

MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT INDUSTRIEL ET SCIENTIFIQUE

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL
B.P. 6009 – 45018 Orléans Cédex – Tél.: (38) 66.06.60

ÉTABLISSEMENT DES PROJETS D'EXÉCUTION DE TUNNELS SELON LA NOUVELLE MÉTHODE AUTRICHIENNE

par

C. LOUIS et J. PIRAUD



Département géologie de l'aménagement

Géotechnique

B.P. 6009 – 45018 Orléans Cédex – Tél.: (38) 66.06.60

73 SGN 426 AME

Décembre 1973

RESUME

Un projet d'exécution de tunnel est élaboré conjointement à partir des données suivantes :

- les renseignements recueillis lors des reconnaissances géologiques préliminaires ou de l'exécution de galeries expérimentales ;
- la classification géotechnique des terrains traversés ;
- les résultats des essais géotechniques ;
- les conclusions des calculs théoriques relatifs au comportement mécanique du soutènement et du massif encaissant.

Ces données servent de pièces justificatives à l'établissement du projet d'exécution proprement dit, qui comprend :

- la définition des profils-types de soutènement et leur répartition sur le tracé ;
- la description détaillée des techniques envisagées pour l'excavation et la mise en oeuvre du revêtement ;
- le programme d'auscultation de l'ouvrage pendant et après les travaux ;
- le métré (quantités mises en oeuvre) ;
- le planning d'exécution et l'organisation du chantier.

La présente note a été conçue comme devant fournir l'ossature, soit du dossier d'appel d'offres préparé par le maître d'oeuvre, soit du projet d'exécution présenté lors de la soumission par l'entrepreneur ou son ingénieur-conseil. Elle a été établie dans le cadre de la participation du B.R.G.M. à l'Association française des travaux en souterrain (AFTES), qui a constitué un groupe de travail (n° 6) spécialement consacré au béton projeté, et à la nouvelle méthode autrichienne en général.

SOMMAIRE

RESUME	<u>Pages</u>
<u>Avant-propos : L'ESPRIT de la NOUVELLE METHODE AUTRICHIENNE</u>	
A - <u>PRINCIPE FONDAMENTAL</u>	3
B - <u>CONDITIONS NECESSAIRES pour l'EXECUTION des TRAVAUX</u>	3
a) - Excavation	3
b) - Soutènement	3
C - <u>TECHNIQUES RECOMMANDEES</u>	4
a) - Nécessité de l'auscultation	4
b) - Méthodes d'excavation	4
c) - Méthodes de soutènement	4
D - <u>CONCLUSION & LIMITES de la METHODE</u>	5
 <u>ETABLISSEMENT des PROJETS d'EXECUTION de TUNNELS</u>	
1 - <u>INTRODUCTION du PROJET d'EXECUTION</u>	7
2 - <u>SYNTHESE GEOLOGIQUE et GEOTECHNIQUE</u>	7
2.1 - Synthèse géologique	7
2.2 - Hydrogéologie du site	8
2.3 - Classification géotechnique des terrains	8
2.4 - Caractéristiques mécaniques	8
2.5 - Observation d'une galerie de reconnaissance	9
3 - <u>CALCUL du COMPORTEMENT MECANIQUE du REVETEMENT et du MASSIF</u>	9
3.1 - Avertissement sur le calcul	9
3.2 - Approche théorique par la méthode des éléments finis	10
3.3 - Représentation de Mohr	11
3.4 - Justification du revêtement définitif	11
4 - <u>DEFINITION et REPARTITION des TYPES de REVETEMENT</u>	11
4.1 - Types de soutènement	11
4.2 - Variantes	12
4.3 - Distance entre profils	15
4.4 - Etude des têtes de l'ouvrage	15

5 - <u>TECHNIQUES d'EXCAVATION</u>	16
5.1 - Répartition des types d'excavation	16
5.2 - Excavation à l'explosif	16
5.3 - Excavation mécanique	17
6 - <u>MISE en OEUVRE du REVETEMENT</u>	17
6.1 - Béton projeté	17
6.2 - Treillis soudé	18
6.3 - Boulons	18
6.4 - Cintres	19
6.5 - Drainage et étanchéité	19
7 - <u>AUSCULTATION de l'OUVRAGE et du MASSIF</u>	19
7.1 - But de l'auscultation	19
7.2 - Description et emplacement des appareils de mesure	20
7.2.1 - Liste des appareils à mettre en oeuvre	20
7.2.2 - Profils de mesures	20
7.3 - Préparation et exécution des mesures	21
7.3.1 - Installation des appareils	21
7.3.2 - Equipes et fréquence de mesure	22
8 - <u>METRE</u>	
8.1 - Généralités	22
8.2 - Excavation	22
8.3 - Revêtement	22
8.4 - Auscultation	23
9 - <u>PLANNING et ORGANISATION du CHANTIER</u>	23
9.1 - Délais et planning	23
9.2 - Organisation des postes d'attaque	23
9.3 - Organisation générale du chantier	24
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	25

Avant - propos :

L'ESPRIT DE LA NOUVELLE METHODE AUTRICHIENNE

A - PRINCIPE FONDAMENTAL

L'idée de base de la nouvelle méthode autrichienne est de tirer profit au maximum des propriétés mécaniques de la roche encaissante, si faibles soient-elles, pour soutenir et stabiliser une cavité artificielle. Le revêtement du tunnel n'est conçu que comme un traitement de la roche, qui améliore ses caractéristiques et ne lui laisse ni le temps ni la possibilité de se décompresser. Il ne s'agit plus de construire comme à l'air libre un ouvrage d'art à l'intérieur d'une cavité immatérielle creusée au préalable. C'est pourquoi la méthode autrichienne ne peut être, en fin de compte, que plus économique que les techniques classiques, puisqu'elle fait "payer" par la roche elle-même l'essentiel du travail de soutènement.

B - CONDITIONS NECESSAIRES POUR L'EXECUTION DES TRAVAUX

L'objectif fondamental de la nouvelle méthode autrichienne ne peut être atteint que si les travaux sont menés en respectant un certain nombre de conditions :

a) - Excavation

Lors du creusement de la cavité, il faut s'efforcer d'abimer le moins possible la roche laissée en place ; l'excavation devra donc être telle que :

- sa surface soit régulière et soignée, à l'exclusion de tout angle vif et de formes convexes (rentrantes)
- le massif encaissant soit le moins possible ébranlé
- la surface mise à nu en calotte et sur le front soit stable par elle-même durant le temps nécessaire à la mise en oeuvre du revêtement.

b) - Soutènement

Un revêtement satisfaisant doit présenter les caractères suivants :

- être mis en oeuvre immédiatement après l'excavation (comme tout traitement, il doit être appliqué à temps, sous peine d'être inefficace : plus l'on attend, plus le remède nécessaire devient lourd et coûteux)
- faire corps avec le rocher encaissant et y adhérer parfaitement
- être assez souple pour s'adapter sans dommage aux réactions du massif jusqu'à ce que l'équilibre des poussées soit atteint
- être composé d'éléments assez maniables pour pouvoir être modifié facilement à l'avancement selon les conditions rencontrées, sans

avoir pour cela à bouleverser le chantier ni à changer le diamètre de l'excavation

- protéger immédiatement le terrain découvert de l'altération à l'air.

C - TECHNIQUES RECOMMANDEES

Cet ensemble de conditions conduit à adopter les méthodes suivantes :

a) - Nécessité de l'auscultation

L'ingénieur doit rester sans cesse à l'écoute du massif ; des mesures permanentes de contrainte et surtout de déformations doivent permettre :

- de comparer le comportement réel du massif avec les hypothèses prises en compte dans le calcul et le projet
- de vérifier constamment l'efficacité du revêtement
- de le renforcer ou l'alléger, s'il y a lieu.

b) - Méthodes d'excavation

La nécessité de préserver la qualité du rocher conduit à préférer l'excavation mécanique dans toute la mesure du possible. Quand l'utilisation de l'explosif est inévitable, le prédécoupage s'impose, ou à défaut le découpage soigné.

L'impératif de la stabilité à court terme de la surface mise à nu conduit le plus souvent à diviser la section d'attaque. L'avancement sera optimisé en jouant également sur la longueur de la passe, de façon à excaver chaque fois le volume maximal compatible avec la stabilité du front et de la calotte.

c) - Méthodes de soutènement

Les conditions énoncées en B.b impliquent que le revêtement immédiat ait un caractère définitif ; ces conditions peuvent être satisfaites par l'emploi d'une combinaison des trois techniques suivantes :

- le boulonnage qui reporte en profondeur les poussées de surface et augmente la cohésion du massif, en créant autour de la cavité un anneau porteur de "roche armée" (son effet pratique immédiat est de limiter les déformations).
- le béton projeté, qui peut être mis en oeuvre immédiatement, ciment les blocs et assure un contact continu avec la roche en épousant parfaitement sa forme ; renforcé par des nappes de treillis soudé, il travaille comme une coque mince qui est capable d'apporter (après

une légère convergence) la pression de confinement nécessaire à la stabilité de la roche.

- éventuellement les cintres légers (bloqués au rocher et enrobés de béton), qui reprennent les efforts transmis par la coque de béton, les répartissent tout au long de l'arc et les renvoient en profondeur par l'intermédiaire des boulons auxquels ces cintres sont suspendus ; dans le cas de terrains poussants, ils augmentent la rigidité du revêtement et diminuent donc la convergence nécessaire pour atteindre l'équilibre.

D - CONCLUSION ET LIMITES DE LA METHODE

Ainsi, la mise en oeuvre d'un "soutènement immédiat continu" s'appuie sur six éléments fondamentaux :

- Auscultation permanente
- Découpage soigné
- Attaque en section partielle
- Boulonnage
- Béton projeté
- Cintres légers

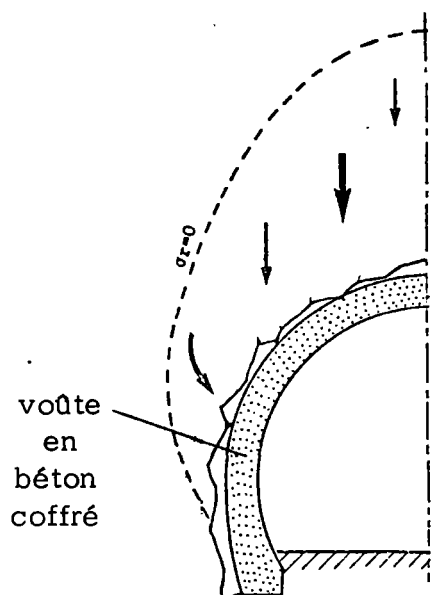
Dans certains cas, certains éléments n'apparaîtront pas nécessaires, sous réserve que les conditions énoncées précédemment soient satisfaites. D'ailleurs, cette série de techniques conformes à l'esprit de la nouvelle méthode autrichienne n'est pas, a priori, exhaustive.

Cette méthode trouve actuellement ses limites techniques dans deux cas :

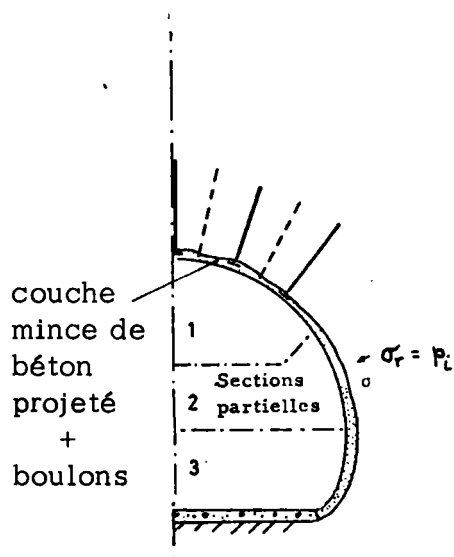
- lorsque des venues d'eau excessives empêchent la mise en oeuvre du béton projeté ;
- lorsque le terrain est trop peu cohérent pour qu'une excavation d'une dizaine de mètres cubes soit stable pendant le temps nécessaire à la mise en place de son soutènement.

Les principaux avantages que présente la méthode autrichienne, du point de vue mécanique, par rapport aux méthodes traditionnelles, sont schématisés sur la figure 1.

METHODE TRADITIONNELLE

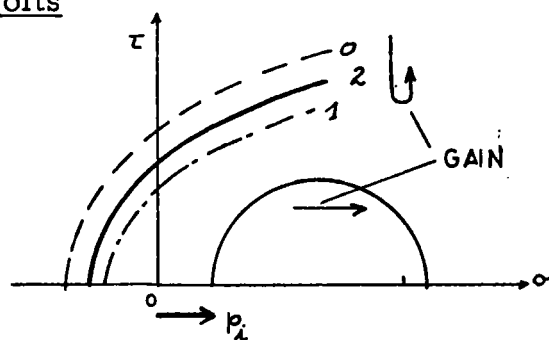
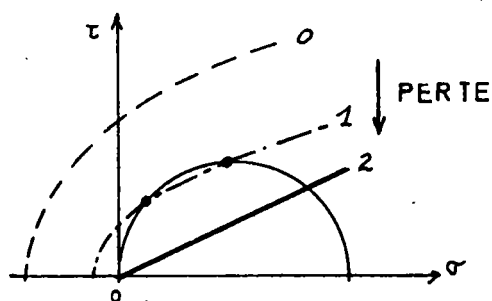


METHODE AUTRICHIENNE

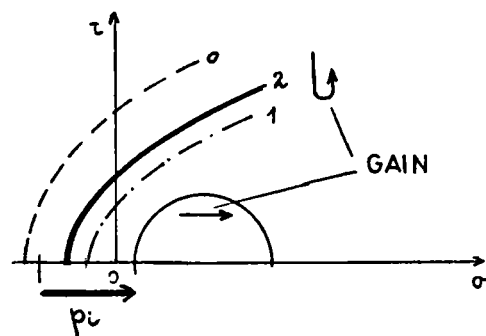
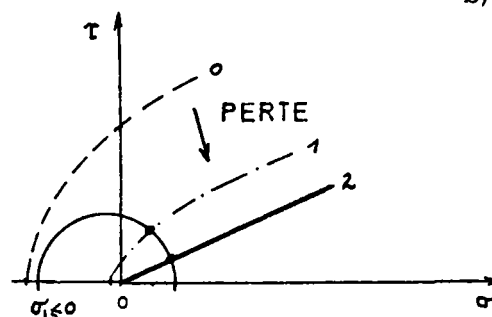


p_i = pression de confinement induite par le béton projeté et les boulons après une légère convergence

a) en piedroits



b) en couronne



--- 0 initiale
 Courbes intrinsèques -.-.- 1 après excavation
 — 2 après soutènement

Fig. 1 Comparaison de la méthode traditionnelle et de la méthode autrichienne du point de vue de l'évolution de l'état de contrainte au contact béton-rocher (représentation de MOHR)

ETABLISSEMENT DES PROJETS D'EXECUTION DE TUNNELS

1 - INTRODUCTION DU PROJET D'EXECUTION

Un projet d'exécution de tunnel doit commencer par un certain nombre de renseignements introductifs rappelant :

- le cadre juridique du projet,
- l'historique des études et reconnaissances antérieures avec la liste des organismes qui les ont exécutées,
- l'implantation géographique et géologique de l'ouvrage, et sa géométrie (tracé, profil en long, profils en travers),
- les diverses variantes de tracé envisagées et les raisons principales qui ont fait retenir la variante proposée.

2 - SYNTHESE GEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE

Ce chapitre doit faire la synthèse de toutes les données géologiques et géotechniques recueillies au cours des diverses phases de la reconnaissance. Il revêt une importance particulière lorsque la mise en oeuvre d'un revêtement continu immédiat est envisagée : en effet, si l'on veut faire participer la roche elle-même au travail de soutènement, il est essentiel de savoir dans quelle mesure elle en est capable.

2.1 - Synthèse géologique

Elle doit grouper les renseignements tirés :

- des observations de surface
- des reconnaissances par sondages
- des campagnes géophysiques de surface
- des observations dans les galeries de reconnaissance

Ces données seront portées sur une coupe longitudinale synthétique et des coupes en long et en travers, aussi détaillées que possible et dessinées sans distorsion des échelles ; chaque type de terrain fera l'objet d'une description lithologique et minéralogique précise.

De plus, dans le cas d'un massif rocheux, on fera la synthèse des données structurales (obtenues par relevés en surface, en sondage et en galerie) en donnant :

- la description de la fracturation (nature des fissures, ouverture, continuité, rugosité, remplissage),
- l'orientation par rapport au tunnel des différentes familles de discontinuités, en soulignant celles qui sont les plus défavorables

- pour la stabilité (au front, en piedroit et en calotte) ,
- la dimension du bloc moyen (maille).

2.2 - Hydrogéologie du site

Devront être précisées :

- la piézométrie de la nappe éventuelle et ses variations
- la perméabilité des terrains
- les zones où les venues d'eau sont à craindre, avec estimation précise de leur débit tout au long du tracé
- les zones où des poussées dues au gradient hydraulique vers la cavité sont à craindre.

2.3 - Classification géotechnique des terrains

Trois types de classifications analytiques pourront être étudiées :

- une classification intrinsèque des matériaux (par exemple la dureté pour l'excavation mécanique au tunnelier);
- une classification des formations rocheuses tenant compte d'une part de la résistance de la matrice (indice Franklin par exemple), d'autre part de la maille de la fracturation (RQD par exemple) ; cette classification servira de base à la détermination de la technique d'excavation ;
- une classification hydrogéologique intégrant la perméabilité, la piézométrie et éventuellement les pressions de gonflement.

Tout au long du tunnel les terrains seront ainsi classées vis-à-vis de ces divers critères ; puis sur chaque tronçon du tunnel, les valeurs (chiffres ou lettres) de ces divers critères seront mises en parallèle et superposées (si possible sommées), compte tenu de leur importance relative, de la hauteur de recouvrement et du diamètre du tunnel. Cette méthode permettra d'aboutir à une classification globale relative à la tenue des terrains . Si une galerie de reconnaissance a été percée et étudiée au fur et à mesure de son avancement, il sera particulièrement indiqué de se référer à la classification de LAUFFER (utilisant comme facteurs la durée de stabilité de l'excavation et sa dimension minimale). Ces classes de terrain, en nombre limité (5 à 7 au maximum) seront mises en correspondance directe avec les divers types de revêtement.

2.4 - Caractéristiques mécaniques

a) Résistance mécanique

Les essais géotechniques, réalisés in situ ou en laboratoire, ont pour but essentiel de déterminer les caractéristiques mécaniques précises des roches à l'intérieur des différentes classes de

terrain définies précédemment à partir d'essais rapides. Ainsi, pour chaque type de roche prélevé en surface, en sondage et en galerie, on déterminera la courbe intrinsèque, sinon par des essais triaxiaux ou de cisaillement, du moins par des essais de traction indirecte et de compression simple. Dans le cas de massif rocheux discontinu, c'est surtout dans les joints qu'il importe de mesurer la cohésion et l'angle de frottement.

b) Déformabilité

Si le projet prévoit des calculs théoriques de contraintes et de déformations, il est nécessaire de déterminer les caractéristiques de déformabilité des matériaux par des mesures sur échantillons ou in situ.

c) Etat de contrainte

La mesure des contraintes naturelles au voisinage des parois d'une galerie expérimentale fournit des renseignements extrêmement précieux ; malheureusement c'est là une opération assez délicate, et très coûteuse. Ces valeurs de contraintes (mesurées ou, à défaut, calculées) seront alors confrontées avec les caractéristiques de résistance du terrain encaissant, afin de prévoir la pression de confinement nécessaire que doit apporter le revêtement ; cette pression est l'un des paramètres principaux servant à dimensionner le soutènement.

2.5 - Observation d'une galerie de reconnaissance

Si une galerie de reconnaissance (et éventuellement une section expérimentale) est réalisée, il est très important que tous les faits qui ont marqué la vie de cette galerie soient notés (ou recherchés), cités dans le projet et exploités à fond ; il s'agit en particulier de la technique d'excavation, de la vitesse d'avancement, du revêtement utilisé et de son évolution jusqu'à la date du projet. La galerie de reconnaissance permet enfin la meilleure observation possible des caractéristiques géotechniques du site ; il faut toutefois veiller à ce que son implantation dans le profil ne soit pas néfaste à l'exécution du tunnel proprement dit.

3 - CALCUL DU COMPORTEMENT MECANIQUE DU REVETEMENT ET DU MASSIF

3.1 - Avertissement sur le calcul

Dans l'état actuel des connaissances, l'analyse par voie théorique du comportement du massif autour d'une excavation souterraine n'est pas très satisfaisante. Les méthodes classiques de calculs des revêtements bétonnés ou appareillés, considérés comme des arcs

articulés ou des anneaux soumis à des surcharges hypothétiques, sont le plus souvent irréalistes ; elles sont a fortiori inapplicables à une coque mince de béton projeté soutenant un anneau de roche armée.

D'une manière générale, quatre facteurs s'opposent à un dimensionnement rigoureux du revêtement par voie théorique :

- a) Les phénomènes les plus importants (concentration de contraintes, déformations rapides) se produisent au voisinage immédiat du front de taille. Le problème est donc essentiellement tridimensionnel, alors que la théorie ne permet pour le moment une analyse satisfaisante qu'à deux dimensions.
- b) Le facteur temps a un rôle prépondérant mais encore mal connu : tout se "joue" pendant l'excavation et dans les instants qui la suivent. Or aucune analyse théorique ou expérimentale correcte n'a pu être faite sur le processus de décompression de la roche (desserage et "foisonnement") et sur ses conséquences : chute plus ou moins rapide de la résistance mécanique du massif. C'est l'histoire de la cavité, plus que ses caractéristiques géométriques et mécaniques, qui déterminera son comportement ultérieur.
- c) Non seulement la structure réelle du massif, qui est le plus souvent discontinu, hétérogène et anisotrope, ne peut être intégrée dans le calcul, mais cette structure même, de par son caractère aléatoire, est difficilement accessible à l'observation et à la mesure.
- d) Le soutènement continu immédiat est le siège de phénomènes localisés (au contact béton-rocher, au voisinage des boulons et de leur tête) qu'il est difficile de faire entrer dans le calcul.

3.2 - Approche théorique par la méthode des éléments finis

Une approche théorique élémentaire est possible en restant dans le domaine de l'élasticité linéaire ou de l'élastoplasticité à deux dimensions et moyennant quelques hypothèses simplificatrices :

- le terrain a subi une décompression donnée ;
- l'anneau porteur en roche armée est doté de caractéristiques virtuelles globales améliorées (pour tenir compte des boulons).

Le calcul par éléments finis doit intégrer :

- des conditions aux limites (contraintes initiales et déformations imposées) ;
- des lois de comportement (paramètres de déformabilité E et ν des divers matériaux) ;

- des critères de rupture (courbes intrinsèques et déformations maximales admissibles).

Le maillage du modèle doit porter sur l'ensemble de l'espace, la géométrie des éléments devant permettre une décharge exacte (conforme au schéma d'abattage) dans le tunnel et un remplacement du terrain naturel soit par du béton projeté, soit par un matériau partiellement affaibli.

Une autre approche consiste à considérer que le terrain est soumis sur le profil d'un tunnel à une pression de confinement stabilisatrice induite par la rigidité du béton projeté et des ancrages.

La simulation du comportement du massif dans le temps est obtenue par le biais d'itérations sur les critères de rupture. Le modèle sera peu à peu calé et perfectionné grâce aux résultats des mesures de contrainte et de déformation faites au cours des travaux dans les profils de mesure.

3.3 - Représentation de MOHR

Dans tous les cas, il sera bon de se baser sur le critère de Mohr au contact béton-rocher en piédroit pour prévoir la pression de confinement que doit apporter le revêtement immédiat et pour déterminer les limites d'application de la méthode. Eventuellement, cette méthode permettra aussi de fixer les caractéristiques mécaniques minimales à donner au terrain (par exemple en l'injectant) si celles-ci s'avèrent insuffisantes à l'état naturel.

3.4 - Justification du revêtement définitif

Les fondateurs de la nouvelle méthode autrichienne considèrent que le revêtement immédiat doit être capable seul de stopper les déformations provoquées par l'excavation ; indépendamment des questions d'étanchéité et d'esthétique, le revêtement définitif de béton coffré ne serait donc pas sollicité, et servirait seulement à accroître la sécurité en s'opposant aux déformations mal connues qui interviennent à long terme du fait du fluage du massif au cours des années. En tout état de cause, il y aura lieu de justifier les épaisseurs choisies pour cet anneau de béton coffré (+).

4 - DEFINITION ET REPARTITION DES TYPES DE REVETEMENT

4.1 - Types de soutènement

A chaque classe géotechnique de terrain définie en 2.3 sera asso-

(+) Ce problème délicat est l'objet d'un groupe de travail de l'AFTES (n°7).

cié un type de revêtement approprié, schématisé par son profil-type ; pour l'organisation du chantier, il est cependant souhaitable que ces types ne soient pas trop nombreux et qu'ils ne varient pas continuellement tout au long du tracé. D'autre part il ne faudra pas perdre de vue qu'un type de revêtement n'a pas de valeur en soi, mais est indissociable de son délai de mise en oeuvre. On indiquera donc, pour chaque profil-type :

- les phases d'excavation et la longueur de la passé d'avancement par section partielle excavée ;
- les caractéristiques du revêtement immédiat (nombre et épaisseur des couches de béton projeté, nombre et type d'ancrages, de cintres, de treillis) ;
- les caractéristiques du revêtement définitif ;
- les phases d'exécution du revêtement et les délais à respecter, en insistant particulièrement sur les opérations à faire impérativement au cours du poste suivant l'excavation.

Ces éléments seront mis en évidence sur les documents graphiques suivants, établis pour chaque type de soutènement :

- une coupe transversale du tunnel au 1/100 avec mention des phases d'excavation ;
- une coupe longitudinale au 1/100 de la zone d'attaque, avec le déphasage spatial réel à un moment donné, et l'indication des opérations futures par des zones en pointillé numérotées ;
- une coupe-type du revêtement au 1/10 au niveau des cintres et des boulons.

Ces documents seront évidemment complétés par un profil en long de l'ouvrage, indiquant la répartition des techniques d'abattage et des profils-types.

A titre d'exemple, les figures 2 et 3 montrent un profil en long avec classification géotechnique des terrains traversés en vue, d'une part, de l'abattage et d'autre part, du soutènement.

4.2 - Variantes

Plusieurs variantes peuvent être proposées, en particulier à propos du revêtement définitif (en béton projeté ou béton coffré) et de son délai de mise en oeuvre. Tout ce qui a été signalé au paragraphe 4.1 devra être repris intégralement pour chaque variante proposée.

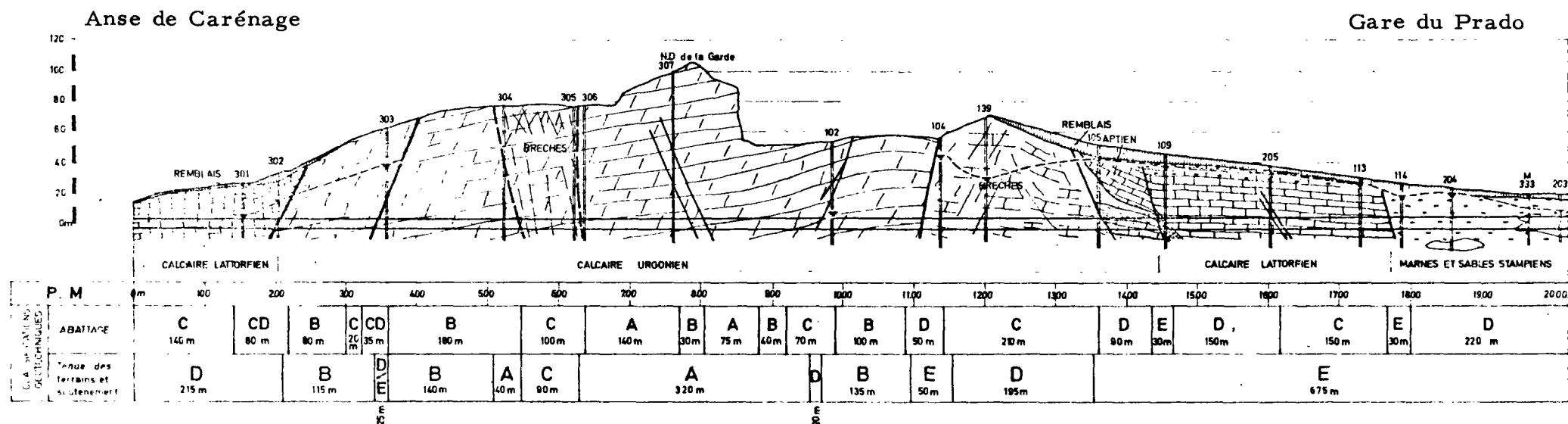
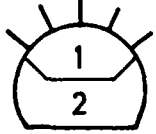
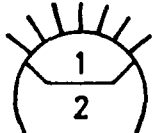
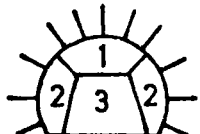
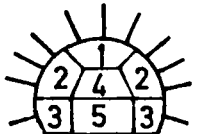


Fig. 2 - Profil longitudinal du tunnel Centre ville à Marseille (tube en site vierge)
La classification relative à l'abattage tient compte des critères de résistance et de fracturation. La classification relative au soutènement intègre en plus trois paramètres hydrauliques (piézométrie, perméabilité et pression de gonflement).

Classe de terrain	Nature	Longueur et pourcentage		Tenue des terrains	Mode d'excavation	Représentation schématique	Longueur d'abattage	Moyens de soutènement immédiat
A	Urgonien sain	360 m	18 %	très bonne	explosif avec découpage fin		3 m ⁽⁺⁾	1 boulon de 3 à 4 m pour 10 m ² 8 cm de béton projeté 1 nappe de treillis soudé
B	Urgonien fissuré Urgonien sain avec charge hydraulique	390 m	19 %	bonne	explosif avec découpage fin		1,5 à 3 m	1 boulon pour 8 m ² 15 cm de béton projeté 1 à 2 nappes de treillis soudé
C	Urgonien bréchique	90 m	4 %	moyenne	mécanique ou explosif avec réserves		1,5 à 2,5 m	1 boulon pour 5 m ² 18 cm de béton projeté 2 nappes de treillis soudé
D	Urgonien bréchique - Brèches Lattorfien - Terrains en charge hydr.	455 m	23 %	mauvaise (venues d'eau)	mécanique ⁽⁺⁺⁾		1 à 2 m	1 boulon pour 4 m ² 21 cm de béton projeté 2 nappes de treillis soudé
E	Brèches argil. Lattorfien très fissuré - Stampien - Zones faillées - Terrains en charge hydr.	725 m	36 %	très mauvaise, venues d'eau	mécanique ⁽⁺⁺⁾		0,80 à 1,5 m	1 boulon pour 3 m ² cintre léger et barrette 24 cm de béton projeté 3 nappes de treillis soudé

Total 2020 m en tunnel pour 260 m en tranchée couverte à l'entrée est dans le Stampien (de classe E)

(+) L'importance des tirs de mines sera limitée par des considérations de nuisances en site urbain (vibrations)

(++) L'explosif pourra éventuellement être utilisé dans les terrains classés D et E, uniquement pour des critères hydrauliques

Fig. 3 - Classification préliminaire des terrains sur le tracé en site vierge du tunnel Centre ville à Marseille (portion en tunnel) pour la tenue des terrains et le mode d'exécution au front de taille.

4.3 - Distance entre profils

Pour des raisons de chantier, il est recommandé de ne pas faire varier sans cesse des paramètres tels que le diamètre de l'excavation, le nombre de boulons d'une section transversale, l'inertie des cintres, etc. Aussi s'efforcera-t-on de définir un profil-type correspondant au revêtement moyen que nécessite l'ouvrage pour la passe d'excavation optimale ; ce profil-type commun pourra être mis en oeuvre dans différentes classes de terrains en jouant seulement sur la distance entre profils, c'est-à-dire entre cintres ou nappes de boulons, etc. Ce système permet de plus de jouer sur l'épaisseur de béton projeté sans modifier le diamètre de l'excavation, par le biais de la création de petites voûtes toriques entre cintres.

4.4 - Etude des têtes de l'ouvrage

La stabilité des têtes de l'ouvrage est un problème délicat et souvent négligé qui devra faire l'objet d'études spécifiques, en particulier du point de vue de la stabilité du talus où est taillée l'entrée du tunnel.

Des techniques d'excavation et de revêtement particulières seront en général proposées pour les zones d'entrée.

La figure 4 ci-dessous donne à titre d'exemple les coupes transversale et longitudinale de l'attaque d'un tunnel en terrain de classe D.

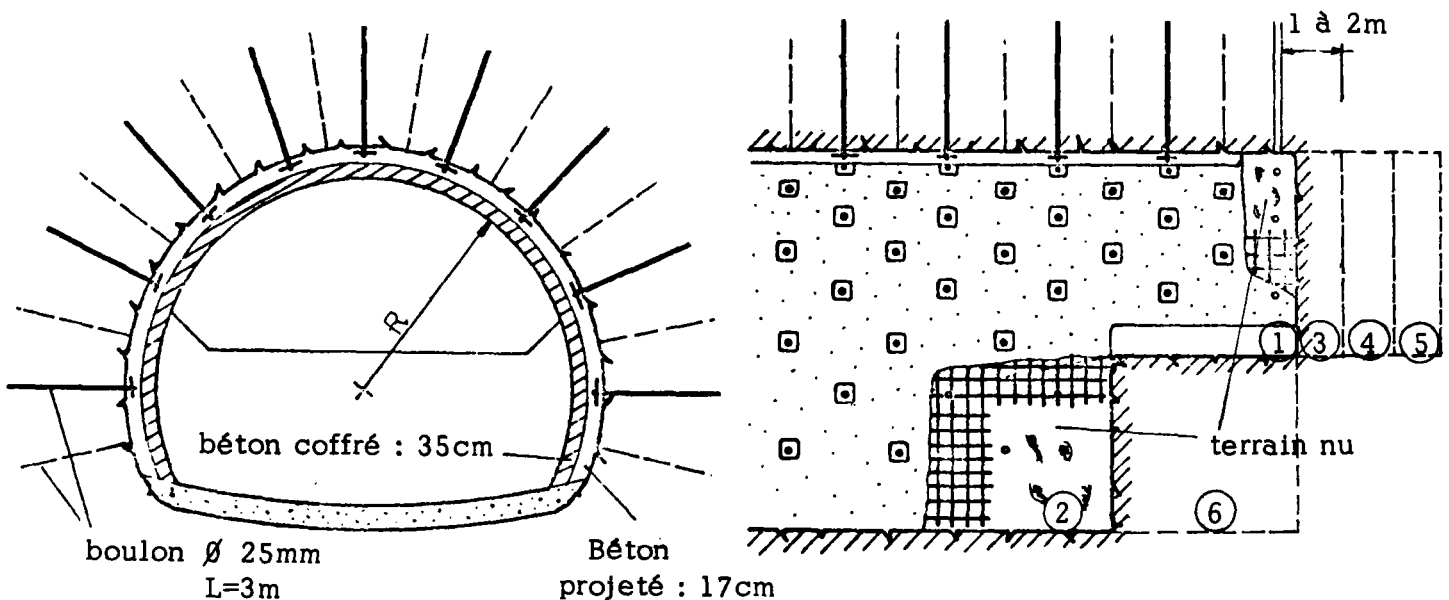


Fig. 4 : exemple de profil-type en terrain D pour une section inférieure à 70 m²

5 - TECHNIQUES D'EXCAVATION

5.1 - Répartition des types d'excavation

L'étude des techniques optimales d'excavation doit être faite avec un soin particulier étant donné l'importance des investissements en matériel lourd qu'elle implique et l'influence essentielle que l'abattage a sur le comportement ultérieur du massif. Ces choix sont en général irréversibles, alors que les caractéristiques du revêtement peuvent être, par nature, facilement modifiées.

La deuxième classification géotechnique des terrains citée en 2.3 doit permettre de prévoir la répartition exacte des diverses méthodes à employer tout au long du tracé, aussi bien pour les sections partielles supérieures que pour le ou les stross, s'il y a lieu.

En règle générale, l'abattage se fera au maximum par voie mécanique, le recours à l'explosif ne devant intervenir qu'en cas de nécessité absolue (selon des critères techniques et économiques très stricts).

5.2 - Excavation à l'explosif

La mise en oeuvre du revêtement immédiat continu sous-entend de façon impérative que l'excavation ne donne pas de hors-profils et ménage au maximum le terrain. Cela impose le recours soit au prédécoupage, soit au découpage fin.

Le projet devra donc comporter une étude détaillée :

- du matériel de perforation nécessaire (jumbo), de sa puissance et du degré de précision qu'il doit atteindre pour le positionnement et le parallélisme des bras ; ces caractéristiques dépendent essentiellement des dimensions de l'excavation et de la résistance de la matrice rocheuse (paragraphe 2.3, 1er alinéa) ;
- des plans de tir (charges, types d'explosifs et des retards), généralement différents pour chaque classe de terrain ;
- de la longueur optimale des volées, compte tenu des facteurs géotechniques et de la puissance du matériel de marouflage ; il faudra se garder des volées trop longues, car le déblaiement du front fait perdre un temps précieux aux opérations de revêtement, qui sont essentielles. En fait, ce sont les possibilités de marouflage qui constituent le plus souvent le goulot d'étranglement d'un cycle de travail.

En site urbain, les possibilités du tir sont sévèrement limitées et un contrôle des vibrations devra être envisagé, conduisant à une adaptation des plans de tir. Un programme d'essais de prédécoupage

ou découpage fin devra de toute façon être intégré au planning des travaux, ces essais ne pouvant se faire qu'en vraie grandeur et in situ.

5.3 - Excavation mécanique

La latitude dans le choix du matériel est plus grande, étant donné la variété des engins (pelles, chargeurs, fraises, brise-roche) ; le choix devra se faire à partir d'une classification géotechnique des terrains qui combine résistance et fracturation. La machine retenue sera dimensionnée pour les caractéristiques du terrain le plus dur non attaqué à l'explosif. Dans le cas de terrains hétérogènes, elle devra permettre une excavation aussi variée que possible, en surface et profondeur excavées.

Afin de laisser le moins longtemps possible à nu le terrain excavé, il faudra explorer toutes les possibilités de marinage rapide ou fractionné, par exemple

- en déblayant seulement une aire de travail au pied du front de taille afin de commencer immédiatement le revêtement ;
- en laissant au centre du front de taille un noyau stabilisateur aussi volumineux que possible, qui ne sera excavé qu'une fois le revêtement terminé ;
- en divisant, tout simplement, la section.

6 - MISE EN OEUVRE DU REVETEMENT

Ce chapitre doit décrire en détail la technologie et la mise en oeuvre des différents éléments du revêtement, avec des spécifications suffisamment précises pour pouvoir être utilisé comme un véritable cahier des prescriptions, les caractéristiques géométriques du revêtement étant déjà fixées au chapitre 4.1 (profils-types). Il doit de plus indiquer les valeurs de résistance minimales garantissant la qualité des éléments de revêtement mis en oeuvre.

6.1 - Béton projeté

Le maître d'oeuvre devra indiquer :

- le procédé de projection (sec ou mouillé) recommandé pour le revêtement immédiat ;
- la taille du plus gros granulat ;
- les contrôles auxquels devront être soumis les granulats, et leur fréquence ;
- le dosage minimal en ciment ;

- la résistance minimale à atteindre à 48 heures et 28 jours, en précisant le mode de prélèvement des échantillons (carottage in situ ou dans des caisses) ;
- les types d'accélérateurs de prise qui ne sont pas agréés.

Dans le cas de roches graphiteuses ou sériciteuses, il pourra être demandé d'effectuer des essais d'adhérence du béton projeté grâce à un dispositif mesurant la force nécessaire à l'arrachement d'une petite plaque de revêtement.

Le système destiné à contrôler l'épaisseur des couches de béton projeté, ainsi que sa tolérance, devra être précisé ; pour cela, des barres de fer calibrées et enfoncées normalement à la paroi seront utilisées avantageusement ("piges").

D'un autre côté, pour faciliter la réception du revêtement immédiat et le calcul de la cubature du béton coffré définitif, il est recommandé d'employer la méthode de photoprofils, qui se prête bien à un traitement par ordinateur.

6.2 - Treillis soudé

Devront être indiqués :

- la dimension optimale des nappes de poids unitaire donné pour chaque type de revêtement (en fonction des volumes élémentaires excavés) ;
- la largeur de la zone de recouvrement entre nappes de treillis ;
- le nombre de points de fixation du treillis à la paroi, non compris l'effet des boulons et des cintres.

6.3 - Boulons

Etant donné la sensibilité des divers types d'ancrages à la qualité du terrain, il sera bon d'envisager divers procédés de boulonnage, et de mettre au point un programme d'essais important destiné à déterminer la technologie optimale dans chaque terrain. Le maître d'oeuvre devra préciser :

- la valeur de résistance à l'arrachement exigée pour les boulons ;
- le procédé de mesure et la probabilité tolérée d'atteindre le résultat ;
- la localisation des essais et leur fréquence ;
- la limite au-dessous de laquelle un terrain sera considéré contractuellement comme non boulonnable pour une technologie donnée ; un critère de boulonnabilité devra si possible être établi.

6.4 - Cintres

Dans le cas de cintres coulissants, le projet devra préciser :

- le nombre optimal d'éléments de cintre pour couvrir le profil complet et leur longueur de recouvrement ;
- la nature de la liaison entre éléments de cintre (force de serrage des étriers) ;
- le nombre de barrettes ou fers à béton à fixer ou à souder entre deux cintres voisins pour créer une rigidité longitudinale ;
- le blocage éventuel des cintres au terrain (force de précontrainte) ;
- la nature de l'appui éventuel des pieds du cintre sur le radier ;
- la position des trous à préparer pour enfiler les boulons.

Lorsqu'un revêtement comprend à la fois béton, treillis, boulons et cintres, l'ordre de mise en oeuvre devra être étudié avec le plus grand soin, compte tenu des nécessités du chantier. L'ordre recommandé est le suivant :

- a) pose du treillis soudé, en le fixant seulement au treillis de la passe précédente ;
- b) pose du cintre, qui plaque le treillis contre la paroi ;
- c) pose des boulons à travers les trous prévus dans les cintres, et serrage des plaques ;
- d) projection du béton de telle sorte que toutes les pièces métalliques disparaissent sous un enrobage de 2 cm.

6.5 - Drainage et étanchéité

Une coupe longitudinale indiquera les zones où des dispositifs de drainage et d'étanchéité seront à prévoir ; ces dispositifs et leur technique de mise en oeuvre seront décrits ; il faudra préciser avec soin comment ces opérations s'intercalent dans le processus de revêtement.

7 - AUSCULTATION DE L'OUVRAGE ET DU MASSIF

7.1 - But de l'auscultation

La nouvelle méthode autrichienne de construction des tunnels se caractérise par un contrôle et une auscultation très poussés du massif et du tunnel avant, pendant et après les travaux. Cette contrainte supplémentaire fait partie intégrante de la méthode.

Avant de décrire les appareils à mettre en place pour contrôler le comportement de l'ensemble tunnel-massif, il est utile de dégager le but de ces mesures et d'envisager les décisions que des résultats - favorables ou défavorables - peuvent avoir comme conséquences ; pour cela des valeurs maximales de contraintes et surtout de déplacements (éventuellement des vitesses de déplacements) seront fixées. Le but des mesures est en général double :

- vérifier l'efficacité et le bon dimensionnement du revêtement ;
- apprécier l'influence du tunnel sur des ouvrages voisins.

L'auscultation constitue un investissement analogue à une "prime d'assurance", apportant garantie et sécurité à l'entrepreneur et au maître d'oeuvre

7.2 - Description et emplacement des appareils de mesure

7.2.1 - Liste des appareils à mettre en oeuvre

On combinera divers types de mesures en fonction du but recherché, de l'importance de l'ouvrage et de sa difficulté :

- Mesures topographiques (essentiellement nivellement en surface et en souterrain).
- Mesures extensométriques (depuis la surface et au tunnel).
- Mesures de convergence entre plots scellés dans la voûte.
- Mesures de déformation latérale dans des sondages passant au voisinage du piédroit du tunnel (clinomètres).
- Mesures de contrainte dans le béton et au contact béton-rocher.
- Mesure des forces d'ancrage par des disques dynamométriques interposés entre la plaque et la roche.

7.2.2 - Profils de mesures

Il est recommandé de grouper les dispositifs d'auscultation dans des profils de mesures afin de pouvoir, d'une part, vérifier et comparer des résultats de même nature donnés par des appareils différents et, d'autre part, faire des corrélations indépendantes du terrain et du lieu. Ces sections de mesures se situeront avantageusement à l'entrée de nouveaux types de terrains, pour qu'il soit possible de prendre à temps les décisions suggérées par les résultats de l'auscultation. On distinguera deux types de profils :

- a) Profils de mesure primaires : ils sont équipés de plusieurs plots de nivellement en surface, d'extensomètres multiples, de plots de convergence, éventuellement d'indicateurs de déformation latérale et enfin de cellules de contrainte radiales et tangentielles ; ils sont destinés à analyser le comportement du massif

sous l'influence du tunnel et à étudier le comportement du revêtement et son interaction avec le massif ; on pourra ainsi vérifier la validité des hypothèses retenues dans le projet (en particulier les résultats du calcul par éléments finis) et envisager s'il y a lieu les modifications nécessaires.

- b) Profils de mesure secondaires : ils comprennent seulement des plots de convergence (au moins trois), un contrôle topographique de la clé par nivellement ou un tassomètre si le recouvrement est inférieur à 30 m ; ces profils courants servent à vérifier simplement l'efficacité du revêtement mis en place. Il ne faut pas hésiter à les multiplier car ils donnent des renseignements très précieux, pour un coût minime par rapport à celui des autres appareils d'auscultation.
- c) Nombre de profils de mesure : la fréquence spatiale des profils de mesure dépend essentiellement du caractère hétérogène des terrains traversés. En site urbain et sous faible couverture cette fréquence devra être notablement accrue.

7.3 - Préparation et exécution des mesures

7.3.1 - Installation des appareils

Les "créneaux" nécessaires devront être prévus pour la pose des appareils de mesure prévus dans le tunnel et le forage des trous correspondants. Cependant, lorsque le recouvrement est faible (la limite pratique est de 80 à 100 m), il y a tout intérêt à faire le maximum d'observations à partir de la surface, à l'aide de repères de nivellement, de clinomètres, d'extensomètres de surface ("tassomètres"), etc. Les mesures de surface présentent trois avantages :

- elles n'imposent pas au chantier de perturbation ou d'interruption, toujours mal accueillies par les exécutants ;
- elles évitent les risques de détérioration des appareils de mesure par les engins de chantier ou les tirs ;
- enfin et surtout, elles permettent de mesurer les déformations qui se produisent au droit d'un appareil de mesure avant le passage du front de taille et au cours de l'abattage (ces déformations peuvent en effet atteindre les 2/3 de la déformation totale) ; il devient ainsi possible d'établir la ligne d'influence de l'avancement sur tel ou tel paramètre en un point donné.

Il n'est pas inutile de rappeler que les sondages destinés à recevoir ces appareils doivent être prévus suffisamment à l'avance.

7.3.2 - Equipes et fréquence de mesure

Un personnel spécialisé, rattaché à l'équipe topographique, sera prévu pour effectuer les mesures et mettre en forme les résultats au jour le jour ; l'importance de ce personnel dépend de la fréquence des mesures, qui sera fixée à l'avance pour chaque appareil, en fonction de son éloignement du front de taille.

8 - METRE

Le métré définit de façon précise les quantités à mettre en oeuvre d'après les profils-types définis au chapitre 4.1 ; les majorations probables (ou les économies possibles) pour hors-profils et aléas divers seront estimés séparément. De plus, chaque variante définie en 4.2 fera l'objet d'un métré complet et séparé.

Les quantités suivantes seront chiffrées :

8.1 - Généralités

- Longueur et pourcentage relatif des différents types de revêtement
- Section et surface totale de l'intrados
- Volume total à excaver.

8.2 - Excavation

- Volume et section de l'excavation par classe de terrain définie en 2.3, en distinguant s'il y a lieu la calotte et le stross ;
- volume par passe d'excavation pour chaque type de revêtement défini en 4.1, et pour chaque longueur de passe envisagée ;
- volume à abattre pour chaque technique d'excavation retenue ;
- consommation totale d'explosifs de chaque type.

8.3 - Revêtement

- a) - Quantités à mettre en oeuvre par mètre linéaire de tunnel en section totale, pour chaque type de revêtement
 - Nombre de boulons,
 - volume de béton projeté, en tenant compte de 30% de chutes en calotte et 15% en piédroit,
 - poids de treillis soudé compte tenu du recouvrement,
 - poids de cintre compte tenu du recouvrement,
 - volume de béton coffré définitif.

Ces valeurs, multipliées par le bordereau des prix, permettent d'obtenir immédiatement le coût relatif des différents composants du soutènement, ainsi que le coût comparé d'un mètre linéaire de chaque type de soutènement.

b) - Quantités totales à mettre en oeuvre

- Nombre de boulons de chaque type et poids total d'acier,
- nombre de nappes de treillis de chaque type et poids total,
- nombre d'éléments de cintre de chaque type et poids total,
- volume total de béton projeté (avec et sans pertes),
- volume total de béton coffré (sans hors-profils),
- nombre total de drains et surface des éléments d'étanchéité.

c) - Variations possibles

Si des économies (chiffrées en pourcentage) sont à atteindre sur les postes du paragraphe 8.3.2, on indiquera à quelles conditions et avec quelle probabilité. Il en est de même pour les augmentations ; en particulier, on s'efforcera d'estimer les hors-profils en pourcentage de volume de béton projeté s'il y a des cintres, et en pourcentage de volume de béton coffré s'il n'y a pas de cintres.

8.4 - Auscultation

- Liste des appareils prévus.
- Prix d'achat total des appareils.

9 - PLANNING ET ORGANISATION DU CHANTIER

Par définition, c'est surtout à l'entreprise qu'il convient de développer ce chapitre ; le maître d'oeuvre, en effet, ne peut guère imposer que la date de mise en service de l'ouvrage.

9.1 - Délais et planning

Des délais d'exécution plausibles seront avancés, en s'appuyant sur des courbes d'avancement en fonction du temps des différentes tâches (par exemple creusement de la calotte, stross, béton coffré, finition).

9.2 - Organisation des postes d'attaque

La vitesse journalière d'avancement des tâches fondamentales (creusement et revêtement immédiat) sera déterminée en s'appuyant sur des plannings journaliers que l'on établira pour chaque classe de revêtement (en portant le temps en abscisse et les opérations élémentaires en ordonnée) ; compte tenu de ces éléments, des délais imposés et de la législation, seront aussi fixés le nombre

de postes journaliers (3 ou 3) et d'heures de travail (8 à 10). Ces plannings journaliers sont très importants : ils permettent de dimensionner le matériel à utiliser, de prévoir le personnel nécessaire, et aussi de dessiner le chemin critique des opérations afin de renforcer la maintenance du matériel correspondant ; pour gagner du temps, on s'efforcera de superposer les tâches compatibles - ce qui conduira souvent à diviser la section.

9.3 - Organisation générale du chantier

Ce point, qui n'est pas spécifique des tunnels, développera tout ce qui touche aux réseaux divers, ateliers, fournitures, accès, encadrement, etc.

BIBLIOGRAPHIE

- CORDEL R. - Prédécoupage et béton projeté dans les ouvrages souterrains de l'Arc-Moyen. Revue de l'Industrie minière, mars 1972.
- DUFFAUT P., MARIN G. - Techniques nouvelles dans l'exécution des galeries au rocher. Annales ITBTP, supp. au n°304, avril 1973.
- DUFFAUT P. - Conception et calcul des grandes excavations souterraines à partir des résultats d'essais de laboratoire. Mémoires CERES (Univ. de Liège), nouv.série, n°36, août 1971.
- EDELING H., SCHULZ W. - Construction du métro de Francfort par la Nouvelle méthode autrichienne (en allemand). Der Bauingenieur, Ig 47, Heft 10, 1972.
- EGGER - Influence du comportement des roches après la rupture sur le soutènement des tunnels, en particulier par boulonnage. Thèse, Univ. de Karlsruhe, 1973. (trad.BRGM)
- FRANKLIN J.A. - Classification of rock according to its mechanical properties. Ph D. thesis, Univ. of London, 1970.
- LAUFFER H. - Classification des roches pour la construction des tunnels (en allemand). Geologie und Bauwesen, Vienne, Ig 24, Heft 1, 1958.
- LOUIS C. - Reconnaissance des massifs rocheux par sondages et classifications géotechniques des roches. Annales ITBTP, 1974 (à paraître), Rapport BRGM 73 SGN 445 AME.
- LOUIS C. - Construction des tunnels par la Nouvelle méthode autrichienne. Rev. de l'ind. minière, n° spécial, avril 1972, Rapport BRGM 71 SGN 323 GTC.
- LOUIS C. et les membres de l'AFTES - Recommandations sur la technologie et la mise en oeuvre du béton projeté dans les travaux souterrains. Tunnels et travaux souterrains, n°1, janvier 1974, Rapport BRGM 73 SGN 424 AME.
- LONDE P. - La Mécanique des roches et les fondations des grands barrages. Congrès des grands barrages, Madrid, 1973.

- MULLER L. - Nouvelles conceptions pour la construction d'excavations souterraines en Europe centrale et leurs conséquences pratiques (en allemand). 4ème Congrès du ministère allemand de la défense, Lorch, avril 1970.
- PANET M. - La stabilité des ouvrages souterrains - Soutènement et revêtement. Laboratoire central des Ponts et chaussées, rapport de recherche n°28, septembre 1973.
- PIRAUD J., LOUIS C. - Technologie du boulonnage léger. Rapport BRGM 73 SGN 425 AME.
- RABCEWICZ L. von - La signification des mesures dans la construction de cavités souterraines (en allemand). Der Bauingenieur, Ig 47, Heft 7 und 8, 1972.
- RABCEWICZ L. von - La Nouvelle méthode autrichienne de construction des tunnels (en allemand). Origine, mise en oeuvre et expérience. Der Bauingenieur, Heft 8, août 1965.
- Tunel del Turo de la Rubira. Projet d'exécution selon la Nouvelle méthode autrichienne. Rapport conf. BRGM 73 SGN 034 AME.
- Der Monierbauer (Bulletin de l'entreprise BETON-& MONIERBAU AG)
- Sonderheft 1970 - Tunnels et barrages
- Sonderheft 1973 - Tunnels et cavernes