

Géologie, géotechnique, mécanique des roches appliquées aux ouvrages souterrains

Travaux souterrains : interactions entre géologie, méthodes d'exécution et comportement

ENPC - COTUN

Intervenants : Fabien BINET, Julian MARLINGE
(BE TERRASOL, groupe SETEC)



École des Ponts
ParisTech



- p.1 **Le contexte général des travaux souterrains**
- p.2 **Aspects géotechniques des travaux souterrains**
- p.3 **Techniques de construction**
- p.4 **Approche géotechnique d'un projet de tunnel**
- p.5 **Le role du suivi du chantier et des auscultations**

- p.1 **Le contexte général des travaux souterrains**
- p.2 Aspects géotechniques des travaux souterrains
- p.3 Techniques de construction
- p.4 Approche géotechnique d'un projet de tunnel
- p.5 Le role du suivi du chantier et des auscultations

1\ Contexte général \ Les enjeux

- Savoir dans quel terrain il va falloir creuser (et « choisir » le tracé du projet)
- Connaître l'environnement du projet
- Définir les méthodes de construction (traditionnelles, tunneliers, traitement des terrains, etc...)
- Prévoir le comportement : stabilité, tassements, vitesses d'avancement, venues d'eau

1\ Contexte général \ Spécificités

- Ouvrages linéaires, profonds : difficultés d'accès
- Comportement mécanique : succession d'états de contraintes 3D
- Notion de temps : stabilité immédiate, soutènement provisoire, revêtement \pm différé
- Méthodes de construction : influence sur comportement
- Hydrogéologie : facteurs prépondérants
- Sécurité des ouvriers : stabilité immédiate, déboutrages
- Incidences sur environnement : fondamentale en phase conception et travaux
- Mécanisation poussée (tunneliers) : reconnaissances spécifiques

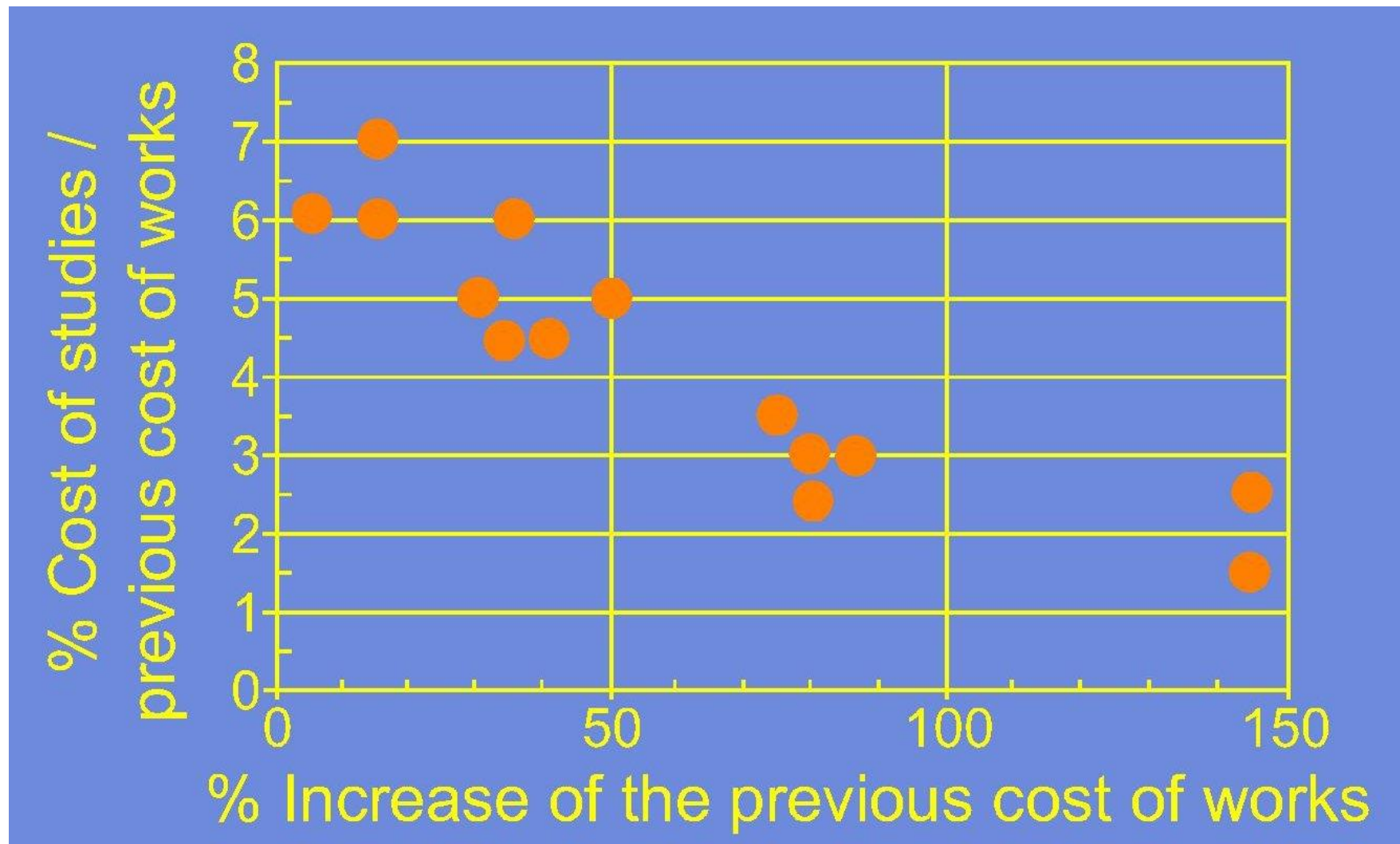
Importance de recommandations particulières (AFTES) notamment pour le choix :

- Des paramètres géotechniques
- Des essais permettant de les obtenir

A intégrer aux stades :

- Conception globale
- Dimensionnement
- Exécution

Les « économies » sur les reconnaissances :



- p.1 **Le contexte général des travaux souterrains**
- p.2 **Aspects géotechniques des travaux souterrains**
- p.3 **Techniques de construction**
- p.4 **Approche géotechnique d'un projet de tunnel**
- p.5 **Le role du suivi du chantier et des auscultations**

1. Acquisition des données de base :

contraintes géométriques et de sécurité dépendant de la destination de l'ouvrage (tracé, section, gabarit, ouvrages annexes de sécurité notamment), données de terrain : géologie, géotechnique et hydrogéologique, contraintes liées à l'environnement (bâti existant et sa sensibilité, milieu naturel)

2. Conception du projet et dimensionnement des ouvrages :

définition précise de la géométrie des ouvrages (en plan, profil et sections), modélisations (dimensionnement des structures et évaluation des conséquences sur l'environnement: déformations, modification de régimes hydrogéologiques, risques de pollution)

3 . Choix des méthodes d'exécution:

techniques de construction permettant de réaliser l'ouvrage dans les délais requis, tout en respectant les critères de sécurité tant pour le chantier que pour l'environnement

4. Réalisation de l'ouvrage:

nécessité constante de contrôler l'adéquation des techniques mise en œuvre à la nature et au comportement réel des terrains effectivement rencontrés, d'où l'importance majeure de suivi géologique et de l'auscultation

Tunnels profonds en milieu rocheux :

- Milieu discontinu ;
- Stabilité assurée (sauf à très grande profondeur)
- Rôle majeur des failles

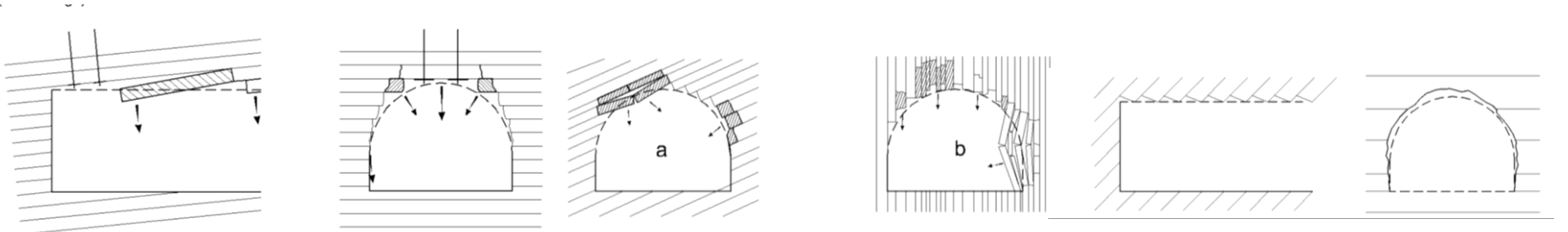
Tunnels peu profonds dans les sols ou les roches tendres :

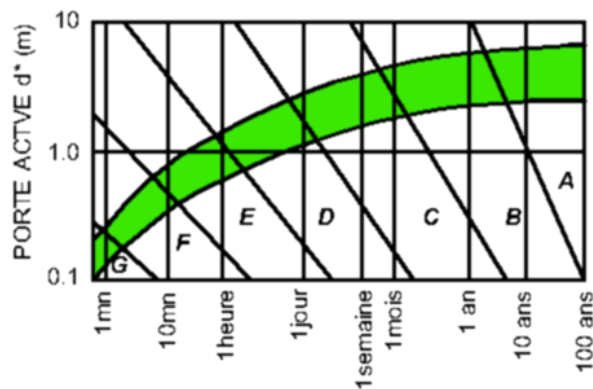
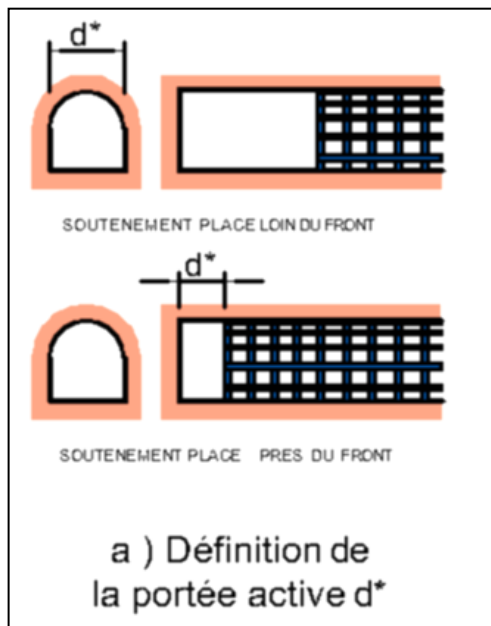
- Milieu continu
- Nécessité d'un soutènement des terres
- Rôle majeur des déformations

En terrain rocheux, les techniques dépendent principalement de la fracturation du massif :

- Si rocher homogène peu fracturé :
 - Stabilité assurée ;
 - pas ou peu de besoin en soutènement
- Si rocher fracturé :
 - instabilités liées aux risques de chutes de blocs
 - soutènement par boulonnage (+ grillage ou béton projeté)
- Cas particulier des tunnels à très grande profondeur :
 - risque de dépasser en piédroits la résistance en compression du rocher
 - risque d'écaillage

L'orientation de la stratification à une influence majeure sur la stabilité des parois des tunnels



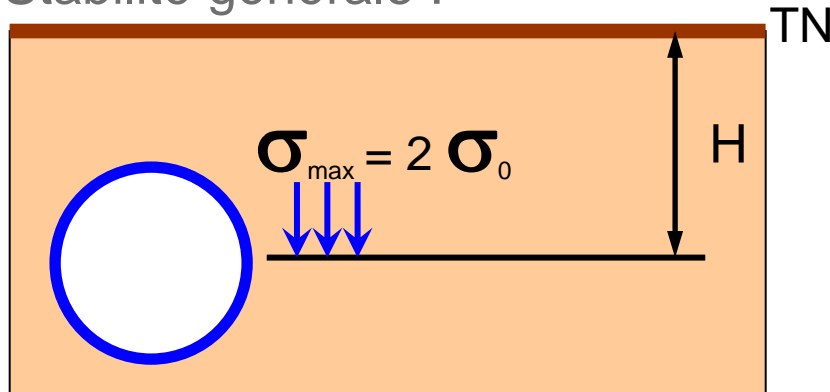


b) Diagramme de qualification

| Catégorie de terrain | Description des terrains | t_s | d^* (m) |
|----------------------|--|-------------|-----------|
| A | Roche massive | 20 ans | 4 |
| B | Risque éventuel de chute de blocs en voûte | 6 mois | 4 |
| C | Terrain légèrement fracturé | 1 semaine | 3 |
| D | Terrain légèrement fracturé | 5 heures | 1.50 |
| E | Terrain très fracturé | 20 minutes | 0.80 |
| F | Terrain nécessitant un soutènement immédiat au front de taille | 2 minutes | 0.40 |
| G | Terrain nécessitant le blindage du front de taille | 10 secondes | 0.15 |

Position du problème :

- Stabilité générale :



Stable si :

H = 10 m

H = 50 m

H = 100 m

$$\sigma_{\max} < R_c$$

$$R_c \geq 0.4 \text{ Mpa}$$

$$R_c \geq 2.0 \text{ MPa}$$

$$R_c \geq 4.0 \text{ MPa}$$

- Stabilité du front :

$$\frac{\sigma_0 - p_c}{c_u} \leq 4 \text{ ou } 5$$

H = 10 m

H = 50 m

H = 100 m

$$c_u \geq 50 \text{ Kpa}$$

$$c_u \geq 250 \text{ Kpa}$$

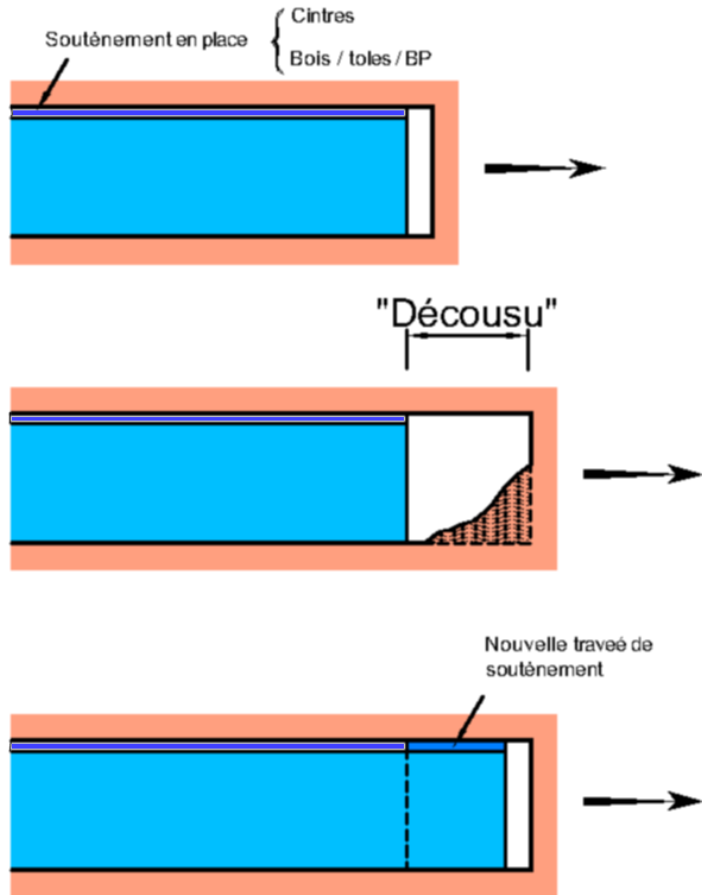
$$c_u \geq 500 \text{ Kpa}$$

- Venues d'eau : à réduire
- Tassements en surface

- p.1 **Le contexte général des travaux souterrains**
- p.2 **Aspects géotechniques des travaux souterrains**
- p.3 **Techniques de construction**
- p.4 **Approche géotechnique d'un projet de tunnel**
- p.5 **Le role du suivi du chantier et des auscultations**

3\ Techniques de construction\ Méthodes traditionnelles

Cycle : excavation - marinage - soutènement



Revêtement définitif (plus ou moins différé)

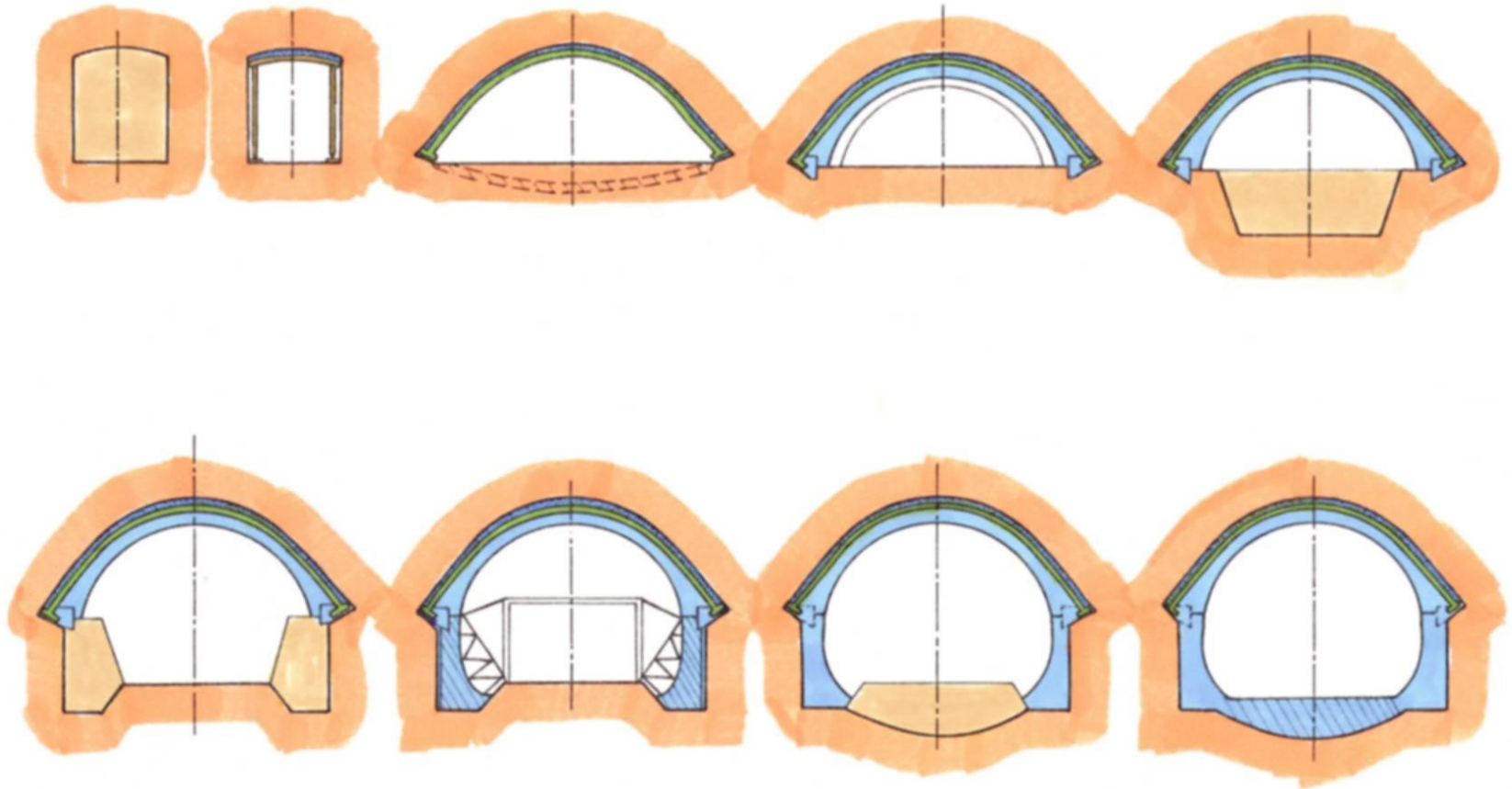


En terrain difficile :

- Action sur les méthodes d'excavation:
 - Excavation en sections divisées
 - + *soutènement par cintres et tôle ou béton projeté*
 - Éventuellement, merlon au front (si dimensions suffisantes et stabilité du front limite)
- Action sur le terrain :
 - Renforcement (parois et front de taille) : boulons, pré-soutènements
 - Drainage ;
 - Injections
 - Congélation
 - Compensation des tassements par des injections dans le terrain

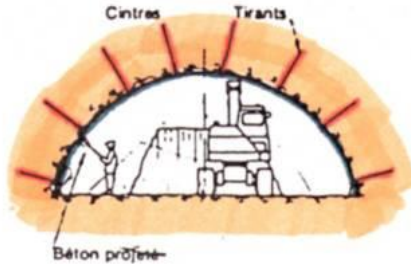
En terrain difficile \ Action sur les méthodes d'excavation

Section divisée

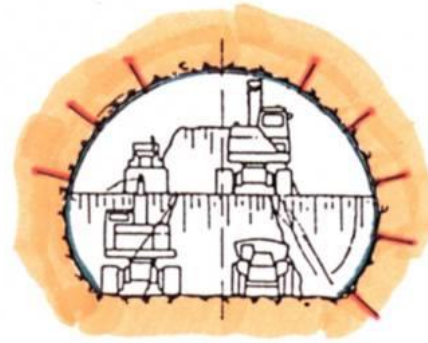


En terrain difficile \ Action sur les terrains

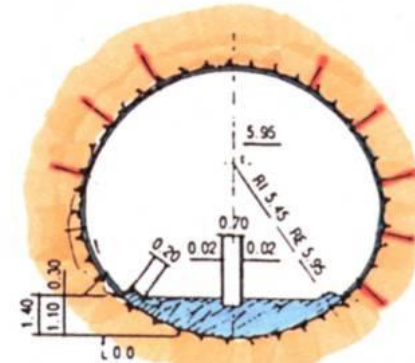
Boulonnage



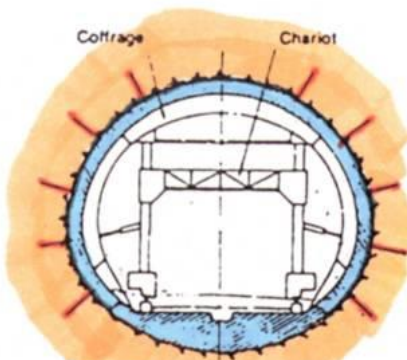
Terrassement en calotte
béton projeté et ancrages



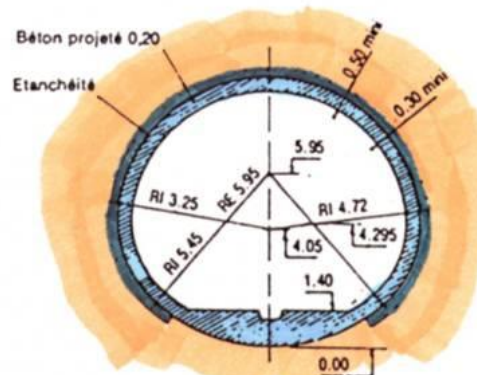
Terrassement plédroit
béton projeté et ancrages



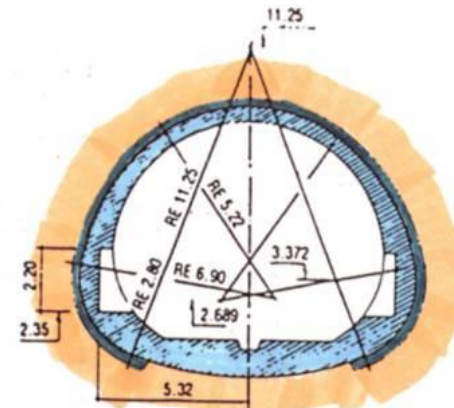
Terrassement et
bétonnage du radier



Bétonnage du
revêtement définitif



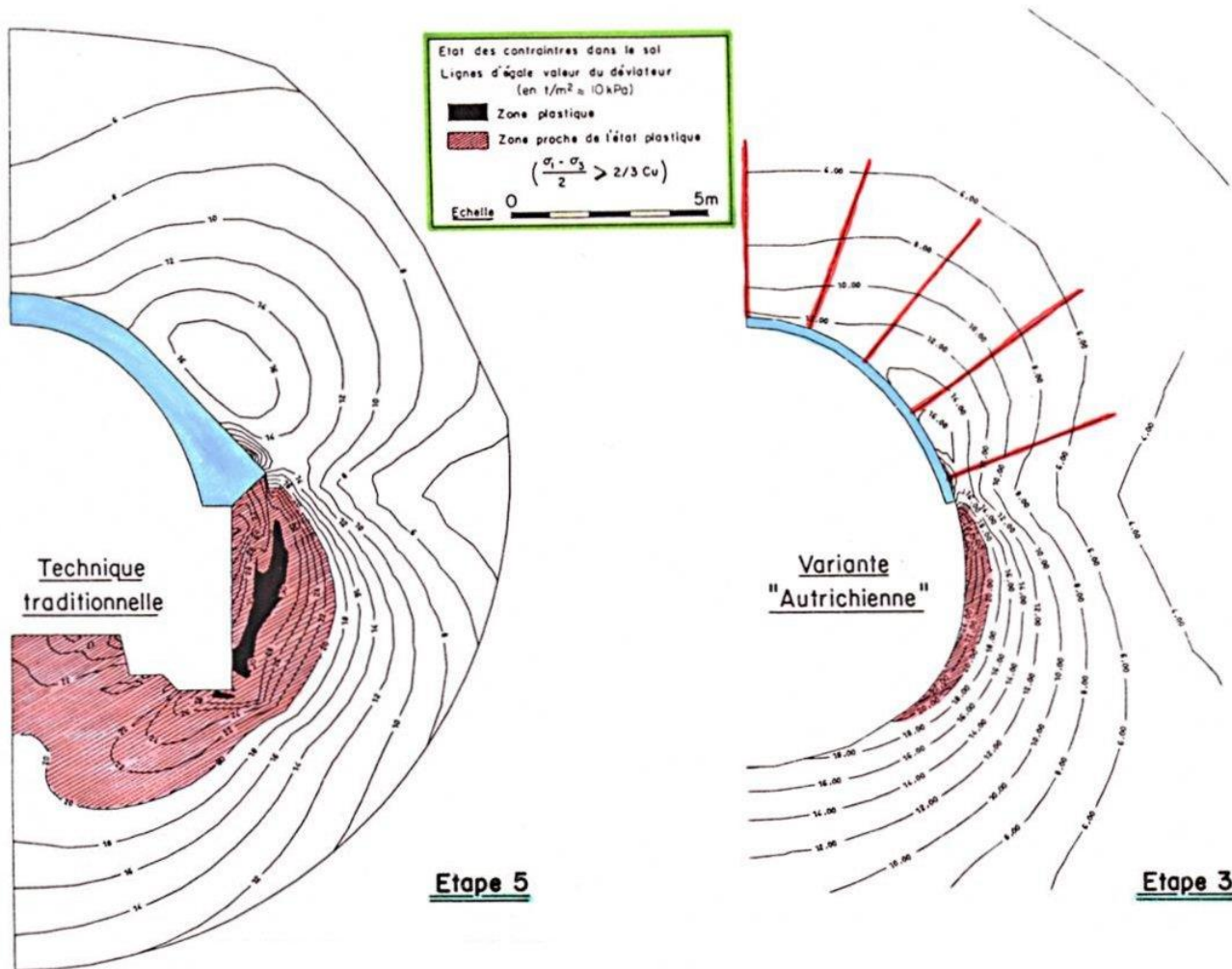
COUPE COURANTE



3\ Techniques de construction \ Méthodes traditionnelles

En terrain difficile \ Action sur les terrains

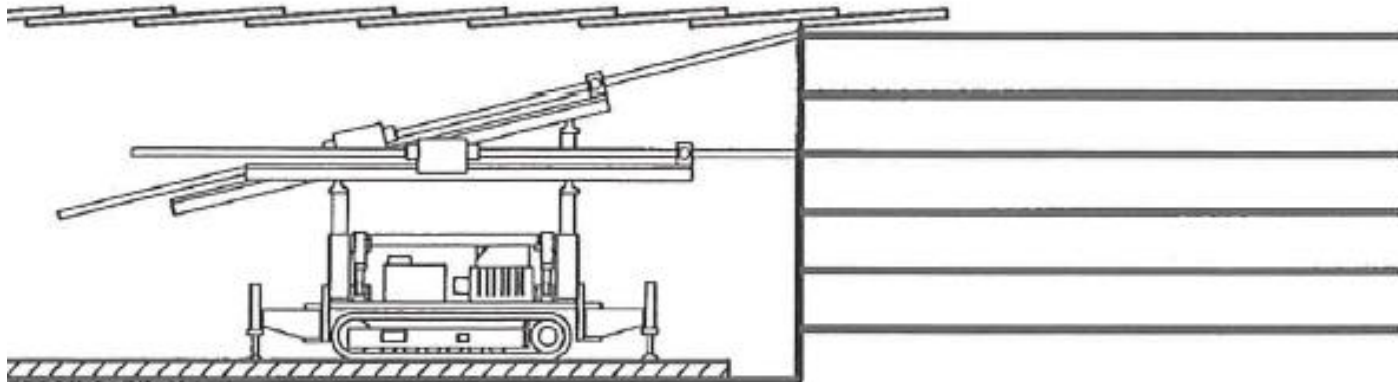
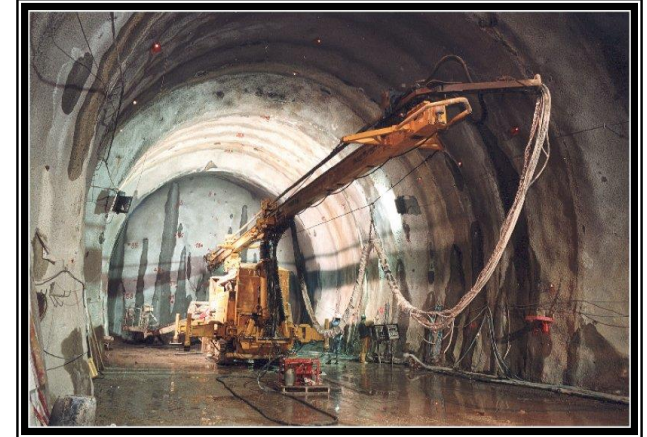
Boulonnage => on sollicite moins le terrain



En terrain difficile \ Action sur les terrains

Renforcement au front :

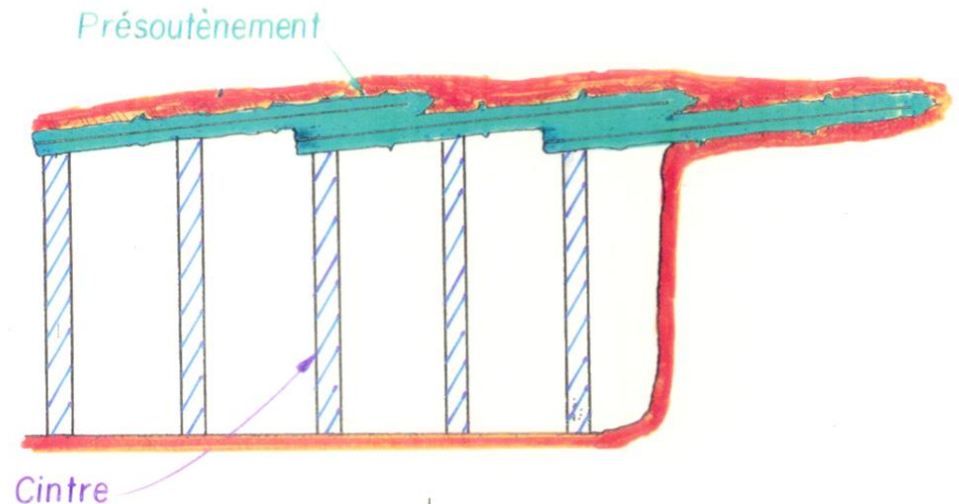
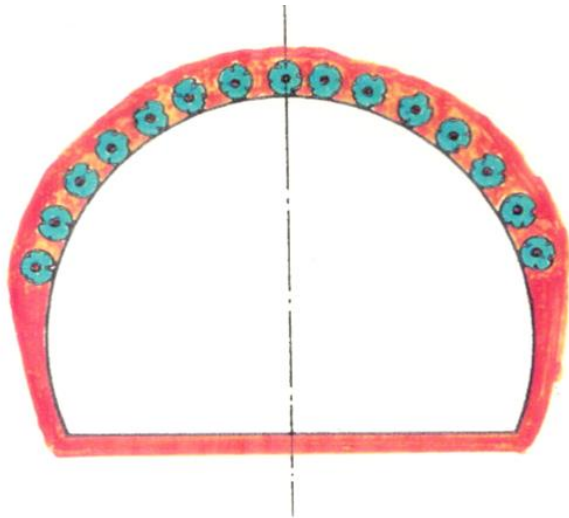
- Utilisé pour les grands tunnels, en pleine section
- Boulons en fibre de verre (en général) ;
- Éléments de grande longueur (15-25 m)
- Objectif : Maintenir le “noyau d’avancement” en état élastique (réduit les déformations et évite de passer le pic si comportement fragile)



En terrain difficile \ Action sur les terrains

Pré-soutènements :

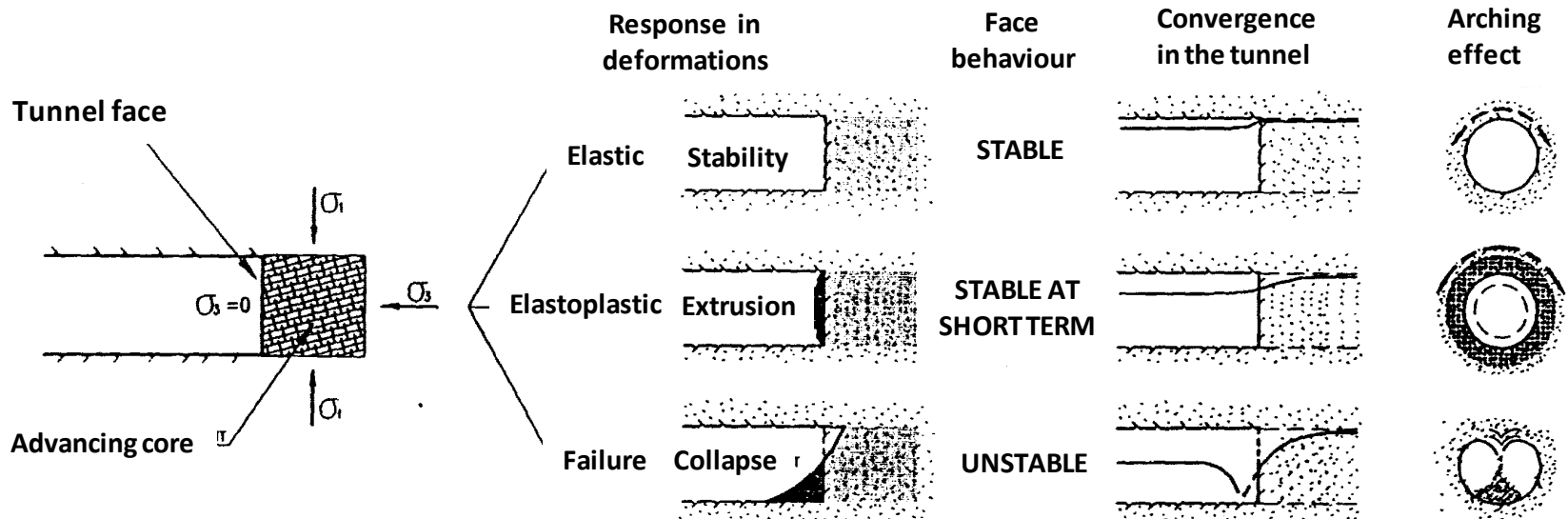
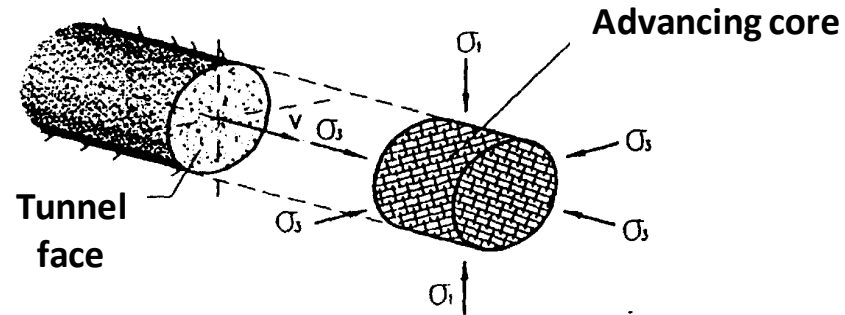
- Objectifs : soutenir le terrain avant de l'excaver
 - Barres foncées/battues (enfilage, forepolling, ...) sur 3 à 6 m
 - Tubes scellés sur 12 à 15 m au moins ;
- Effet : favorise les effets de voûte autour du tunnel (et soutient le terrain avant creusement ~ parois moulées)



En terrain difficile \ Concept global

Pré-soutènements :

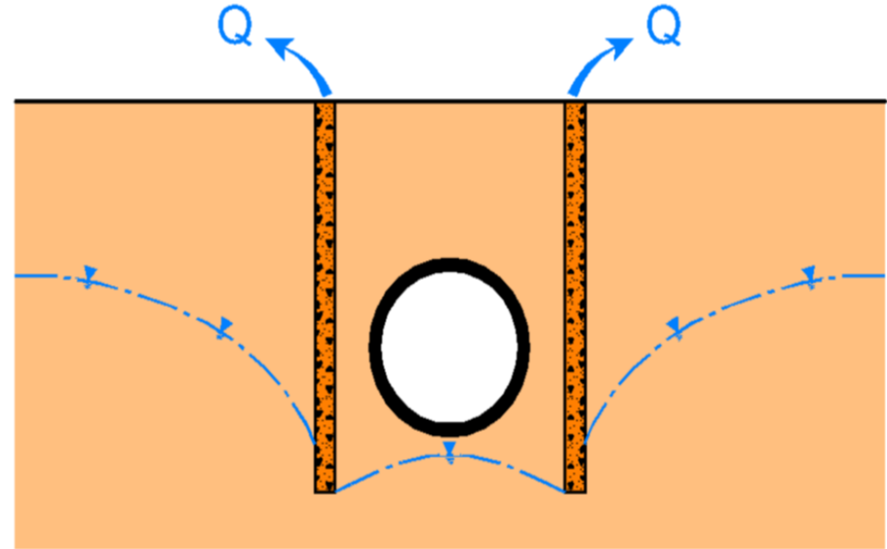
- Méthode ADECO (Lunardi)



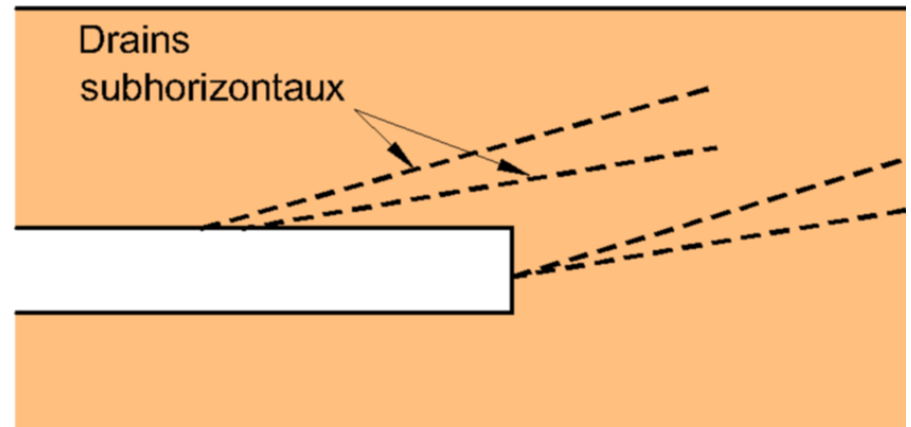
En terrain difficile \ Action sur les terrains

Action sur l'eau - Drainage :

- Rabattement par l'extérieur



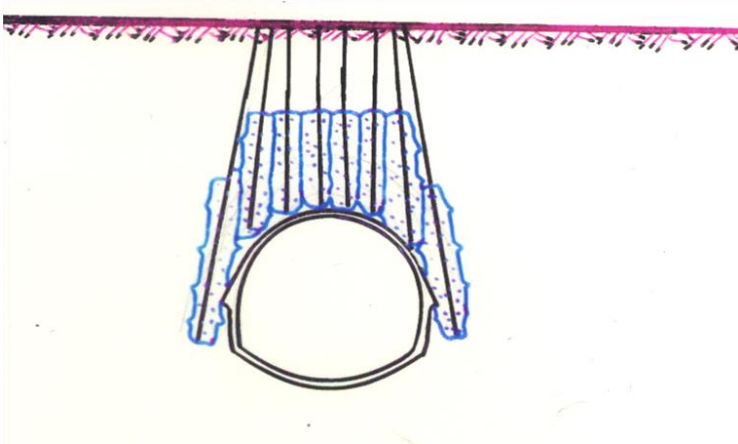
- Drainage à l'avancement



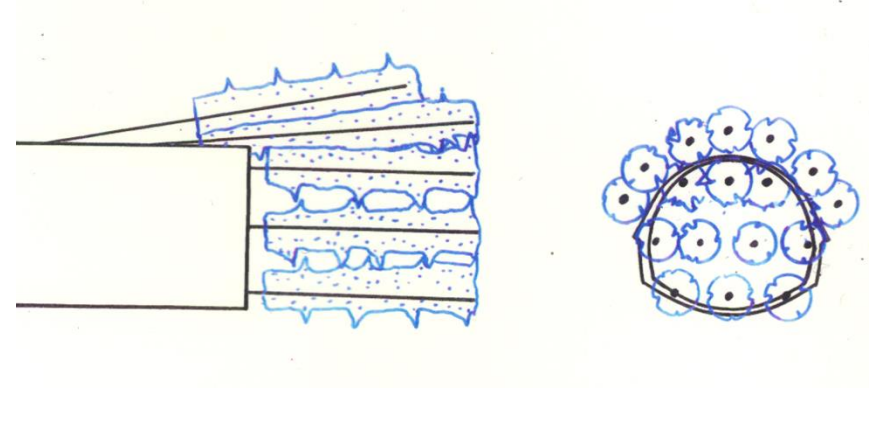
En terrain difficile \ Action sur les terrains

Action sur l'eau + le terrain : injections- Drainage :

- Objectifs :
 - Consolidation (améliorer la résistance et diminuer la déformabilité)
 - Étanchement (réduire la perméabilité)
- Méthodes :
 - Injections classique de coulis bentonite-ciment
 - Drainage à l'avancement



Depuis la surface

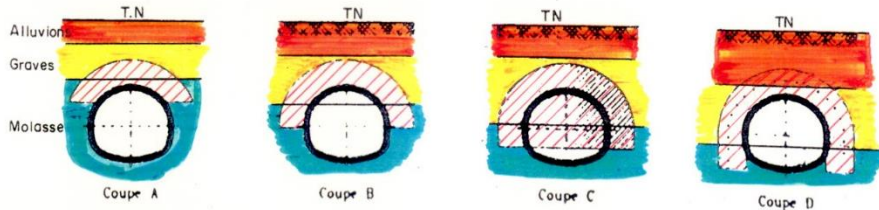
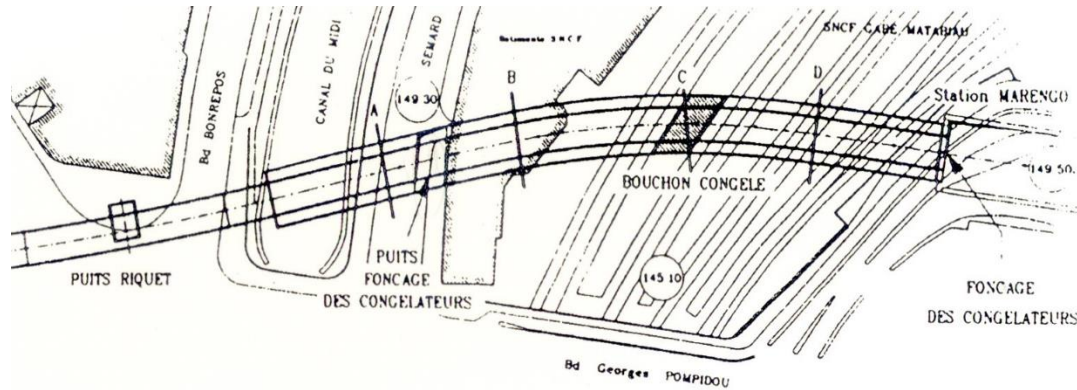


En tunnel à l'avancement

En terrain difficile \ Action sur les terrains

Congélation :

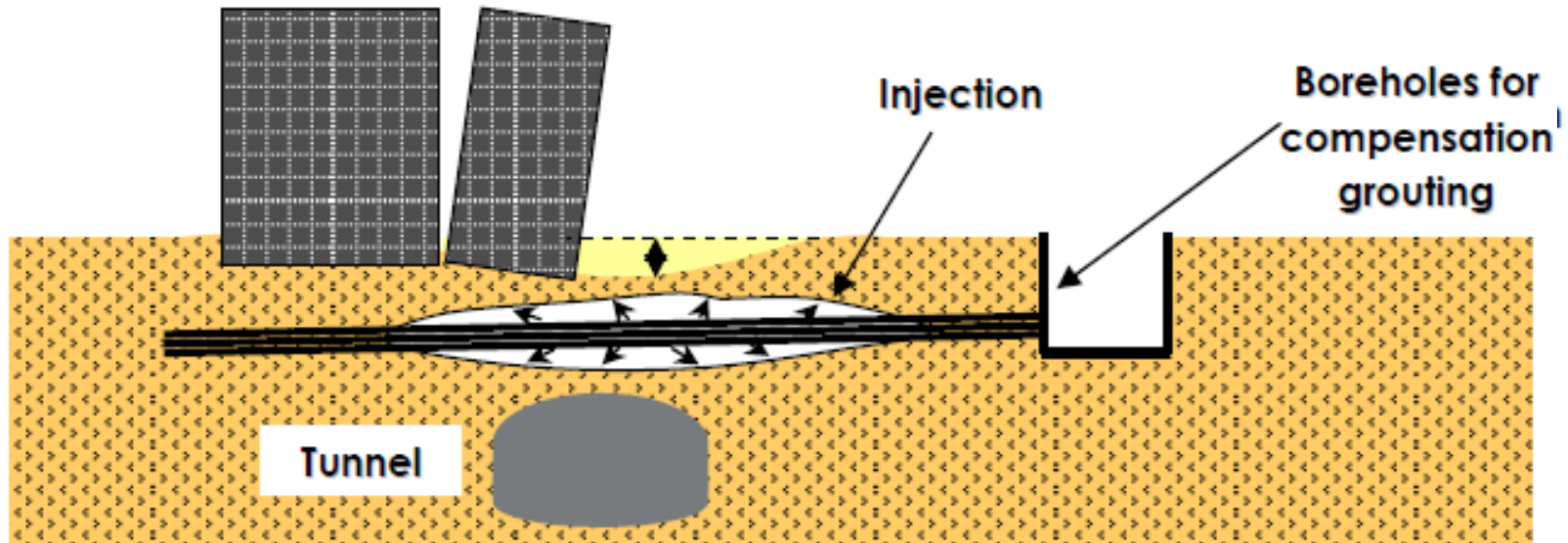
- Objectifs ~injections : consolider et étancher



En terrain difficile \ Action sur les terrains

Injections de compensation :

- Objectifs : compenser les effets sur les fondations des tassements profonds engendrés par le creusement, par injection de coulis entre le tunnel et les fondations à protéger



Tunneliers (boucliers)

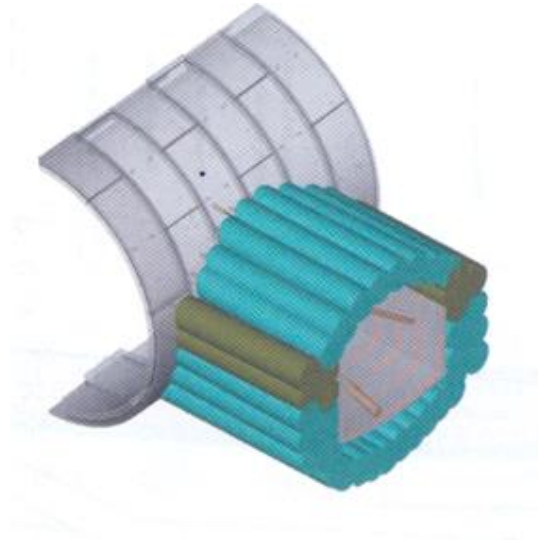


Tunneliers (boucliers)

- Types :
 - Ouverts (rocher) ou fermés (confinement) :
 - Pression de confinement :
 - Terre : adapté aux terrains fins ;
 - Boue : adapté aux terrains granulaires perméables de type alluvions grossières
 - Air : limité aux petites sections
 - Marinage : hydraulique, par vis d'Archimède, ou par convoyeurs.
- Avantages :
 - Stabilité du front
 - Réduction des tassements
 - Sécurité accrue
 - Avancements performants (10 à 15 ml/jour jusqu'à 40/50 ml/jour – Transmanche)
- Inconvénients
 - Sensibles aux hétérogénéités
 - Section circulaire
 - Coût élevé, rentable seulement pour de grandes longueurs (plusieurs kilomètres)

Ouvrages annexes:

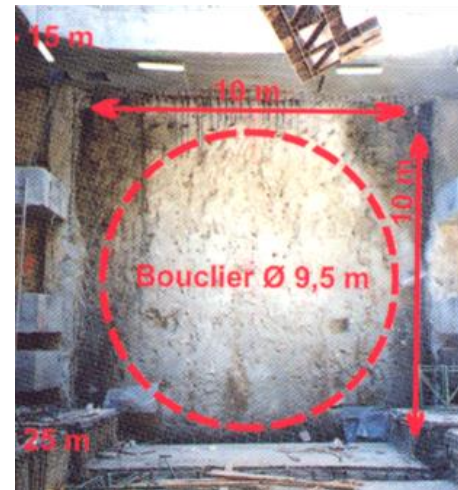
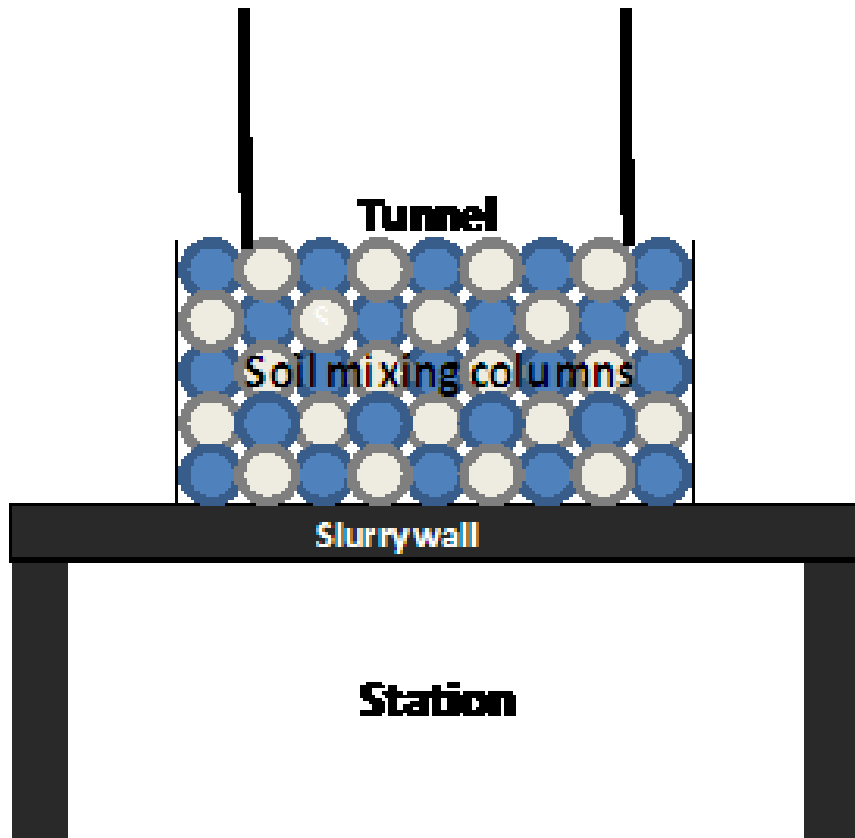
- (Stations / gares)
- Puits de ventilation, de secours
- Niches de sécurité
- Rameaux entre tubes / Niches – Enjeux :
 - Souvent techniquement difficiles à réaliser (sols meubles) surtout si associés à un tunnel au tunnelier : Découpage des anneaux de voussoir Injections, jet-grouting, congélation
 - Peuvent représenter une part importante du coût global des projets



3\ Techniques de construction\ Entrées/sorties de stations

A proximité des ouvrages enterrés dans lesquels il doit pénétrer, le tunnelier ne peut fonctionner de façon optimale

=> traitements de terrain nécessaires sur une emprise de la dimension d'un diamètres de tunnel



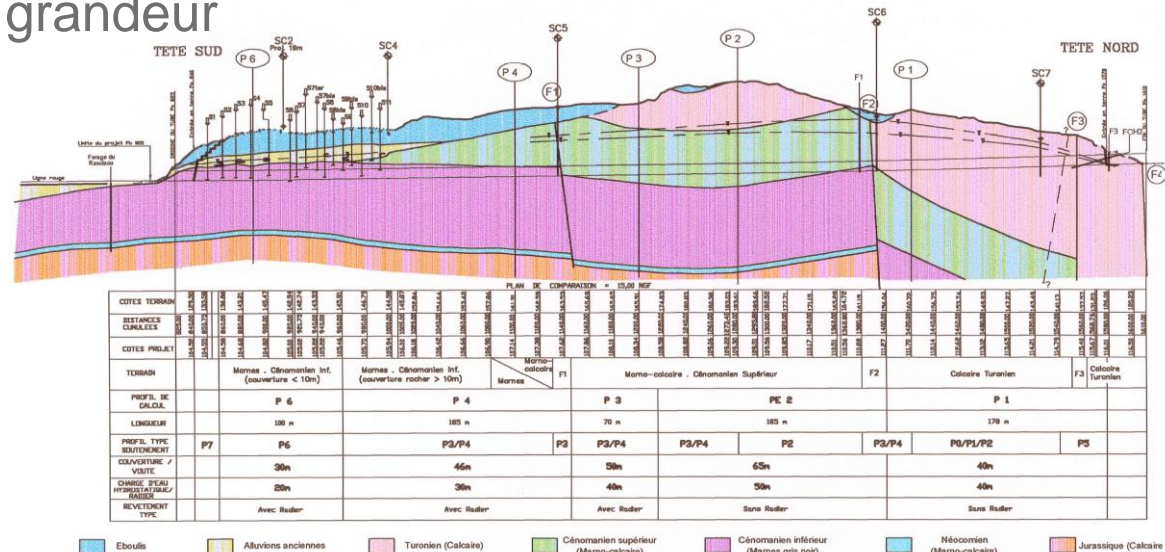
- p.1 **Le contexte général des travaux souterrains**
- p.2 **Aspects géotechniques des travaux souterrains**
- p.3 **Techniques de construction**
- p.4 **Approche géotechnique d'un projet de tunnel**
- p.5 **Le role du suivi du chantier et des auscultations**

4\ Approche géotechnique du projet \ Moyens

Moyens d'études et de reconnaissances géologiques, géotechniques et hydrogéologiques :

- Études géologiques : bibliographie, terrain, photo-interprétation
- Méthodes géophysiques
- Reconnaissances géotechniques : sondages destructifs, carottés avec prélèvement d'échantillons, essais in situ
- Essais de laboratoire : mécanique des sols et des roches
- Puits et galeries de reconnaissance (avec auscultations) pour évaluer le comportement en vraie grandeur

=> **Objectif** : établir le profil en long géotechnique du projet



■ Eboulis
 ■ Alluvions anciennes
 ■ Turonien (Calcaire)
 ■ Cénomaniens supérieur (Marno-calcaire)
 ■ Cénomaniens inférieur (Marnes gris noir)
 ■ Néocomien (Marno-calcaire)
 ■ Jurassique (Calcaire)

Cinq (5) familles de paramètres à caractériser pour les terrains :

- Contraintes naturelles : *histoire géologique du massif / direction des contraintes principales / valeurs de K_o ($= \sigma_h / \sigma_v$)*
- Paramètres physiques : *identification des terrains, qualité globale, caractéristiques des discontinuités, altérabilité, chimie de l'eau*
- Paramètres mécaniques : *résistance, déformabilité, réponse dynamique (déformation, amortissement)*
- Paramètres hydrogéologiques : *niveaux piézométriques, conditions aux limites (zones d'alimentation des nappes), perméabilités*
- Paramètres de constructibilité : *dureté/abrasivité des roches, collage des argiles, propagation (et atténuation) des vibrations vers l'environnement, efficacité des technologies envisagées dans le terrain*

Essais pour mesurer les paramètres :

- Se référer aux recommandations AFTES pour le choix des paramètres utiles à la conception et à l'exécution des ouvrages creusés en souterrain
- Choix des types d'essais adaptés :
 - aux paramètres recherchés (dimensionnements des soutènements revêtements ; stabilité court terme ; moyens d'abattage ...)
 - aux terrains (sols – roches)
 - au stade de l'étude (faisabilité, APS, APD, exécution)
- Utilisation des paramètres mesurés pour classifier les terrains selon les méthodes globales (RMR/GSI, Q-index) ;
- Classifications permettent d'orienter :
 - Le choix des techniques de soutènements : cintres, boulons, béton projeté, pré-soutènements ...
 - Le (pré-)dimensionnement des soutènements : épaisseur des béton, longueur et densité des boulons, espacement des cintres

- p.1 **Le contexte général des travaux souterrains**
- p.2 **Aspects géotechniques des travaux souterrains**
- p.3 **Techniques de construction**
- p.4 **Approche géotechnique d'un projet de tunnel**
- p.5 **Le rôle du suivi du chantier et des auscultations**

Les auscultations ont toujours fait partie intégrante des chantiers de tunnel :

- on vérifie que les terrains sont conformes aux prévisions,
- on est certain que le tunnel est stable lorsque les convergences se stabilisent.
- En tunnels urbains, le suivi des tassements en surface est essentiel pour vérifier que les techniques de creusement sont adaptées, ou les corriger si nécessaire

Elles comprennent :

- Le suivi géologique des terrains rencontrés ;
- Le suivi des déformations induites par les travaux sur les terrains et les avoisinants ;
- Le suivi des sollicitations induites par les travaux sur les avoisinants.

Suivi géologique :

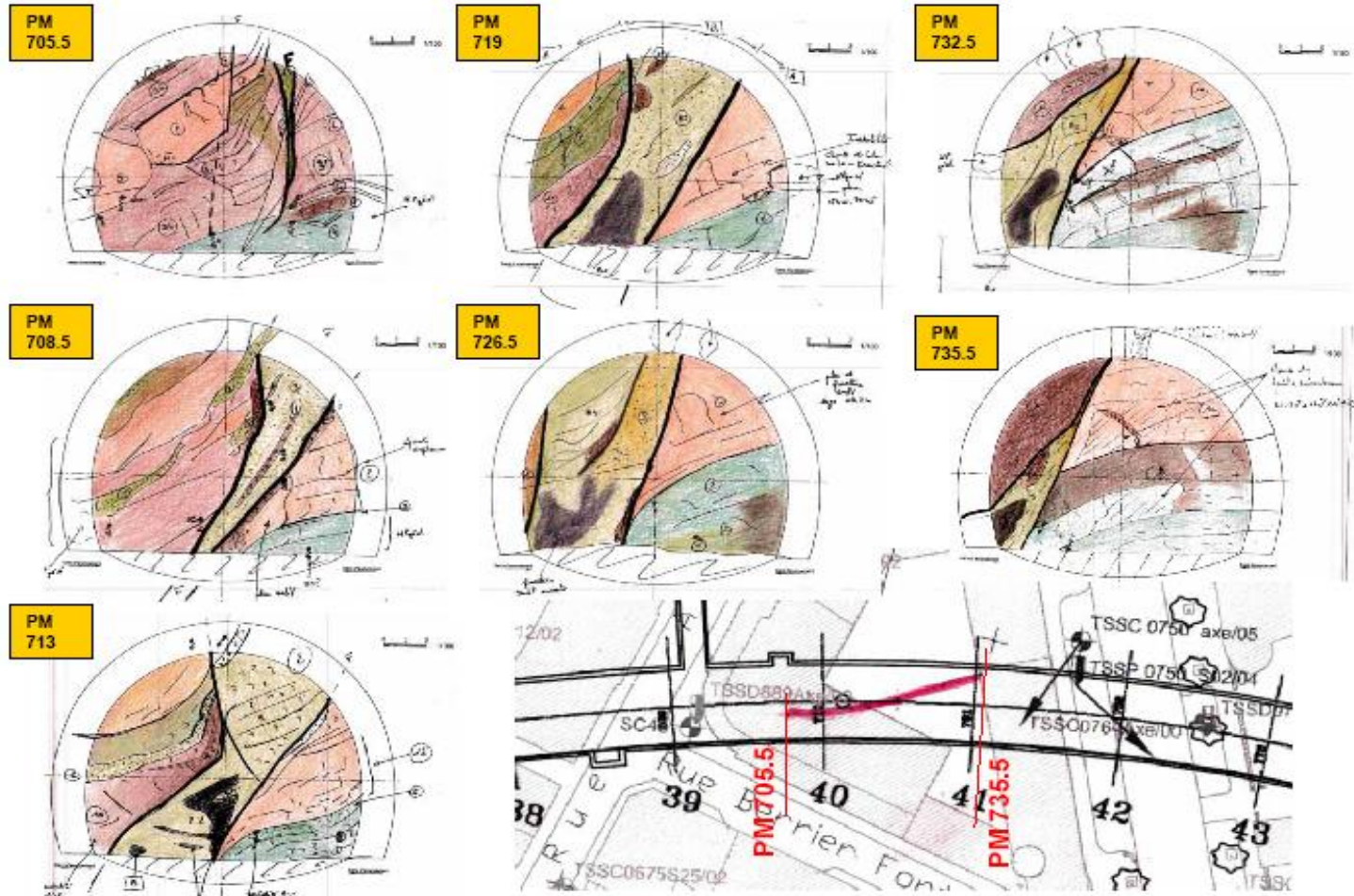
- Suivi des fronts de taille

| | Levé Géologique et Hydrogéologique | |
|--|---|--|
| Couvre: Galérie Bitubo (V2) Libé n°: G4 B10a V2-30 Date: 10/10/2019 Heure: 17h30 | DM: =197,0m (126,0m) Direction de creusement: =N140° Longueur de la trémie: =1,50m Mode d'excavation: Fraisage hydraulique | Niveau géométrique dans le secteur: =+21mNGP Couverture en clair: =19,0m Profil de soutènement: P2b élargi |
| Profil de soutènement / Atténuations acoustiques: REB190 + 23cm BPF (C30/37) en voûte et piédroits. Radier réalisé en différé : 25cm de BP (C30/37) + 1 nappes de troillis ST35+RA8 Circo à poser: V2-088 Nota: Levé réalisé contradictoirement avec la MOE (P. ASSELBORN) | | |
| Géologie en Parois | | Localisation : |
| Indice de discontinuités - ID (APTES) : ID1: orange, ID2: orange foncé, ID3: vert clair, ID4: vert foncé, ID5: bleu. Résistance - Rc (APTES) : Rc1: rouge, Rc2: orange, Rc3: orange foncé, Rc4: vert clair, Rc5: vert foncé, Rc6: bleu, Rc7: bleu foncé. Altération : AM1: orange, AM2: orange foncé, AM3: vert clair, AM4: vert foncé, AM5: bleu, AM6: bleu foncé. | Géologie : Calcaires Grossiers (CGmoy) =32,0 NGP V2 Calcaire blancâtre compact Niveau tendre Calcaire sableux plus induré S0 Calcaire sableux beige tendre Niveau plus induré CGmoy CGinf Marin =24,0 NGP Echelle : 1:100 | Légende lithologique : Suintements (bleu), Barre d'enfilage exposée (rouge) Calcaires Grossiers (CGsum): Banc de Roche (gris), Marnes (orange), Calcaire raide (bleu), Calcaire sableux (vert), Calcaire sableux plus (orange foncé). Calcaires Grossiers (CGinf): Calcaire sableux à glauconie (bleu foncé), Calcaire compacts (orange), Calcaire gréseux à glauconie (bleu). Lit argileux sombre, Lit argileux vert, Lit sablo-limoneux couleur ocre. |
| Description lithologique : Sur la plus grande partie du front: Calcaire Grossier moyen (CGmoy) : alternance de calcaires sableux homogènes localement bioclastiques et plus indurés. En calotte, banc de calcaire blancâtre plus induré. Corps de section : alternance de calcaires sableux +/- cimentés ; quelques lits centimétriques sablo-argileux. En base de section : banc de calcaire gréseux dur et niveau sablo-limoneux marquant la transition avec les Calcaires Grossiers Inférieurs (calcaire glauconieux brunâtre à lits sablo-limoneux ocre). Pour le détail on pourra se référer à la coupe géologique. | Hydrogéologie : Front et parements secs. | Éléments significatifs/synthèse : * Marnes homogènes en section et bien fracturées. * Le lit sablo-argileux n'est plus visible en calotte ; il se trouve juste au-dessus de la voûte (décollement potentiel d'éléments). |
| Description structurale : * Stratification subcirculaire (S0). - Classe APTES => "S2" / "ID3", sans évolution. | Conditions de stabilité : * Secteur homogène: le lit sablo-limoneux n'est plus visible en calotte (il se trouve juste au-dessus de la voûte). | Recommandations vis-à-vis du soutènement : * Soutènement adapté au terrain, sous réserve du respect des épaisseurs de béton de blocage. Le maintien de la longueur de trémie à 1,5m est envisageable pour la zone de réajustement entre VL C-87 et VL C-92. |
| Caractéristiques géotechniques : Calcaires sableux homogènes +/- cimentés. Globalement, résistance "faible" (SMDa=Rc2/SMDa - un coup ferme de la pointe du marteau de géologue laisse une marque en surface) ; les niveaux les plus indurés approchent ou dépassent les SMDa (notamment le niveau calcaire situé en partie haute de section). Banc dur de calcaire gréseux beige Rc=70MPa (R=100) vers la partie basse de la coupe. Calcaire glauconieux : résistance similaires aux CGmoy. REM : type IV - rocher bon à éq. (R=100) | Auscultation (Date 15/10/2019) : * Convergence = 0,11 - Galerie V2 : globalement stable. On note qqes chocs sur des cibles. * Topographie autoconstruite des bords et structures : pas de mouvement en R à proximité de la zone ascendante. - Face de Colline de l'Arche : pas de mouvements sur les cibles (< 1mm). - Colline de l'Arche (Raso) : mouvements infra-millimétriques (Ras) - 0,5mm dérivés positionnés sur la ligne 7 (R007, R007 et R0071). R007 semble se stabiliser depuis la fin septembre. | |
| Libé affecté par: S. BAUMANN Contôle par: A. MISARELLA | Transmis au Maître d'ouvrage: Date: 14/10/2019 | Vise MCF: |

Suivi géologique :

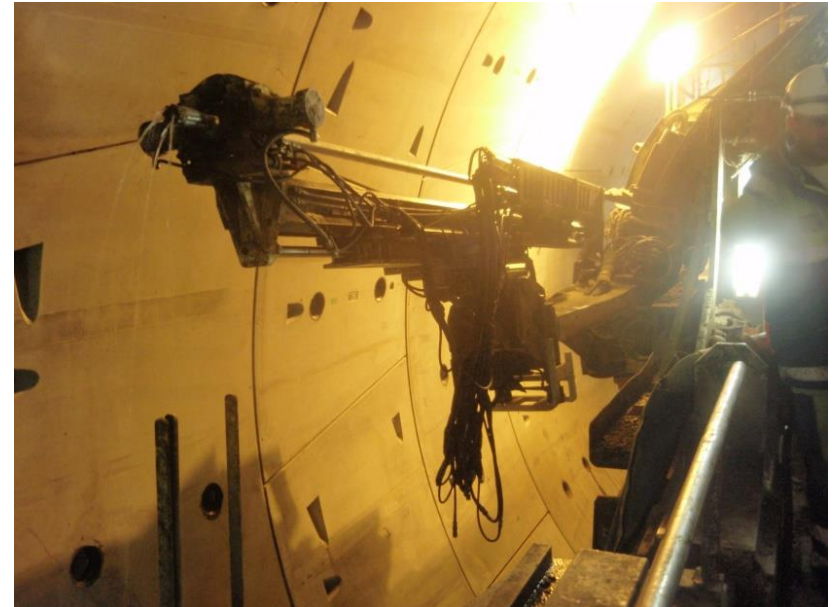
- Suivi des fronts de taille

Attaque Ouest: Géologie du PM 705 à 735



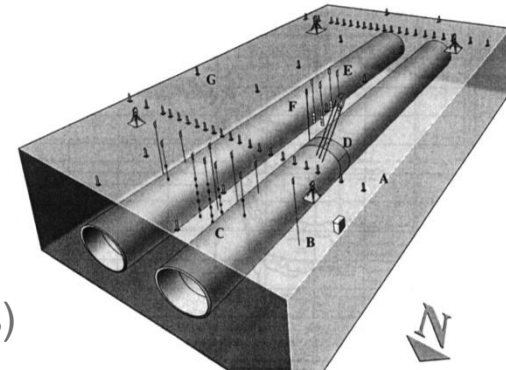
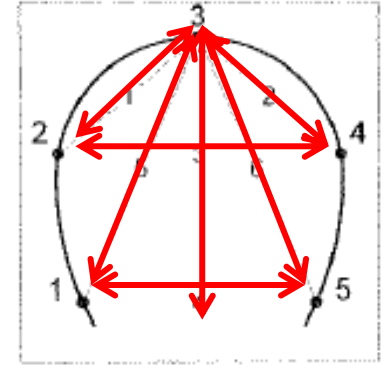
Suivi géologique :

- Suivi des fronts de taille ;
- Reconnaissances à l'avancement du front :
 - Par des forages destructifs (carottés, etc.), en général 25 à 30 m devant le front pour anticiper les variations géologiques, venues d'eau, etc. ;
 - Plus complexe à réaliser depuis un tunneliers (foreuses intégrées aux machines, soit dans l'axe à travers la roue de coupe, soit latéralement à travers la jupe);

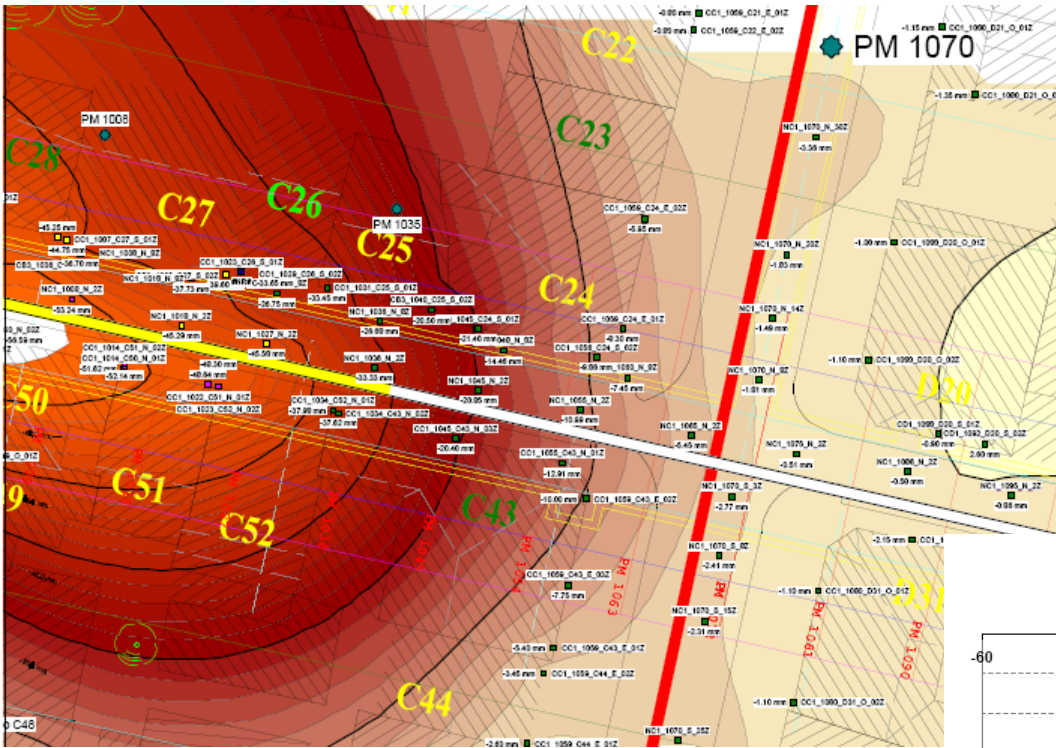


Auscultations :

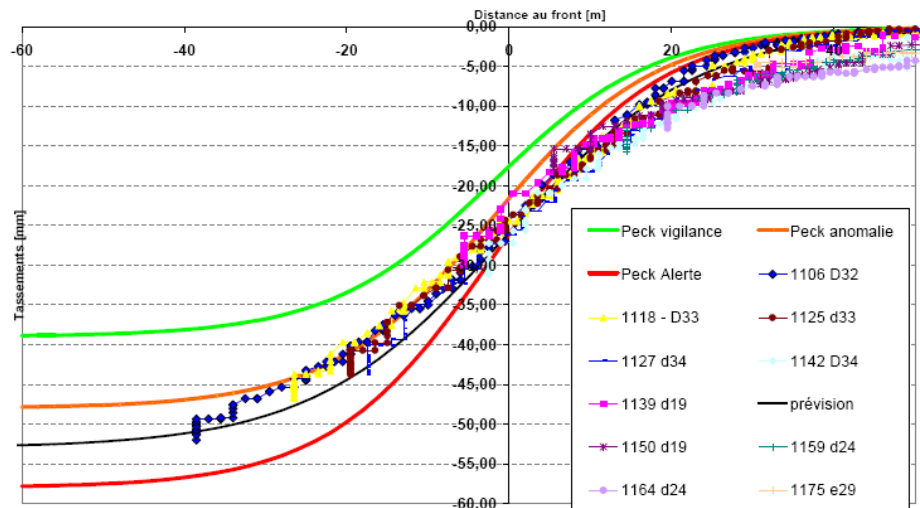
- Mesures de convergences :
 - Traditionnellement au fil Invar ;
 - Maintenant presque toujours par méthodes topo
 - Tracé de l'évolution en fonction de la date ou distance au front
- Schéma d'auscultation généralisé pour un tunnel en milieu urbain
 - Mesures topographiques en surface
 - Extensomètres en forages
 - Inclinomètres
 - Piézomètres
 - Mesures sur bâtiments
 - etc.
- Systèmes automatisés en temps réel
 - se généralise (au moins pour grands chantiers urbains)
 - Appareils automatisés (théodolites motorisés, électronique)
 - Mesures fréquences possibles (plusieurs fois par jour)
 - Transmission en temps réel sur une base de données ;
 - Accès en temps réel (en ligne) à tous les acteurs d'un chantier (avec alarmes)



5\ Suivi de chantier et auscultations \ Auscultations



Attaque Ouest : PM 1097-1175 le 04/01/2010
PM front : 1144,5



5\ Suivi de chantier et auscultations \ Percement





terrasol
Tour Central Seine
42 - 52, quai de la Rapée
75583 Paris cedex 12

Tél +33 1 82 51 68 00
info@terrasol.com

julian.marlinge@setec.com
fabien.binet@setec.com

www.terrasol.fr