

The background of the slide is a light gray gradient with several realistic water droplets of various sizes scattered across it. The droplets have highlights and shadows, giving them a three-dimensional appearance.

**ENPC-CHEC
MODULE OUVRAGES SOUTERRAINS**

LES TUNNELIERS

Bruno DEMAY

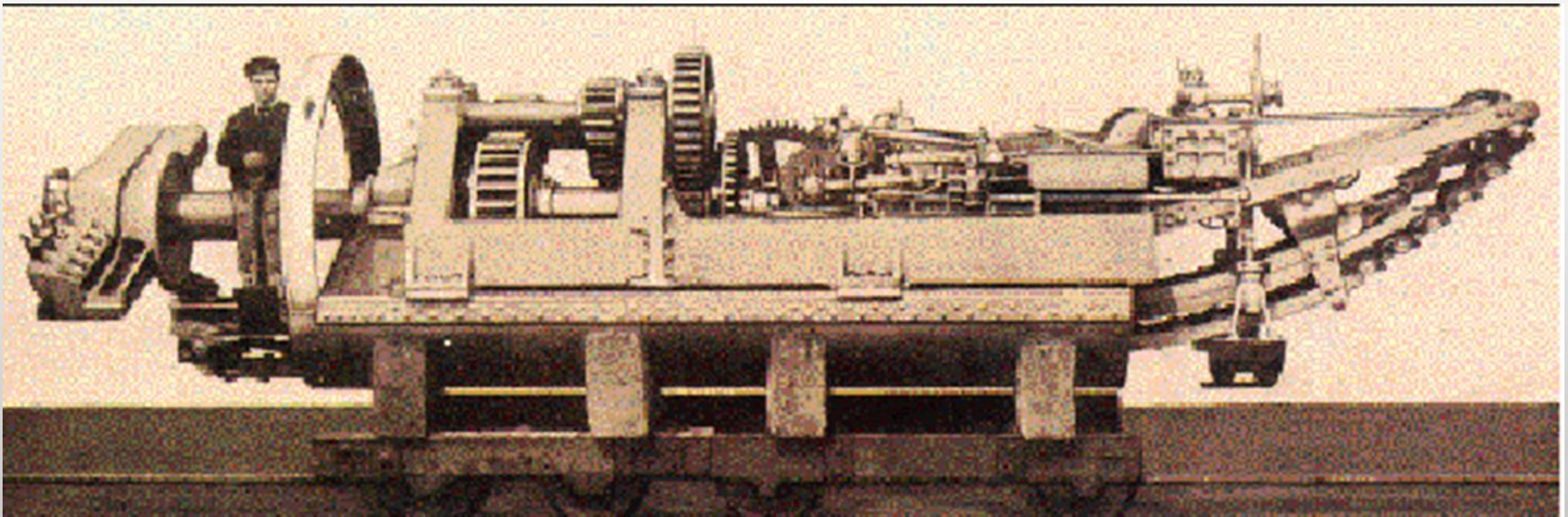
PLAN DE L'EXPOSE

- 1. LES DIFFÉRENTS TYPES DE TUNNELIERS**
- 2. LES PRINCIPAUX ORGANES D'UN TUNNELIER**
- 3. LE CONFINEMENT DU FRONT DE TAILLE**

PREMIÈRE PARTIE

LES DIFFERENTS TYPES DE TUNNELIER

LA GENÈSE DES TUNNELIERS : LA MACHINE DU COLONEL DE BEAUMONT (1882)



LES DIFFÉRENTS TYPES DE TUNNELIER

1. TUNNELIERS À APPUI RADIAL (TUNNELIERS DIT « ROCHES DURES »):

TERRAINS ROCHEUX, DURS, DONC À PRIORI IMPERMÉABLES ...

2. « BOUCLERS » MÉCANISÉS À FRONT OUVERT (PAS DE CONFINEMENT):

ATTAQUE GLOBALE OU PONCTUELLE, BOUCLERS À SOUTÈNEMENT

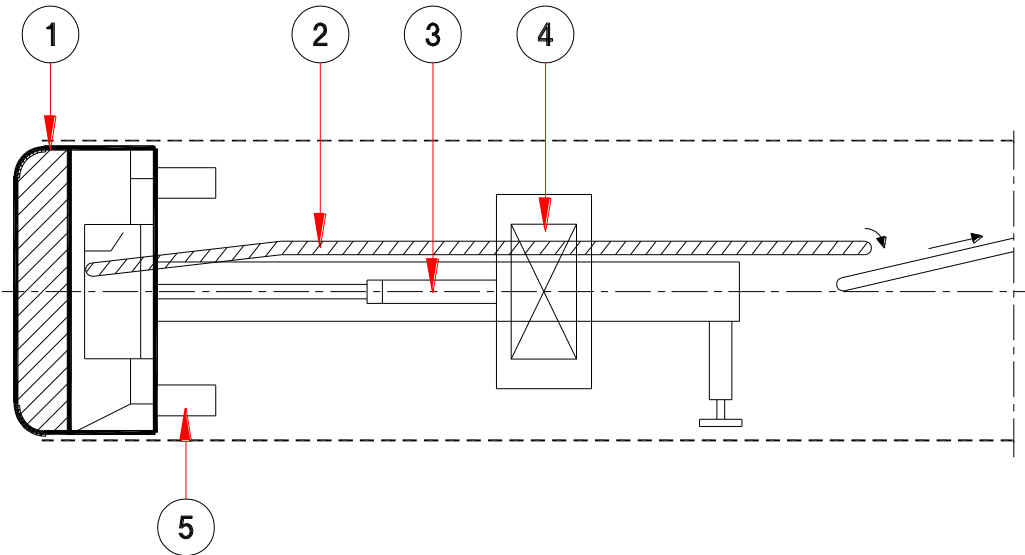
MÉCANIQUE DU FRONT : TERRAINS DE QUALITÉ « MOYENNE À MÉDIOCRE »

3. « BOUCLERS » MÉCANIQUES À FRONT CONFINÉ : TERRAINS MEUBLES ET

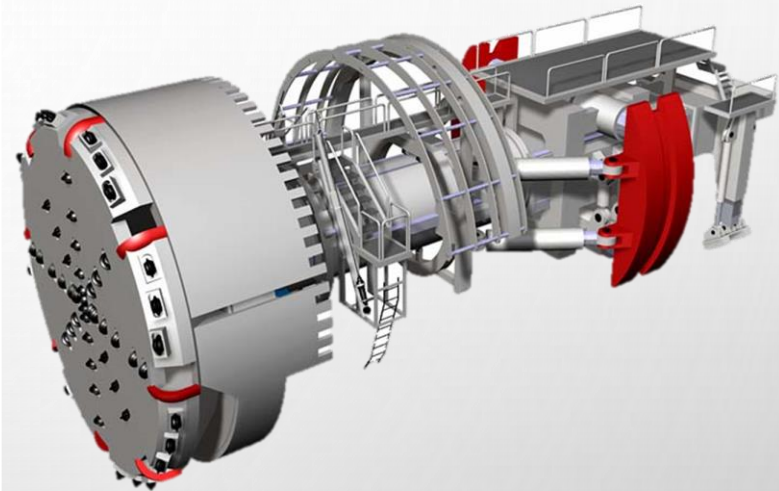
AQUIFÈRES > TUNNELIER À CONFINEMENT PAR PRESSION DE BOUE OU

PRESSION DE TERRE, OU AIR COMPRIMÉ, OU MIXTE

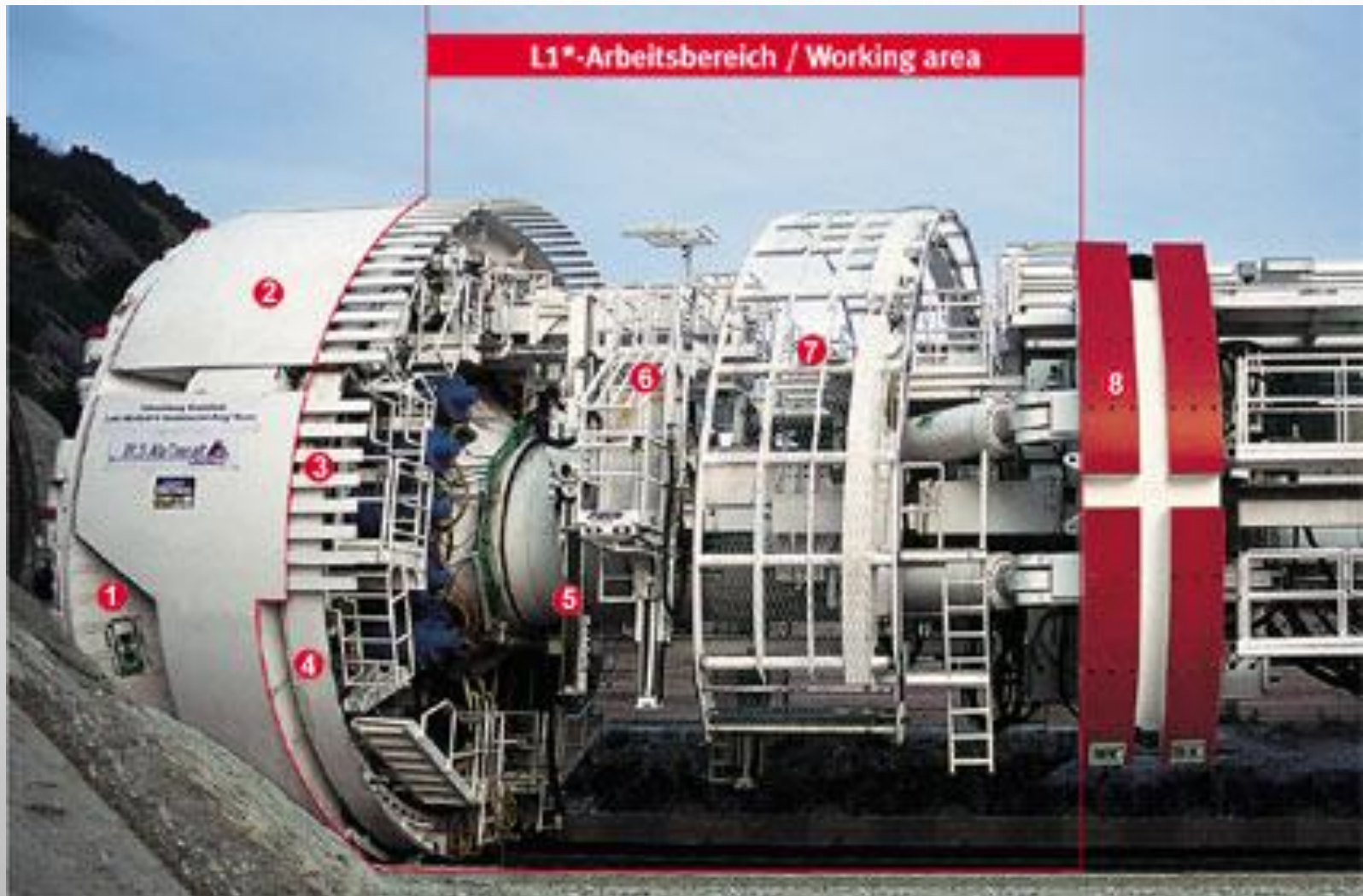
TUNNELIER À APPUI RADIAL



- 1 Tête d'abattage
- 2 Convoyeur
- 3 Vérin de poussée
- 4 Grippers (à appui radial)
- 5 Motorisation



TUNNELIER À APPUI RADIAL / ROCHES DURES



CONCEPT GÉNÉRAL D'UN TUNNELIER ROCHES DURES



TUNNELIER ROCHES DURES : DÉTAILS

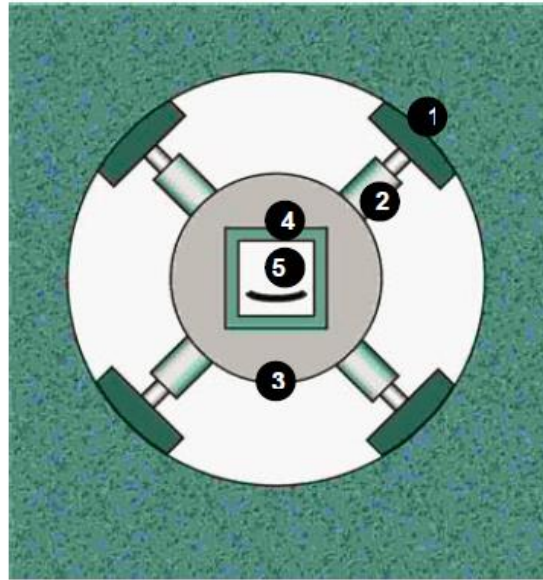


Figure 14.2: Gripper System

- 1 Gripper Pad
- 2 Gripper Cylinder
- 3 Outer Kelly
- 4 Inner Kelly
- 5 Muck Conveyor

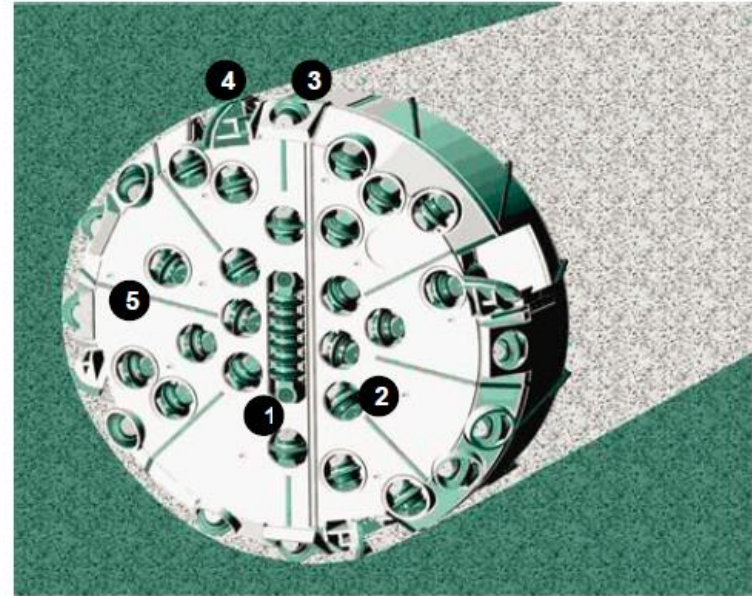


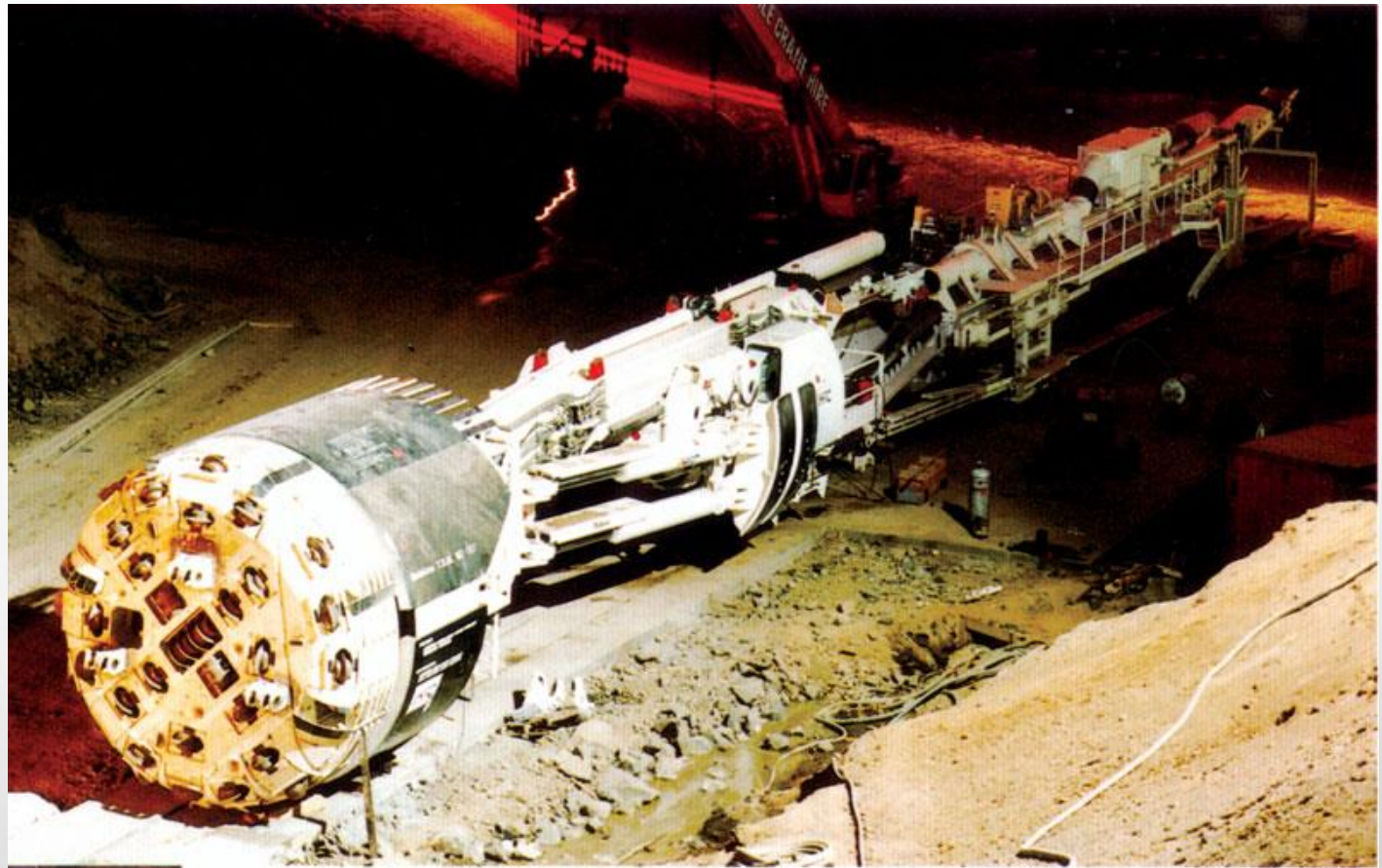
Figure 14.3: Cutter Head front view

- 1 Centre Cutter
- 2 Face Cutter
- 3 Gauge Cutter
- 4 Scraper
- 5 Wear Plates

DÉTAILS DES GRIPPERS SUR LE TUNNEL DU GOTHARD

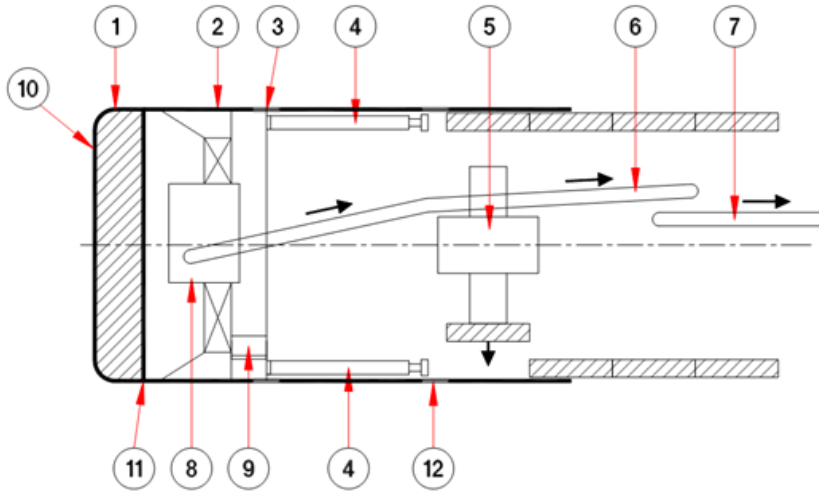


TUNNELIER ROBBINS AU LESOTHO



- EXEMPLES DE PERFORMANCES :
 - MEILLEUR JOUR : 66.8M
 - MEILLEURE SEMAINE : 325 M
 - MEILLEUR MOIS : 1221 M

BOUCLIER MECANISE A SOUTENEMENT MECANIQUE POUR TERRAINS « MÉDIOGRES »

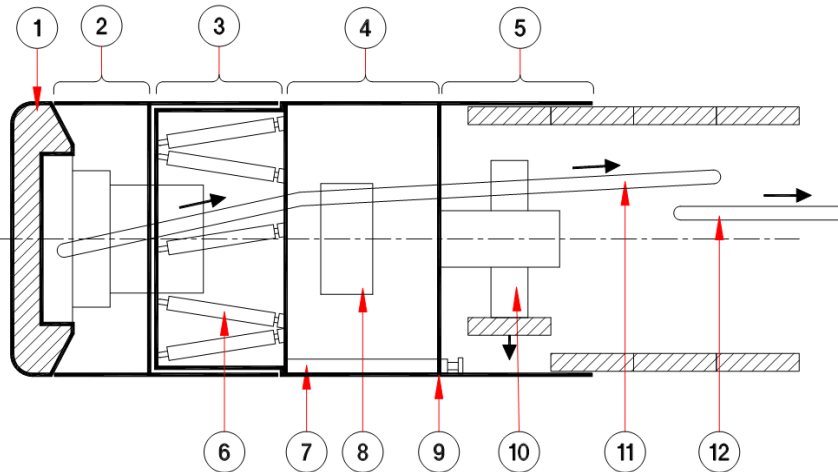


- | | | | |
|---|-------------------------------------|---|---|
| ① | Tête d'abattage | ⑦ | Convoyeur de reprise |
| ② | Bouclier | ⑧ | Trémie de réception des déblais |
| ③ | Articulation du bouclier (option) | ⑨ | Motoréducteur d'entrainement de la roue |
| ④ | Vérin de poussée | ⑩ | Volets d'obturation de tête d'abattage |
| ⑤ | Erecteur | ⑪ | Joint périphérique entre tête et bouclier |
| ⑥ | Convoyeur extracteur | ⑫ | Articulation jupe (option) |

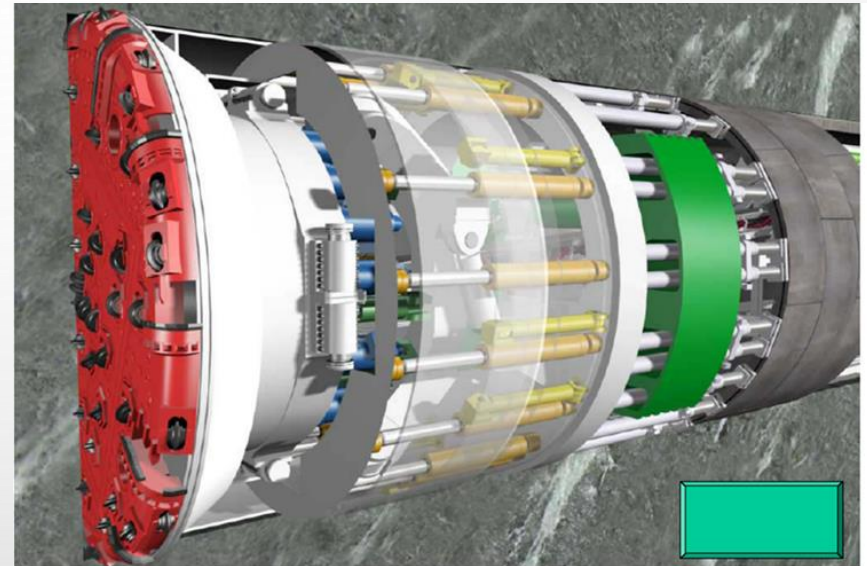


Photo 4.3.2
RER Line D (Paris)

BOUCLIER MECANISE A APPUI MIXTE (« DOUBLE SHIELD »)



- | | | | |
|---|---------------------------------|----|------------------------------|
| 1 | Tête d'abattage | 7 | Vérin d'appuis longitudinaux |
| 2 | Corps avant (bouclier) | 8 | Grippers |
| 3 | Corps télescopique (bouclier) | 9 | Articulation jupe (option) |
| 4 | Corps "grippers" (bouclier) | 10 | Erecteur |
| 5 | Jupe arrière (bouclier) | 11 | Convoyeur |
| 6 | Vérins de poussée principaux | 12 | Convoyeur de reprise |



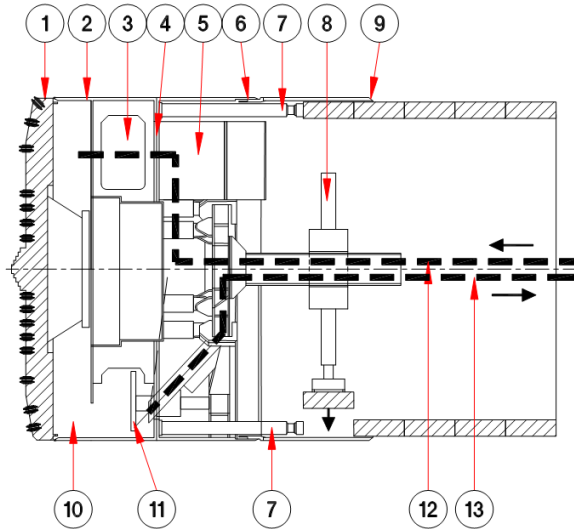
HERRENKNECHT



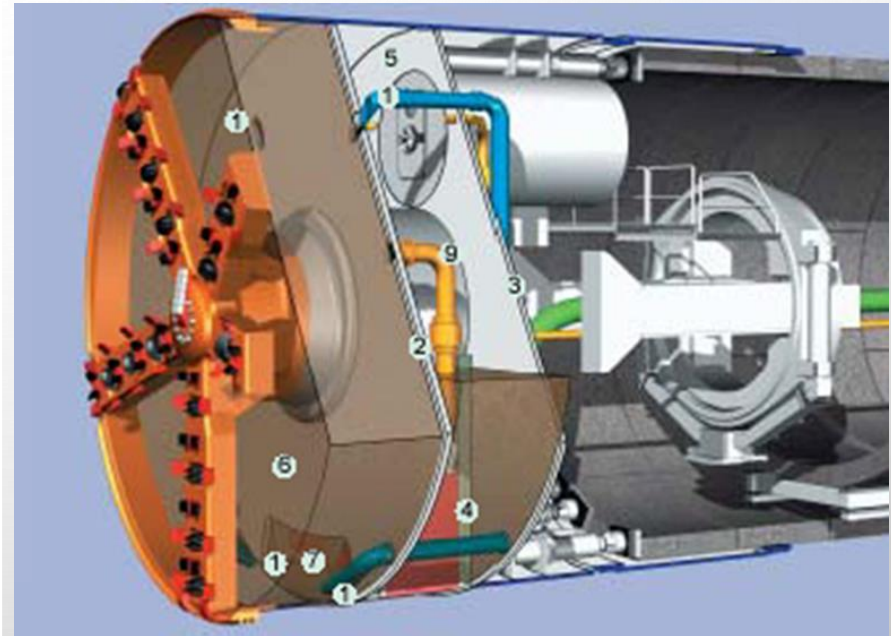
DOUBLE SHIELD: GALERIES HYDRAULIQUES DE SALAZIE À LA REUNION



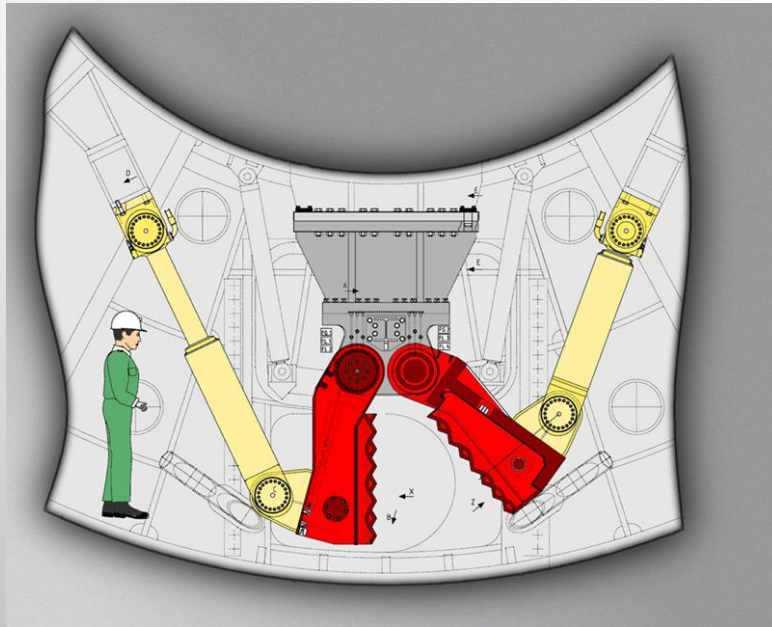
BOUCLIER MECANISE A PRESSION DE BOUE (SLURRY SHIELD)



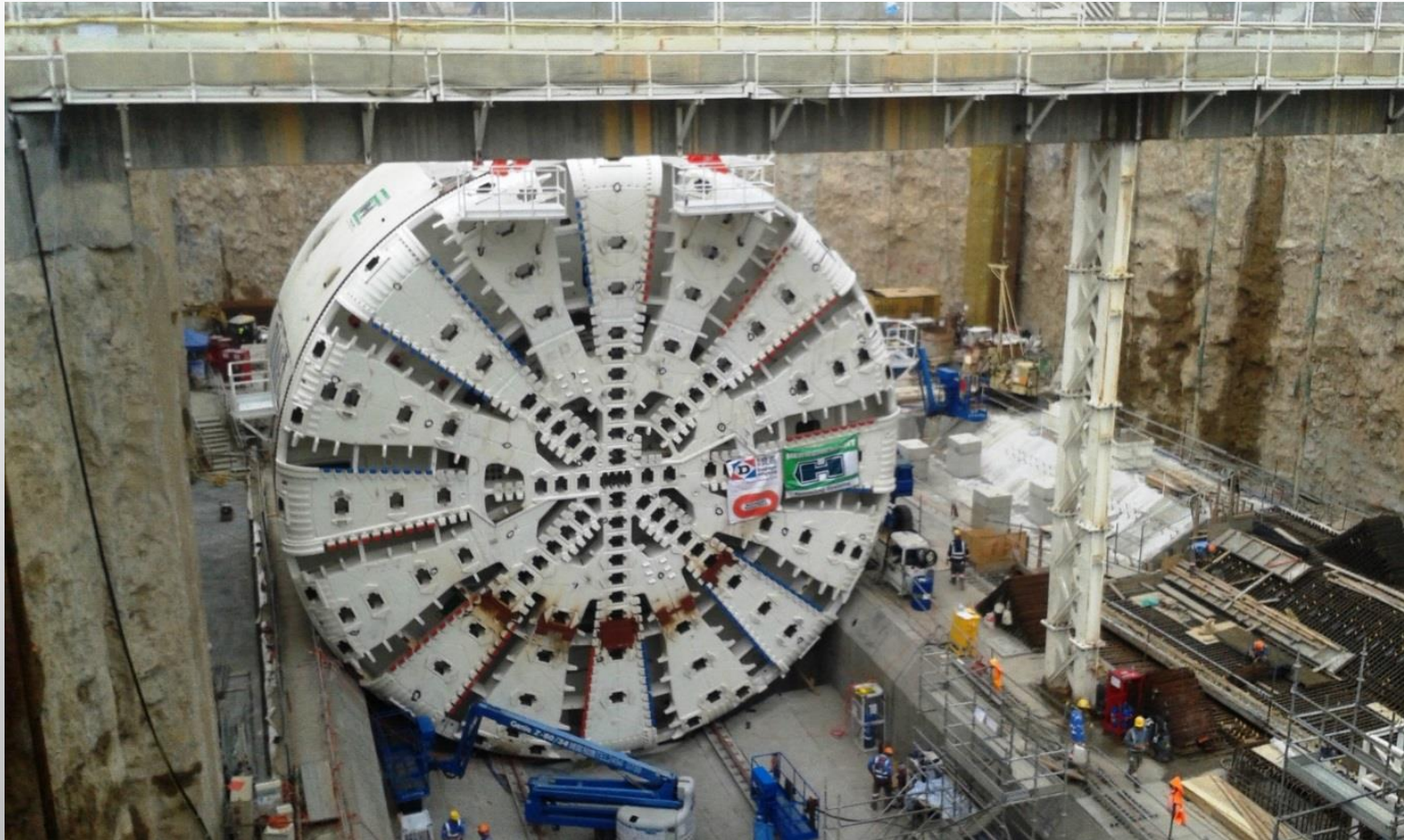
- | | | | |
|---|--------------------------------------|----|--|
| 1 | Tête d'abattage | 8 | Erecteur |
| 2 | Bouclier | 9 | Joint d'étanchéité (dit de "queue") |
| 3 | Bulle d'air (option) | 10 | Chambre d'abattage |
| 4 | Cloison étanche | 11 | Agitateur (option) |
| 5 | Sas d'accès à la chambre d'abattage | 12 | Conduite d'alimentation de boue bentonitique |
| 6 | Articulation jupe arrière (option) | 13 | Conduite de refoulement de boue bentonitique |
| 7 | Vérin de poussée | | |



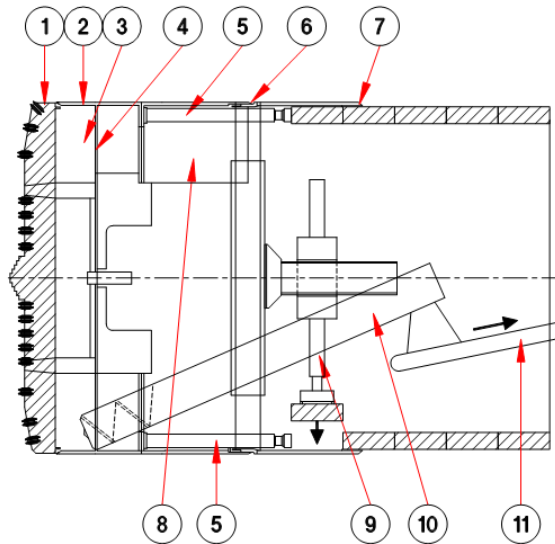
TUNNELIER À PRESSION DE BOUE ZONE CRITIQUE: CONCASSAGE ET ASPIRATION DU MARINAGE EN RADIER



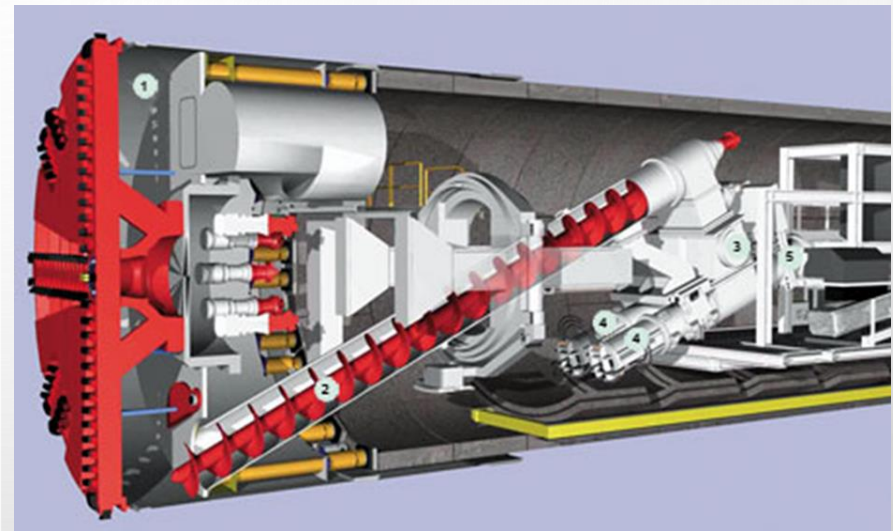
TUNNELIERS À PRESSION DE BOUE : LE TUNNELIER GÉANT DE TUEN MUN CHEP LAP KOK À HONG KONG (17,63 M)



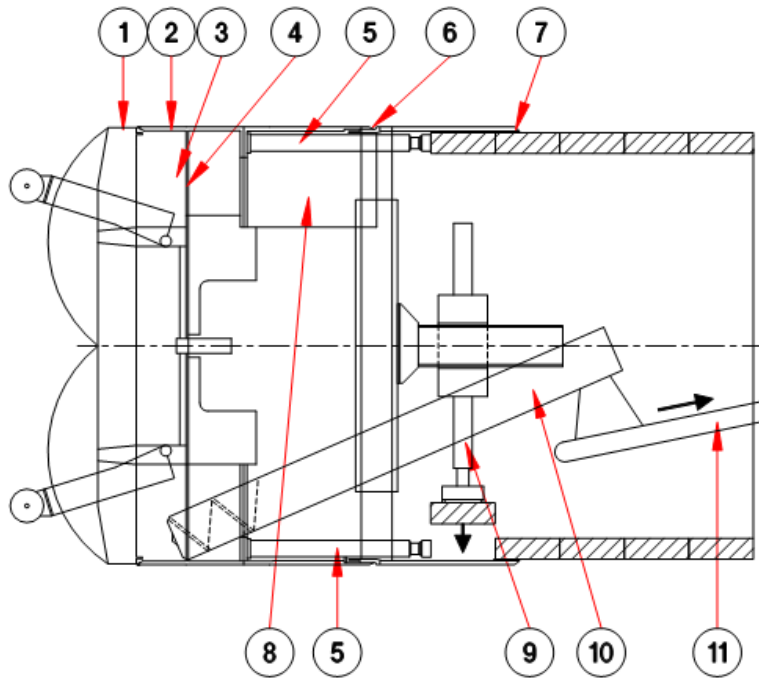
BOUCLIER MÉCANISÉ À PRESSION DE TERRE (EARTH PRESSURE BALANCE - EPB)



- | | | | |
|---|--------------------------------------|---|---------------------------------------|
| ① | Tête d'abattage | ⑦ | Joint d'étanchéité (dit de "queue") |
| ② | Bouclier | ⑧ | Sas d'accès à la chambre d'abattage |
| ③ | Chambre d'abattage | ⑨ | Erecteur |
| ④ | Cloison étanche | ⑩ | Vis d'extraction |
| ⑤ | Vérin de poussée | ⑪ | Convoyeur de reprise des déblais |
| ⑥ | Articulation jupe arrière (option) | | |



BOUCLIER MÉCANISÉ À CONFINEMENT D'AIR COMPRIMÉ

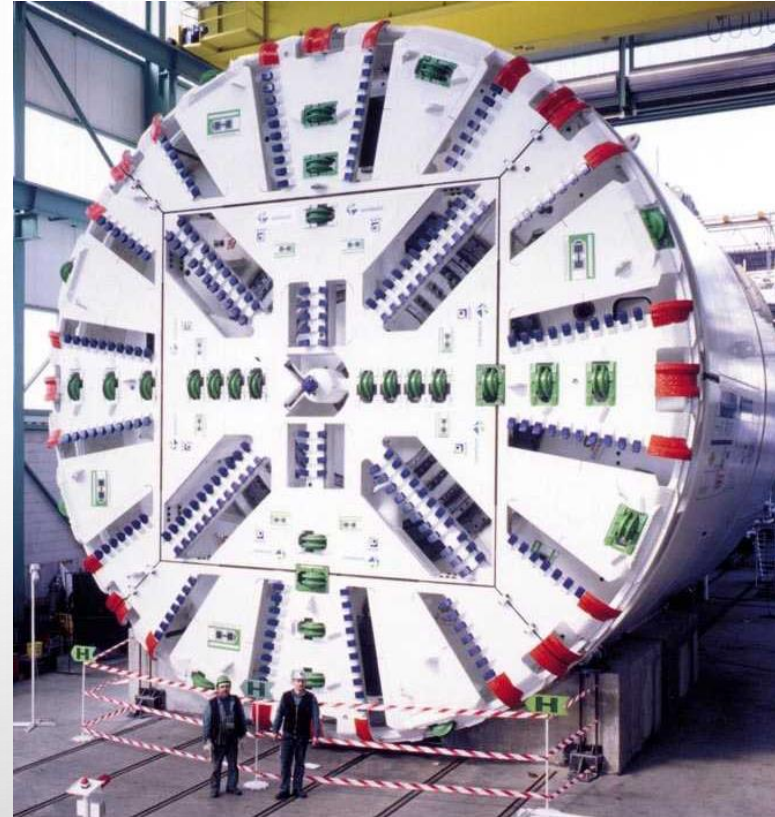
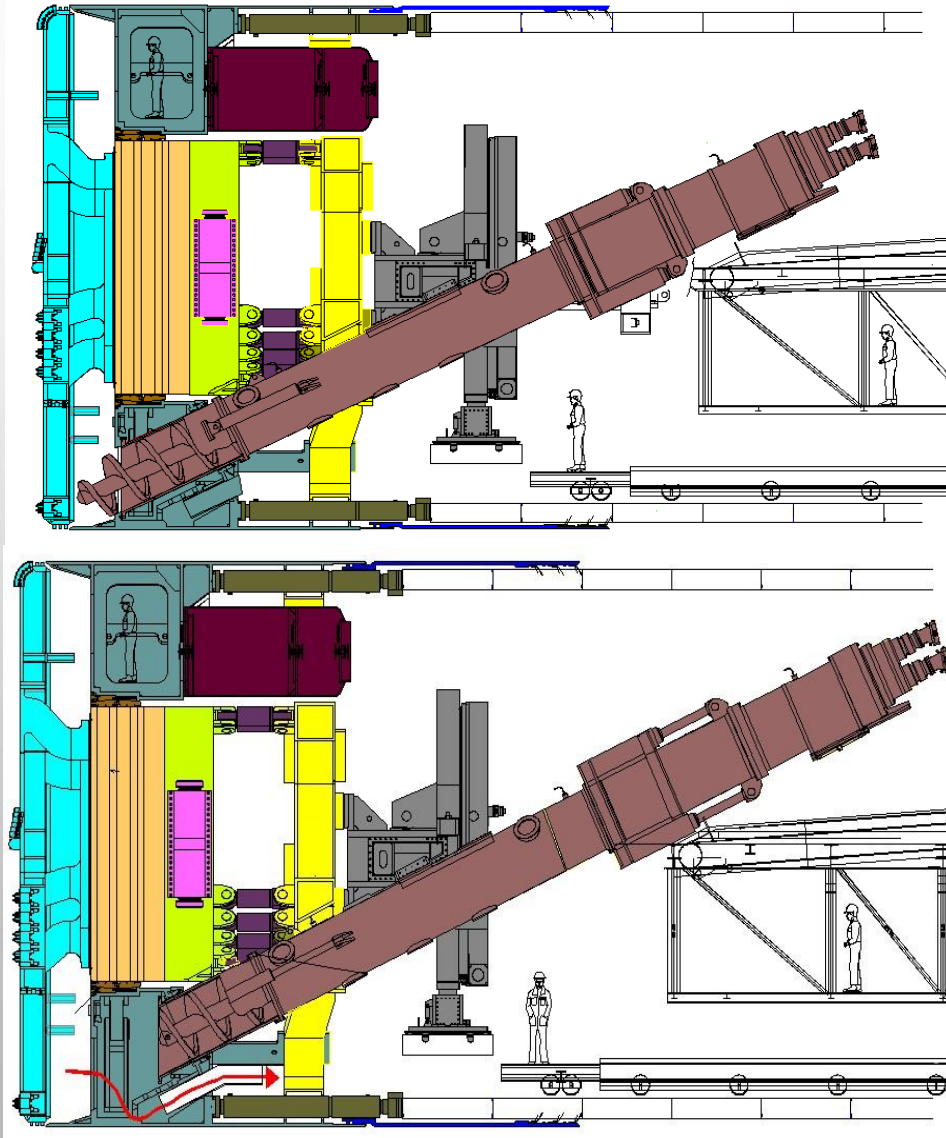


- | | | | |
|---|-------------------------|---|---|
| ① | Bras excavateur | ⑥ | Joint d'étanchéité (dit de "queue") |
| ② | Bouclier | ⑦ | Sas d'accès à la chambre d'abattage |
| ② | Chambre d'abattage | ⑧ | Erecteur |
| ③ | Cloison étanche | ⑨ | Vis d'extraction (ou convoyeur + sas) |
| ④ | Vérin de poussée | ⑩ | Convoyeur de reprise des déblais |
| ⑤ | Articulation (option) | | |



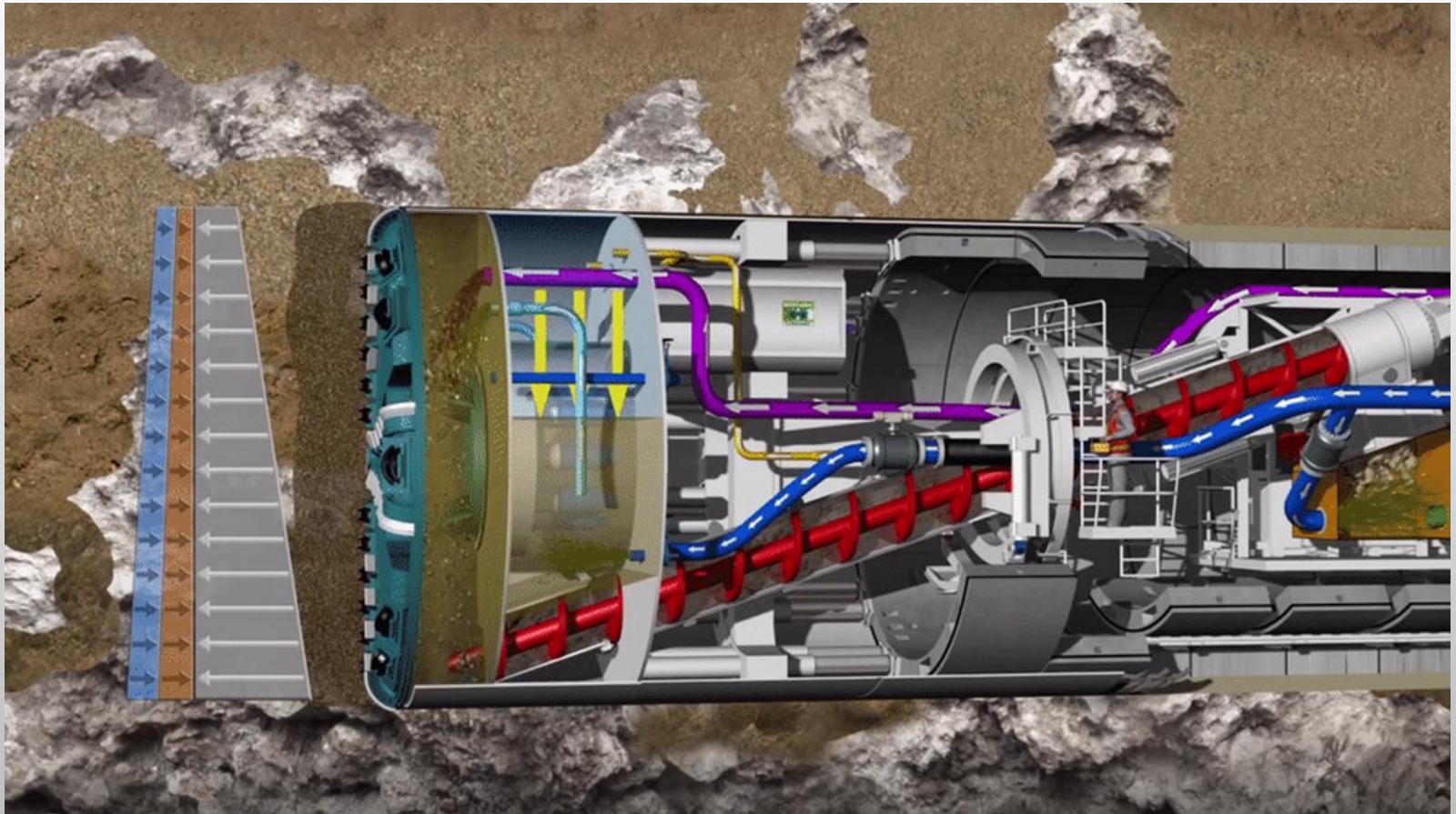
Photo 4.3.3 - Compressed air TBM - Boom type

BOUCLIER MÉCANISÉ À CONFINEMENT MIXTE (« MIXSHIELD »)

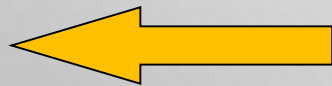
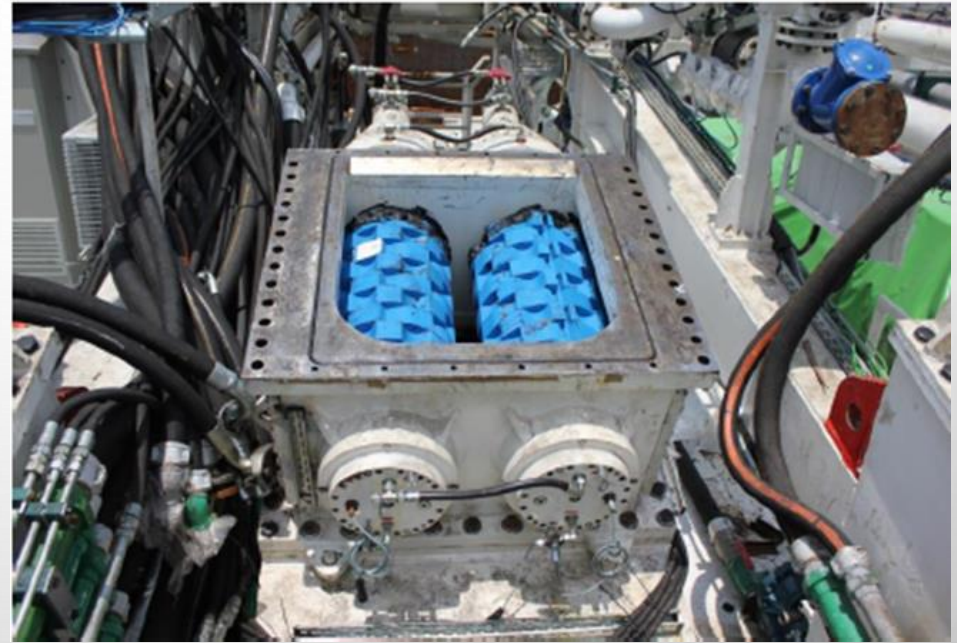
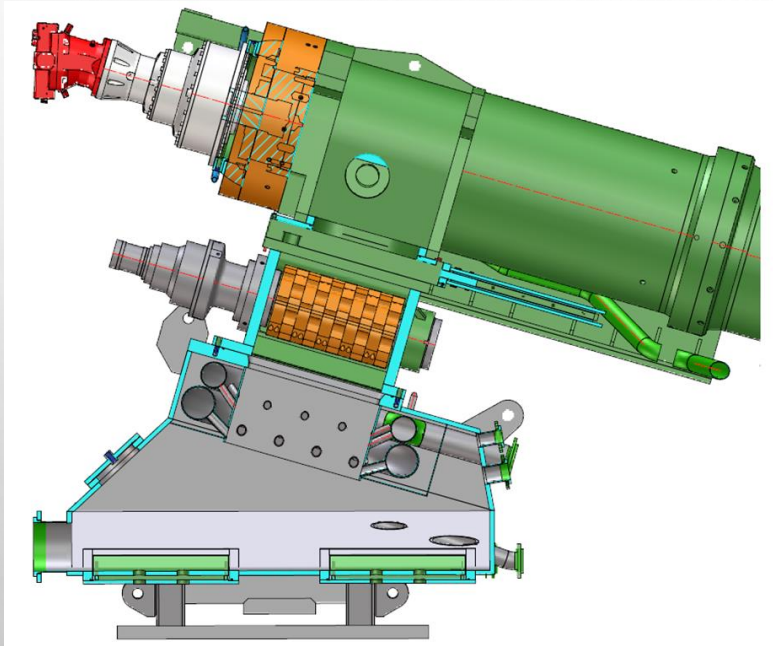


SOCATOP-A86 Tunnel Est

TUNNELIERS À DENSITÉ VARIABLE COMBINAISON DES PRINCIPES DE PRESSION DE TERRE ET DE PRESSION DE BOUE



CONCASSEUR GIRATOIRE EN SORTIE DE VIS



Transport hydraulique / boue

DEUXIÈME PARTIE

LES PRINCIPAUX ORGANES D'UN TUNNELIER

LES PRINCIPAUX ORGANES D'UN TUNNELIER

- **LA TÊTE DE COUPE**
- **LES OUTILS DE COUPE : MOLETTES ET PICS**
- **LES DISPOSITIFS D'ÉVACUATION DES DÉBLAIS**
- **LES OUTILS DE MISE EN PLACE DU REVÊTEMENT**
- **LE TRAIN SUIVEUR**
- **LES SYSTÈMES DE GUIDAGE TOPOGRAPHIQUE ET DE PILOTAGE**

TÊTE DE COUPE POUR ROCHES DURES



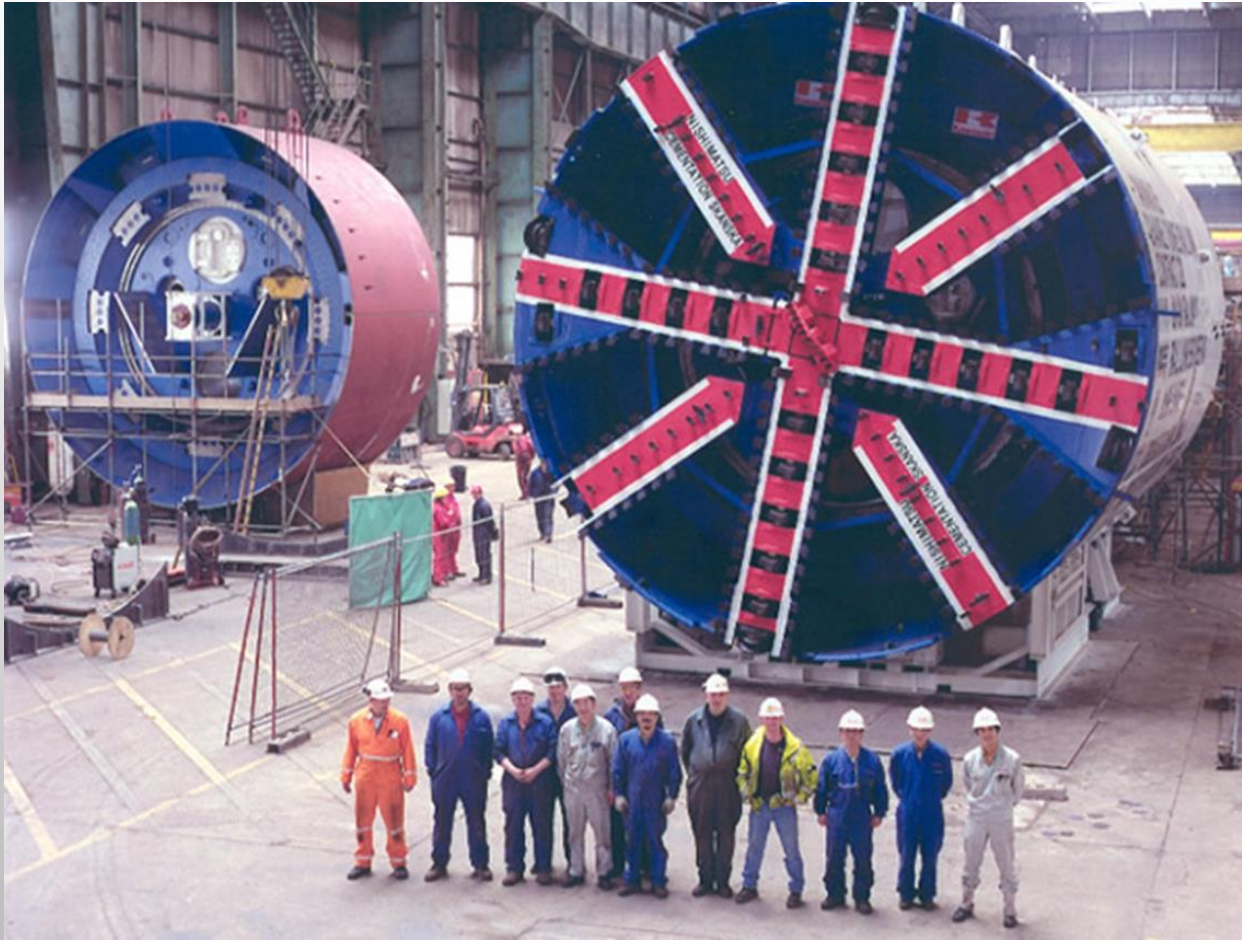
- TRÈS FERMÉE (< 10 % OUVERTURE)
- OUVERTURES PÉRIPHÉRIQUES
- PENSÉE EN FONCTION DE LA PROBLÉMATIQUE DE L'USURE

TÊTE DE COUPE POUR SOLS

- TAUX D'OUVERTURE DE L'ORDRE DE 30 À 50 %
- EN GÉNÉRAL PEU OU PAS DE MOLETTES
- OUVERTURES RADIALES
- FORME DE TÊTE SOUVENT ASSOCIÉE AUX EPB



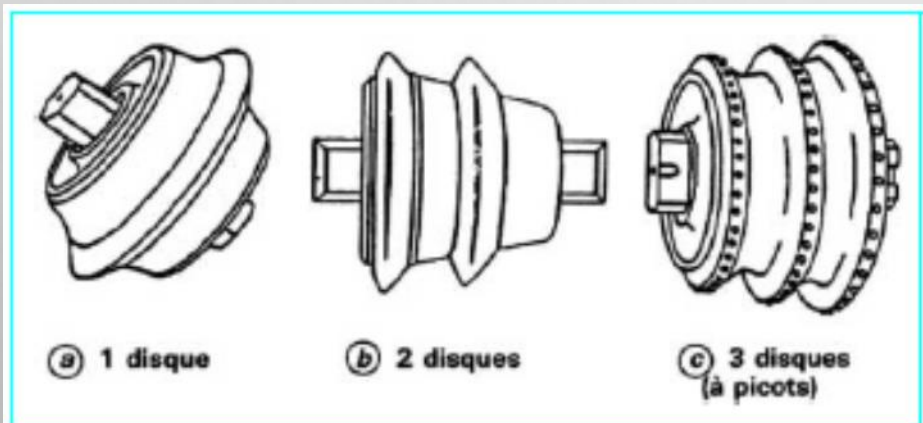
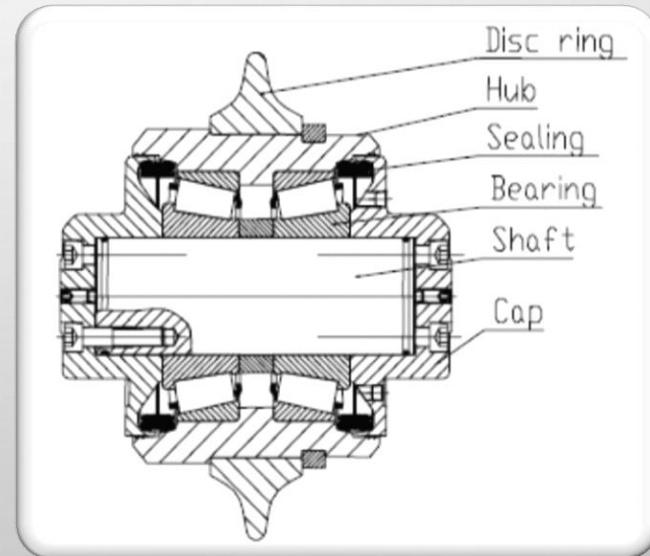
TÊTE DE COUPE EN ÉTOILE



- OUVERTURE MAXIMALE (70 %)
- SOUVENT ASSOCIÉE AUX TUNNELIERS À PRESSION DE BOUE

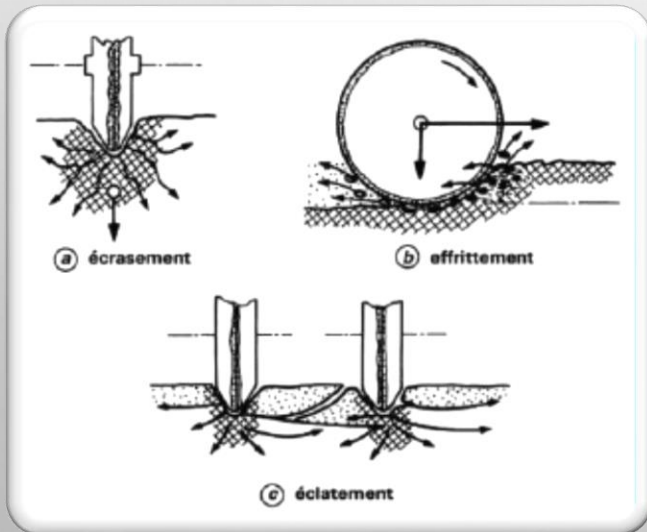
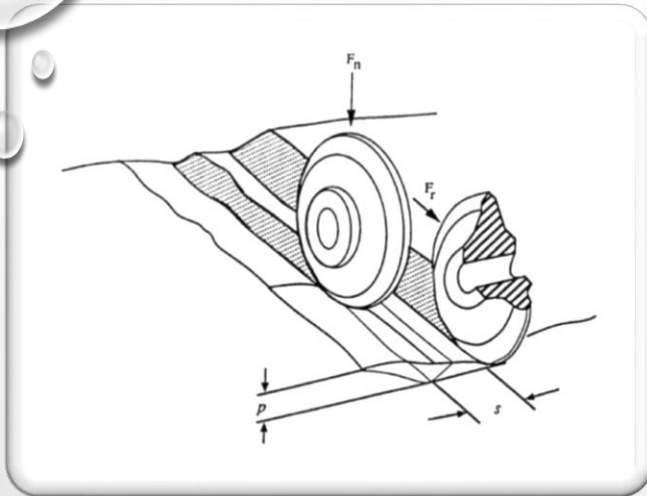
OUTILS DE COUPE : LES MOIETTES

- ANALOGUES DANS LE PRINCIPE AUX MOIETTES DE VITRIER : MOIETTES À DISQUES
- DIAMÈTRES DE 12 À 19 POUCES VOIRE AU-DELÀ
- PRÉVENTION DE L'USURE : CHANGEMENT DEPUIS L'ARRIÈRE DE LA TÊTE DE COUPE
- MOIETTES À DOUBLE DISQUES ET À PICOTS



MÉCANISME D'ACTION DES MOLETTES

- ECARTEMENT SUFFISAMMENT FAIBLE POUR PROVOQUER LA RUPTURE DE LA ROCHE PAR ÉCLATEMENT (MOBILISATION DE LA RÉSISTANCE À LA TRACTION)
- NOTION DE FORCE UNITAIRE MAXIMALE PAR MOLETTE, COUPLÉE À L'EFFORT DE POUSSÉE TOTAL DU TUNNELIER





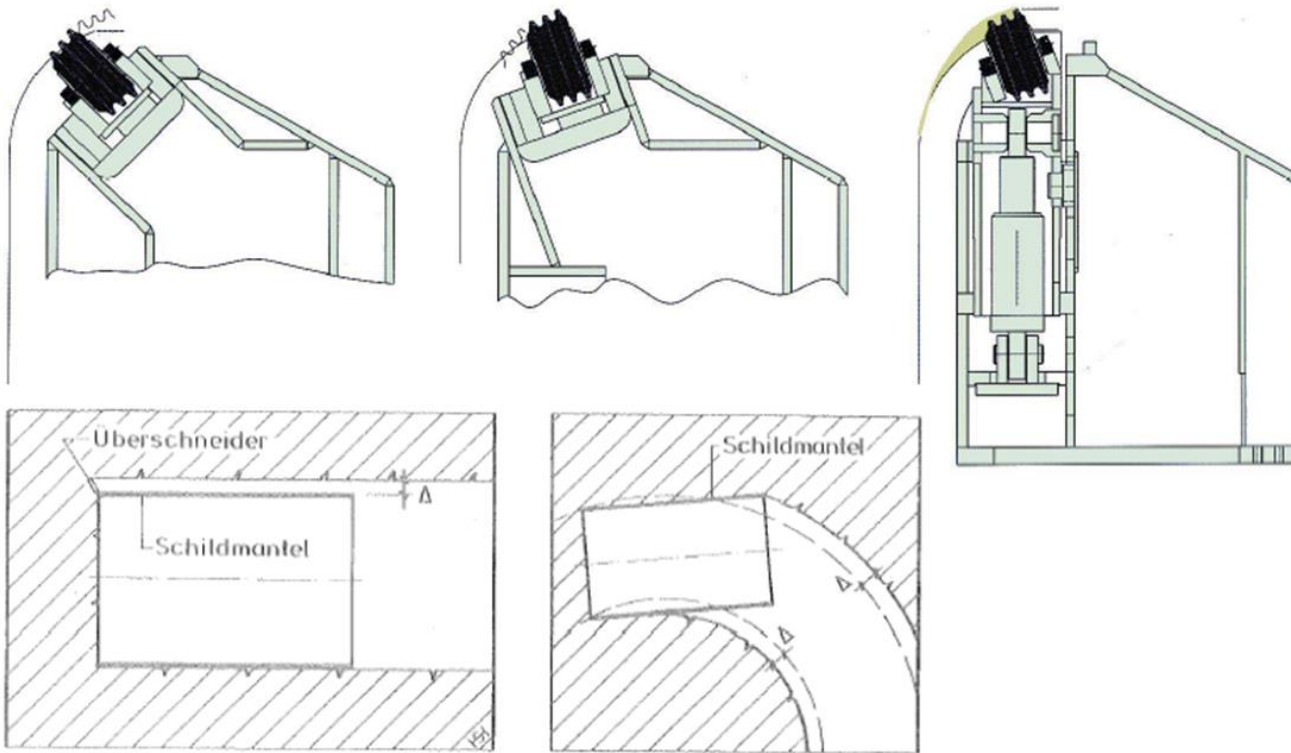
TRAVAIL DES MOLETTES EN TERRAIN DUR

USURE OU CASSE DES MOIETTES



OUTILS DE SURCOUPE

Cutterhead design.
overcut.



- PERMET DE PRENDRE LES VIRAGES
- PERMET ÉGALEMENT DE LUTTER CONTRE LA CONVERGENCE EN TERRAINS « POUSSANTS » (SQUEEZING-ROCK)

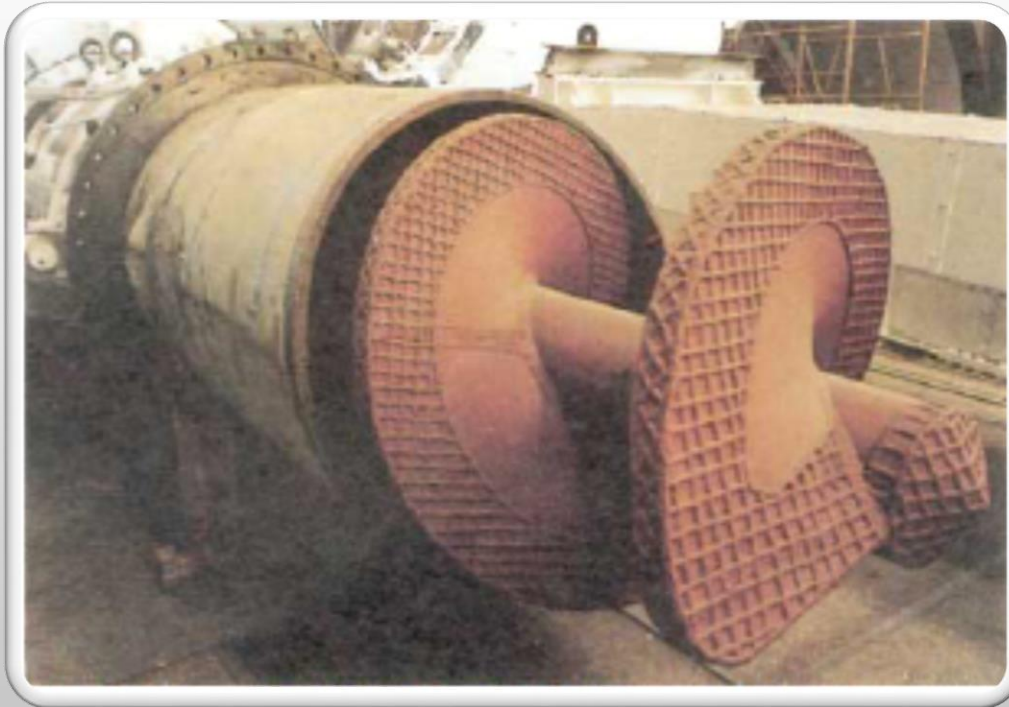
EVACUATION DES DÉBLAIS

- **DANS LE CAS DU TUNNELIER À PRESSION DE BOUE, MARINAGE HYDRAULIQUE**
 - BOUE + MATÉRIAUX CONCASSÉS POMPÉS (GRANULOMÉTRIE 0/10 MM)
 - **STATION DE TRAITEMENT** DU MARINAGE HYDRAULIQUE (CRIBLAGE, CYCLONAGE, FILTRES-PRESSE)
- **DANS LE CAS DU TUNNELIER PRESSION DE TERRE (AIR), VIS D'EXTRACTION + CONVOYEUR À BANDE OU BERLINES (CAS DES PETITS DIAMÈTRES)**
 - LA VIS D'EXTRACTION DISTRIBUE LES DÉBLAIS SUR UN CONVOYEUR À BANDE, VIA UNE TRAPPE (EN FONCTION DU CONFINEMENT EXIGÉ ON PEUT AJOUTER UN DISTRIBUTEUR ROTATIF OU UNE POMPE À PISTONS)
 - LA CONSISTANCE DES PRODUITS DOIT ÊTRE ADAPTÉE AU TRANSPORT PAR CONVOYEUR À BANDE > UTILISATION D'ADDITIFS
 - PESAGE DES MATÉRIAUX SUR LE CONVOYEUR À BANDE : PERMET LA SUSPICION DE LA PRÉSENCE D'UN FONTIS

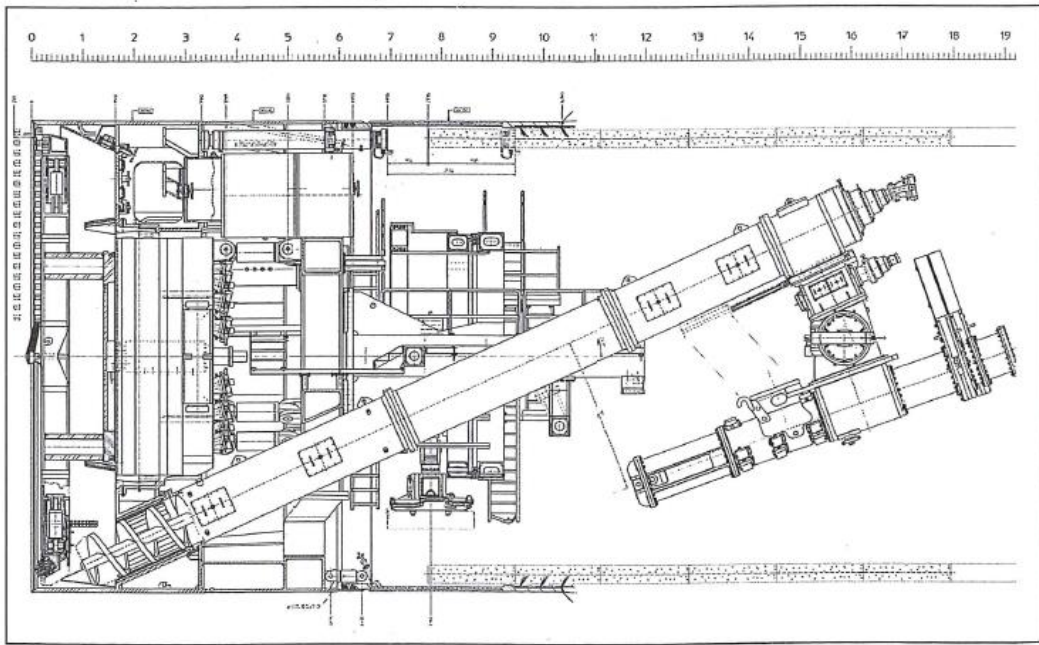


MARINAGE HYDRAULIQUE (PRESSION DE BOUE)

VIS D'EXTRACTION (PRESSION DE TERRE)



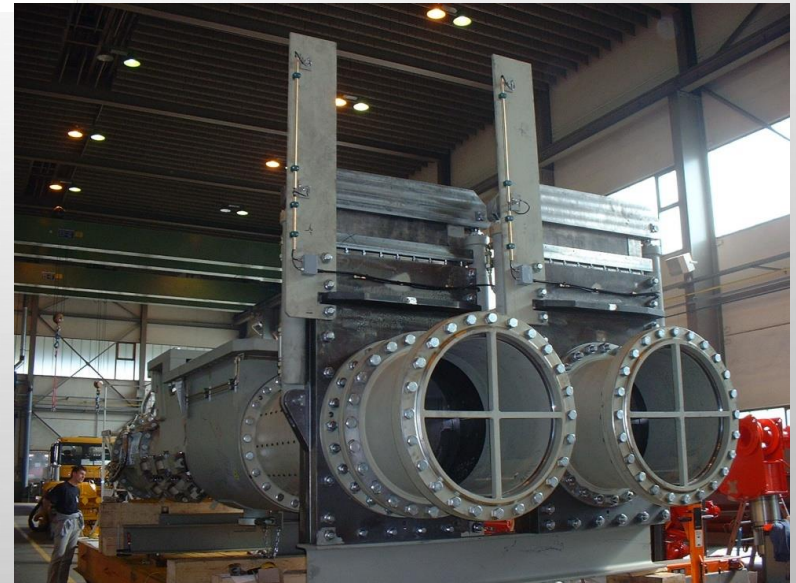
- DOIT S'ACCOMMODER DES VARIATIONS DE GRANULOMÉTRIES DU TERRAIN
- RÉGULE LE DÉBIT D'EXTRACTION EN FONCTION DE L'AVANCEMENT (COUPLAGE AVEC LE DÉBIT DE LA ROUE DE COUPE)
- DOIT ÉVITER LES DÉBOURRAGES BRUTAUX QUELQUE SOIT LA PRESSON DANS LA CHAMBRE (TECHNIQUE DU BOUCHON DE MATÉRIAUX)
- NOTION DE GRADIENT DE PRESSON LE LONG DE LA VIS (20 KPA POUR CHAQUE PAS D'HÉLICE)
- DISTRIBUTEUR ROTATIF OU POMPE VOLUMÉTRIQUE À PISTON EN CAS DE FORTE PRESSON EN RADIER
- MATÉRIAUX ABRASIFS : PROBLÈME DE LA PRÉVENTION DE L'USURE



Le tunnelier équipé de la pompe PUTZMEISTER en sortie de vis

POMPE À PISTONS

**Permet d'affronter de
fortes pressions
hydrostatiques en radier**



REVÊTEMENT EN VOUSSOIRS – MTR 820 HONG KONG



VOUSSOIRS (ÉLÉMENTS PRÉFABRIQUÉS)

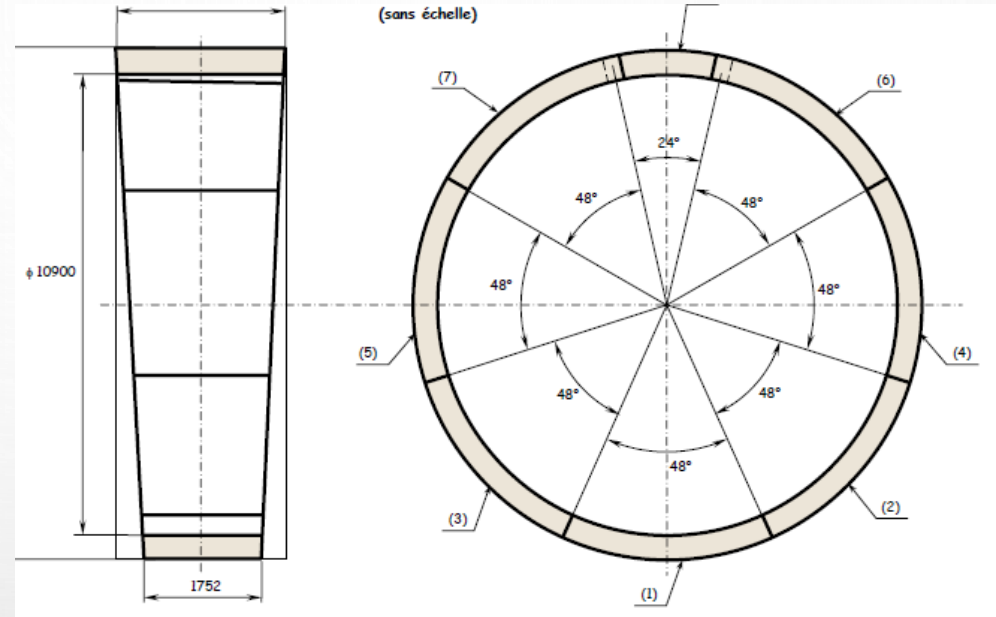
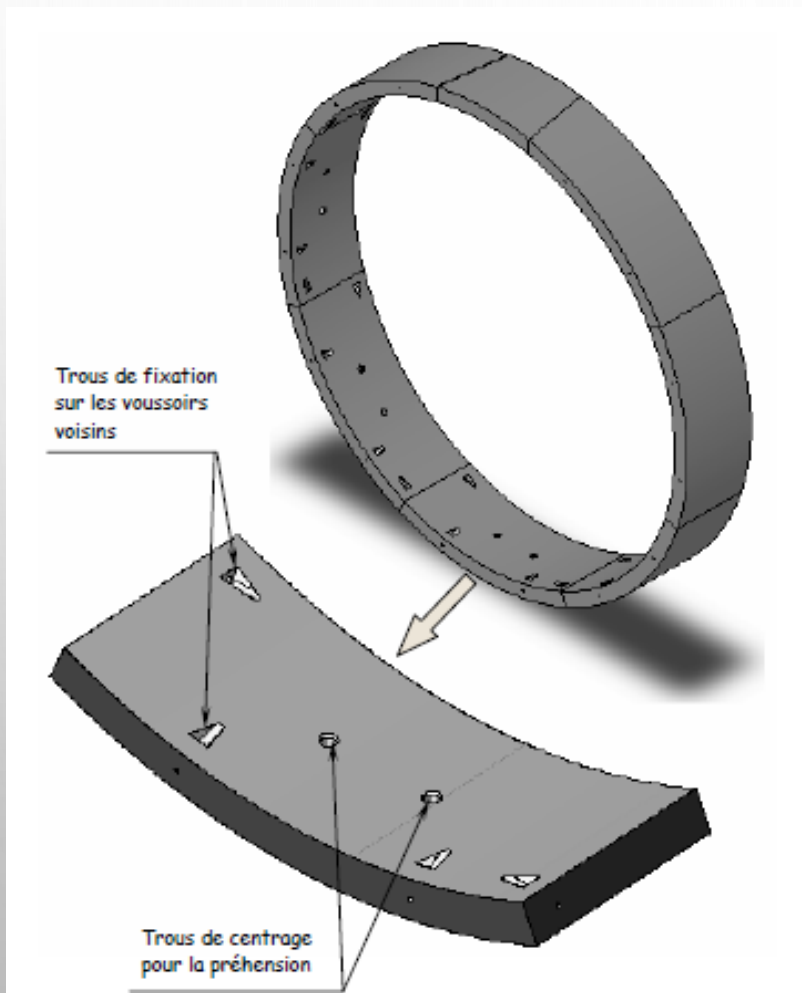


Documents CBC

VIDEO : USINE À VOUSOIRS DE ST MARTIN LA PORTE (LYON-TURIN FERROVIAIRE)

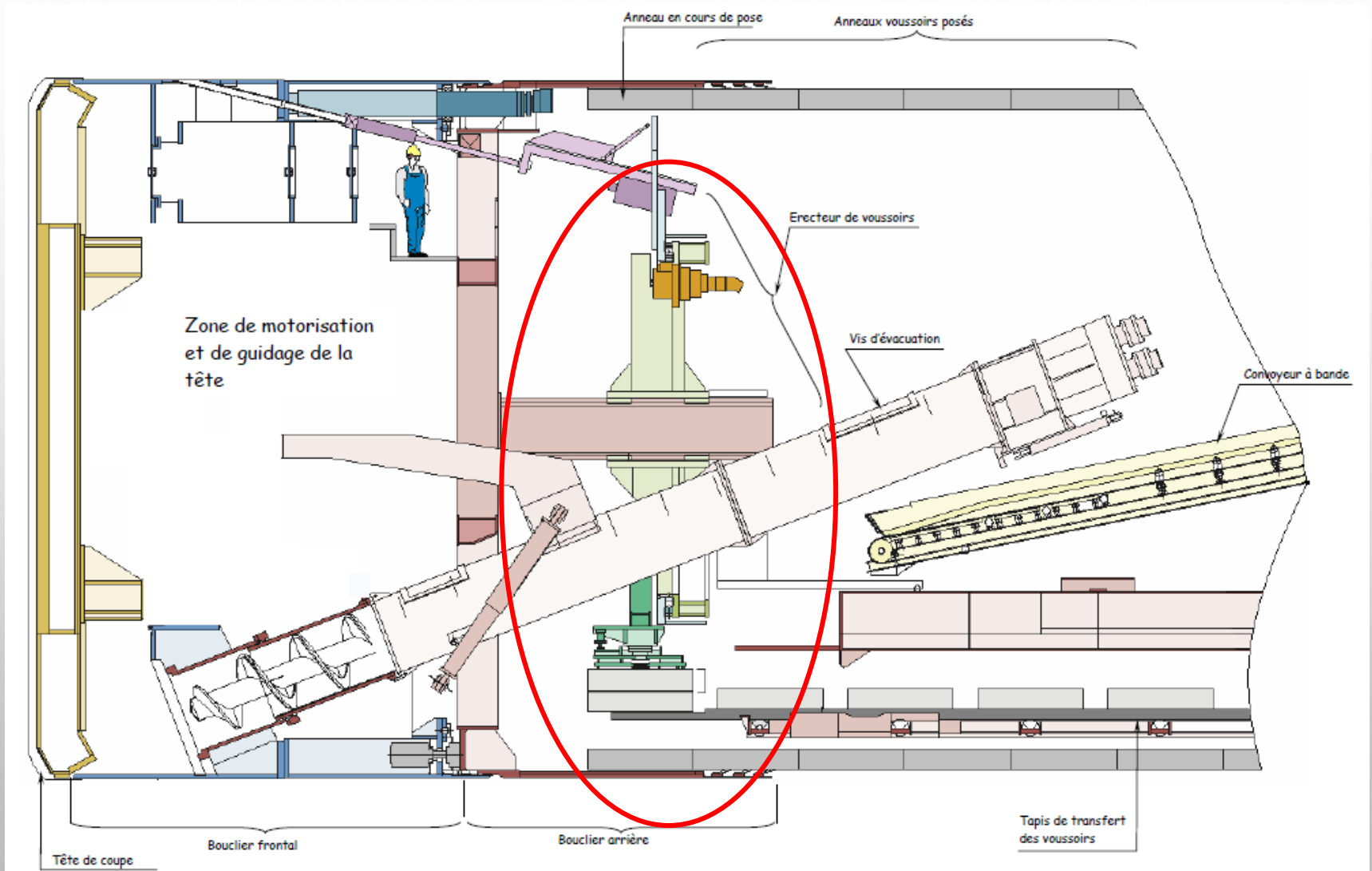


CONFIGURATION D'UN ANNEAU DE VOUSOIRS

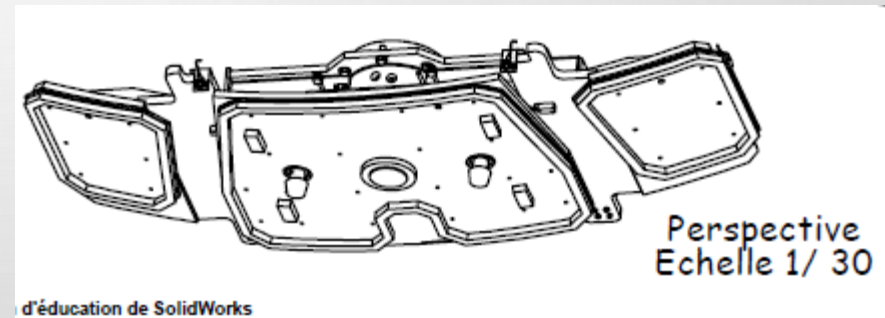
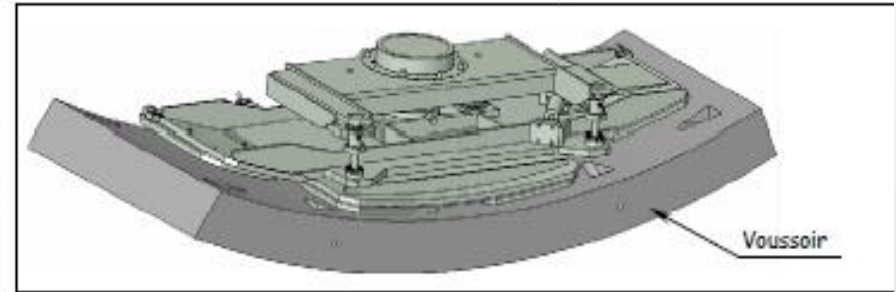
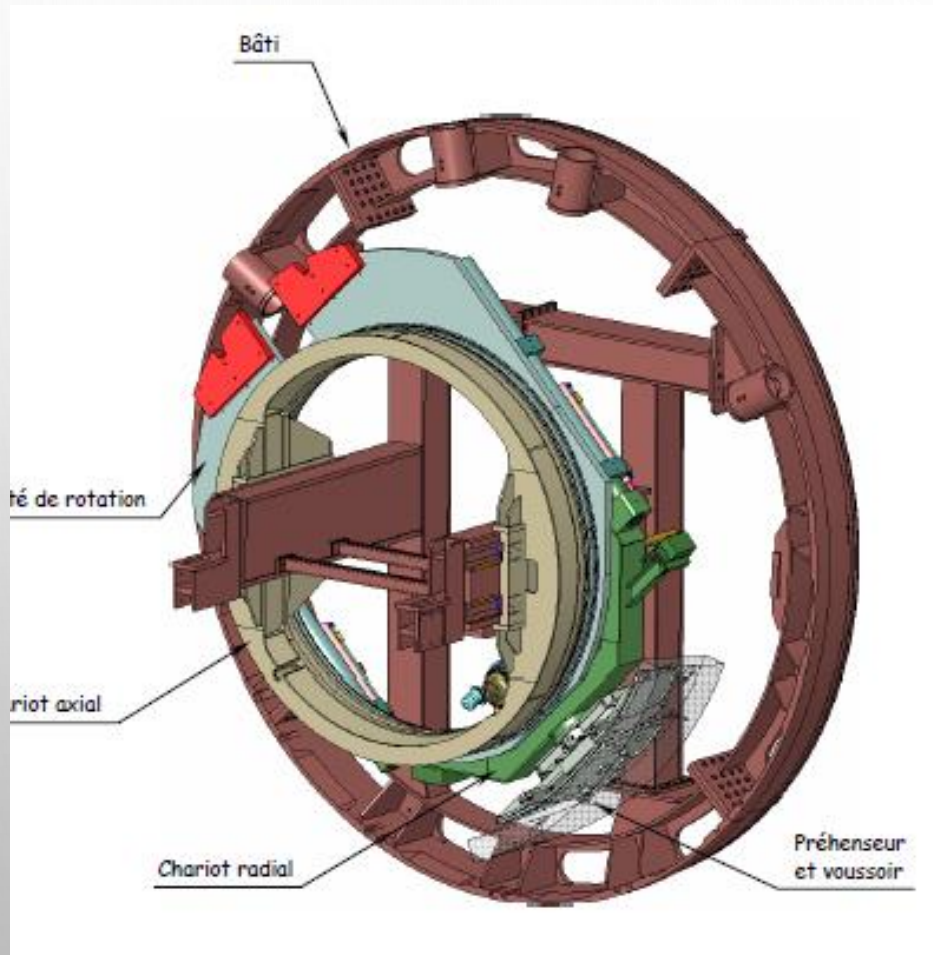


**Technique dite de
« l'anneau universel »
Clé / contre-clé / voussoirs
standard**

POSE DES VOUSSOIRS VIA UN ÉRECTEUR

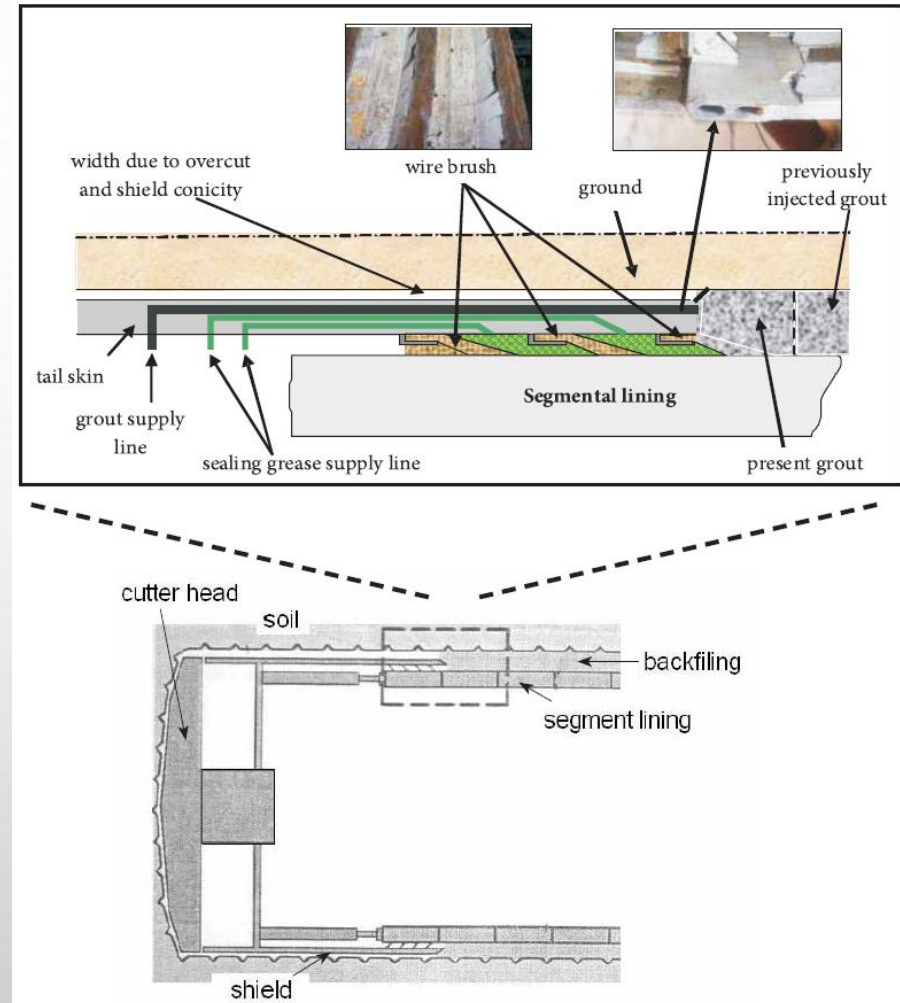


ERECTEUR À VOUSOIRS / PRÉHENSEUR



INJECTIONS DE MORTIER DE BOURRAGE ENTRE LE REVÊTEMENT ET LE TERRAIN

- NÉCESSAIRE PAR CONSTRUCTION (DIAMÈTRES RESPECTIFS JUPE / ANNEAU + COURBES)
- TRÈS IMPORTANTES POUR LA QUALITÉ DU REVÊTEMENT ET LE CONTRÔLE DES TASSEMENTS
- MODE D'INJECTION LONGITUDINAL / RADIAL (ABANDONNÉ)
- LE MORTIER DOIT À LA FOIS ÊTRE FLUIDE POUR UNE MISE EN ŒUVRE PAR POMPAGE À TRAVERS LA JUPE, ET GARANTIR DE BONNES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DE RÉSISTANCE ET DE DÉFORMATION À COURT / MOYEN TERME (UTILISATION DE CENDRES VOLANTES, FILLERS, LIANTS HYDRAULIQUES DIVERS)



LOGISTIQUE EMBARQUÉE : LE « TRAIN SUIVEUR »



TRAIN SUIVEUR (« BACK-UP »)

- REMORQUE DE PILOTAGE (CABINE, ARMOIRES ÉLECTRIQUES, ROTO-DISTRIBUTEUR DE MORTIER DE BOURRAGE, POMPES D'EXHAURE)
- REMORQUE DE PUISSANCE (POMPES HYDRAULIQUES ALIMENTANT LES VÉRINS, ÉRECTEUR, VIS)
- REMORQUE D'INJECTION DU MORTIER DE BOURRAGE
- REMORQUE RÉFECTOIRE / AIR COMPRIMÉ
- REMORQUE PORTANT LES TRANSFORMATEURS ÉLECTRIQUES (MT 10 KV / BT 380 V)
- REMORQUE DE VENTILATION SECONDAIRE + ENROULEUR DE TUYAUTERIES D'ALIMENTATION ET D'EXHAURE
- REMORQUE POUR STOCKAGE DES TUYAUTERIES + ENROULEURS À CÂBLES

GUIDAGE TOPOGRAPHIQUE D'UN TUNNELIER

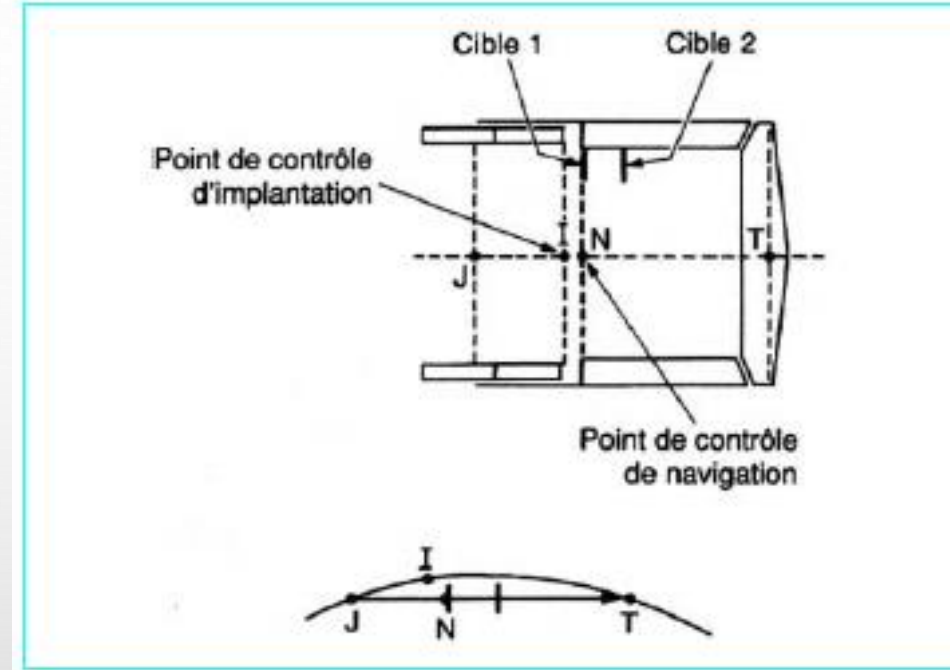


GUIDAGE D'UN TUNNELIER : LA NAVIGATION

- TOLÉRANCES POUR LA POSITION DE L'AXE RÉEL : CERCLE DE RAYON DE L'ORDRE DE 5 CM
- NAVIGATION = REPÉRAGE TOPOGRAPHIQUE
- PILOTAGE = CONDUITE PROPREMENT DITE
- LE BOUCLIER EST REPÉRÉ PAR LA POSITION D'UN POINT DE SON AXE ET LA DIRECTION DE CET AXE
- LA NAVIGATION CONSISTE À:
 - RELEVER LA POSITION ET LA DIRECTION RÉELLES DANS L'ESPACE
 - LES COMPARER AUX DONNÉES PRÉVUES
 - EN DÉDUIRE LES CONSIGNES POUR LA PHASE DE PILOTAGE

GUIDAGE TOPOGRAPHIQUE D'UN TUNNELIER

- RELEVÉS PAR TRIANGULATION COMME EN TUNNEL TRADITIONNEL
- POINTS DE REPÈRES TOUS LES 100 À 250 M À L'ARRIÈRE DU TUNNELIER
- RAYON LASER ATTACHÉ À CES BASES
- 2 CIBLES INSTALLÉES À L'ARRIÈRE ET AU MILIEU DU TUNNELIER, CONNECTÉES À UN CALCULATEUR DONNANT EN TEMPS RÉEL LES ÉCARTS PAR RAPPORT À LA POSITION THÉORIQUE



GUIDAGE D'UN TUNNELIER : LE PILOTAGE

- CONSIGNES DE PILOTAGE :
 - ACTION DIFFÉRENTIELLE SUR LES VÉRINS DE POUSSÉE
 - DÉFINITION DE LA SUCCESSION D'ANNEAUX
- LES VÉRINS DE POUSSÉE SONT GROUPÉS (PAR 2, 3, 4 VOIRE PAR 8) : PRESSIONS HYDRAULIQUES DIFFÉRENTES
- RECUEIL DES DONNÉES PROVENANT DE LA NAVIGATION ET ACTION CONCOMITANTE SUR LES VÉRINS
- CONTRÔLE ET MESURE AUTOMATIQUE DE L'ALLONGEMENT DES VÉRINS DE POUSSÉE





LE CONFINEMENT DU FRONT DE TAILLE

POURQUOI LE CONFINEMENT ?

DIFFÉRENTS MODES DE CONFINEMENT

ASPECTS PRATIQUES DE LA MAÎTRISE DU CONFINEMENT SUR CHANTIER

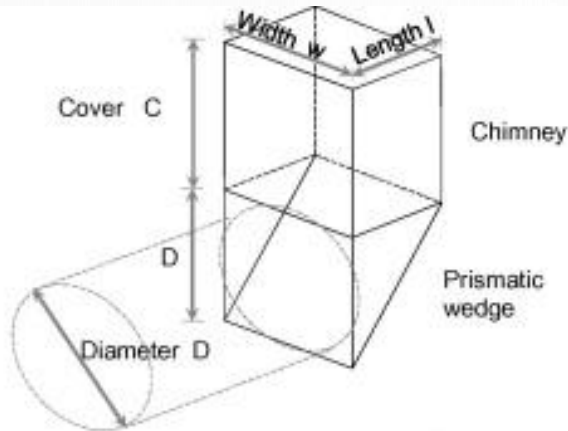
CONFINER LE TERRAIN, POURQUOI FAIRE ?

1. S'ADAPTER À LA VARIABILITÉ DES CONDITIONS GÉOLOGIQUES
AFIN D'ÉVITER DES ACCIDENTS MAJEURS
2. LA MAÎTRISE DES PHÉNOMÈNES HYDRAULIQUES A UNE
IMPORTANCE FONDAMENTALE POUR LA STABILITÉ DU FRONT
3. MAÎTRISER LE CONFINEMENT, C'EST MAÎTRISER LES TASSEMENTS
4. LA MAÎTRISE DU CONFINEMENT CORRESPOND À UN BON
FONCTIONNEMENT MÉCANIQUE DU TUNNELIER

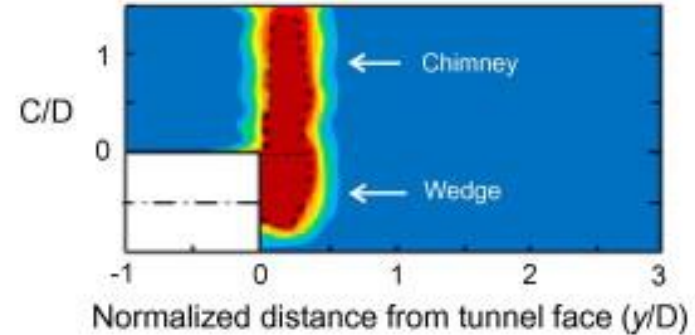
ACCIDENT MAJEUR : LE FONTIS



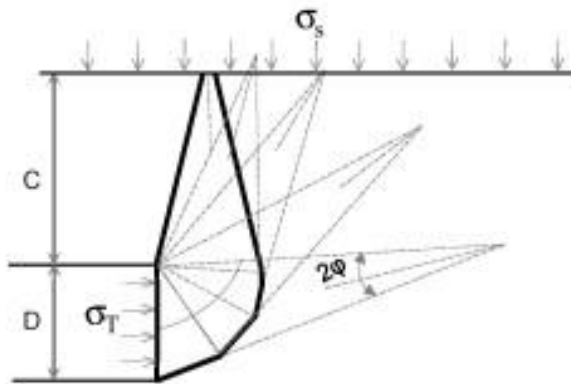
MÉCANISMES DE RUPTURE À FRONT



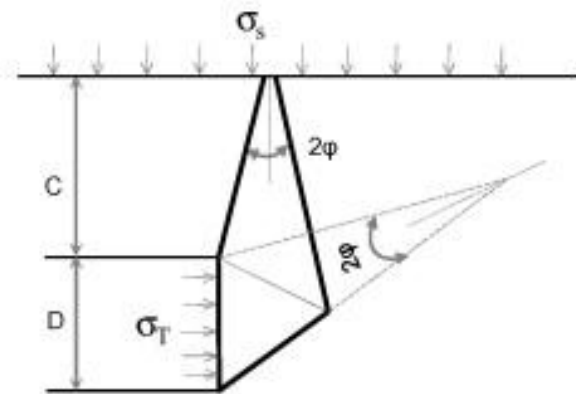
Failure mechanism by Horn (1961)



Failure observed in transparent soil models



Multi-block failure mechanism by Mollon et al., (2009)

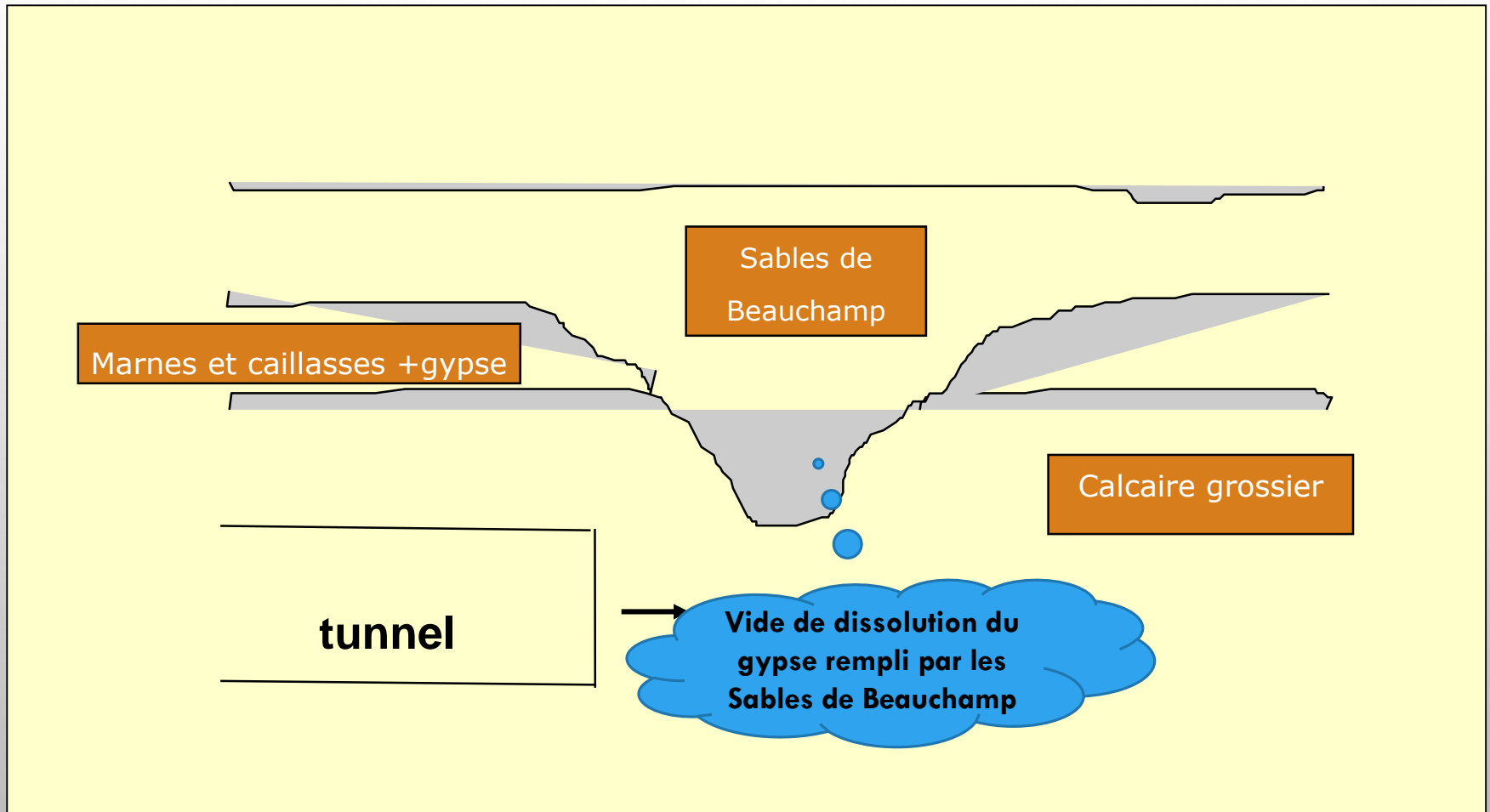


Two-block failure mechanism by Leca and Dormieux (1990)

1 / S'ADAPTER A LA VARIABILITE DES CONDITIONS GEOLOGIQUES AFIN D'ÉVITER LES INCIDENTS MAJEURS

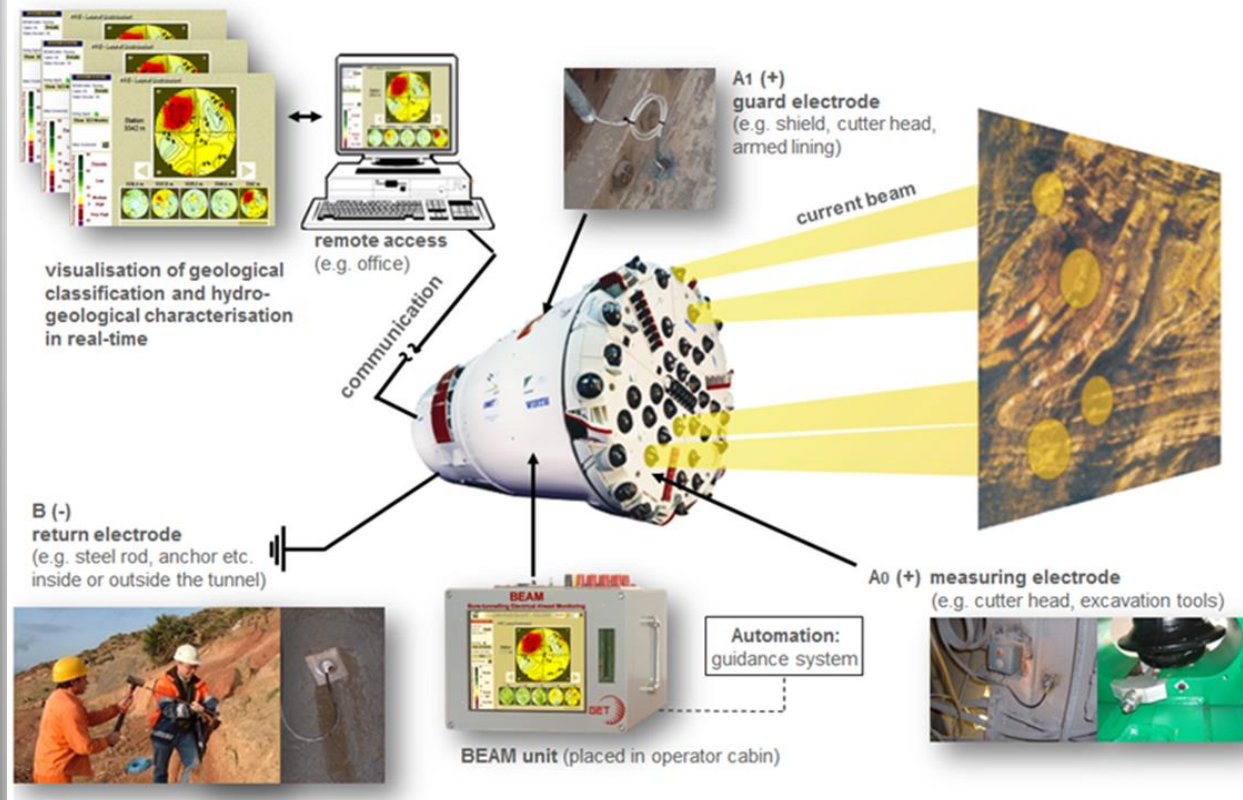
- ▶ CAS DE FIGURE FRÉQUENTS :
 - ▶ ABAISSEMENT DU TOIT D'UNE COUCHE RÉSISTANTE
 - ▶ CREUSEMENT EN TERRAINS KARSTIQUES
 - ▶ TRANSITION ENTRE MILIEU ROCHEUX ET TERRAIN MEUBLE
 - ▶ DISCONTINUITÉS AU SEIN DU SUBSTRATUM ROCHEUX (FAILLE)

VARIABILITE DES CONDITIONS GEOLOGIQUES ABAISSEMENT DU TOIT D'UNE COUCHE RÉSISTANTE (CAS DE LA REGION PARISIENNE)



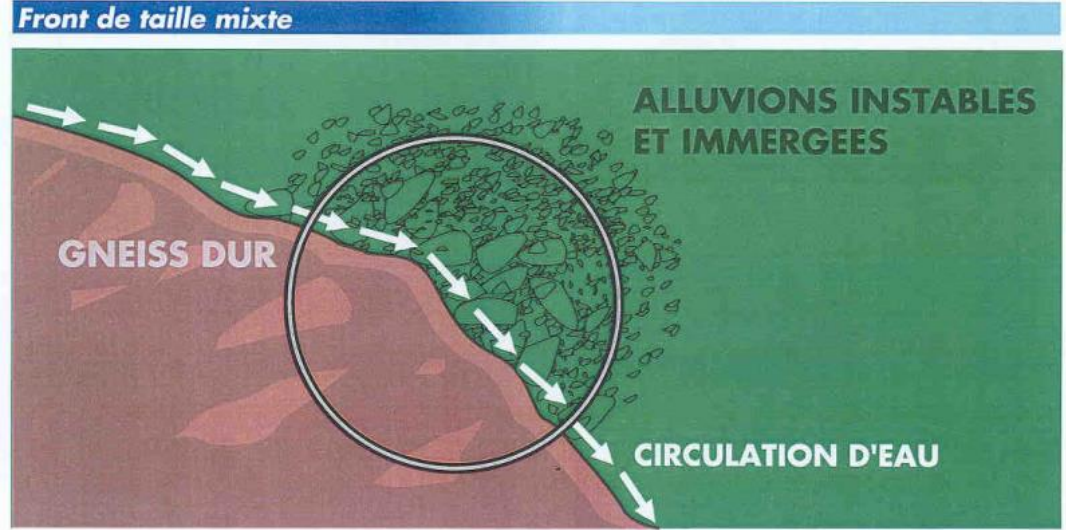
VARIABILITE DES CONDITIONS GEOLOGIQUES : CREUSEMENT EN TERRAINS KARSTIQUES

- ▶ RISQUE DE « DÉBOURRAGE » DU MATÉRIAU DE REMPLISSAGE DU KARST (ARGILE) + LE KARST COMMUNIQUE TRÈS SOUVENT AVEC LA NAPPE
- ▶ DÉBOURRAGE ET PLONGEMENT DU TUNNELIER
- ▶ INTÉRÊT DE LA RECONNAISSANCE À L'AVANCEMENT
 - SISMIQUE RÉFLEXION
 - CYLINDRE ÉLECTRIQUE / MESURE DE RÉSISTIVITÉ (SYSTÈME BEAM)
 - GÉORADAR

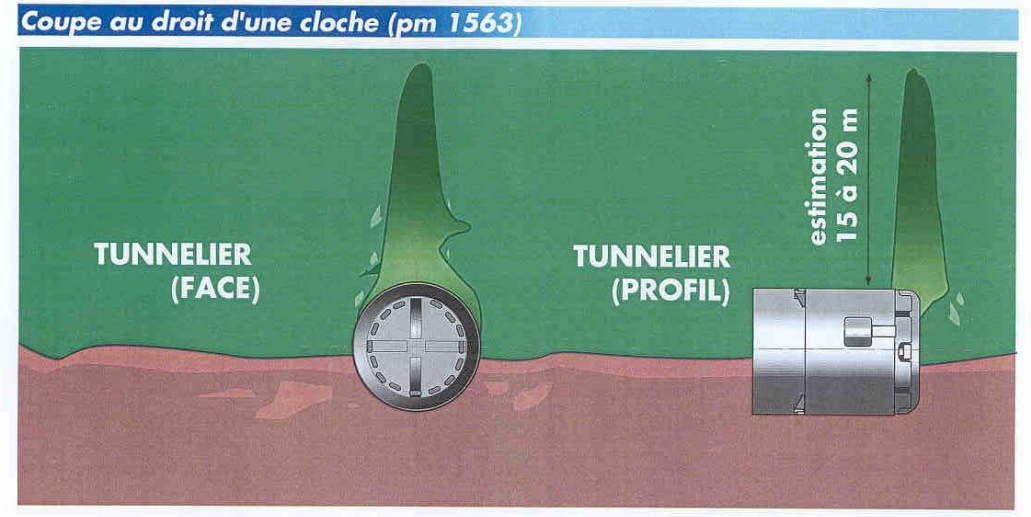


VARIABILITE DES CONDITIONS GEOLOGIQUES : TRANSITION ENTRE MILIEU ROCHEUX ET TERRAIN MEUBLE

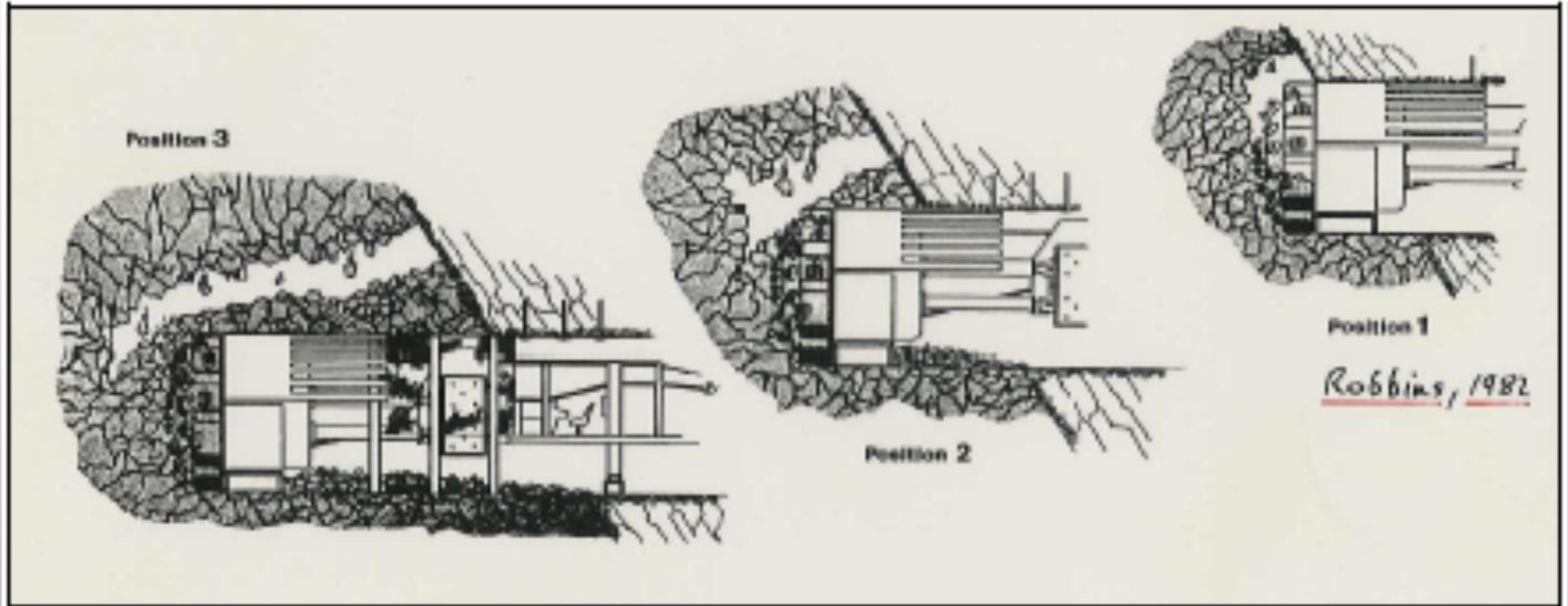
Tunnel de Caluire - Tube Nord



Tunnel de Caluire - Tube Nord



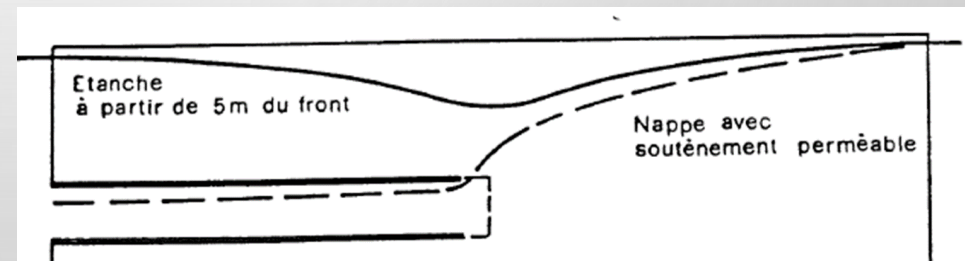
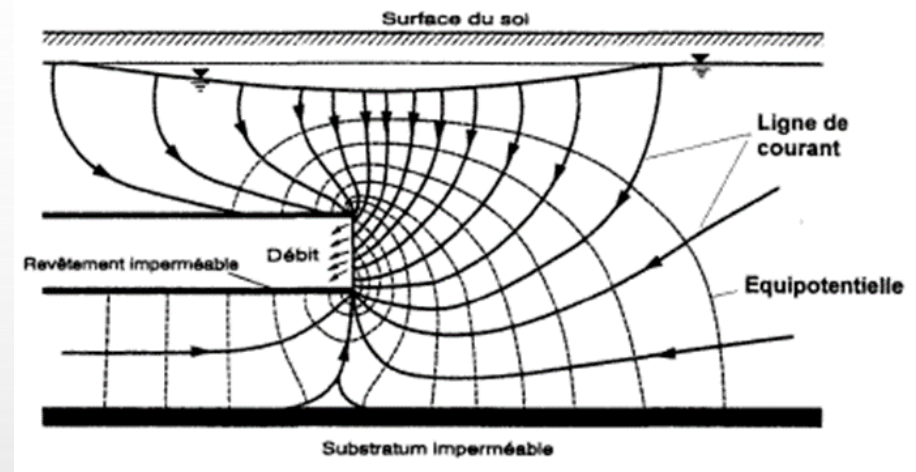
VARIABILITE DES CONDITIONS GEOLOGIQUES : DISCONTINUITÉS DANS LES MASSIFS ROCHEUX (FAILLES)



POURQUOI LE CONFINEMENT ?

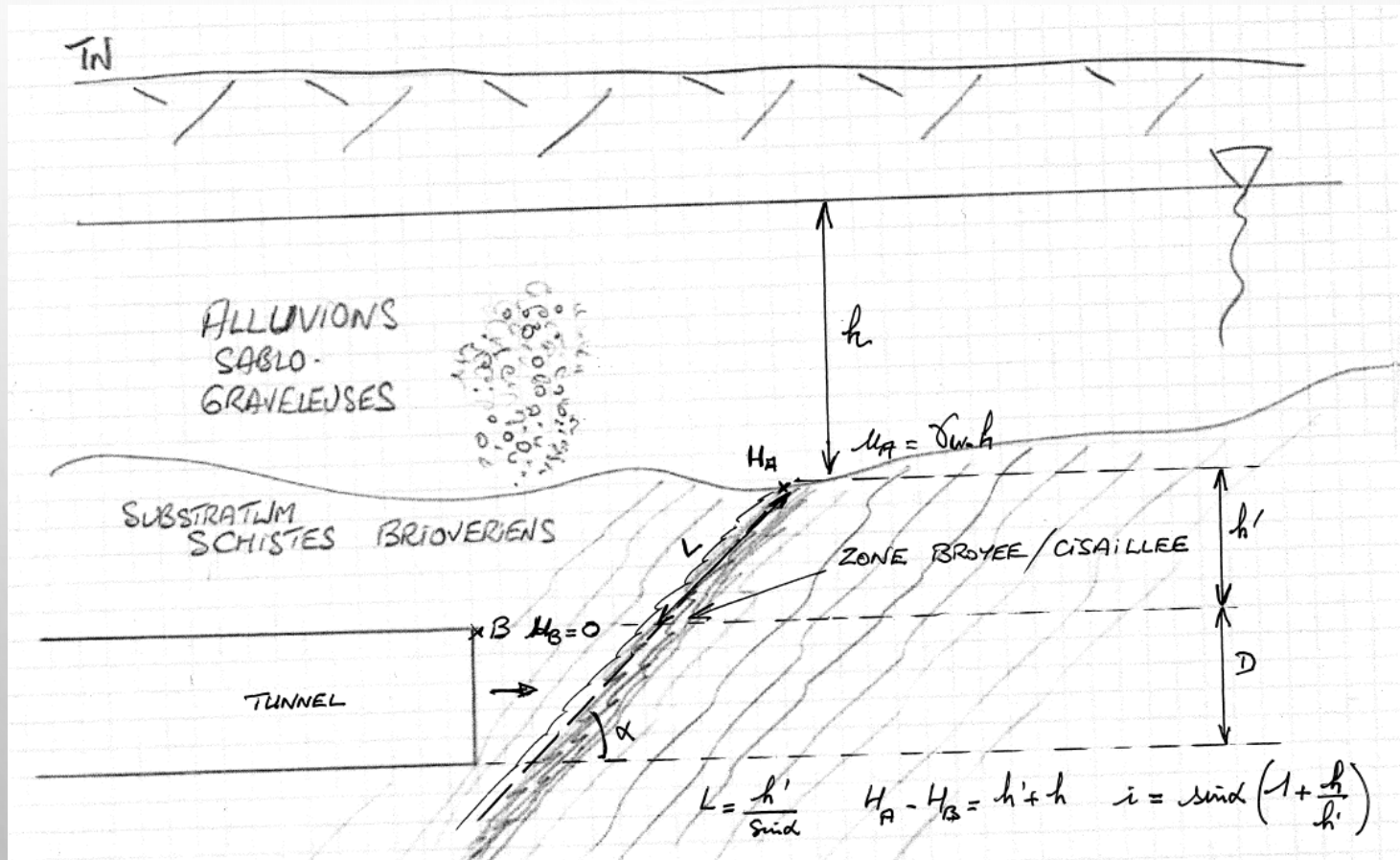
2 / LES PHÉNOMÈNES HYDRAULIQUES DANS LES SOLS

- ▶ ECOULEMENT AU FRONT D'UN TUNNEL, NOTION DE RÉGIME TRANSITOIRE / RÉGIME PERMANENT
- ▶ RÉTABLISSEMENT IMMÉDIAT DU RÉGIME HYDRAULIQUE LORSQUE $K > 10^{-5}$ M/S
- ▶ APPARITION DE GRADIENTS HYDRAULIQUES → FORCES D'ÉCOULEMENT → ENTRAÎNEMENT DE PARTICULES FINES
- ▶ UNE SEULE BONNE RÉPONSE : LE MAINTIEN DE LA STABILITÉ DU FRONT DE TAILLE



LES PHÉNOMÈNES HYDRAULIQUES EN TERRAIN ROCHEUX

- ▶ EXISTENCE DE PLANS DE FAIBLESSE AU SEIN DU MASSIF ROCHEUX (FAILLES, FRACTURES, DIACLASES, SCHISTOSITÉ, ...)
- ▶ MATÉRIAU DE REMPLISSAGE DE FAIBLES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES (MYLONITE, ZONES BROYÉES)
- ▶ GRADIENTS HYDRAULIQUES → DÉBOURRAGE



POURQUOI LE CONFINEMENT ?

3 / LA MAÎTRISE DES TASSEMENTS

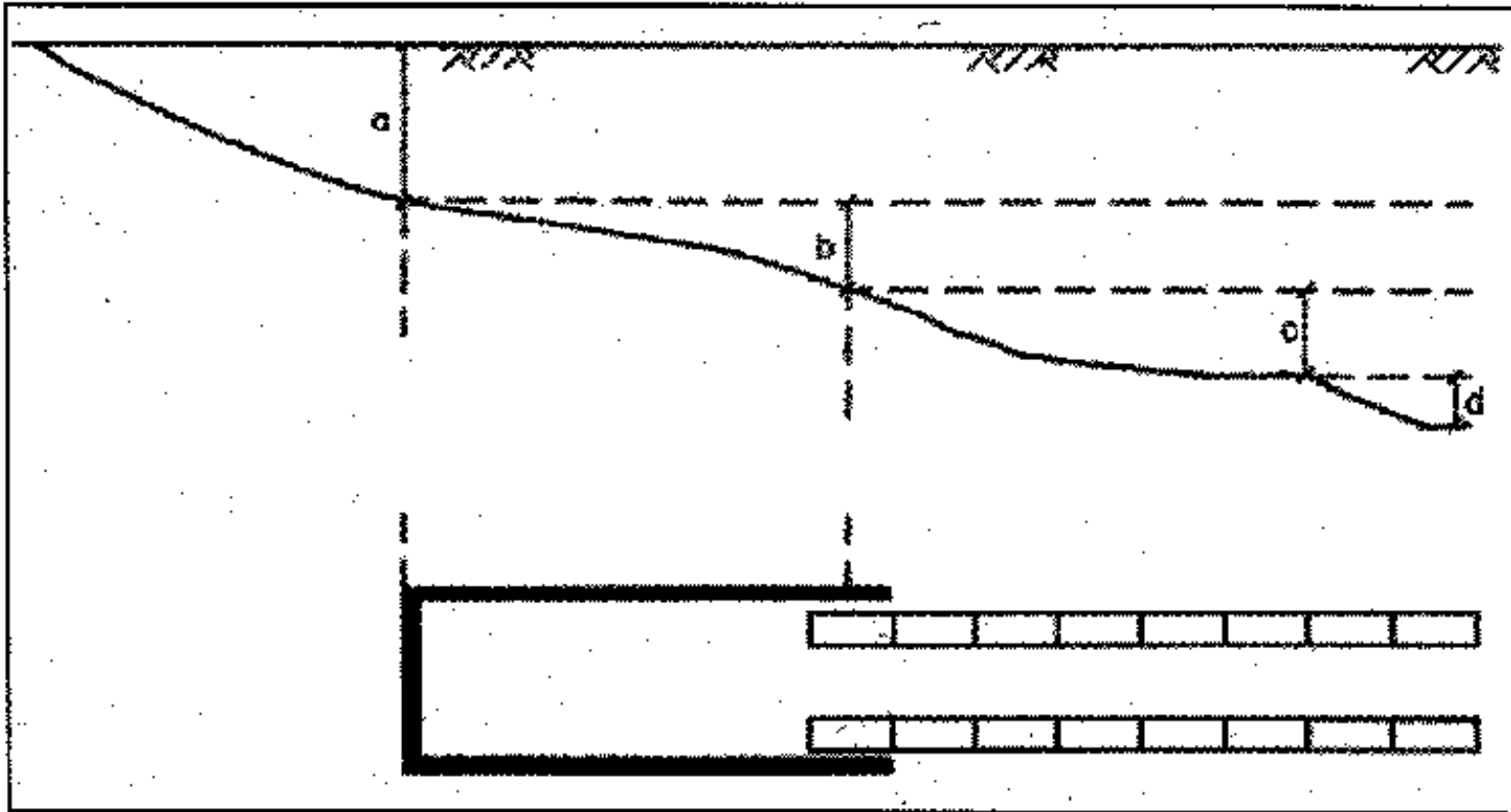
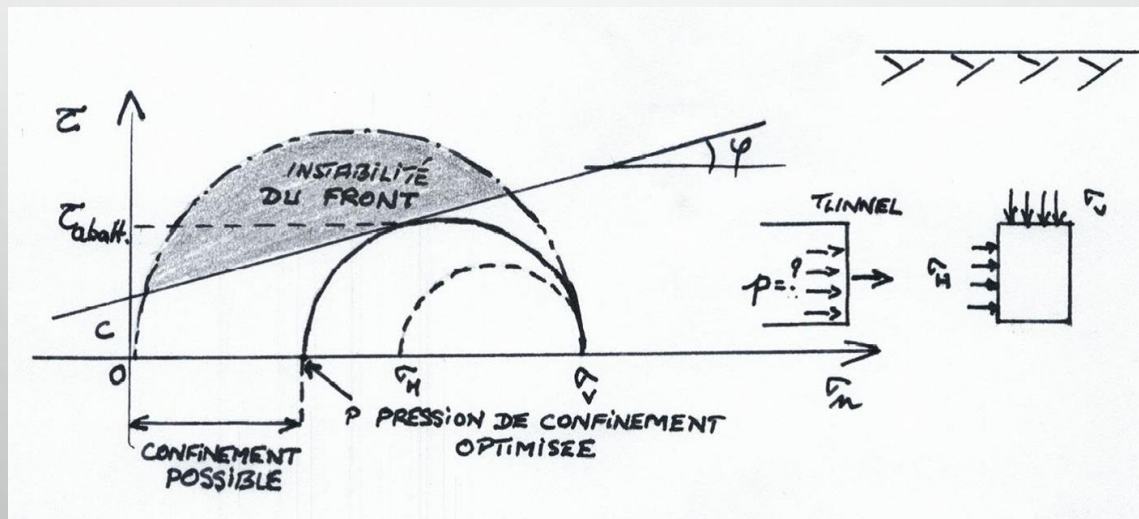


Fig. 10. Evolution des tassements le long d'un tunnelier

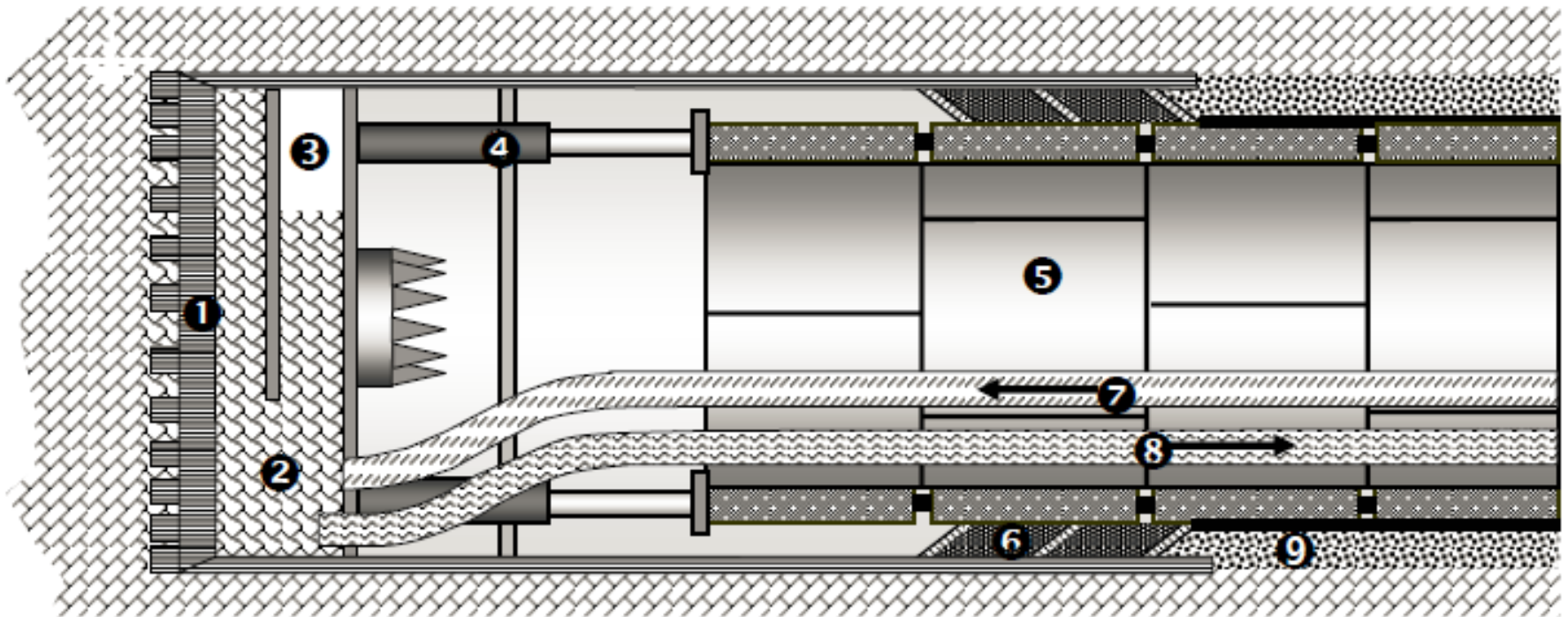
POURQUOI LE CONFINEMENT ?

4 / INFLUENCE DES PARAMÈTRES GÉOMÉCANIQUES SUR LE BON FONCTIONNEMENT DU TUNNELIER

- ▶ EXCAVATION > MODIFICATION DE L'ÉTAT DE CONTRAINTES ($\sigma_3 = 0$)
- ▶ CISAILLEMENT \leftrightarrow COUPLE, CONTRAINTE NORMALE \leftrightarrow POUSSÉE
- ▶ POUSSÉE TROP FAIBLE = TASSEMENTS VOIRE ÉBOULEMENT
- ▶ POUSSÉE TROP FORTE = RECOMPACTAGE DU TERRAIN À L'AVANCEMENT = AUGMENTATION DU COUPLE
- ▶ LE CONFINEMENT INFLUE DIRECTEMENT SUR LA BONNE MARCHE DU TUNNELIER



CONFINEMENT PAR PRESSION DE BOUE : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT



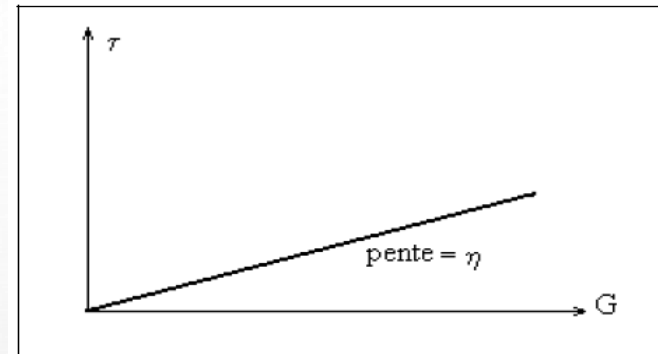
- | | | |
|---------------------------|----------------|---------------------------------|
| ❶ Cutterhead | ❷ Thrust arms | ❸ Bentonite Slurry Feed |
| ❹ Bentonite Slurry / Soil | ❺ Segments | ❻ Bentonite Slurry/ Soil Return |
| ❻ Air Bubble | ❼ Tail sealant | ❼ Annulus Grout |

CONFINEMENT PAR PRESSION DE BOUE

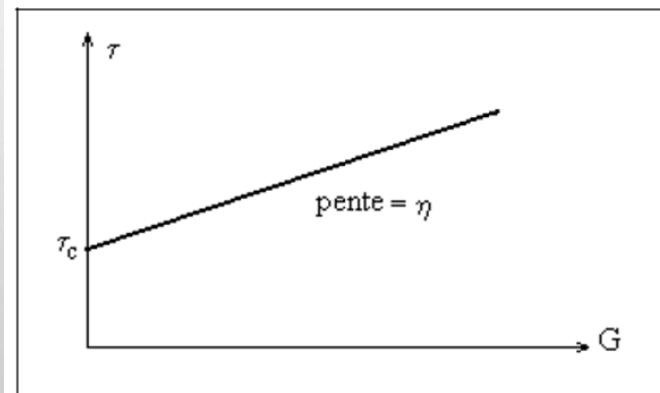
APPROCHE RHÉOLOGIQUE THÉORIQUE ET EXPÉRIMENTALE

- ▶ BOUE = FLUIDE DE BINGHAM
- ▶ SOL = MILIEU POREUX
- ▶ PERMÉAMÈTRE EXPÉRIMENTAL
- ▶ CAKE « MEMBRANE » / CAKE « IMPRÉGNATION »

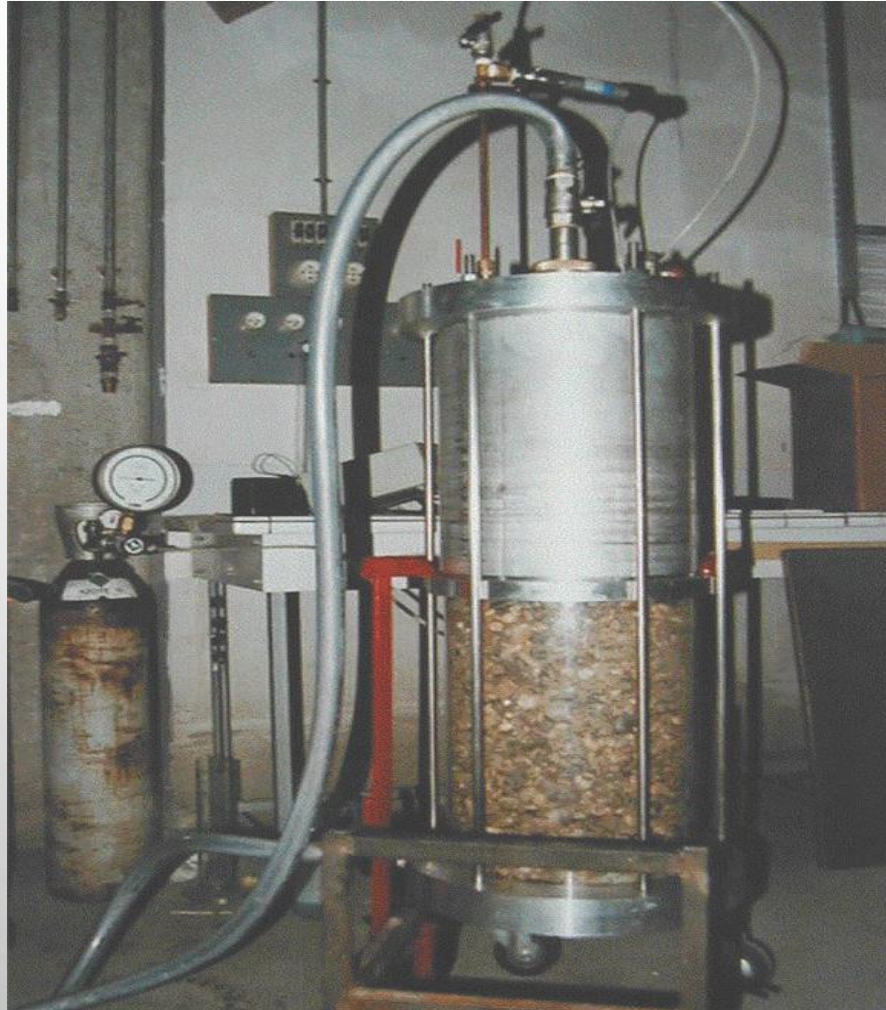
a- fluide newtonien.



b- fluide plastique (*Bingham*)



CONFINEMENT PAR PRESSION DE BOUE APPROCHE EXPERIMENTALE : LE PERMEAMETRE



CAKE MEMBRANE / CAKE IMPRÉGNATION



CONFINEMENT PAR PRESSION DE BOUE

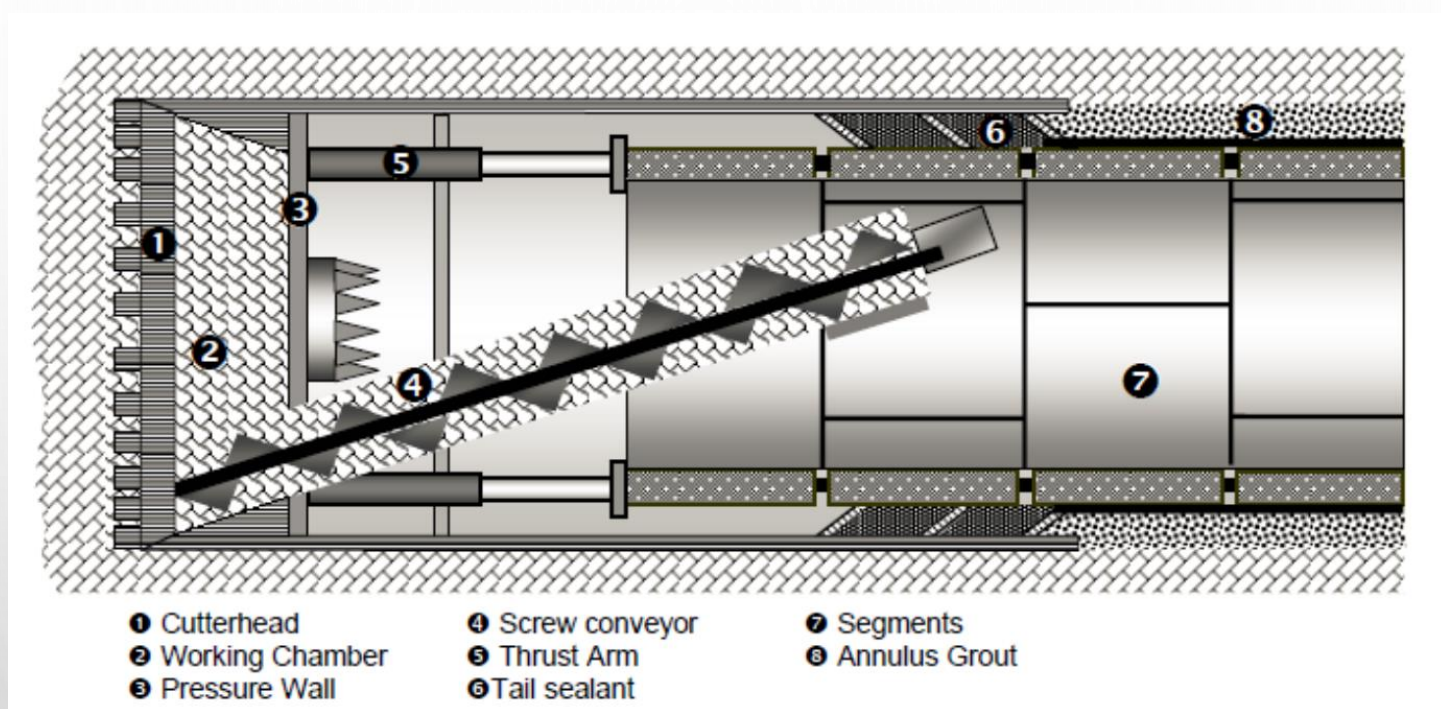
AVANTAGES

- RÉGULATION TRÈS PRÉCISE DE LA PRESSION DE CONFINEMENT
- PUISSANCE INSTALLÉE PLUS FAIBLE QUE POUR LE CONFINEMENT À PRESSION DE TERRE
- MOINS SENSIBLE À L'USURE

INCONVÉNIENTS

- NÉCESSITÉ D'UNE INSTALLATION DE TRAITEMENT PERFORMANTE (CYCLONAGE, FILTRES - PRESSE)
- LIMITE PHYSIQUE À L'EMPLOI DE LA BOUE EN TERRAIN TRÈS OUVERT OU TRÈS HÉTÉROGÈNE
- NÉCESSITÉ D'UN CONCASSEUR EN CAS DE MATÉRIAUX GRAVELEUX / AVEC BLOCS

CONFINEMENT PAR PRESSION DE TERRE : PRINCIPE



- ▶ CONFINEMENT ASSURÉ PAR LES MATÉRIAUX EUX-MÊMES
- ▶ EXTRACTION PAR VIS
- ▶ PRESSION ASSURÉE PAR LA POUSSÉE DU TUNNELIER
- ▶ MATÉRIAUX MANIABLES ET IMPERMÉABLES

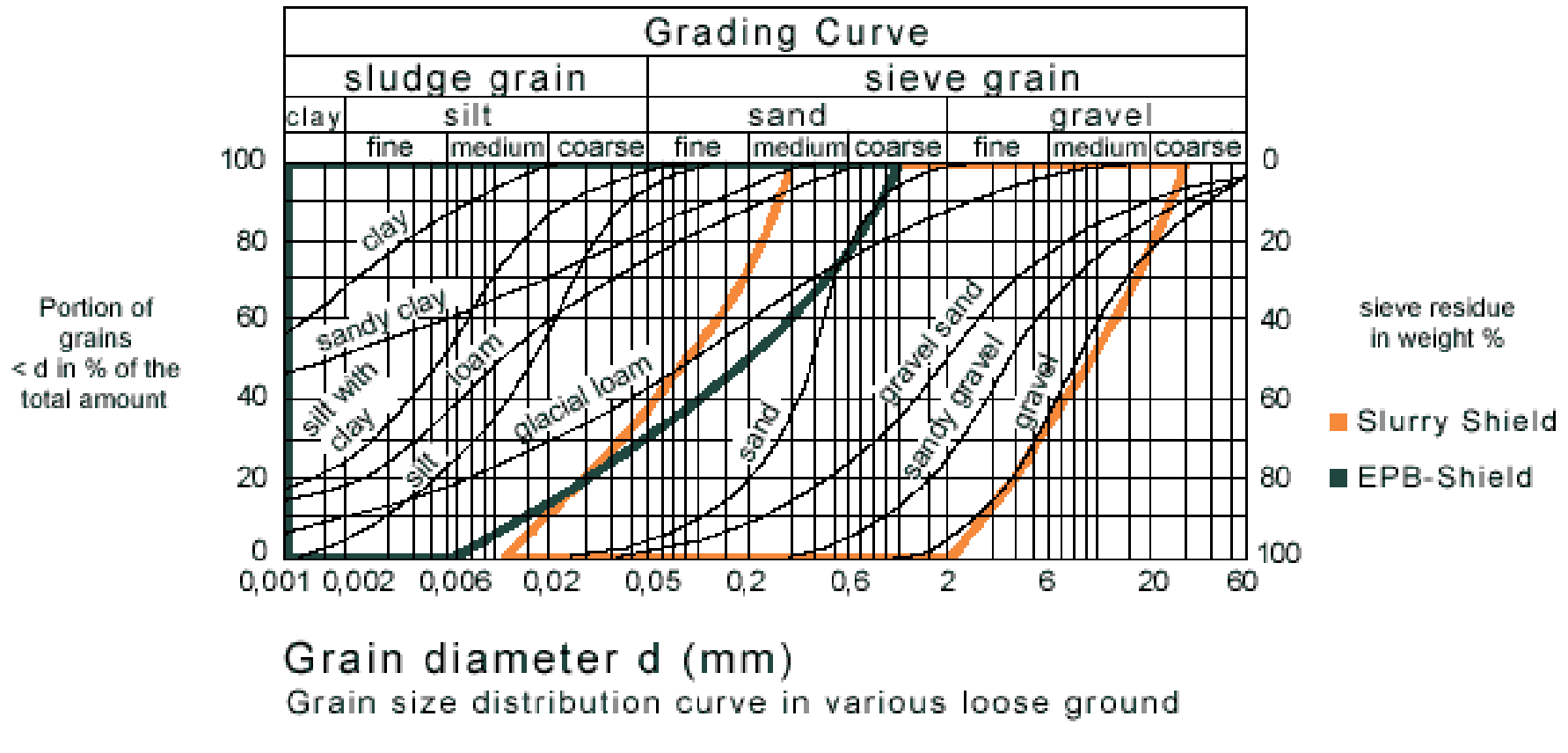
DOMAINE D'EMPLOI DU PROCÉDÉ PRESSION DE TERRE



▶ LE MATÉRIAU IDÉAL POUR
L'EXTRACTION :

- ▶ ARGILE FERME $I_c = 0,5$ À $0,7$
- ▶ LIMONS
- ▶ SABLE AVEC TENEUR EN FINES $80 \mu m > 20$ À 30 %
- ▶ AJOUTS D'ADDITIFS

DOMAINES RESPECTIFS D'EMPLOI EPB/SLURRY EN FONCTION DE LA GRANULOMÉTRIE DES TERRAINS

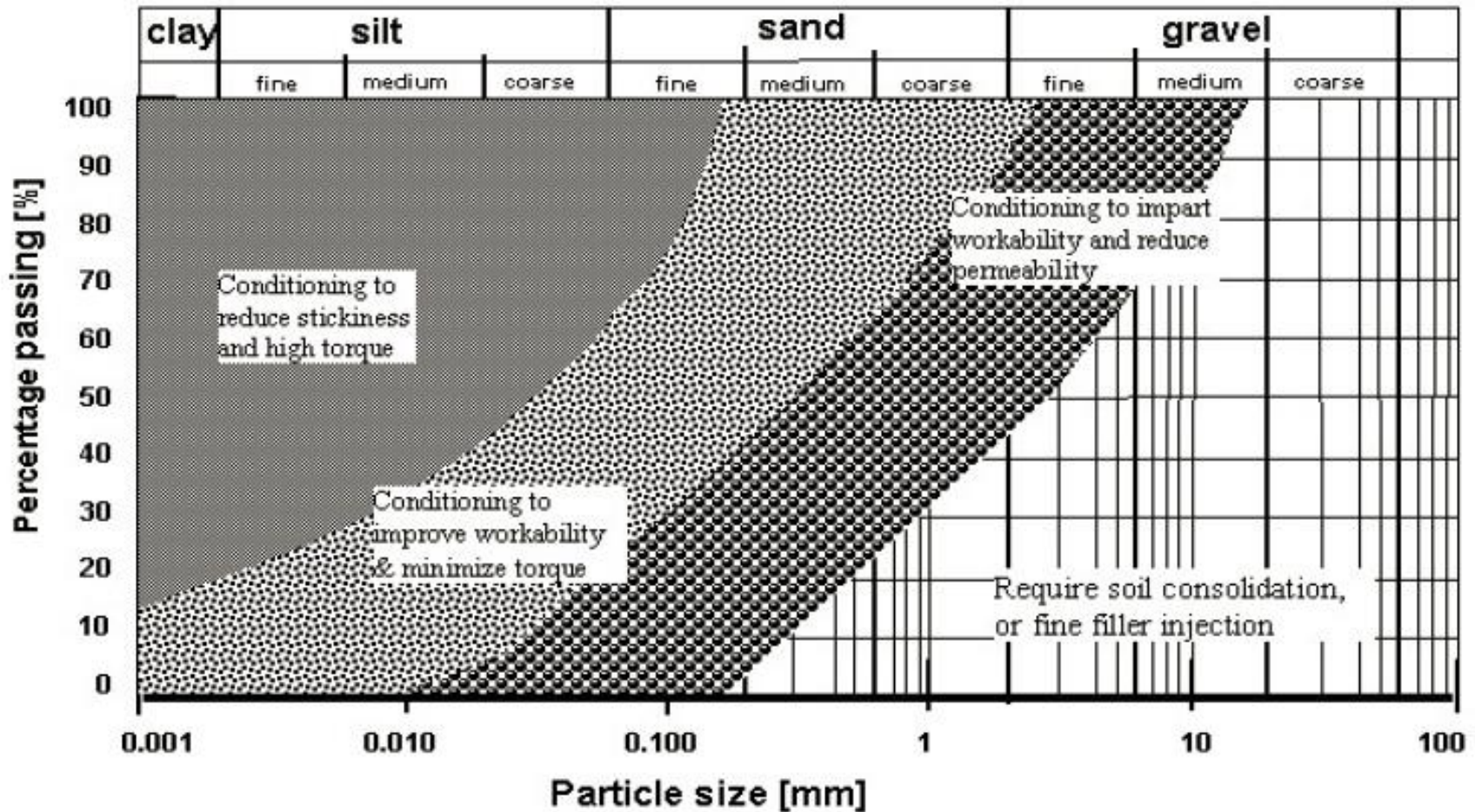




LES ADDITIFS POUR TUNNELIERS À PRESSION DE TERRE

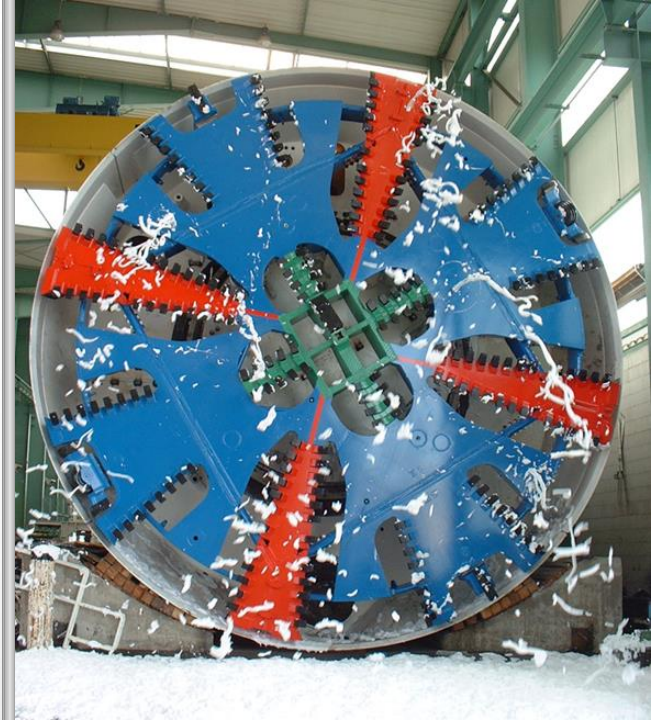
- OBJECTIFS DE L'EMPLOI DES ADDITIFS
 - CONSISTANCE DU SOL : OBTENIR UN ÉTAT PSEUDO-PLASTIQUE
 - RÉDUIRE LA PERMÉABILITÉ DU TERRAIN ET DU MÉLANGE DANS LA CHAMBRE
 - HOMOGENÉISER LES MATÉRIAUX DANS LA CHAMBRE
 - LIMITER LES FROTTEMENTS (LIMITATION DU COUPLE CONSOMMÉ)
 - DANS LES ARGILES, ÉVITER LE COLMATAGE
- ADDITIFS UTILISÉS
 - EAU (LE PLUS FRÉQUENT !)
 - BOUE LOURDE (HIGH DENSITY SLURRY) (POUR MÉMOIRE)
 - POLYMÈRES HYDOSOLUBLES
 - LA MOUSSE
 - LE PLUS FRÉQUENT : COMBINAISON MOUSSE + POLYMÈRES

DOMAINES D'EMPLOI DES ADDITIFS



LA MOUSSE

- SOLUTION DE BASE : EAU + AGENT MOUSSANT À 0.5 – 5 % (+ POLYMÈRE)
- MÉLANGE SOLUTION + AIR : TAUX D'EXPANSION
- $TE = \text{VOLUME MOUSSE} / \text{VOLUME DE LIQUIDE INITIAL}$
- TE GÉNÉRALEMENT COMPRIS ENTRE 10 ET 20 (PRESSION ATMOSPHÉRIQUE)
- FIR = FOAM INJECTION RATIO = $\text{VOLUME MOUSSE} / \text{VOLUME TERRAIN EXCAVÉ}$ (FIR GÉNÉRALEMENT COMPRIS ENTRE 30 ET 60 %, EXCEPTIONNELLEMENT 100 %)
- UTILISATION DE GÉNÉRATEURS DE MOUSSE



CONFINEMENT PAR PRESSION DE TERRE

AVANTAGES

- ▶ CONFINEMENT INDÉPENDANT DE LA FORMATION D'UN CAKE
- ▶ PAS DE TRAITEMENT DES DÉBLAIS
- ▶ PROCÉDÉ SOUPLE, ADAPTÉ AUX VARIATIONS RAPIDES DE TERRAIN

INCONVÉNIENTS

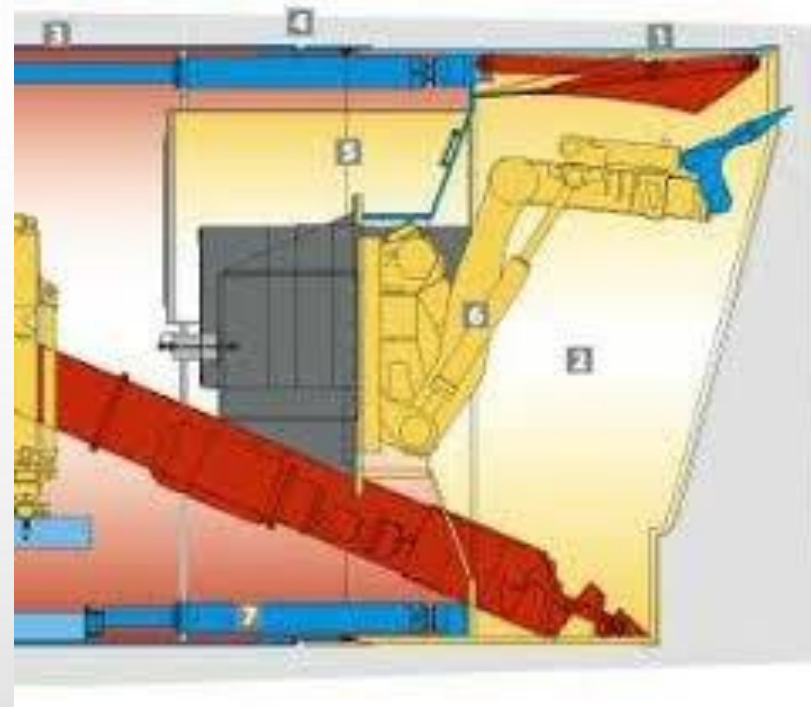
- ▶ COUPLE ÉLEVÉ
- ▶ RISQUE D'USURE ÉLEVÉ
- ▶ RÉGULATION DIFFICILE
- ▶ MAÎTRISE DES PERTES DE CHARGES DANS LA VIS
- ▶ CONTRÔLE VOLUMÉTRIQUE DES MATÉRIAUX EXTRAITS INDISPENSABLE
- ▶ PRESSIONS ÉLEVÉES EN RADIER

VIDÉO : TUNNELIER À PRESSION DE TERRE



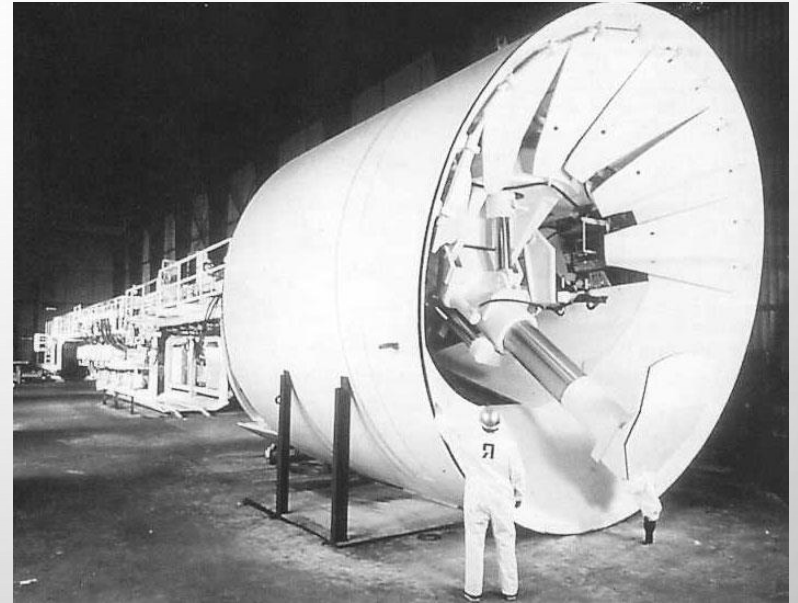
CONFINEMENT A PRESSION D'AIR

- ▶ PRINCIPE TRÈS ANCIEN (HAVAGE DES CAISSONS DE PILE DE PONTS EN RIVIÈRE)
- ▶ SOLUTION 1 : MISE EN PRESSION DU TUNNEL
- ▶ SOLUTION 2 : CHAMBRE SOUS-PRESSION
 - FUITES DANS LE TERRAIN
 - FUITES LE LONG DE LA VIS
- ▶ LIMITE D'EMPLOI :
PERMÉABILITÉ À L'EAU $< 10^{-5}$
M/S



CONFINEMENT MECANIQUE

- ▶ CONFINEMENT PARTIEL PAR L'INTERMÉDIAIRE DE PLAQUES (VOLETS) APPUYÉES CONTRE LE TERRAIN
- ▶ MODULE LE TAUX D'OUVERTURE DE LA TÊTE D'ABATTAGE
- ▶ DOMAINE D'EMPLOI RÉSERVÉ AUX TERRAINS RELATIVEMENT COHÉRENTS, PEU PERMÉABLES OU À DES ROCHES TENDRES
- ▶ NON COMPÉTITIF PAR RAPPORT AU TUNNELIER À PRESSION DE TERRE



MAITRISE DU CONFINEMENT SUR CHANTIER

SUIVI DES PARAMÈTRES DE FONCTIONNEMENT

▶ PRINCIPE

- MESURE EN TEMPS RÉEL DES VALEURS DE PARAMÈTRES CHOISIS
- COMPARAISON DES VALEURS À UNE VALEUR DE SEUIL PRÉDÉFINIE
- IDÉALEMENT : ANALYSE AUTOMATIQUE DES ÉCARTS ET DÉCLENCHEMENT AUTOMATIQUE D'UNE ACTION CORRECTIVE

▶ 3 CRITÈRES

- STABILITÉ DU FRONT DE TAILLE / PRÉVENTION DES FONTIS
- MAÎTRISE DES TASSEMENTS
- SOLLICITATIONS S'EXERÇANT SUR L'ANNEAU DE VOUSOIRS

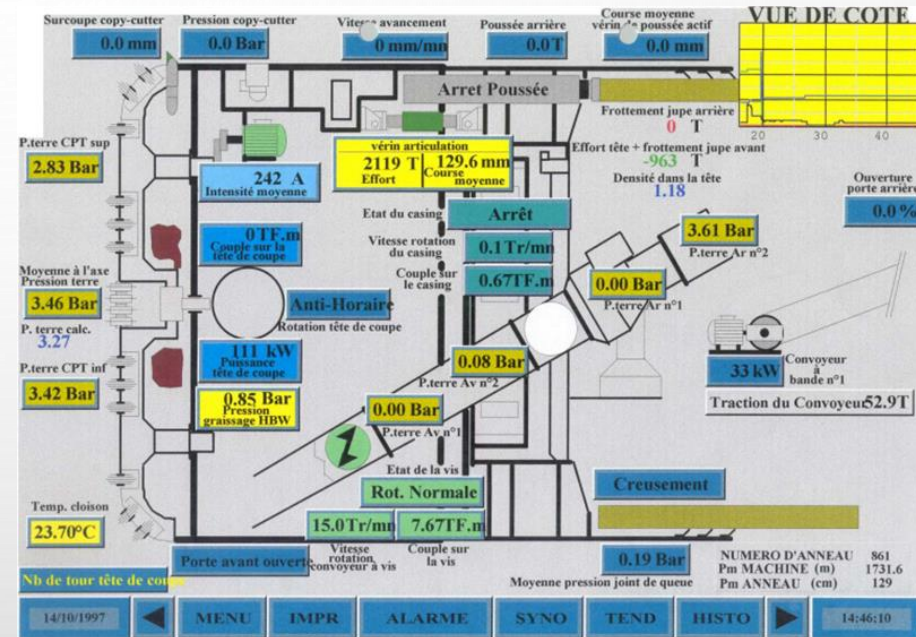
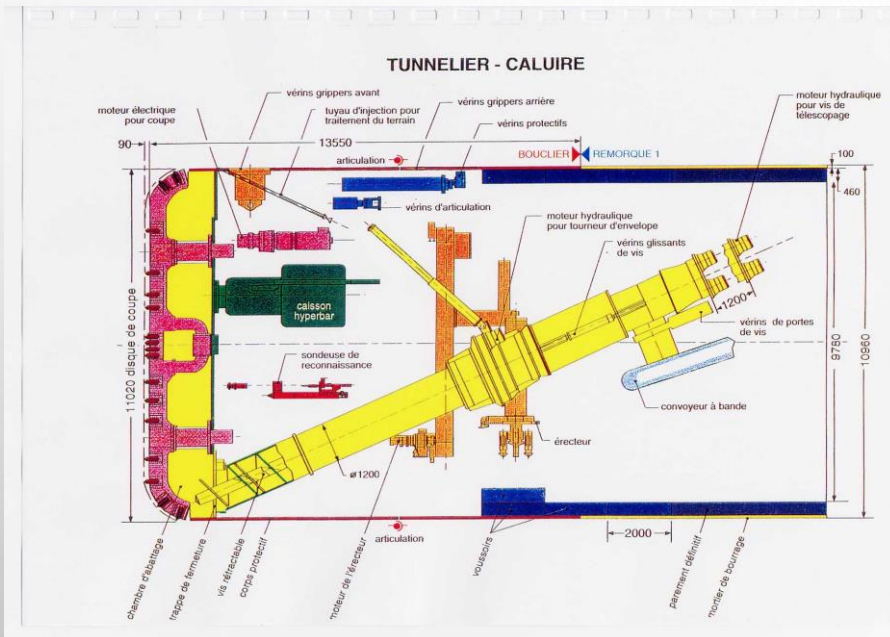
▶ EXEMPLE D'AUTOMATISATIONS POSSIBLES

- EXTRACTION VIS / VITESSE D'AVANCEMENT AVEC PESAGE DES MATÉRIAUX EXTRAITS
- POUSSÉE / PRESSION DANS LA CHAMBRE

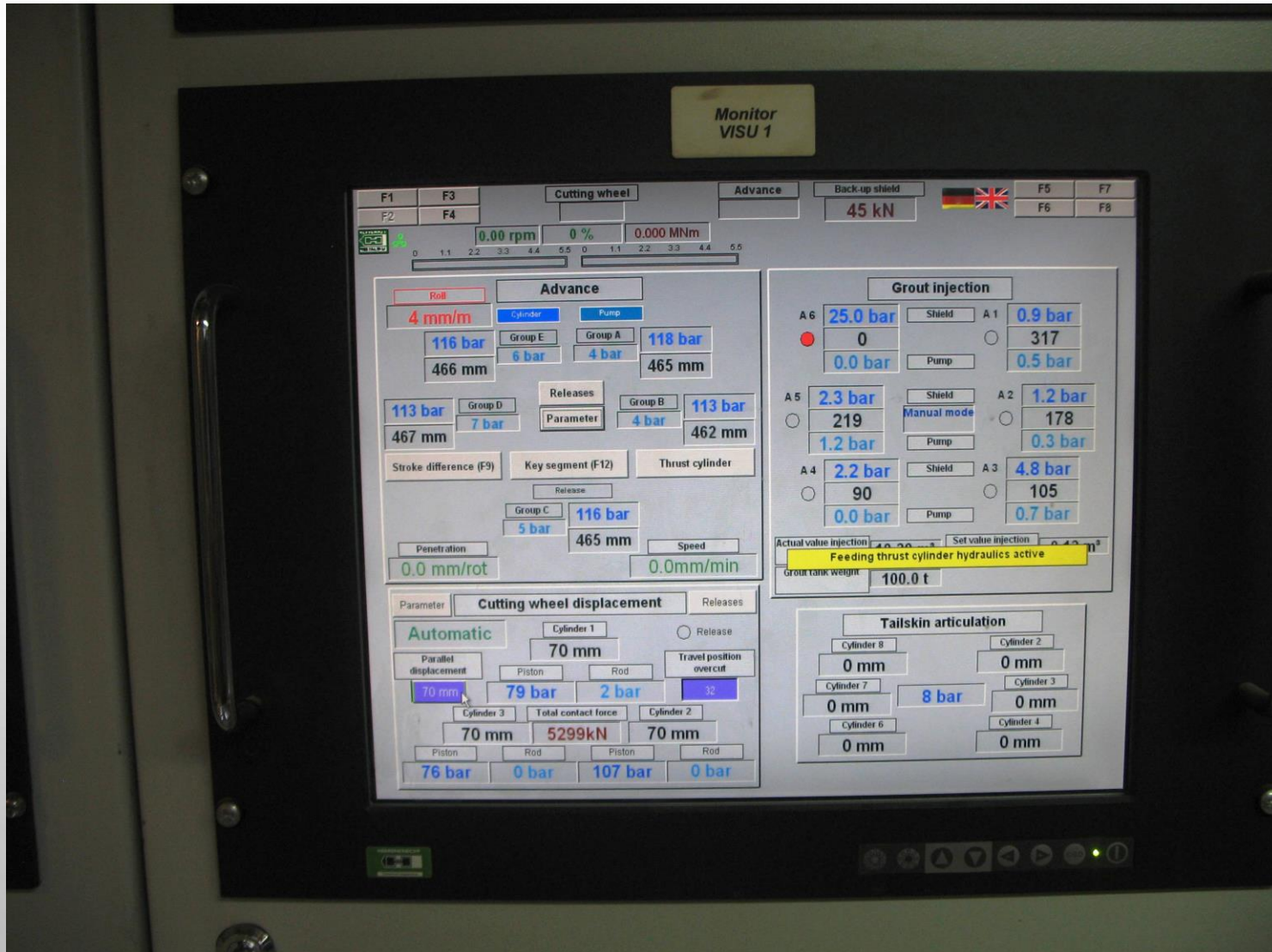
MAÎTRISE DU CONFINEMENT SUR CHANTIER SUIVI DES PARAMÈTRES DE FONCTIONNEMENT

- ▶ PRESSIONS DANS LA CHAMBRE
 - ▶ PRESSIONS DANS LA VIS (PRESSION DE TERRE)
 - ▶ PRESSIONS INJECTION DU MORTIER DE BOURRAGE
 - ▶ VITESSE D'AVANCEMENT
 - ▶ COUPLE CONSOMMÉ
 - ▶ POUSSÉE / COURSE DES VÉRINS
- + INJECTIONS DE BENTONITE LE LONG DE LA JUPE

MAÎTRISE DU CONFINEMENT SUR CHANTIER SUIVI DES PARAMÈTRES DE FONCTIONNEMENT



MAÎTRISE DU CONFINEMENT SUR CHANTIER SUIVI DES PARAMÈTRES DE FONCTIONNEMENT



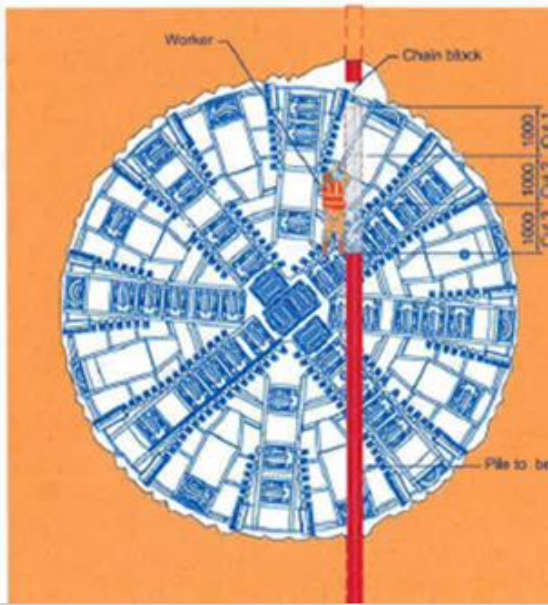
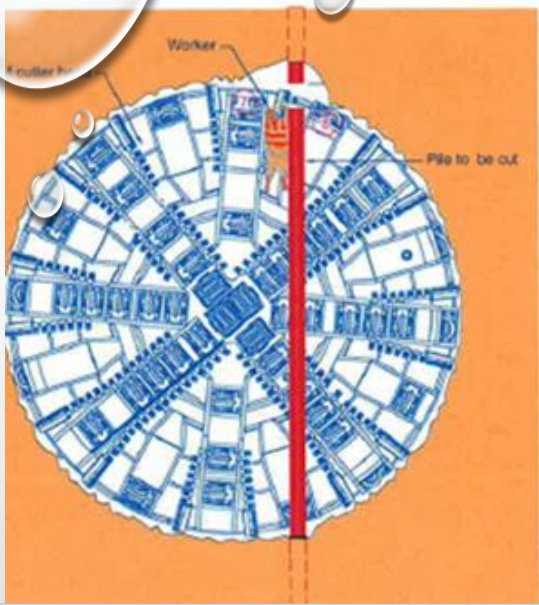


MAITRISE DU
CONFINEMENT
SUR CHANTIER

LES
INTERVENTIONS
HYPERBARES

04/10/2019

- ▶ INTERVENTIONS DANS LA CHAMBRE D'ABATTAGE RENDUES NÉCESSAIRES EN CAS :
 - ▶ D'USURE DES OUTILS
 - ▶ D'UN OBSTACLE INOPINÉ À L'AVANCEMENT
- ▶ NÉCESSITE DE MAINTENIR LA PRESSION DANS LA CHAMBRE D'ABATTAGE
- ▶ PROBLÉMATIQUES COMPLEXES METTANT DIRECTEMENT EN JEU LA SÉCURITÉ DU PERSONNEL



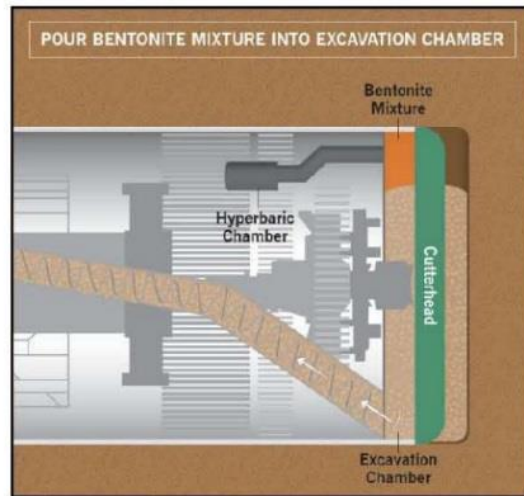
PRÉSENCE D'UN
 OBSTACLE À
 L'AVANCEMENT
 (CANALISATION,
 FONDATION...)

- EXEMPLE
 D'ENLÈVEMENT DE
 PIEUX MÉTALLIQUES
 DEVANT LA TÊTE DU
 TUNNELIER À HONG-
 KONG

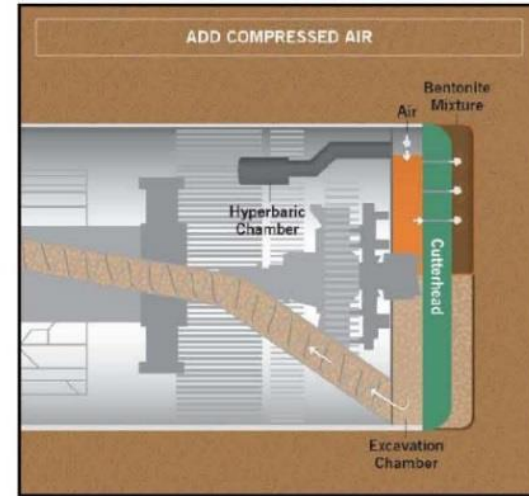


PROCESSUS INTERVENTION HYPERBARE : BULLE D'AIR A L'ABRI D'UN CAKE MEMBRANE

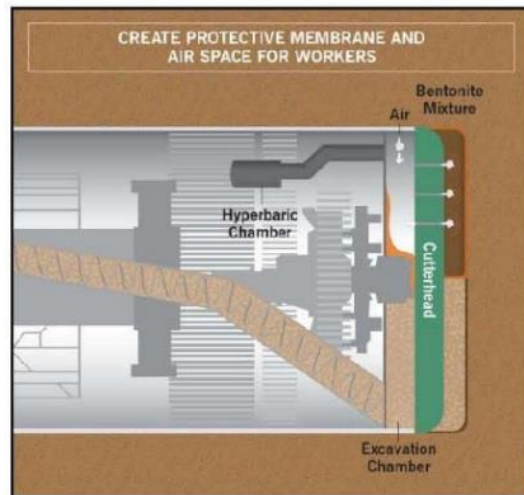
Step 1



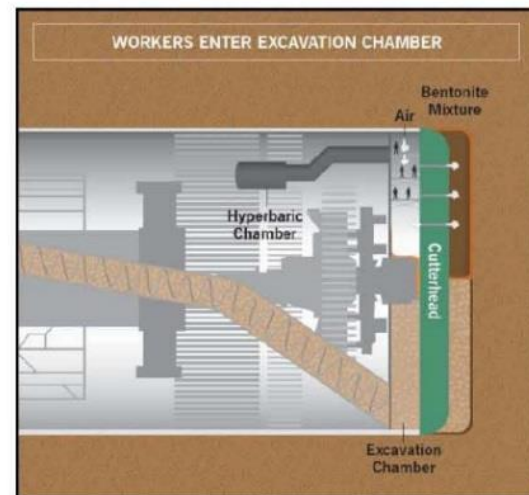
Step 2



Step 3



Step 4



MAITRISE DU
CONFINEMENT
SUR CHANTIER
LES
INTERVENTIONS
HYPERBARES



Travail sous air comprimé (< 4 bars) ou mélange gazeux spécifique (> 4 bars)



Temps de travail / temps de décompression (désaturation en azote) > procédures sous contrôle médical (tables)



Importance des caractéristiques de la boue (Dessiccation progressive du cake)



Surveillance attentive du régime d'air comprimé (fuites)

MERCI POUR VOTRE ATTENTION