

III - Programme détaillé par matière

(1 fiche détaillée par matière)

Intitulé du Master : Géotechnique

Semestre : 3

Crédits : 4

Coefficients :2

Intitulé de l'UE : UEF1

Intitulé de la matière : Ouvrages souterrains

Objectifs de l'enseignement :

L'objectif de ce cours est d'enseigner les bases théoriques de la mécanique des roches et les conceptions des tunnels

Connaissances préalables recommandées :

Contenu de la matière :

Chapitre 1 : Tunnels

- ✓ Creusement d'ouvrages souterrains ; Tunnel et bouclier. Attaque ponctuelle creusement traditionnel à l'explosif. Dispositifs de soutènements
- ✓ Détermination des diverses sollicitations
 - ❖ Méthodes géomécaniques :Protodiakonov. Terzaghi. Lauffer
- ✓ Classification du massif rocheux et le dimensionnement du soutènement:
 - ❖ La classification de BIENIAWSKI
 - ❖ Les recommandations de L'A.F.T.E.S.
 - ❖ La méthode de Hoek & Brown
- ✓ Calcul des pressions horizontales et verticales
 - ❖ Méthode de TERZAGHI,
 - ❖ Théorie de BIERBAÜMER
 - ❖ Théorie des poids des terres,
 - ❖ Théorie de PROTODIAKONOV.
 - ❖ Méthode de COULOUMB-RANKINE
 - ❖ Méthode convergence – confinement

Chapitre 2 : Réservoirs enterrés

- ✓ Calcul et technique d'exécution
- ✓ Étanchéité

Chapitre 3 : Conduites enterrées

Mode d'évaluation : Contrôle continu (50%) examen (50%)

Références (Livres et photocopiés, sites internet, etc).

Tunnelling and tunnel mechanics Geotechnical engineering Soil mechanics

Sites Internet : www.ggsd.com

www.gigapedia.org

Les ouvrages souterrains

Les ouvrages souterrains regroupent un grand nombre d'ouvrages comme des puits et des galeries pour l'exploitation minière et pétrolière, des conduites, des canalisations et des collecteurs d'assainissement, des parkings, des réservoirs souterrains, des usines et des gares souterraines, des tunnels autoroutiers et ferroviaires, des galeries de métro etc

Classification des ouvrages souterrains

Classe	Description
A	Excavation minière à caractère temporaire
B	Puits verticaux
C	Galeries hydrauliques, Collecteurs d'assainissement, Galeries de reconnaissances
D	Cavité de stockage, stations de traitement d'eau, tunnels routiers et ferroviaires, tunnels d'accès
E	Usines souterraines (plus souvent hydroélectrique), tunnels autoroutiers. Tunnel ferroviaires. Galeries du métro, Abries de défense civile
F	Centrales nucléaires souterraines. Gares souterraines. Salles ouvertes au public (Sports, Spectacles)

✓ Chapitre 1 : Tunnels

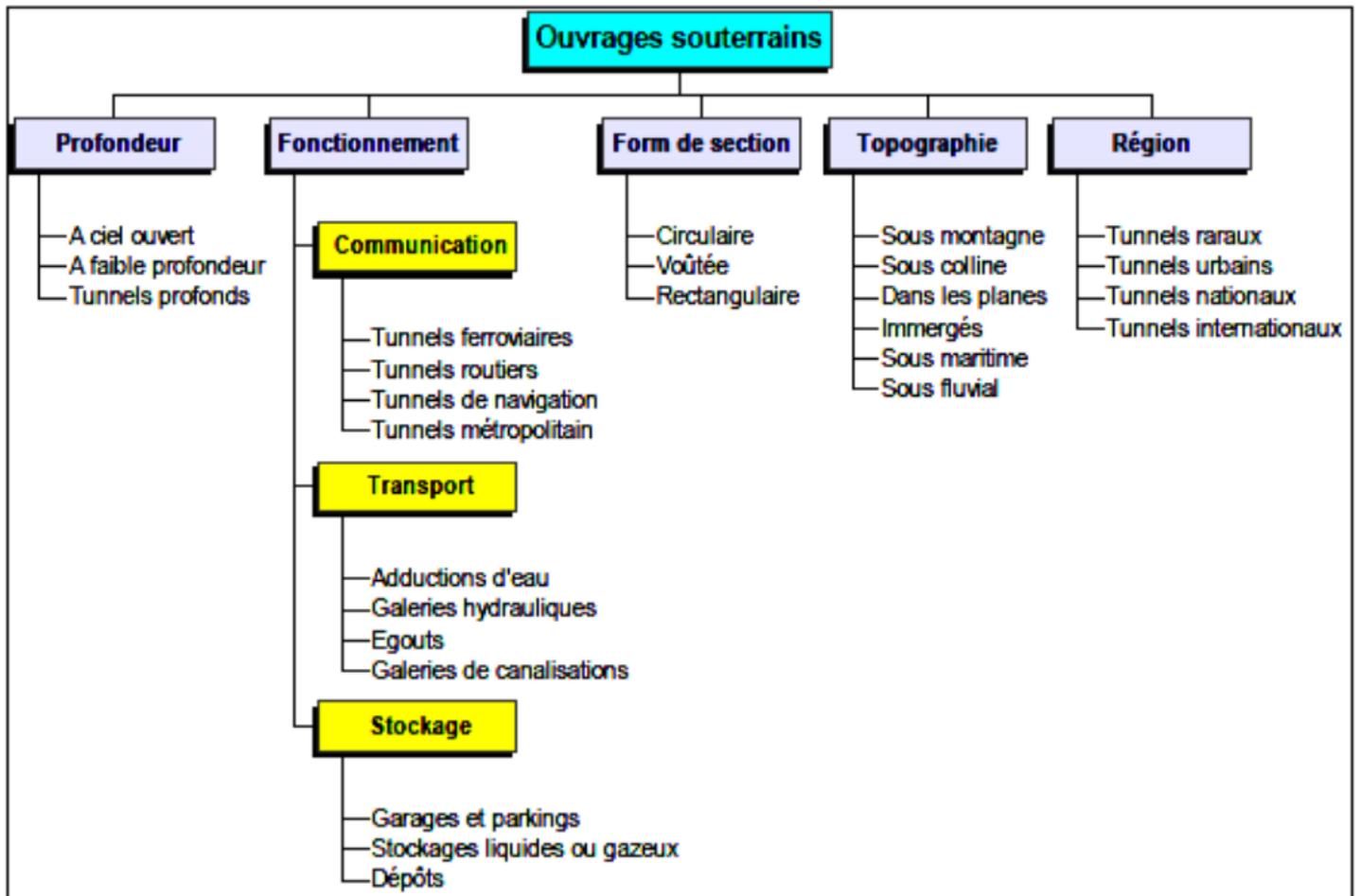
✓ Creusement d'ouvrages souterrains : Tunnel et bouclier. Attaque ponctuelle creusement traditionnel à l'explosif. Dispositifs de soutènements

I.1.Définition

Un tunnel est un ouvrage d'art souterrain livrant passage à une voie de communication (chemin de fer, canal, route, chemin piétonnier). Sont apparentés aux tunnels par leur mode de construction les grands ouvrages hydrauliques souterrains, tels que les aqueducs, collecteurs et émissaires destinés soit à l'amenée, soit à l'évacuation des eaux des grands centres et certaines conduites établies en liaison avec les barrages et usines hydro-électriques.

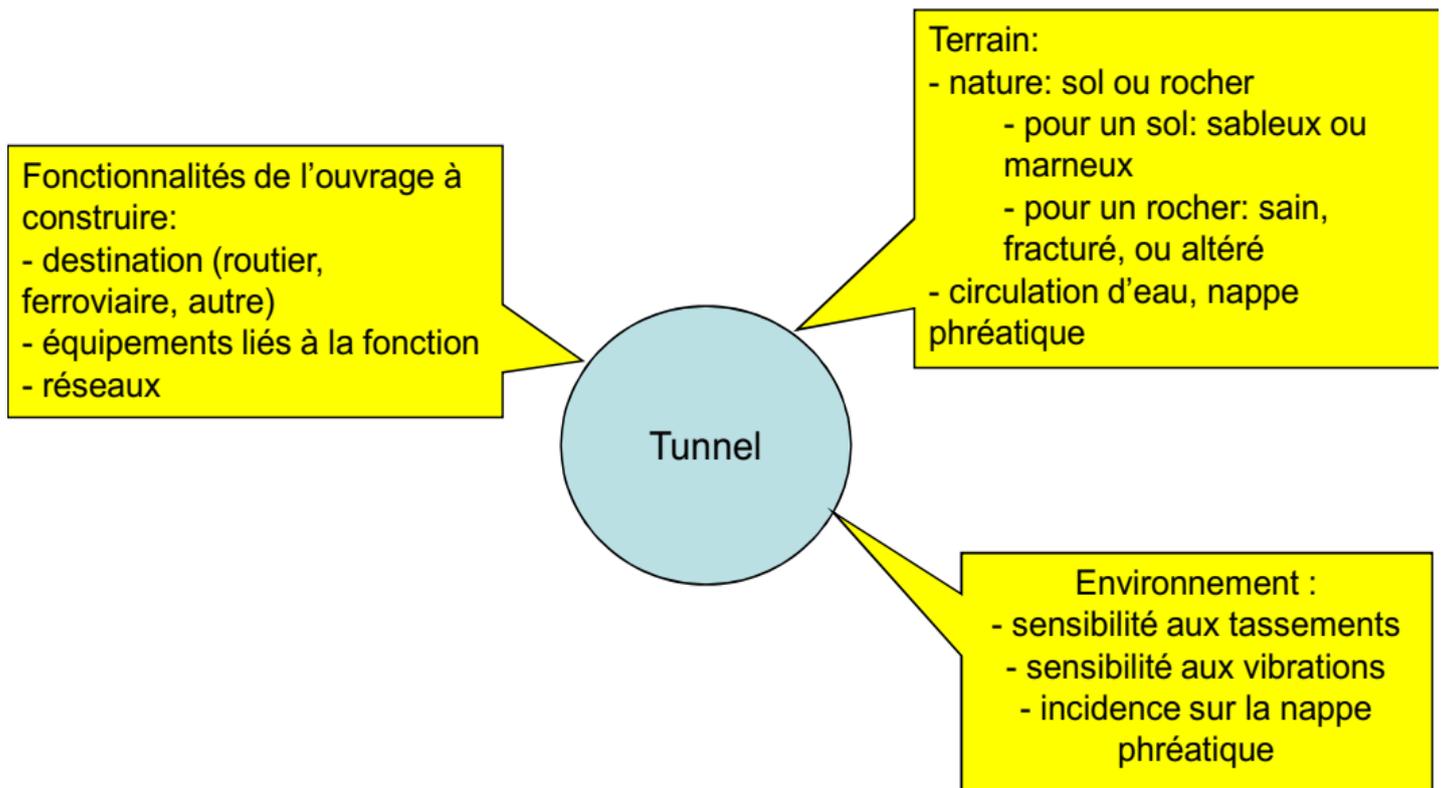


Quelques types des tunnels



Classification globale des tunnels (J.IDRIS.2007)

Facteurs déterminants de la conception d'un tunnel



I.2. Les différentes méthodes d'exécution des tunnels

Quatre principales méthodes d'exécution des tunnels peuvent être utilisées. Le choix de la technique à employer résulte d'un arrangement entre les exigences liées à la géométrie de l'ouvrage à réaliser, les caractéristiques du terrain à creuser, les spécificités du site et de son environnement et les contraintes géologiques et hydrogéologiques (présence ou non de la nappe phréatique). Les progrès de ces dernières années dans les techniques de creusement, de soutènement et de revêtements permettent maintenant de réaliser des ouvrages dans tous les types de terrain.

❖ Tunnel dans les roches

Méthode par attaque ponctuelle

Méthode Traditionnelle à l'explosif

❖ Tunnel en terrain difficile

Méthode pré découpage mécanique

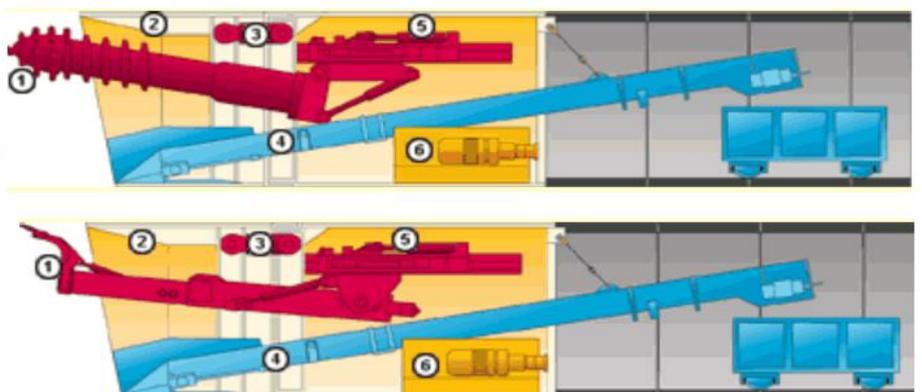
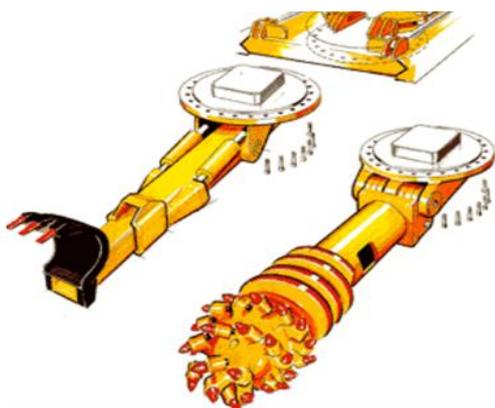
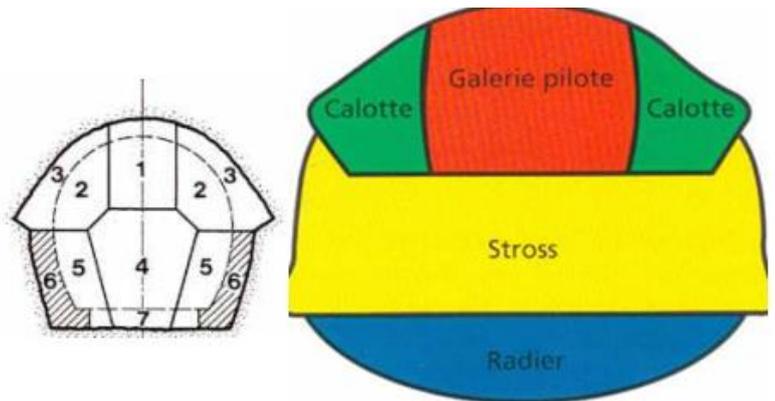
Méthode creusement au tunnelier

Méthode d'excavation traditionnelle :

Cette méthode fait appel à l'utilisation des procédés d'excavations traditionnelles, avec excavateurs, pelle, pioche, pic, marteau perforateur ou une simple machine d'attaque ponctuelle. Le domaine d'application de cette méthode s'élargit en suivant un processus de creusement séquentiel avec, si besoin, l'installation de pré soutènement et l'amélioration du terrain. Le procédé d'excavation séquentiel consiste à excaver la section du tunnel en deux ou plusieurs étapes avec l'installation d'une partie du support provisoire. Une fois toutes les étapes sont terminées, le support provisoire se complète et l'observation des déformations du support continue. Le revêtement définitif sera placé par la suite après la stabilisation des déformations.

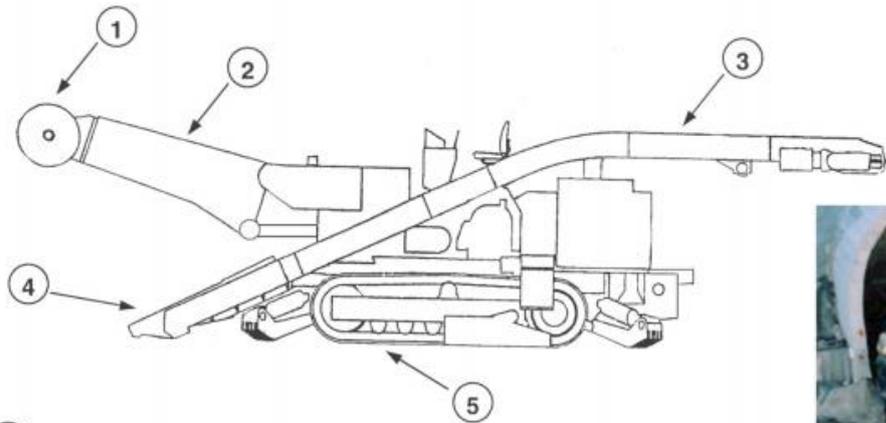
Méthode par attaque ponctuelle :

Si la roche est friable, l'excavation est exécutée par une machine qui attaque ponctuellement et progressivement le sol (machine à attaque ponctuelle).



La fraise ou machine à attaque ponctuelle (« MAP »)

Principe :

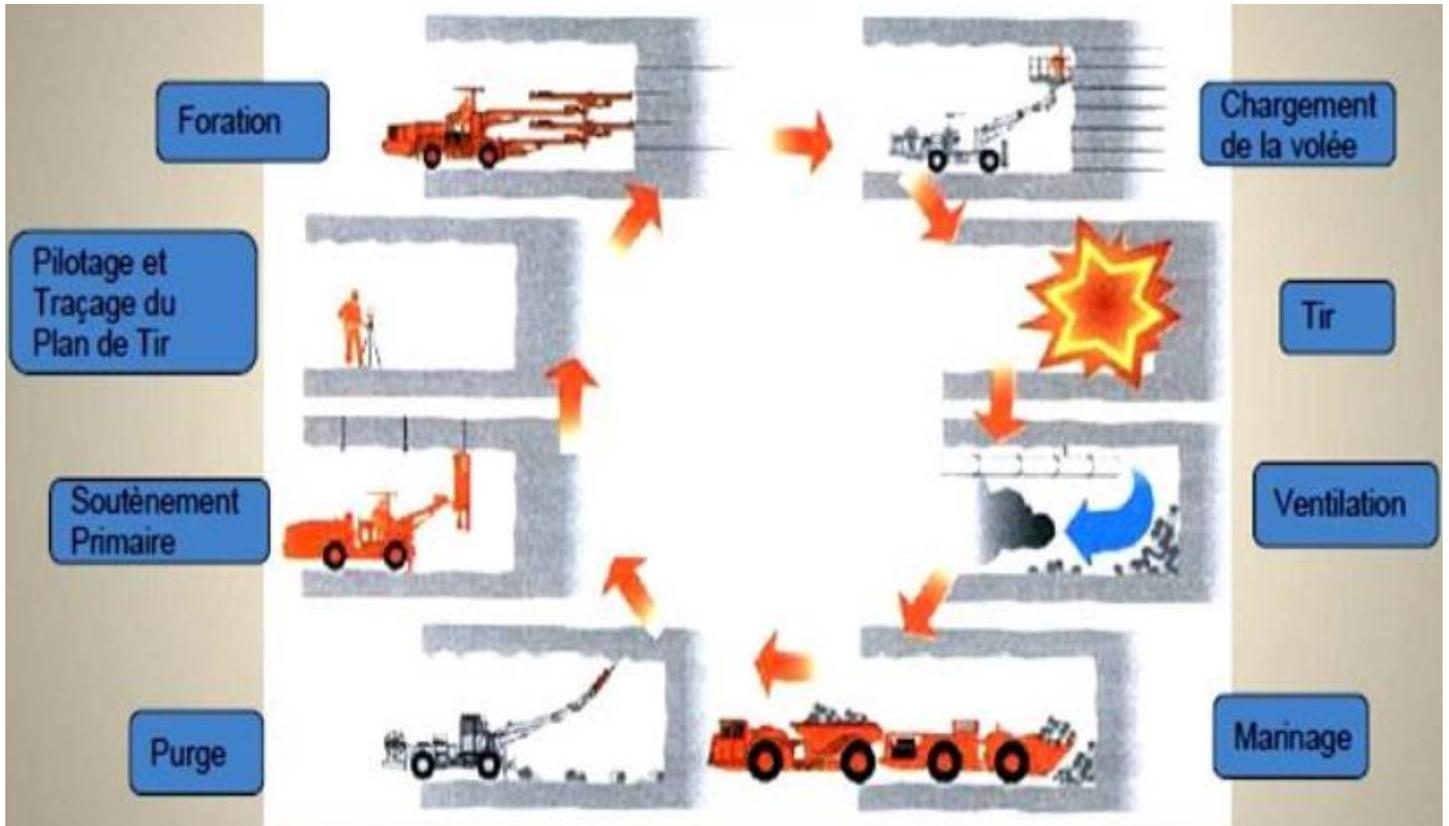


- ① Tête transversale
- ② Bras d'abattage
- ③ Convoyeur
- ④ Tablier de ramassage
- ⑤ Châssis automoteur sur chenilles



Méthode traditionnelle à l'explosif :

L'usage des explosifs serait nécessaire si le terrain rencontré est dur et compact. Cette méthode est adaptée à une roche saine et homogène aux caractéristiques géotechniques élevées. L'abattage à l'explosif nécessite la perforation préalable de trous de mine (constituant la volée) à l'aide de marteaux perforateurs.



Critères de choix pour le creusement des tunnels :

Critère de choix		Nature de terrain	Matériels	Section du creusement
Méthodes	l'explosif	Toutes les natures de roches	Ne varie pas fondamentalement en fonction du terrain	-
	Méthodes mécanisées	Sols homogènes	Varie considérablement en fonction au terrain	-
Type de machine	Machine à attaque ponctuelle	Terrain tendre mais cohérent	-	Toutes sections
	Machine à attaque ponctuelle	Sols homogènes	-	Section circulaire
Type de confinement	Bentonite ou air comprimé	Terrain instable	-	-
	Confinement pâteux	Terrain hétérogène	-	-
Type de tête de coupe	Couteaux	Sols	-	-
	Pics à crayon	Roche mi dur	-	-
	Molettes à disques	Roche dure à très dure	-	-

Source : Gesta (2007)

I.3. Soutènement

Le soutènement provisoire est une structure qui permet d'assurer la stabilité des parois d'une cavité souterraine pendant le temps qui s'écoule entre son creusement et la mise en place éventuelle du revêtement définitif.

Les techniques les plus couramment utilisées sont :

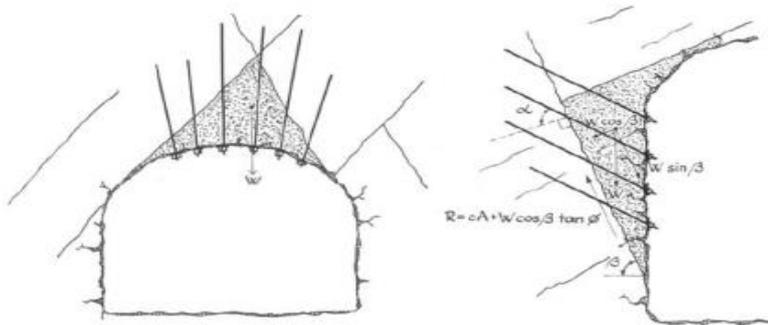
- soutènements métalliques : cintres métalliques, blindage, boulons ;
- soutènements en béton : béton projeté, prévoûte en béton ;
- soutènements mixtes

Si l'on classe les soutènements provisoires en fonction de leur mode d'action par rapport au terrain, on peut en distinguer quatre catégories différentes :

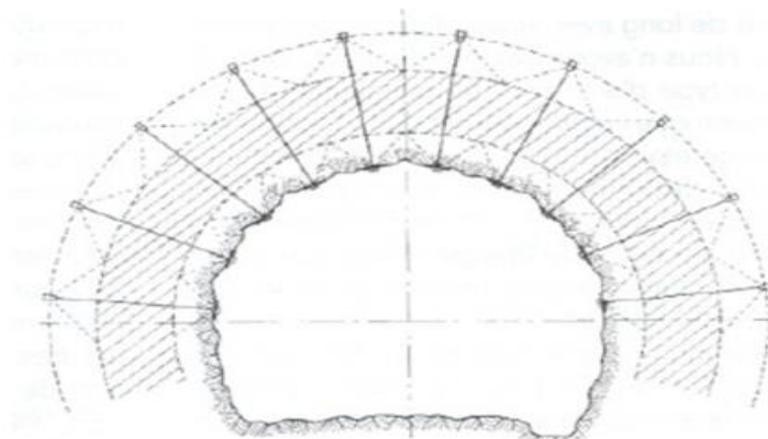
- les soutènements agissant par **confinement** du terrain encaissant ; ce sont essentiellement :
 - le béton projeté seul,
 - le béton projeté associé à des cintres légers ;
- les soutènements agissant à la fois par **confinement** et comme **armature** du terrain encaissant ; il s'agit du boulonnage sous diverses formes, qu'il soit ou non associé au béton projeté, aux cintres légers ou aux deux dispositifs simultanément :
 - boulons à ancrage ponctuel (à coquille ou à la résine),
 - boulons à ancrage réparti (scellés à la résine ou au mortier),
 - barres foncées ;

L'action du boulonnage

Stabilisation locale :



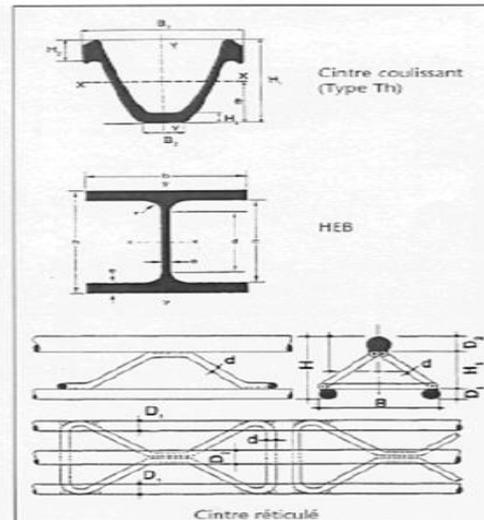
Confinement et renforcement :



- les soutènements agissant par **supportage** :

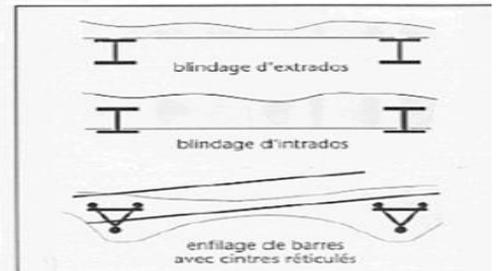
- cintres lourds,
- cintres légers,
- plaques métalliques assemblées,
- voussoirs en béton,
- tubes préforés (voûte parapluie),
- boucliers ;

Cintres coulissants

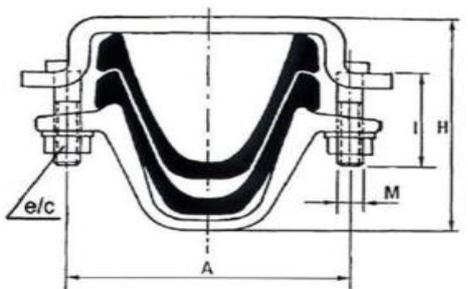
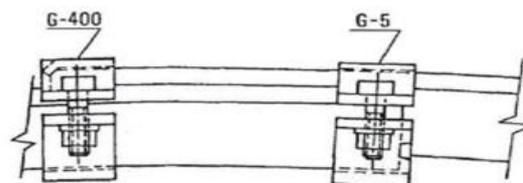


Cintres lourds

Cintres réticulés



Cintres coulissants



2018 - 2019

- les soutènements agissant par **consolidation** du terrain et modification de ses caractéristiques géotechniques ou hydrologiques :

- injections de consolidation,
- air comprimé,
- congélation.

Le soutènement assure les fonctions suivantes :

- Protection contre les chutes de pierres
- Soutien des blocs rocheux soumis à des pressions
- Exercer sur le terrain une certaine réaction
- S'opposer en tout ou en partie à la détente de la roche

Critères de choix du soutènement

Le choix raisonné d'un mode de soutènement comprend schématiquement deux phases successives

❖ Une phase d'analyse technique du problème qui aboutit à l'élimination d'un certain nombre de types de soutènement en raison de leur incompatibilité avec certaines des données techniques du projet qui peuvent être d'ordre géotechnique, géométrique ou liées à l'environnement ;

❖ Une phase complémentaire d'analyse économique qui fait intervenir : D'une part le dimensionnement du soutènement qui est l'un des éléments de calcul du coût ; D'autre part les éléments de prix de revient propres à l'organisation du chantier considéré :

- Plus ou moins grande mécanisation,
- Longueur du tunnel,
- Délais à respecter.

Parmi toutes les solutions de soutènement possibles pour un projet de tunnel, le meilleur choix est celui qui satisfait, au mieux, à la fois :

- Le critère économique (soutènement léger et facile à mettre en œuvre).
- Le critère de sûreté (conserver l'intégrité du massif en limitant le développement de la dégradation du massif au voisinage de l'ouverture).

✓ Détermination des diverses sollicitations

On peut distinguer quatre types de méthodes de calcul utilisés : des méthodes *empiriques* (fondées sur une classification géotechnique des roches), des méthodes *analytiques* (fondées sur des solutions analytiques en mécanique des milieux continus), des méthodes de *calcul spécifiques* pour les revêtements (méthode des « réactions hyperstatiques » et la méthode de *calcul numérique*).

❖ Méthodes Empiriques (géomécaniques) :

Protodiakonov. Terzaghi. Lauffer

Ces méthodes sont fondées sur des corrélations entre, d'une part, l'identification physique et la classification des roches et, d'autre part, des caractéristiques de soutènement. Normalement, ces méthodes sont utilisées dans les études préliminaires et ne concernent que les ouvrages creusés dans les roches. Cette approche a été, pour la première fois, développée par [Terzaghi.1946] : elle consiste à supposer que le tunnel est soumis, d'une part, à un chargement vertical dû au poids des terrains sus-jacents et, d'autre part, à un chargement horizontal égal à une fraction de la pression verticale agissant en clé ; cette dernière est déterminée à partir d'un calcul de type équilibre limite, en faisant l'hypothèse de la mise en rupture d'un bloc de terrain au-dessus de l'ouvrage et en écrivant l'équilibre de ce bloc sous l'action de son poids, de la réaction de l'ouvrage et du frottement mobilisé le long de la ligne de rupture. [Bieniawski et al. 1973, 1979, 1983], [Barton et al. 1974], [AFTES. 1993] ont proposé des méthodes basées sur la classification des roches. Les méthodes usuelles utilisées par l'ingénieur d'études sont les méthodes R.Q.D, - R.M.R et des recommandations de [l'AFTES. 1993]. La méthode de classification appelée R.Q.D (Rock Quality Designation) a été proposée par [Deere. 1964, 1970] qui a mis en corrélation cette méthode avec la méthode empirique de Terzaghi. Le R.Q.D est déterminé à partir des observations faites sur les échantillons prélevés dans un sondage carotté. [Bieniawski.1973, 1979, 1983] a proposé la classification des roches en utilisant les paramètres suivants : La résistance à la compression simple ou essai de type Franklin (pour les roches dures), le R.Q.D, l'espacement des joints, la nature des joints, les venues d'eau (La nappe d'eau) et l'orientation des discontinuités. Cette méthode est couramment appelée R.M.R (Rock Mass Ratio) Pour chaque classe de roche, il a également proposé des recommandations sur le soutènement à mettre en place. [Barton et al. 1974] ont proposé une méthode appelé la classification R.M.Q (Rock Mass Quality). Le principe de cette classification est le même : à partir d'indices élémentaires (nombre de familles de fissures, indice en fonction de la rugosité des fissures, indice exprimant le niveau

d'altération des fissures, facteur de réduction pour prendre en compte la présence d'eau et facteur de réduction pour tenir compte des contraintes naturelles), on définit un indice global appelé indice de qualité du massif. Cette méthode relie l'indice de qualité Q au comportement et au besoin de soutènement d'une galerie de largeur donnée. Pour le classement de massif en fonction de la résistance en compression, et l'analyse de l'emploi de différents soutènements en fonction de ces catégories

La première classification élaborée par **PROTODIAKONOV** en 1909 distinguait 10 classes de terrains caractérisées par la valeur de la résistance à la compression simple.

TERZAGHI (1946) distingue 9 classes de terrains en fonction de leur comportement en souterrain, comportement dépendant de la résistance, du caractère stratifié ou non, de la fracturation, de la nature des joints, de la déformabilité, de l'altération et (ou) du gonflement de la roche. Pour chaque classe, TERZAGHI propose un type de soutènement et une estimation de la charge rocheuse s'exerçant sur ce soutènement, mais l'analyse des critères et l'attribution d'une classe restent essentiellement qualitatives

Nature de la roche	Charge H_p	Remarques
Dure et intacte	0 à 0.25 B	Quelques ancrages s'il y a chute de pierres
Dure et stratifiée	0 à 0.5 B	Soutènement léger
Massive avec quelques joints	0 à 0.25 B	La charge peut changer brusquement d'un point à l'autre
Modérément ébouleuse	0.25 à 0.35 (B+H _t)	Pas de pression latérale
Très ébouleuse	0.35 à 1.1 (B+H _t)	Peu ou pas de pression latérale
Complètement broyée Chimiquement inerte	1.1 (B+H _t)	Pression latérale considérable
Roche fluante à profondeur modérée	1.1 à 2.1 (B+H _t)	Grande pression latérale Cintres circulaires recommandés
Roche fluante à grande profondeur	2.1 à 4.5 (B+H _t)	Grande pression latérale Cintres circulaires recommandés
Roche gonflante	jusqu'à 75 m indépendant de (B+H _t)	Cintres circulaires Dans les cas extrêmes, cintres coulissants

LAUFFER (1958) propose de classer les terrains en fonction de deux paramètres expérimentaux caractéristiques du comportement en souterrain : l la longueur d'excavation stable sans soutènement et t la durée de cette stabilité. En fonction des valeurs de ce couple de paramètres, LAUFFER distingue 7 classes de terrains pour chacune desquelles est préconisé un type de soutènement. Bien que d'une mise en pratique très difficile parce que, a priori, les valeurs des paramètres l et t ne sont pas connues, cette classification est très intéressante parce que LAUFFER introduit pour la première fois le principe de l'interaction terrain soutènement dans la stabilité de l'excavation au voisinage du front et l'importance de la longueur découverte.

Classification du massif rocheux et le dimensionnement du soutènement :

❖ La Classification de BIENIAWSKI

Plus récemment, 1973, BIENIAWSKI, et 1974, BARTON, ont proposé deux classifications géomécaniques : le R.M.R. (Rock Mass Rating) dont le principe est de décrire de manière détaillée le massif au sein duquel est creusé l'ouvrage et de déterminer à partir de cette description la classe de soutènement adéquate. Les paramètres descriptifs du massif sont les suivants :

- La qualité rocheuse caractérisée par le R.Q.D. ;
- L'altération ;
- La résistance de la matrice rocheuse caractérisée par la résistance à la compression simple ;
- La distance entre les discontinuités ;
- L'ouverture des discontinuités ;
- La persistance des discontinuités ;
- L'orientation des discontinuités ;
- Le débit de percolation

Pour chacun de ces paramètres, il est distingué, suivant la valeur, cinq classes et à chaque classe est attribuée une valeur numérique. La classe de soutènement est déterminée par la valeur du total des huit valeurs numériques correspondant aux huit classes résultant de la description du massif selon les huit paramètres.

Paramètres			Plages de Valeurs						
1	Résistance de la Roche (Matrice)	Indice Franklin Is (MPa)	> 10	4 – 10	2 – 4	1 – 2	Faibles valeurs de Is Utiliser la résistance en compression uniaxiale		
		Résistance compression uniaxiale (Mpa)	> 250	100 – 250	50 – 100	25 – 50	5 – 25	1 – 5	< 1
	Notation		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD	(%)	90 – 100	75 – 90	50 – 75	25 – 50	< 25		
	Notation		20	17	13	8	3		
3	Espacement des discontinuités		> 2000 mm	600 mm – 2000 mm	200 mm – 600 mm	60 mm – 200 mm	< 60 mm		
	Notation		20	15	10	8	5		
4	Nature de discontinuités (Voir l'annexe A)		Surfaces très rugueuses Non continues Epontes en contact Epontes non altérées	Surfaces légèrement rugueuses Epaisseur < 1 mm Epontes faiblement altérées	Surfaces légèrement rugueuses Epaisseur < 1 mm Epontes fortement altérées	Surfaces lustrées ou Remplissage < 5 mm Épaisseur de 1 à 5 mm Joint continu	Remplissage mou > 5 mm ou Epaisseur > 5 mm Joint continu		
	Notation		30	25	20	10	0		
5	Eau	Débit sur 10 m de longueur de tunnel (l/min)	Aucun	< 10	10 à 25	25 à 125	> 125		
		Ration : Pression eau / Contr princ	0	< 0,1	0,1 – 0,2	0,2 – 0,5	> 0,5		
		Conditions générales	Complètement sec	Humide	Mouillé	Suintant	Débitant		
	Notation		15	10	7	4	0		
Annexe A			Indications pour la Notation NATURE DES DISCONTINUITES						
Longueur des discontinuités (m)			< 1	1 à 3	3 à 10	10 à 20	> 20		
Notation			6	4	2	1	0		
Ouverture des discontinuités			Aucune	< 0,1 mm	0,1 à 1 mm	1 à 5 mm	> 5 mm		
Notation			6	5	4	1	0		
Rugosité des épontes des discontinuités			Très rugueuse	Rugueuse	Légèrement rugueuse	Lisse	Lustrée		
Notation			6	5	3	1	0		
Altération des épontes			Non altéré	Légèrement altéré	Moyennement altéré	Très altéré	Décomposé		
Notation			6	5	3	1	0		
Matériau de remplissage des discontinuités			Aucun	Remplissage dur < 5 mm	Remplissage dur > 5 mm	Remplissage mou < 5 mm	Remplissage mou > 5 mm		
Notation			6	4	2	2	0		

Influence de l'orientation et du pendage des discontinuités pour la stabilité des Tunnels

Horizontale de plan de discontinuité perpendiculaire à l'axe longitudinal du tunnel (creusement en travers bancs)		Horizontale de plan de discontinuité parallèle à l'axe longitudinal du tunnel (creusement en direction)	
Creusement dans le sens du pendage		Pendage 45° à 90° : Très défavorable	Pendage 20° à 45° : Moyen
Pendage 45° à 90° : Très favorable	Pendage 20° à 45° : favorable		
Creusement contre le sens du pendage		Pendage 0° à 20° et orientation quelconque : Moyen	
Pendage 45° à 90° : Moyen	Pendage 45° à 90° : Défavorable		

Ajustement de la valeur de RMR en fonction de l'orientation des discontinuités

Direction et pendage		Très Favorable	Favorable	Moyen	Défavorable	Très Défavorable
Notation	Tunnels	0	-2	-5	-10	-12
	Fondations	0	-2	-7	-15	-25
	Talus	0	-5	-25	-50	-60

Classes de Massif Rocheux déterminées par le RMR

Valeur du RMR	81 à 100	61 à 80	41 à 60	21 à 40	< 21
Classe	I	II	III	IV	V
Description	Très bon rocher	Bon rocher	Rocher Moyen	Rocher Médiocre	Rocher très Médiocre

Propretés globales attribuées au massif rocheux en fonction des Classes

Classe	I	II	III	IV	V
Temps de tenue sans soutènement	20 ans pour une portée de 15 m	Un an pour une portée de 10 m	Une semaine pour une portée de 5 m	Dis H pour une portée de 2,5 m	30 Min pour une portée de 1 m
Cohésion du Massif rocheux (KPa)	> 400	300 à 400	200 à 300	100 à 200	< 100
Angle de frottement du massif rocheux (°)	> 45	33 à 45	25 à 35	15 à 25	< 15

Classe de la Roche	Type de soutènement						
	Boulons d'ancrage		Béton projeté			Cintres Métalliques	
	Espacement	Complément d'ancrage	Voûte	Piédroits	Complément de soutènement	Type	Espacement
I	Généralement pas nécessaire						
II	1,5 – 2,0 m	Occasionnellement treillis soudé en Voûte	50 mm	Néant	Néant	Non rentable	
III	1,0 – 1,5 m	Treillis soudé + 30 mm de béton projeté en voûte si nécessaire	100 mm	50 mm	Occasionnellement treillis et boulons si nécessaire	Cintres légers	1,5 – 2,0 m
IV	0,5 – 1,0 m	Treillis soudé + 30 – 50 mm béton projeté en voûte et en piédroits	150 mm	100 mm	Treillis soudé et boulons de 1.5 à 3 m d'espacement	Cintres moyens + 50 mm de béton projeté	0,7 – 1,5 m
V	Non Recommandé		200 mm	150 mm	Treillis soudé boulons et cintres légers	Immédiatement 80 mm de béton projeté puis cintres lourds à l'avancement	0,7 m

❖ Les recommandations de L'A.F.T.E. S

L'A.F.T.E.S. a établi en 1976 des recommandations "relatives au choix du type de soutènement en galerie".

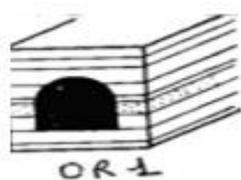
La définition des critères et paramètres retenus pour caractériser les terrains se base, pour ce qui concerne le cas des galeries exécutées à l'intérieur de massifs rocheux, sur d'autres recommandations de l'A.F.T.E.S., "pour une description des massifs rocheux utile à l'étude de la stabilité des ouvrages souterrains" Les critères plus spécialement retenus pour le choix du soutènement sont :

- La résistance de la roche,
- Les discontinuités,
- L'altérabilité,
- Les conditions hydrogéologiques,
- Les contraintes naturelles.

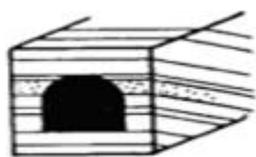
Pour chacun de ces critères, une classification du terrain est opérée et des indications sont données pour orienter le choix du type de soutènement. On tient compte également des dimensions de la cavité, du procédé de creusement et de la sensibilité aux tassements. On distingue quatre classes principales de soutènement suivant leur mode d'action par rapport au terrain :

Résistance de la Roche			
Catégorie	Désignation	Exemples	σ_c (Mpa)
R1	Roche de Résistance très élevée	Quartzites et basaltes de résistance élevée	> 200
R2a	Roche de résistance élevée	Granits très résistants, porphyres, grés et calcaires de très haute résistance	200 à 120
R2b		Granites, grés et calcaires de très bonne tenue ou légèrement dolités, marbres, dolomies, conglomérats compacts	120 à 60
R3a	Roche de résistance Moyenne	Grés ordinaires, schistes siliceux ou grés schisteux, gneiss	60 à 40
R3b		Schistes argileux, grés et calcaires de résistance moyenne, marnes compactes, conglomérats peu consistants	40 à 20
R4	Roche de faible résistance	Schistes ou calcaires tendres ou très fracturés, gypses, grés très fracturés ou marneux, poudingues, craie	20 à 6
R5a	Roche de très faible résistance et sols cohérents consolidés	Marnes sableuses ou argileuses, sables marneux gypses ou craies altérés	6 à 0,5
R5b		Alluvions graveleuses sables argileux normalement consolidés	< 0,5
R6a	Sols plastiques ou peu consolidés	Marnes altérées, argiles franches, sables argileux limons fins	X
R6b		Tourbes silts et vases peu consolidés, sables fins sans cohésion	

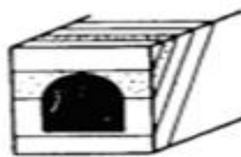
(A.F.T.E. S) Orientation des Discontinuités							
Classes		Orientation des discontinuités		Condition du creusement			
		Angle entre pendage et axe d'avancement du creusement A°	Pendage B°				
OR1		Quelconque		0° à 20°		En bancs subhorizontaux	
OR2	a	0° à 30°		20° à 90°		Entraver Banc	(a) avec le pendage
	b						(b) contre le pendage
OR3		30° à 65°		20° à 90°		Conditions intermédiaires	
OR4	a	65° à 90°		20° à 60°		En direction	(a) Pendage moyen
	b			60° à 90°			(b) Pendage fort



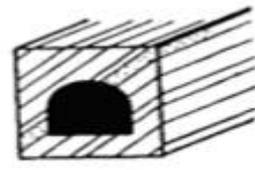
OR1



OR2a



OR2b



OR4b

(A.F.T.E. S) Espacement des discontinuités		
Classes	Valeurs d'espacement (cm)	Description
ES1	> 200	Discontinuités très espacées
ES2	60 à 200	Discontinuités espacées
ES3	20 à 60	Discontinuités moyennement espacées
ES4	6 à 20	Discontinuités rapprochées
ES5	< 6	Discontinuités très rapprochées

(A.F.T.E. S) Famille des discontinuités		
Classes	Termes descriptifs du nombre de famille des discontinuités	
N1	Peu de discontinuités ou quelques discontinuités diffuses	
N2	a	Une famille principale
	b	Une famille principale et des discontinuités diffuses
N3	a	Deux familles principales
	b	Deux familles principales et des discontinuités diffuses
N4	a	Trois (et plus) familles principales
	b	Trois (et plus) familles principales et des discontinuités diffuses
N5	Nombreuses discontinuités sans organisation	

(A.F.T.E. S) Hydrogéologie					
Charge Hydraulique			Perméabilité		
Classes	Comptée en m au-dessus du radier du tunnel	Description	Classes	du Massif (m/s)	Description
H0	0	Nulle	K1	$< 10^{-8}$	Faible
H1	< 5	Faible	K2	10^{-8} à 10^{-6}	Moyenne
H2	5 à 20	Moyenne	K3	10^{-6} à 10^{-4}	Forte
H3	20 à 100	Forte	K4	$> 10^{-4}$	Très Forte
H4	> 100	Très Forte	K5	Infinie	Karstique

(A.F.T.E. S)		Profondeur de l'Excavation (Couverture)
Classes	Rapport entre la résistance σ_c et la contrainte initiale σ^o (σ_c/σ^o)	Description de l'état des contraintes naturelles
CN1	> 4	Faible (Résistance de la roche est suffisante pour assurer la stabilité ; un soutènement peut être cependant rendu nécessaire par la présence de discontinuités)
CN2	4 à 2	Moyen (des ruptures peuvent se produire sur les parois)
CN3	< 2	Fort (la résistance de la roche est nettement insuffisante)

(A.F.T.E. S)

●	Soit particulièrement recommande (nettement favorable)
	Soit possible à condition que d'autres critères soient particulièrement favorables
X	Soit très mal adapté bien qu'éventuellement possible (plutôt défavorable)
	Soit en principe impossible (nettement défavorable)

(A.F.T.E. S)

Critère : Comportement Mécanique

	Pas de soutènement	Béton Projété	Boulons			Cintres		Voussoirs		Tubes préforés	Bouclier ou pousse Tube	Procèdes spéciaux		
			à ancrage ponctuel	à ancrage réparti	Barres foncées	Lourds	Légers coulissants	Plaques métallique	Béton			Injection	Air Comprimé	Congélation
R1	●		●		⊗			X	X	X	⊗		X	X
R2a	●		●		⊗			X	X	X	⊗		X	X
R2b		●	●	●	⊗			X	X	X	⊗		X	X
R3a		●	●	●	⊗		●	X	X	X	⊗		X	
R3b		●		●	⊗		●		X	X	X			
R4	X	●	X			●	●							
R5a	⊗	●	⊗			●	●	●						
R5b	⊗		⊗	X		●	●	●	●	●	●	●		
R6a	⊗	⊗	⊗	⊗	X	● Enf	Enf	●	●		●	●		
R6b	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	Enf Bif	Enf Bif	● Enf Bif	● Bcl Bif	Bif	● Bif	●		●
Enf : avec enfilage			Bif : avec Blindage				Bcl : avec Bouclier							

(A.F.T.E. S)

Critère : Discontinuités

Nombre de Familles	Orientation	Espacement	Pas de soutènement	Béton Projeté	Boulons			Cintres		Voussoirs		Tubes préforés	Bouclier ou pousse Tube	Procèdes spéciaux		
					à ancrage ponctuel	à ancrage réparti	Barres foncées	Lourds	Légers coulissants	Plaques métallique	Béton			Injection	Air Comprimé	Congélation
N1										X	X					
N2	OR2 ou OR3	S1 à S3	●							X	X			X		
N3	Quelconque	S1	●		●					X	X			X		
		S2			●	●				X	X			X		
S3			●	Gr	●Gr					X						X
S4		X	●	Gr Bp	● Gr Bp		● Bl Bp	● Bl Bp								X
S5			●	X			●Bl Bp	● Bl Bp				X				X
N4																
N5				●				● Bl Bp	● Bl Bp	●			X	●		X
Gr : Grillage Continu					Bp : béton projeté			Bl : Blindage bois ou métallique								

(A.F.T.E. S)

Critère : Hydrogéologie

				Boulons			Cintres		Voussoirs		Procèdes spéciaux								
				Pas de soutènement	Béton	à ancrage ponctuel	à ancrage réparti	Barres foncées	Lourds	Légers coulissants	Plaques métallique	Béton	Tubes préforés	Bouclier ou pousse Tube	Injection	Air Comprimé	Congélation		
Hors d'eau																			
Roche R1 à R4	Charge	H1	Perméabilité	K1 K2 K3		Dr	●	●	⊗	●	●				X				
				K4		⊗	●		⊗	●	●					●			
		H2 ou H3		K1 ou K2		Dr	●	●	⊗	●							X		
		K3 ou K4			⊗			⊗	●								●		
Sols R5 et R6	Charge	H1 H2 ou H3	Perméabilité	K1 ou K2	⊗	X Dr	⊗			●	●	●	●		X				
				K3	⊗	⊗	⊗	⊗		X	Enf	Enf	● Enf	● Bcl		●	●	●	●
				K4	⊗	⊗	⊗	⊗	X	Enf Bif	Enf Bif	Bcl Bif	● Bcl Bif	Bif	● Bif	●		●	

Dr : avec drainage

Enf : avec enfilage

Bif : avec blindage

Bcl : avec Bouclier

(A.F.T.E. S)

Critère : Couverture

		Pas de soutènement	Béton Projeté	Boulons			Cintres		Voussoirs		Tubes préforés	Bouclier ou pousse Tube	Procèdes spéciaux		
				à ancrage ponctuel	à ancrage réparti	Barres foncées	Lourds	Légers coulissants	Plaques métallique	Béton			Injection	Air Comprimé	Congélation
Roche R1 à R4	Couverture < D	X			X	●	●				X		X		
	CN1	●			X						X				
	CN2	X			X						X				
	CN3	X	X	●	●	X					X				
Sols R5 R6	Couverture < 1,5 D	X	X	X	X	●	●	●	●	●	●	●		●	
	σ° Modéré	X		X											
	$\sigma^\circ > 10$ MPa	X	X	X						●	●	●			

(A.F.T.E. S)

Critère : Dimensions de la galerie et environnement

	Pas de soutènement	Béton Projeté	Boulons			Cintres		Voussoirs		Tubes préforés	Bouclier ou pousse Tube	Procèdes spéciaux		
			à ancrage ponctuel	à ancrage réparti	Barres fongées	Lourds	Légers coulissants	Plaques métallique	Béton			Injection	Air Comprimé	Congélation
D < 2.50 m		X	X	X	X		●	●			●			
2,50 < D < 10 m														
D > 10 m		● Bo	●	●		X	Bo Rev							

Bo : Boulonnage Obligatoire

Rev : mise en place rapprochée du revêtement définitif

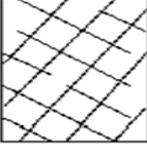
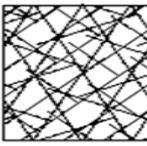
Environnement

Sensibilité aux tassements	X	Ci Pm	Bp	Bp	Bp	Act	X	Enf	Bcl		Inj			
----------------------------	---	-------	----	----	----	-----	---	-----	-----	--	-----	--	--	--

Ci : Cintres et boulons pour les terrains de Classes R4, Bp : avec Béton Projeté, Act : Cintres actifs (a vérins) et calages expansibles
 Inj : Injection de bourrage immédiates ou anneaux extensibles, Bcl : avec Bouclier, Enf : avec Enfilage Pm : pré découpage mécanique (pour terrains R2b et R5a)

❖ La méthode de Hoek & Brown

Introduit par Hoek, Kaiser et Bawden (1995), le **GSI** est un nombre sans dimension, déterminé empiriquement, qui varie entre 5 et 85, et qui peut être estimé à partir d'un examen de la qualité de la masse rocheuse in situ. La méthode **GSI** s'appuie donc sur une observation directe de la structure du massif rocheux. La Figure ci-dessous (d'après Hoek, 1995) présente les 20 codes qui permettent d'identifier chaque catégorie de masses rocheuses, et d'estimer la valeur du **GSI** à partir des conditions de surface des discontinuités et de leur structure. Par définition, les valeurs proches de 5 correspondent à des matériaux de très mauvaise qualité, tandis que les valeurs proches de 85 décrivent des matériaux d'excellente qualité (pour lesquels la résistance de la masse est égale à celle de la matrice rocheuse).

<p>CARACTERISTIQUES DE LA MASSE ROCHEUSE POUR L'ESTIMATION DE LA RESISTANCE</p> <p>À partir de l'apparence de la roche, choisir la catégorie qui donne, selon vous, la meilleure description des conditions moyennes de structure in situ. [...] Le critère de <u>Hoek-Brown</u> devrait uniquement être appliqué à des masses rocheuses dont la taille des blocs individuels est petite devant celle de l'excavation.</p>		<p>CONDITIONS DE SURFACE</p> <p>TRES BONNES Surfaces fraîches, non-altérées, très rugueuses</p> <p>BONNES Surfaces couleur de fer, rugueuses et légèrement altérées</p> <p>MOYENNES Surfaces lisses, altérées ou moyennement altérées</p> <p>PAUVRES Surfaces aux contours lisses, fortement altérées avec enduit ou remplissage compact de fragments anguleux</p> <p>TRES PAUVRES Surfaces aux contours lisses, fortement altérées avec enduit ou remplissage d' argile plastique</p>				
<p>STRUCTURE</p>		<p>QUALITÉ DÉCROISSANTE</p>				
	<p>FRACTURÉE – masse rocheuse non perturbée, très bien assemblée, constituée de blocs cubiques formés par trois familles de discontinuités orthogonales</p>	80	70	60	50	40
	<p>TRÈS FRACTURÉE – masse rocheuse partiellement perturbée, bien assemblée, constituée de blocs anguleux à plusieurs facettes formées par au moins quatre familles de discontinuités orthogonales</p>	70	60	50	40	30
	<p>FRACTURÉE/DESTRUCTURÉE – blocs anguleux formés par plusieurs familles de discontinuités entrecoupées, avec pliures et/ou failles</p>	60	50	40	30	20
	<p>DÉSINTÉGRÉE – masse rocheuse fortement broyée, mal assemblée, avec un mélange de blocs rocheux anguleux et arrondis</p>	50	40	30	20	10

Estimation du GSI à partir d'une description géologique de la masse rocheuse, d'après Hoek et Brown (1995).

Les méthodes de calcul numérique :

Ces méthodes représentent le terrain et le soutènement comme des solides et elles permettent de prendre en compte trois aspects majeurs d'une modélisation d'un tunnel :

- La structure et la géométrie du soutènement avec les lois de comportement des matériaux
- La géométrie des différentes unités géomécaniques identifiées dans la zone d'étude et leur loi de comportement

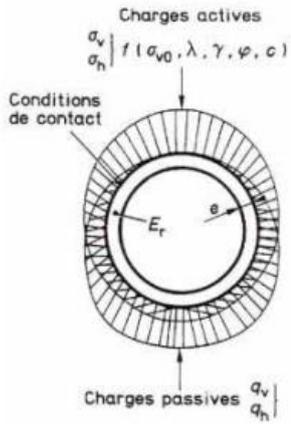
- Les phases d'excavation de l'ouvrage et de mise en place du soutènement.

Les méthodes courantes utilisées sont la méthode des éléments finis, la méthode des différences finies, la méthode des blocs, et la méthode des éléments distincts. Les difficultés du calcul numérique des tunnels rejoignent en fait les difficultés rencontrées dans tout problème géotechnique. Ces difficultés sont liées, d'une part, à la modélisation des massifs de sol, à la détermination des paramètres de calcul et d'autre part à la bonne représentation des différentes phases de creusement du tunnel. En effet, les sols sont très rarement homogènes et leurs propriétés mécaniques et hydrauliques peuvent varier grandement d'un point à l'autre d'un massif ou d'une couche de sol

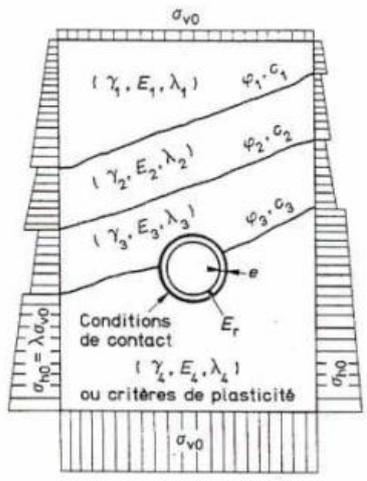
Méthode Convergence-Confinement :

L'intérêt de cette méthode est de substituer à un problème tridimensionnel un problème bidimensionnel en déformation plane de l'interaction terrain-soutènement. Elle est beaucoup plus simple que le modèle tridimensionnel. La démarche originale a été suggérée par [Fenner.1938] ensuite reprise par [Pacher .1964] (cité par AFTES (2002)). Le principal défaut de ces premières approches était de ne pas tenir compte des déformations du terrain qui interviennent avant la mise en place du soutènement. Pour pallier ce défaut, [Lombardi.1973] a proposé une méthode en utilisant une ligne caractéristique du « noyau », une notion de convergence au front, alors que [Panet.1974] a proposé de prendre en compte les déformations qui interviennent avant la mise en place du soutènement par le truchement du taux de déconfinement. Cette méthode a fait par ailleurs l'objet de recommandations de l'AFTES. [1984, 1993, 2002]. La section suivante présente la méthode convergence-confinement d'après [AFTES .2002].

Méthodes des actions et réactions

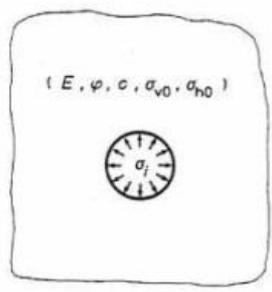


Méthode du solide composite



- σ charges actives
- $\lambda = \sigma_{h0} / \sigma_{v0}$
- γ poids volumique
- φ angle de frottement interne
- c cohésion
- E module d'élasticité

Méthode convergence - confinement



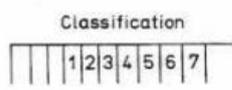
+
 Hypothèses sur le moment et le mode de chargement du soutènement

σ_A, σ_B

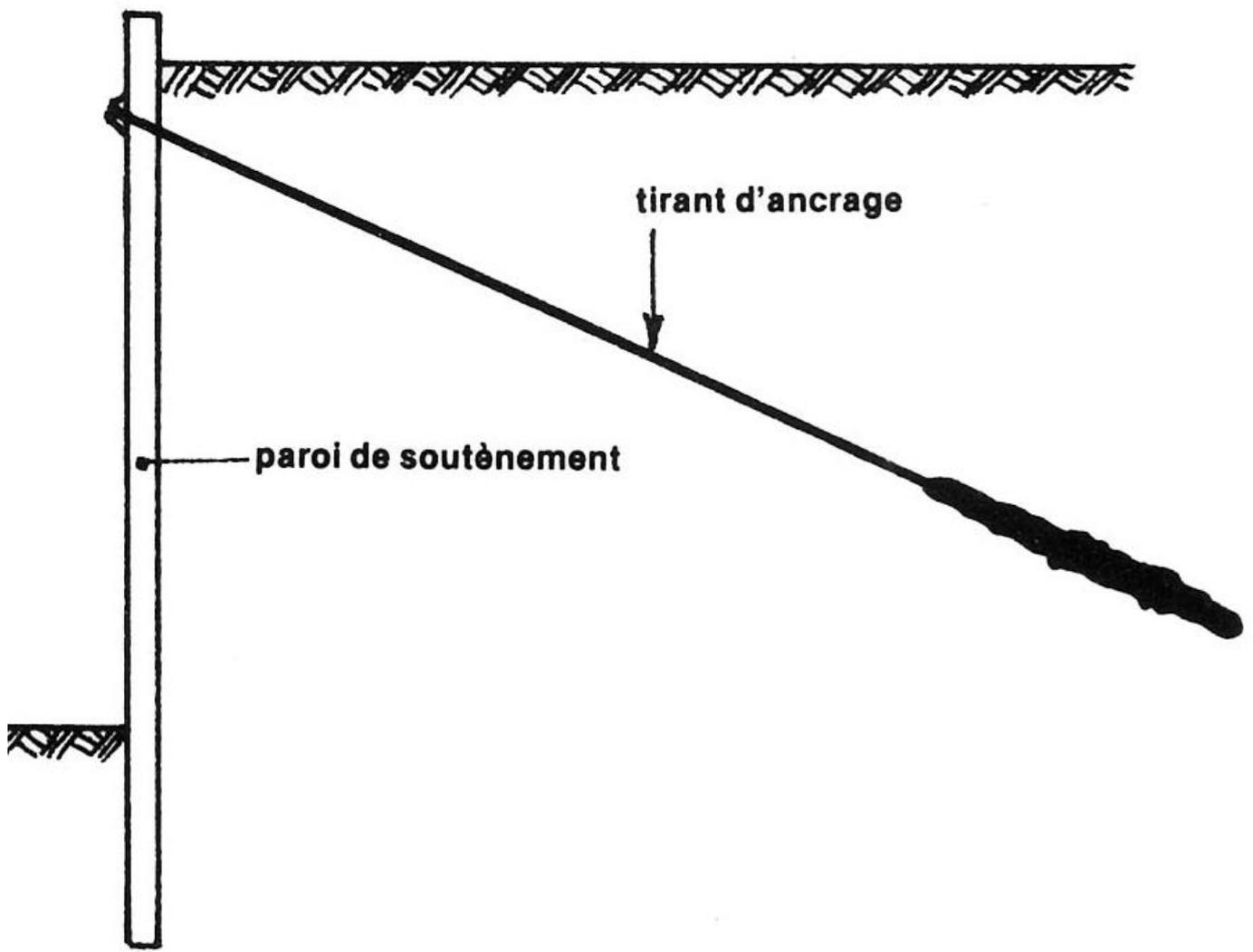
Déformation et état de contraintes du terrain et du soutènement

Méthodes empiriques

- Discontinuités
- Hydrologie
- Contraintes géostatiques
- Plasticité
- Gonflement
- Durée de stabilité constatée
- Dimensions ...



Mode de soutènement



Chapitre 2 : Réservoirs enterrés

1) Classification des réservoirs

a) Selon la fonction

- de distribution ou d'équilibre
- de régularisation de pompage
- de réserve pour le combat d' incendies
- autres

b) Selon l'implantation

- Enterrés
- Semi enterrés
- Élevés (tours de pression)

c) Selon la capacité

- Petits ($V < 500\text{m}^3$)
- Moyens (500 m^3 et 5000 m^3)
- Grands ($V > 5000\text{ m}^3$) ”

e) Selon les matériaux de construction

- Béton Armé
- Brique
- Métallique
- Polyéthylène
- D'autres

f) Selon la nature de produit stocker

- D'eau
- Hydrocarbure
- D'autre

2) Méthode d'exécution

a) Méthode traditionnelle (Classique)

b) Méthode de Paroi mouille



Etanchéité

- 1 Etanchéité en lés à base de bitume
- 2 Etanchéité en lés de matière synthétique
- 3 Mortiers imperméables

Chapitre 3 : Conduites enterrées

Types de matériaux

Matériaux plastiques

- PEHD – Polyéthylène haute densité
- PVC – polychlorure de vinyle
- PVCC – polychlorure de vinyle surchloré
- PP – polypropylène
- PRFV – Polyester renforcé de fibre de verre

Matériaux métalliques/Béton

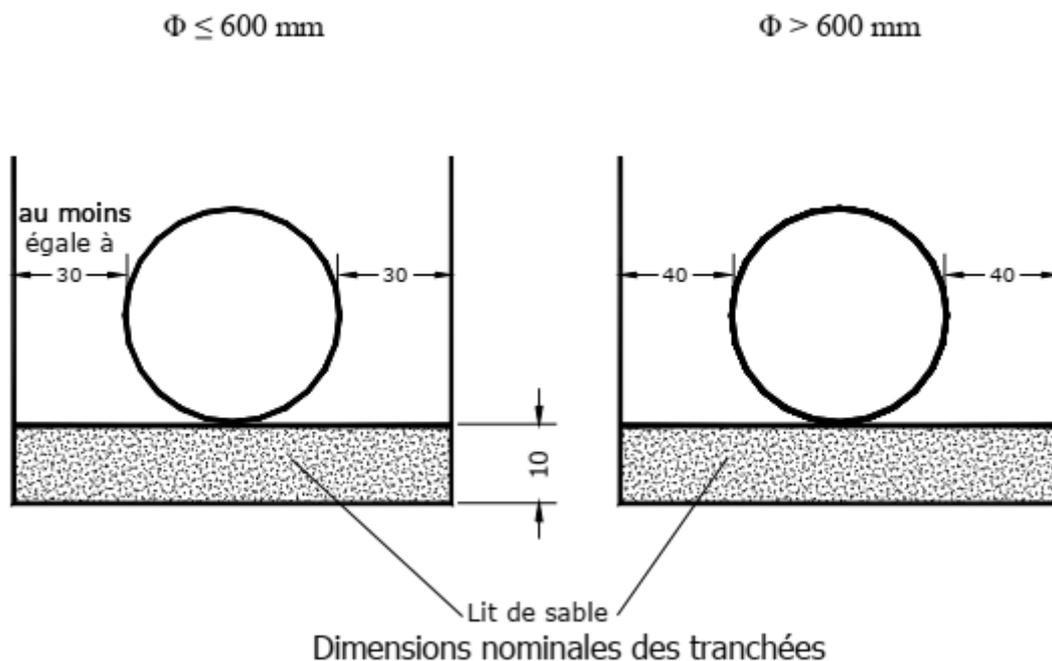
- Fonte Acier
- Béton armé
- Amiante-ciment (fibre-ciment), utilisation déconseillée

Le choix du type de matériaux dépend de :

- La nature fluide (effluent) à transporter
- La nature de terrain
- Stabilité mécanique de la conduite
- Coûts de fourniture et de mise en œuvre
- Facilité à réaliser les raccordements, les réparations

La pose des conduites en tranchée

Dimensionnement



Les différentes couches d'une tranchée

