être envisagé dès ce stade.

Dans des conditions exceptionnelles de couverture et de difficulté d'accès depuis la surface, des investigations par forages dirigés (techniques minières et/ou pétrolières), visant à reconnaître le massif dans l'axe de l'ouvrage, sur de grandes longueurs (échelle kilométrique), peuvent se justifier, particulièrement si elles sont associées à une investigation géophysique et à des essais in situ appropriés.

8.2 - RECONNAISSANCE A L'AVANCEMENT

La notion de reconnaissance à l'avancement doit être confrontée à celle de risque. En effet, ce type de reconnaissance est lourde et coûteuse car elle pénalise l'avancement du fait de l'arrêt du tunnelier (dans l'état de l'art actuel). Sa mise en œuvre doit venir en réponse à un besoin explicite et impératif de lever des incertitudes quant à la traversée de zones à risques, vis à vis de la sécurité du chantier, de la préservation de l'existant ou encore de la pérennité de l'ouvrage.

Quelle que soit la méthodologie choisie, elle doit donner aux spécialistes qui l'exploitent, en temps réel, la capacité d'anti-

ciper une situation d'aléa, en usant de techniques correctives.

Pour atteindre cet objectif, la première condition que doit remplir la fonction de reconnaissance à l'avancement est l'obtention d'une information suffisamment claire et objective en avant du front (entre 1 et 5 diamètres) et disponible dans un délai en rapport avec les cadences d'avancement du chantier.

La seconde condition est qu'elle doit être qualitativement adaptée aux besoins spécifiques du chantier (recherche de vides francs, de zones décomprimées, de failles, etc.). Ces critères, établis conjointement entre le concepteur - maître d'œuvre et l'entreprise, doivent être explicités clairement dans le cahier des charges transmis aux éventuels exécutants de cette investigation.

Au cours des travaux, l'analyse des résultats est généralement à la charge du prestataire, mais l'interprétation des données, corrélée avec celle des paramètres d'avancement du tunnelier (monitoring) doit rester, en principe, le fait de l'entreprise qui pilote l'engin d'excavation.

8.3 - TRAITEMENT DE TERRAIN

Des traitements préalables de terrains sont parfois nécessaires, notamment pour le franchissement de :

- Points singuliers tels que des traversées d'ouvrage ou entrées en terre.
- Discontinuités et zones faillées connues à l'avance.
- Zones aquifères en terrain perméable.

Ces traitements permettront parfois, dans le cas où de tels franchissements sont limités, le choix d'une technique moins sophistiquée et donc moins onéreuse.

Ces traitements étant longs à exécuter et très coûteux à réaliser depuis le tunnel (notamment lorsque le tracé est situé sous le niveau de la nappe phréatique), ils sont en général exécutés depuis la surface (pour les tunnels de faible couverture).

Toutefois, la tendance actuelle est d'équiper les machines avec les dispositions de base minimum (telles que traversées de cloison étanche et/ou de la virole) pour se réserver la possibilité de mettre en œuvre des traitements de terrain depuis celles-ci en cas de rencontre inattendue de terrains aquifères non compatibles avec la technique adoptée. Cela peut être aussi le cas lorsque les conditions locales interdisent un traitement depuis la surface.

Enfin, dans le cas du bouclier à confinement, les conditions géologiques et hydrogéologiques nécessitent souvent des traitements spécifiques pour permettre les entrées en terre et en ouvrage d'arrivée des machines. Ce dernier point n'est pas à négliger tant en phase d'étude préliminaire (emprise de surface, reconnaissances de sol et de réseaux, programme) qu'en phase d'exécution. Il s'agit là en effet, de l'une des phases les plus délicates des tunnels.

Une attention est à porter sur la compatibilité des traitements avec le process du bouclier (effet de moussage, réaction sur boue et additifs etc.....)

Les traitements de terrain les plus couramment employés sont :

- Massif d'injection d'imprégnation de bentonite-ciment et / ou de gel.
- Enceinte étanche.
- Substitution totale du sol par un massif en bentonite-ciment.
- Massif de jet grouting.

8.4 - GUIDAGE

Le guidage d'un tunnelier pleine face dans l'espace souterrain est une fonction indispensable. La performance du dispositif assurant celui-ci doit être en adéquation avec le type de machine et de revêtement, ainsi qu'avec la destination de l'ouvrage.

Le développement des boucliers avec pose simultanée de voussoirs préfabriqués, a conduit à concevoir des systèmes de guidage et de navigation très sophistiqués. En effet, dans ce dernier cas, il n'est plus possible de retoucher l'ouvrage en cas de construction hors tolérance ; il convient donc d'apporter au pilote (voir à l'automate de pilotage), des informations en temps réel sur la position du front d'excavation et la tendance de creusement par rapport à la trajectoire théorique. Par ailleurs, il ne faut pas perdre de vue, dans la tolérance de construction, que le revêtement ne sera pas nécessairement centré dans l'excavation et qu'il peut avoir également une déformation propre (désaffleurement, ovalisation, etc...). On admet généralement comme tolérance une enveloppe formant un cercle de rayon de l'ordre de 10 cm supérieur au théorique.

Quelque soit le degré de sophistication du système de guidage, il est nécessaire dans tous les cas :

- De s'assurer du transfert d'une polygone fiable en tunnel et de «refermer» celle-

ci dès que possible (passage d'un puits, d'une station,...).

- De procéder à des contrôles topographiques réguliers et précis de la position du tunnelier et du tunnel.
- De connaître dès que possible la vitesse et l'amplitude de réaction du bouclier aux sollicitations de modifications de trajectoire.

8.5 - ADDITIFS

a) Généralités

Les techniques d'excavation mécanisée font appel à des produits de natures physique et chimique très différentes qu'il est toutefois possible de regrouper sous un même concept, celui des «boues et fluides conditionneurs». Avant toute utilisation d'additifs chimiques, on s'assurera qu'ils ne présentent aucun danger pour l'environnement (ils seront mélangés intimement au marinage et peuvent présenter des problèmes lors de la mise en décharge), ou pour les hommes (notamment lors des interventions dans la chambre d'abattage en hyperbarie avec une température ambiante qui peut être élevée).

b) L'eau

Présente en quantité variable dans le sol, l'eau en détermine sa consistance comme le démontrent les différents essais géotechniques de caractérisation ou de béton (limites d'Atterberg pour les sols argileux et slump test ou cône d'Abrams pour les sols granulaires). Elle peut être utilisée seule, avec de l'argile (bentonite), avec des polymères hydrosolubles ou avec des tensioactifs afin de constituer un fluide conditionneur (boue ou mousse)

c) L'air

L'air en tant que tel ne peut pas être considéré comme un additif de foration au même titre que l'eau ou que d'autres produits, son action conditionnante reste en effet très limitée. Utilisé dans les boucliers à pression d'air comprimé lorsque la perméabilité du sol le permet, l'air a une action de soutènement. Fluide compressible, l'air, permet d'amortir les fluctuations de pression de confinement avec les techniques des boucliers à pression de boue avec «bulle d'air» et à pression de terre avec ajout de mousse. Constituant de la mousse, l'air permet aussi de fluidifier et réduire la densité du marin et servir de régulateur de pression de confinement dans le procédé de confinement dit " à pression de terre ".

d) La bentonite

Parmi les nombreuses variétés d'argile, la bentonite est très certainement la boue de forage la plus connue. Elle se caractérise par un pouvoir de gonflement extrêmement élevé apporté par son constituant argileux spécifique, la montmorillonite, qui lui confère des qualités colloïdales et d'étanchéité très intéressantes.

Dans la technique des boucliers à confinement de boue, la boue bentonitique, de par ses propriétés rhéologiques (thixotropie), permet d'établir une pression de confinement en milieu perméable en étanchant les parois de l'excavation par filtration sous pression de la boue dans le sol (formation d'un cake d'étanchéité mixte d'imprégnation et membrane) et de transporter les déblais par pompage.

La boue bentonitique peut aussi être utilisée avec un tunnelier à pression de terre, pour améliorer la consistance des matériaux granulaires excavés : homogénéisation, plastification, lubrification,

En milieu perméable, le même principe de formation de cake est utilisé dans la technique de pression de terre avant les interventions dans la chambre d'abattage en conditions hyperbares.

e) Les polymères

Parmi la multitude de produits existants, seuls les composés hydrosolubles ou dispersables dans l'eau présentent un intérêt pour l'adjuvantation d'un tunnelier. Il s'agit pour la plupart de produits bien connus dans l'industrie du forage et dont les propriétés rhéologiques ont du être améliorées afin de mieux répondre aux spécificités du tunnelier.

Ces modifications ont porté essentiellement sur les points suivants : augmentation du pouvoir viscosifiant de façon à mieux homogénéiser les matériaux granulaires grossiers d'une part et le renforcement du caractère lubrifiant afin de limiter les phénomènes de collage ou de colmatage de la tête d'abattage et des dispositifs de marinage, lors de la foration dans certains terrains d'autre part.

On distingue :

- Les polymères naturels (amidon, Guar, gomme Xantha,...).
- Les polymères naturels modifiés ou semi synthétiques (C.M.C pour carboxyméthylcellulose,...).
- Les polymères synthétiques (polyacrylamides, polyacrylates,..).

f) Les mousses (tensio-actifs)

Les mousses sont des systèmes diphasiques (une phase gazeuse et une phase

liquide contenant l'agent moussant) caractérisées physiquement par leur taux d'expansion (volume occupé par l'air constituant la mousse par rapport au volume de liquide).

Les mousses, faciles à mettre en oeuvre, s'apparentent à des boues aérées qui combinent les avantages d'un gaz (compressibilité, densité quasiment nulle, ...) et d'une boue (fluidification, lubrification, remplissage des vides intergranulaires, ...). Elles sont utilisées dans le cadre des boucliers à confinement de terre en tant qu'adjuvant facilitant le confinement et aussi parfois l'abattage et le marinage.

8.6 - ENREGISTREMENT DE PARAMETRES DE FONCTIONNEMENT DES MACHINES

L'acquisition et la restitution des paramètres de fonctionnement des tunneliers est sans doute le plus grand progrès technique réalisé durant cette dernière décennie pour cette technologie.

Ceux-ci permettent en effet, d'analyser de façon objective les états de fonctionnement et de dysfonctionnement de la machine et de ses équipements connexes.

Ces états sont, en effet, rapides et éphémères et donnaient lieu sans moyen d'acquisition à des interprétations diverses et souvent fausses.

Il en ressort une analyse technique «vraie» indispensable à la bonne conduite des chantiers réalisés en sites difficiles ou sensibles.

Les acquisitions de paramètres sont aussi la base du contrôle informatisé du fonctionnement de la machine et de l'automatisation des fonctions (pilotage, marinage, régulation de pression de confinement.....)

L'enregistrement de paramètres permet aussi une connaissance précise des états de fonctionnement et de leur durée. (cf. recommandation analyse du temps et coefficients d'utilisation des tunneliers TOS N° 148 Juillet 98).

Ils constituent aussi le retour d'expérience et permettent d'optimiser l'utilisation des tunneliers.

8.7 - REVETEMENT ET INJECTIONS DE BOURRAGE

8.7.1 - Généralités

Dans le cas des boucliers à appuis longitudinaux, le revêtement et les injections de

bouillage sont indissociables du fonctionnement de la machine.

Ils doivent, en effet, assurer sans transition et de façon parfaitement contrôlée, l'équilibre de la charge hydrostatique, le soutènement latéral de l'excavation et le contrôle des tassements de surface.

Leurs interfaces avec la machine, nécessitent de développer leur conception de façon parallèle et inter dépendante à celle de la machine.

8.7.2 - Revêtement

Le revêtement associé au bouclier mécanisé est généralement réalisé à l'aide de voussoirs en béton armé, parfois en fonte (pour les petits diamètres) et, plus exceptionnellement en béton extrudé derrière un coffrage marchant.

La première catégorie est de très loin la plus utilisée, les deux autres étant en voie de disparition pour des raisons économiques ou techniques.

Ces voussoirs sont mis en œuvre à l'aide d'un érecteur à préhension mécanique ou à ventouse intégré à la machine.

Le lecteur est invité à se reporter aux recommandations suivantes :

- Recommandations sur les revêtements préfabriqués des tunnels circulaires au tunnelier TOS N° 86.
- Recommandation sur les joints d'étanchéité entre voussoirs TOS N° 116 de Mars/Avril 1993.
- Recommandations «pour la conception et le dimensionnement des revêtements en voussoirs préfabriqués en béton armé installés à l'arrière d'un tunnelier» établies par le groupe de travail N°18 et parues dans la revue TOS N° 147 de Mai/Juin 1998.

8.7.3 - Injections de bourrage

Ce chapitre ne concerne que les techniques de bouclier mécanisé avec mise en œuvre de voussoirs.

L'expérience a montré l'extrême importance du contrôle du remplissage et des pressions de ces injections d'une part pour la maîtrise et la limitation des tassements de surface et, d'autre part, pour le blocage de l'anneau de voussoir, soumis à court terme à son poids propre, à la poussée de la machine et à la poussée d'Archimède.

Il convient que celles-ci soient mises en œuvre de façon contrôlée et parfaitement continue simultanément à l'avancement

de la machine, avant même qu'un vide ne se soit constitué à l'arrière de la jupe.

À l'origine, les produits d'injection de bourrage étaient constitués soit de gravette, soit de coulis ou mortier de ciment à raidissement ou prise rapide et mis en œuvre de façon discontinue, par des orifices situés au travers des voussoirs.

La gestion du produit d'injection et de son durcissement entre la fabrication et l'injection étant très complexe, la tendance à l'abandon des compositions à base de ciment n'a cessé de se confirmer au profit de produits à prise différée (réaction pouzzolanique) et faible résistance à la compression. Ce produit est injecté de façon directe et continue par des tubulures situées dans l'épaisseur de la jupe arrière du bouclier débouchant dans l'espace annulaire directement à l'arrière de celle-ci

9 - HYGIENE ET SECURITE

La mécanisation de l'excavation a très largement amélioré les conditions d'hygiène et de sécurité des mineurs. Elle a toutefois fait naître ou amplifié certains risques spécifiques qu'il convient de ne pas négliger. Les principaux sont :

- Les risques d'incendie d'origine électrique ou d'inflammation des huiles hydrauliques.
- Les risques d'électrocution.
- Les risques pendant ou à la suite d'interventions hyperbares et leurs conséquences.
- Les risques inhérents aux manutentions de pièces lourdes (voussoirs).
- Les risques d'origine mécanique.
- Les risques de circulation et de chute.

9.1 - CONCEPTION DES MACHINES DE CREUSEMENT

Les tunneliers sont des équipements de travail et doivent être conformes aux règles édictées par la directive machine de la Commission Européenne de Normalisation CEN.

Elles s'adressent aux concepteurs en vue d'obtenir une présomption de conformité à cette directive. Elles sont destinées également aux utilisateurs.

Ces normes donnent les prescriptions et mesures de sécurité minimales correspondant aux risques propres des différentes

machines de creusement de tunnels. Elles s'appliquent en premier lieu aux machines fabriquées après la date d'approbation de la norme européenne.

□ A ce jour est homologuée :

- NF EN 815 «Sécurité des tunneliers sans bouclier et des machines foreuses pour puits sans tige de traction» (Décembre 1996).

□ Sont en cours d'approbation :

- Pr EN 12111 «Machines à attaque ponctuelle, mineurs continus, brise-roches hydrauliques».
- Pr EN 12336 «Boucliers, machines de fonçage horizontal, matériel de mise en place de revêtement».
- Pr EN 12110 «Tunneliers, sas de transfert».

9.2 - MISE EN ŒUVRE DES MACHINES DE CREUSEMENT

L'exécution de travaux souterrains au moyen de machines de creusement entraîne des risques spécifiques liés essentiellement à la pollution atmosphérique (poussières, gaz toxique, bruit, température), aux gaz et produits inflammables contenus dans le sol, aux installations électriques (basse tension et haute tension), aux équipements hydrauliques (organe de puissance ou de commande) ou travaux en hyperbarie (intervention dans les chambres d'abattage des boucliers sous air comprimé de grand diamètre, mise sous pression d'air de tronçon de tunnels de petit diamètre).

On consultera à cet effet les textes et recommandations élaborées par les organismes traitant de la sécurité sur les chantiers de travaux publics (OPPBT, CRAM, INRS).

Toutes ces prescriptions sont intégrées en début des travaux dans le P.G.C. (Plan général de coordination) et le P.P.S.P.S. (Plan de prévention et de sécurité et de protection de la santé).

ANNEXES 1, 2, 3 ET 4

- 1 - Commentaires associés au tableau n° 1 du chapitre 5.
- 2 - Commentaires associés au tableau n° 2 du chapitre 5.
- 3 - Tableau de classification des terrains.
- 4 - Fiches signalétiques des chantiers mécanisés.

ANNEXE 1

COMMENTAIRES ASSOCIÉS
AU TABLEAU N° 1 DU
CHAPITRE 5.

1 - Contraintes naturelles

Soutènement (colonnes A et B)

Leur connaissance permet :

- le choix initial dans les familles de techniques (des machines à attaque ponctuelle aux boucliers à confinement).
- la gestion de la libération des contraintes (de la simple déformation - convergence - à la rupture).

2 - Paramètres physiques

2.1 - Identification

□ Soutènement frontal (colonne A)

Leur connaissance permet :

- d'évaluer le mode de soutènement et de s'orienter vers la famille technique.
- d'évaluer le soutènement frontal nécessaire.

□ Soutènement latéral (colonne B)

Leur connaissance permet d'évaluer la nécessité d'un soutènement latéral au droit de la machine.

□ Maîtrise de la charge hydrostatique (colonne C).

A partir de ces paramètres, de la connaissance de la granulométrie et de la blocométrie, il est possible d'évaluer la perméabilité du milieu et donc d'envisager la manière de maîtriser la charge hydrostatique.

□ Abattage (colonne D)

Parmi les paramètres concernés, la granulométrie et la blocométrie sont déterminantes pour apprécier le type d'abattage (conception de la tête, outils,...).

2.2 - Appréciation globale de la qualité

□ Soutènement (colonnes A et B)

Sa connaissance donne une information complémentaire à l'identification qui ne s'intéresse qu'à l'échantillon. Cette donnée définit des informations plus globales à l'échelle de l'horizon de terrain concerné.

2.3 - Discontinuités

□ Soutènement (colonnes A et B)

Ces données concernent les roches et sols cohérents. Leur connaissance permet de choisir dans les familles de techniques (des machines à attaque ponctuelle aux boucliers à confinement).

□ Maîtrise de la charge hydrostatique (colonne C)

Leur connaissance permet d'apprécier la perméabilité de fracture et la charge d'eau à prendre en compte pour le projet. Elle permet le choix du type de technique.

□ Abattage (colonne D)

La connaissance des discontinuités (nature, importance et fréquence), en relation avec la blocométrie, est influente voire déterminante selon les cas sur le mode d'abattage à retenir.

3 - Paramètres mécaniques

3.1 - Résistance

□ Soutènement (colonnes A et B)

Leur connaissance permet le choix initial parmi les familles de techniques (des machines à attaque ponctuelle aux boucliers à confinement).

□ Abattage (roche)(colonne D)

Leur connaissance est particulièrement importante pour définir l'architecture de la machine et permet d'établir les caractéristiques techniques de la machine (couple, puissance,...) et le choix des outils.

3.2 - Déformabilité

□ Soutènement (colonnes A et B)

Sa connaissance permet l'évaluation et la prise en compte de la libération des contraintes (de la simple déformation ou convergence jusqu'à la rupture).

3.3 - Potentiel de liquéfaction

□ Soutènement et marinage (colonnes A, B et E)

La connaissance de ce paramètre devient influent dans les zones sismiques d'une part et d'autre part dans le cas de mise en oeuvre de technique engendrant un risque de mise en vibration des terrains (explosion artificielle...).

4 - Paramètres hydrogéologiques

□ Soutènement, maîtrise de la charge hydrostatique et abattage (Colonnes A, B, C et D)

La connaissance de ces paramètres (perméabilité et charge hydrostatique) est déterminante pour apprécier la maîtrise de la stabilité de l'excavation tant au front que latéralement et donc dans le choix de la méthode parmi l'ensemble des techniques existantes. Dans le cas d'ouvrage à réaliser sous couverture importante, l'acquisition de ces paramètres n'étant pas facilitée. Leur estimation devra être menée avec plus grand soin et analysée avec une certaine prudence.

5 - Autres paramètres

□ Abattage et marinage (Colonnes D et E)

Les paramètres d'abrasivité et de dureté sont déterminants ou influents pour apprécier les modes d'abattage et de marinage à mettre en oeuvre. Ces paramètres sont à étudier en parallèle avec les paramètres mécaniques (résistance en particulier).

6 - Caractéristiques du projet

Sans commentaires

avec soin. La déformabilité du terrain encaissant influence également le guidage de la machine. En cas de pose de revêtement en dehors de la jupe, il faut être attentif aux déformations différées.

En cas de gonflement des terrains en présence d'eau, les difficultés concernant la progression de la machine qui peuvent en résulter, sont d'importance comparable dans le cas du tunnelier à boue et du tunnelier à pression de terre : ceci dans la mesure où le gonflement provient d'une diffusion et absorption de l'eau interne dans les terrains décomprimés autour des parois de l'excavation. Le bouclier à l'air comprimé est moins sensible à ce phénomène.

3.3 - Potentiel de liquéfaction

Sans objet sauf si un risque de séisme existe ou si on est en présence d'un matériau sensible (sable saturé,...).

4 - Paramètres hydrogéologiques

La connaissance de ces paramètres a pour but de s'assurer de la stabilité à court terme du massif. La présence de charges d'eau et/ou de débit important avec entraînement des matériaux, interdit l'utilisation des machines à attaques ponctuelles, des tunneliers ouverts ou à soutènement mécanique à moins de mettre en œuvre des méthodes d'accompagnement telles que traitement de terrain rabattement de nappe etc...

La charge hydraulique est déterminante également dans le cas de franchissement d'accidents remplis ou non de terrains meubles, exemple : passage de mylonite.

La perméabilité des terrains et la charge hydrostatique sont déterminantes pour les boucliers mécanisés à confinement d'air comprimé, de boue et de terre.

Pour les boucliers à confinement d'air comprimé, ce paramètre peut conduire à rejeter le choix de ce type de machine.

Pour les boucliers à confinement de terre, ce facteur est particulièrement déterminant dans le cas où des variations brutales de perméabilité sont à craindre.

Pour les boucliers à confinement de boue, l'importance de ce paramètre est atténuée par le fait que l'on utilise un fluide de maritage.

5 - Autres paramètres

5.1 - Abrasivité - Dureté

Des caractéristiques d'abrasivité et de dureté trop élevées rendent impossibles ou non économique l'utilisation des machines à attaque ponctuelle.

L'abrasivité et la dureté peuvent être déterminantes quant à l'usure des outils, de la structure de la tête de coupe et des systèmes d'extraction (vis d'extraction, tuyaux de marinage hydraulique...). Néanmoins, des adjuvants de forage et/ou d'extraction et/ou des dispositifs de protection ou de renforcement de organes sensibles peuvent être retenus pour s'opposer à l'usure.

Dans le cas des boucliers à confinement de terre, les interventions de maintenance sur la tête de coupe sont cependant plus difficiles (utilisation de la boue en vue de créer un film étanche avant mise sous pression d'air).

5.2 - Collage - Colmatage

La connaissance de cette caractéristique du matériau à excaver permet dans le cas des machines à attaque ponctuelle, des aléseurs ou des boucliers ouverts d'adapter les outils ou d'envisager l'utilisation d'adjuvant.

Ce paramètre ne peut à lui seul exclure un type de bouclier ; il n'est donc pas déterminant pour les boucliers à front pressurisé. Toutefois, la tendance au collage des terrains doit être examinée dans la mise au point des ajouts (mousse, adjuvants...) ainsi que dans la conception des organes de malaxage et de délayage des déblais collants (agitateurs, jetting...).

Le transport des déblais par trains et (ou) par convoyeurs à bande est particulièrement sensible à ce paramètre.

5.3 - Frottement terrain/machine

Dans le cas des boucliers, le problème du frottement du terrain sur la jupe peut devenir sensible dans les terrains à forte convergence.

Dans le cas où des risques de serrage du bouclier sont à craindre, (convergences, gonflement, dilatance,...), ce paramètre est particulièrement influent sur la conception du bouclier et de la jupe.

La lubrification apportée par le fluide bentonitique rend les boucliers à pression de boue moins sensibles au frottement terrain/machine.

5.4 - Présence de gaz

Elle peut conditionner l'équipement de la machine.

6 - Caractéristiques du projet

6.1 - Dimensions et sections

L'utilisation de machines à attaque ponctuelle permet la réalisation de toute forme de section et de toute dimension.

L'utilisation des aléseurs et des boucliers ouverts ou à soutènement mécanique se limite à la réalisation de sections de géométrie constante. Les dimensions de la section (boucliers ouverts) seront liées à la stabilité du front.

La section excavée est déterminante pour les boucliers à confinement de terre lorsque leur diamètre est élevé (importance de la puissance installée sur la tête de coupe).

La longueur du projet peut être influente pour un bouclier à confinement de boue (puissance importante de pompage).

6.2 - Profil en long

Les limites d'utilisation des machines en profil sont en général celles de la logistique qui leur est associée. Des adaptations spécifiques permettent, pour les aléseurs et les tunneliers à appui latéral la réalisation d'ouvrages inclinés qui nécessitent des équipements spécifiques et sortent du cadre de la présente recommandation.

Dans le cas des machines à attaque ponctuelle, de boucliers ouverts ou à soutènement mécanique, les venues d'eau peuvent poser un problème en cas d'attaque descendante.

6.3 - Tracé en plan

□ L'utilisation des machines à attaque ponctuelle n'impose pas de contraintes particulières.

□ L'utilisation des aléseurs des tunneliers à appui latéral et des boucliers est limitée à certains rayons de courbure (malgré la mise en place d'articulation sur les machines).

□ Les tracés au niveau des entrées et sorties d'ouvrages rencontrés par le tunnel réalisé au bouclier, comporteront un alignement droit sur au moins deux fois sa longueur (impossibilité de diriger la machine prisonnière de son berceau de ripage).

6.4 - Environnement

6.4.1 - Sensibilité aux tassements

Les machines à attaque ponctuelle, les alé-seurs, les tunneliers à appui radial et les boucliers ouverts ne développant pas généralement de soutènement associé, immédiat, peuvent engendrer des tassements qui dépendent du contexte du projet. Leur importance est particulièrement déterminante en zone urbaine ou en zone sensible (passage sous voies de communication : voie ferrée, canalisation...).

Dans le cas des tunneliers, ce paramètre est déterminant en général et peut conduire à exclure un type de machine.

Les boucliers ouverts ou à soutènement mécanique ne sont pas adaptés au cas de terrains très déformables. En cas de pose de revêtement en dehors de la jupe, il faut être attentif aux risques de déformations différées du terrain encaissant.

En ce qui concerne les boucliers mécanisés à confinement, la maîtrise des tassements est étroitement liée à celle de la pression de confinement.

Dans le cas des boucliers à air comprimé, les risques de tassements se situent dans la perte d'air (brutale ou diffuse).

Pour les boucliers à boue, les risques résident dans la qualité du cake et la régulation de la pression. A ce titre, le système de régulation de pression de confinement «à bulle d'air» est particulièrement performant.

Pour les boucliers à confinement de terre, les risques proviennent d'une régulation moins fine de la pression de confinement. Par ailleurs, le vide annulaire situé entre le terrain et le bouclier n'est pas correctement confiné sauf dispositif particulier d'injection de fluide à travers la jupe.

6.4.2 - Sensibilité aux nuisances et contrainte de travaux

Le bouclier à confinement de boue nécessite, en surface, une emprise importante pour le traitement des boues. De ce fait, ce paramètre peut être influent voire déterminant aux zones fortement urbanisées.

Les ajouts introduits dans la chambre d'abatage des boucliers peuvent conduire à des sujétions de mise en décharge des déblais (bentonite, polymère, tensio actif...).

6.5 - Anomalies dans le terrain

6.5.1 - Hétérogénéité terrain/accident

Les sections mixtes sol - roche posent généralement aux techniques sans confinement des problèmes de stabilité du front, d'appui et de risque de soutirage dans la (les) partie(s) la (les) plus tendre(s).

Ce facteur est aussi déterminant pour le bouclier à confinement d'air comprimé notamment dans le cas de terrains instables se trouvant dans la section excavée.

6.5.2 - Obstacle naturel et artificiel

Pour les techniques «ouvertes», la détection des accidents géologiques est essen-

tielle. Pour les techniques à confinement, on sera attentif à la présence d'obstacles naturels ou artificiels. La présence de ces obstacles peut être influente en fonction des difficultés rencontrées pour franchir l'obstacle et de la nécessité d'intervenir dans la chambre.

Les interventions hyperbares nécessaires à la détection et au traitement de tels obstacles nécessitent des opérations de substitution des produits contenus dans la chambre d'abatage (selon le mode de confinement) par de l'air comprimé.

Ces interventions sont :

□ Dans le principe, plus rapides et plus simples dans le cas d'un tunnelier à air comprimé

□ Aisées dans le cas d'un bouclier à confinement de pression de boue

□ Plus longues et plus difficiles dans le cas d'un bouclier à confinement de pression de terre (vidange de la terre avec substitution par de la boue en vue de former un film d'étanchéité ; puis vidange de la boue avec substitution par de l'air comprimé).

6.5.3 - Cavités

La présence de cavités peut entraîner selon leurs tailles, des dérives très importantes de la trajectoire particulièrement en profil vertical. Elles peuvent être aussi la source de perturbations sur la pression de confinement, particulièrement dans les cas des boucliers à pression d'air comprimé ou de boue.

ANNEXE 3

Classification des terrains

Catégorie	Désignation	Exemples	RC (Mpa)
R1	Roche de résistance très élevée	Quartzites et basaltes de résistance élevée	> 200
R2a	Roche de résistance élevée	Granits très résistants, porphyres, grès et calcaires de très haute résistance	200 à 120
R2b		Granits, grès et calcaires de très bonne tenue ou légèrement	
R3a	Roche de résistance moyenne	dolités, marbres, dolomies, conglomérats compacts Grès ordinaires, schistes siliceux ou grès schisteux, gneiss	120 à 60 60 à 40
R3b		Schistes argileux, grès et calcaires de résistance moyenne,	
R4	Roche de faible résistance	marnes compactes, conglomérats peu consistants Schistes ou calcaires tendres ou très fracturés, gypses, grès très fracturés ou marneux, poudingues, craie	40 à 20 20 à 6
R5 a	Roche de très faible résistance et sols cohérents consolidés	Marnes sableuses ou argileuses, sables marneux, gypses ou craies altérées	6 à 0,5
R5b		Alluvions graveleuses, sables argileux normalement consolidés	< 0,5
R6a	Sols plastiques ou peu consolidés	Marnes altérées, argiles franches, sables argileux, limons fins	
R6b		Tourbes silts et vases peu consolidés, sables fins sans cohésion	

(Cf. Recommandations du GT 7 de l'AFTES - Supplément au n° 117 de TOS Mai/Juin 1993)

ANNEXE 4

Fiches signalétiques des chantiers mécanisés (au 31/12/99).

N° fiche	Chantier	* Type ouvrages (AITES)	N° TOS	Date	Longueur forée (m)	Ø Foration (m)	Géologie
1	Echaillon	D	68	1972-1973	4362	5,80	Gneiss, flysch calcaire
2	La Coche	D	77	1972-1973	5287	3,00	Calcaire, grès, brèches
3	CERN SPS	H	64	1973-1974	6551	4,80	Molasse
4	RER Châtelet-Gare de Lyon	C	64	1973-1975	5100	7,00	Calcaire
5	Belledonne	D	64	1974-1978	9998	5,88	Schistes, granite sédimentaire
6	Bramefarine	D	67	1975-1977	3700	8,10	Calcaire, schiste
7	Métro de Lyon - Cremaillère	C	64	1976	220	3,08	Gneiss, granite
8	Galerie du Bourget	C	67	1976-1978	4845	6 m²	Calcaire, molasse
9	Monaco - Galerie technique	H	64	1977	913	3,30	Calcaire, marne
10	Grand Maison - Eau Dolle	D	64	1978	839	3,60	Gneiss, schistes, dolomies
11	Western Oslofiord	G	77	1978-1984	10500	3,00	Ardoise calcaire, roche éruptive
12	Brevon	D	66	1979-1981	4150	3,00	Calcaire, malm, dolomies
13	Grand Maison (conduites forcées et puits de service)	D	75	1979-1982	5466	3,60	Gneiss, schistes
14	Aqueduc de Marignan	F	66	1979-1980	480	5,52 m²	Calcaire
15	Super Bissorte	D	73	1 980-1981	2975	3,60	Schiste, grès
16	Pouget	D	66	1980-1981	3999	5,05	Gneiss
17	Grand Maison - Vaujany	D	75	1981-1983	5400	7,70	Liptinite, gneiss, amphibolite
18	Vieux Pré	D	68	1981-1982	1257	2,90	Grès, conglomérat
19	Haute Romanche	D	73	1981-1982	2860	3,60	Calcaire, schiste, grès cristallin
20	Cilaos	F	80	1982-1984	5701	3,00	Balsate, tufs
21	Monaco - tunnel n° 6	A	66	1982	183	5,05	Calcaire, dolomies
22	Ferrières	D	79	1982-1985	4313	5,90	Schiste, gneiss
23	Durolle	D	79	1983-1984	2139	3,40	Granite, quartz, microgranite
24	Montfermy	D	80	1983-1985	5040	3,55	Gneiss anatésite, granite
25	CERN LEP (machines 1 et 2)	H	82	1985-1986	14680	4,50	Molasse
26	CERNLEP (machine 3)	H	82	1985-1987	4706	4,50	Molasse
27	Funiculaire de Vail d'Isère	B	97	1986	1689	4,20	Calcaires, dolomies, cargneules
28	Calavon et Luberon	F	97	1987-1988	2787	3,40	Calcaires
29	Takamaka II	D	101	1985-1987	4803	3,20	Basaltes, tufs, agglomérats
30	Oued Lakhdar	D	101	1986-1987	6394	4,56 et 4,80	Calcaires, grès, marnes
31	Centrale Nucléaire de Paluel	E	105	1980-1982	2427	5,00	Craie
32	Centrale Nucléaire de Penly	E	105	1986-1988	2510	5,15	Argile
33	Lyon sous fluviale - métro D	C	106	1984-1987	2 x 1230	6,50	Alluvions modernes et arènes
34	Métro de Lille ligne 1 bis - Lot 8	C	106	1986-1987	1000	7,65	Craie blanche et silex
35	Métro de Lille ligne 1 bis - Lot 3	C	106	1986-1988	3259	7,70	Silts et sables argileux
36	Tunnel de Villejust	B	106	1986-1988	4805+4798	9,25	Sables de Fontainebleau
37	Bordeaux Cauderan-Naujac	G	106	1986-1988	1936	5,02	Sables, marnes et calcaires
38	Métro de Caracas : lot PS 01	C	107	1986-1987	2 x 1564	5,70	Alluvions sablo-limoneuses, graves et argiles
39	Métro de Caracas : lot CP 03	C	107	1987	2 x 2131	5,70	Micaschistes altérés et sables limoneux
40	Métro de Caracas : lot 04	C	107	1987-1988	2 x 714	5,70	Micaschistes
41	Métro de Singapour : lot 106	C	107	1985-1986	2600	5,89	Grès, marnes et argiles
42	Bordeaux : collecteur des boulevards Ø3800	G	113	1989-1990	1461	4,36	Calcaires karstiques et alluvions
43	Bordeaux : Avenue de la Libération Ø2200	G	113	1988-1989	918	2,95	Calcaires karstiques et alluvions
44	St Maur-Créteil tronçon 2	G	113	1988-1990	1530	3,35	Alluvions anciennes et blocs
45	Crosne-Villeneuve St Georges	G	113	1988-1990	911	2,58	Marnes altérées et calcaires indurés
46	Manche T1	B	114	1988-1990	15618	5,77	Craie bleue
47	Manche T2-T3	B	114	1988-1991	20009+18860	8,78	Craie bleue
48	Manche T4	B	114	1988-1989	3162	5,61	Craie grise et craie blanche
49	Manche T5-T6	B	114	1988-1990	2 x 3265	8,64	Craie grise et craie blanche
50	Sèvres - Achères : Lot 3	G	121	1989 - 1991	3550	4,05	calcaires grossiers, sables, fausses glaises, argile plastique, marnes du Montien, craie
51	Sèvres - Achères : Lots 4 et 5	G	121	1988 - 1990	3312	4,80	plastique, marnes et calcaires du Montien, craie
52	Créteil - Vitry	G	124	1990 - 1991	2065	3,35	alluvions et remblais
53	Orly Vail : Lot 2	C	124	1989 - 1990	1160	7,64	marnes avec bancs de gypse

(suite tableau)

N° fiche	Chantier	* Type ouvrages (AITES)	N° TOS	Date	Longueur forée (m)	Ø Foration (m)	Géologie
54	Bordeaux Cauderan-Naujac Rue de la Liberté	G	126	1991	150	3,84	Calcaires karstiques
55	Bordeaux Amont Taudin	G	126	1991	500	2,88	Alluvions et calcaires karstiques
56	Métro bus de Rouen	C	126	1993	800	8,33	Argiles noires, sables de l'Albien moyen et argiles du Gault
57	Métro Toulouse : Lot 3	C	131	1989-1991	3150	7,65	Molasses argilo-sableuses et bancs de grès
58	Métro Toulouse : Lots 4 et 5	C	131	1990 - 1991	1587 + 1487	5,60	Molasses
59	Métro de Lille : Ligne 2 - Lot 1	C	132	1992 - 1994	5043	7,65	Argile des Flandres
60	Métro de Lille : Ligne 2 Section b	C	132	1992 - 1993	1473	7,65	Craie, argiles et tuffeau
61	St Maur : collecteur VL3c	G	133	1992 - 1994	1350	3,50	Argiles plastiques très hétérogènes, sables, calcaires grossiers et fausses glaises
62	Métro de Lyon Ligne D - Vaise - Gorge de Loup	C	133	1993 - 1995	2 x 875	6,27	Sables, graviers et limons argileux
63	METEOR Ligne 14	C	142	1993-1995	4500	8,61	Sables, calcaires, marnes et caillasses
64	RER Ligne D Chatelet / Gare de Lyon	C	142	1993 - 1994	2 x 1600	7,08	Calcaire grossier
65	Cleuson Dixence Lot D Puits incliné	D	142	1994-1996	2300	4,77	Calcaire, quartzites, schistes, grès
66	Cleuson Dixence Puits Incliné	D	142	1994-1996	400	4,40	Calcaire, schistes, grès
67	Cleuson Dixence Lot B Galerie d'aménée	D	145	1994-1996	7400	5,6	Schistes et gneiss
68	Cleuson Dixence Lot C Galerie d'aménée	D	145	1994-1996	7400	5,8	Schistes, micachistes, gneiss et quartzites
69	EOLE	B	146	1993 - 1996	2 x 1700	7,40	Sables, marnes et caillasses, grès et calcaires
70	Emissaire du plateau Sud Est (EPSE)	G	146	1994-1997	3925	4,42	Sables molassique, moraine, alluvions
71	CADIX : Galerie Guadiaro Majaceite	F	148	1995 - 1997	12200	4,88	Calcaire, Argile consolidée
72	Métro de Lille Ligne 2 lot 2	C	148	1995 - 1997	3962	7,68	Argile des Flandres
73	BPNL Tunnel de Caluire Tube nord	A	150	1994 - 1996	3252	11,02	Gneiss, molasses, sables et conglomérat
74	BPNL Tunnel de Caluire Tube sud	A	150	1997 - 1998	3250	11,02	Gneiss, molasses, sables et conglomérat
75	Tunnels Ferroviaires du Storebaelt	B	150	1990-1995	14824	8,78	Argiles et marnes
76	Tramway de Strasbourg	C	150	1992 - 1993	1198	8,30	Sables et graviers

Classification AITES selon le type d'ouvrage

A : tunnels routiers - B : tunnels ferroviaires - C : métros - D : galeries hydroélectriques
 E : galeries pour centrales thermiques et nucléaires - F : galeries hydrauliques - G : émissaires et collecteurs
 H : galeries techniques - I : puits descenderies - J : stockages souterrains - K : mines

Notes :

AFFETTES



www.aftes.asso.fr