

Introduction générale aux ouvrages souterrains

MÉCANIQUE DES
ROCHES ET
OUVRAGES
SOUTERRAINS

Dr. F. SANDRONE



Diapositives importantes



Diapositive de moyenne importance

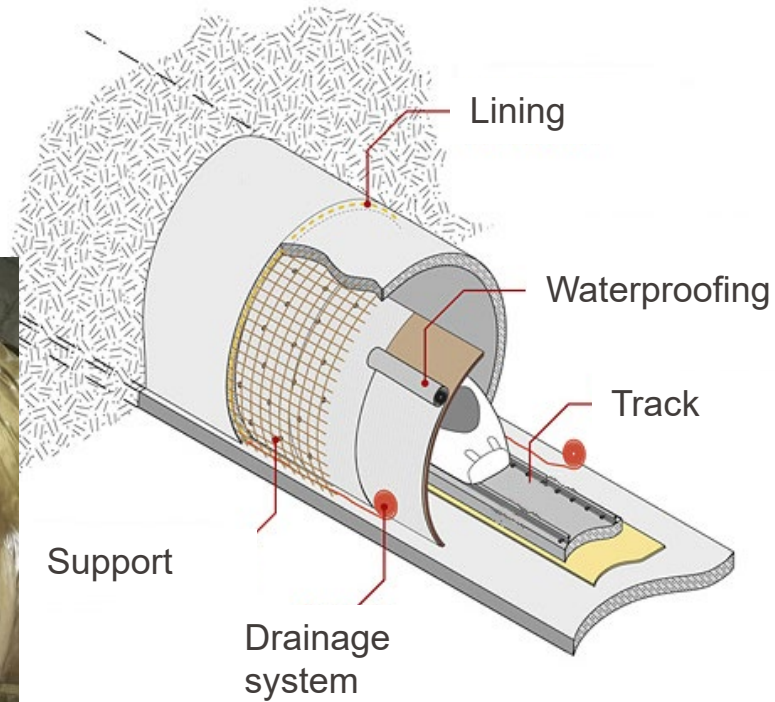


Diapositive de faible importance

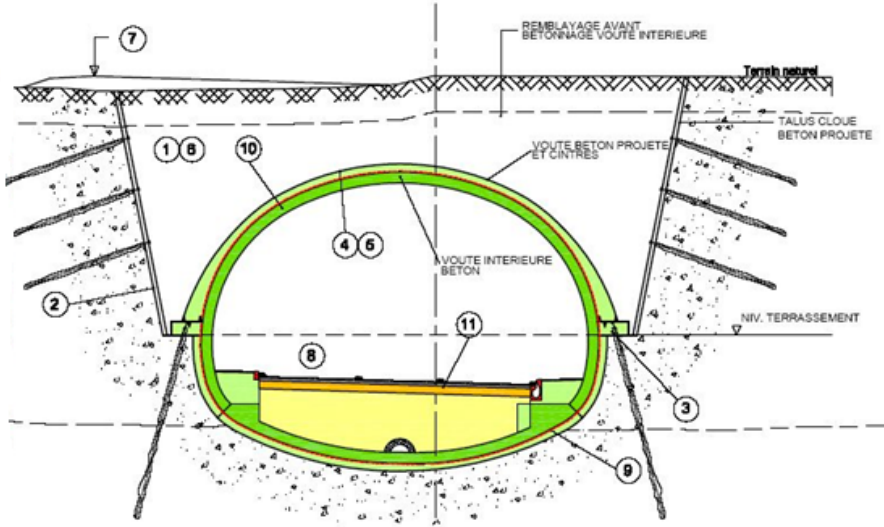
Introduction générale aux ouvrages souterrains

1. **Types de tunnels**
2. Normes et directives / Lexique de base
3. Influence des conditions géologiques sur l'excavation
 - 3.1 Méthodes de reconnaissance
4. Méthodes d'excavation et consolidation du terrain
5. Influence de la taille et de la séquence d'excavation
 - 5.1. Géométrie du tunnel
 - 5.2. Influence de la taille
 - 5.3. Excavation en section divisée ou en pleine section
6. Redistribution des contraintes et déformations
 - 6.1. Solutions analytiques (Lamé & Kirsch)
7. Influence de la forme du tunnel sur contraintes et déformations
 - 7.1. Forme elliptique
 - 7.2. Forme et effets K_0

1. Types de tunnels : Tunnels excavés



1. Types de tunnels : Tranchées couvertes



Introduction générale aux ouvrages souterrains

1. Types de tunnels
2. **Normes et directives / Lexique de base**
3. Influence des conditions géologiques sur l'excavation
 - 3.1 Méthodes de reconnaissance
4. Méthodes d'excavation et consolidation du terrain
5. Influence de la taille et de la séquence d'excavation
 - 5.1. Géométrie du tunnel
 - 5.2. Influence de la taille
 - 5.3. Excavation en section divisée ou en pleine section
6. Redistribution des contraintes et déformations
 - 6.1. Solutions analytiques (Lamé & Kirsch)
7. Influence de la forme du tunnel sur contraintes et déformations
 - 7.1. Forme elliptique
 - 7.2. Forme et effets K_0

2. Normes suisses pour les tunnels



Normes suisses :

- SIA 197 - 197/1 & 197/2 (*Projets de tunnels – Bases générales*)
- SIA 198 (*Constructions souterraines – Exécution*)
- SIA 118/198 (*Conditions générales pour constructions souterraines*)

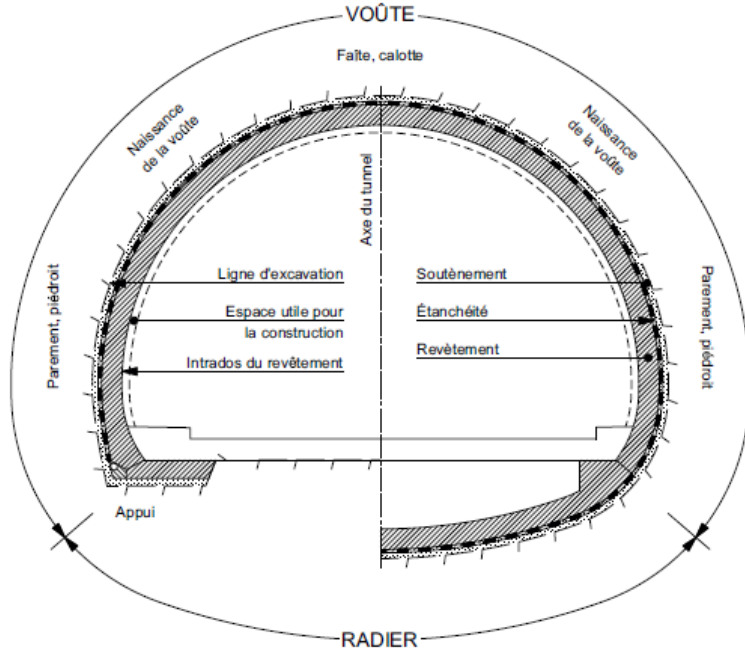
Définition du tunnel selon la norme SIA 198 (2023)

Ouvrage souterrain avec une inclinaison maximale de 20 %.

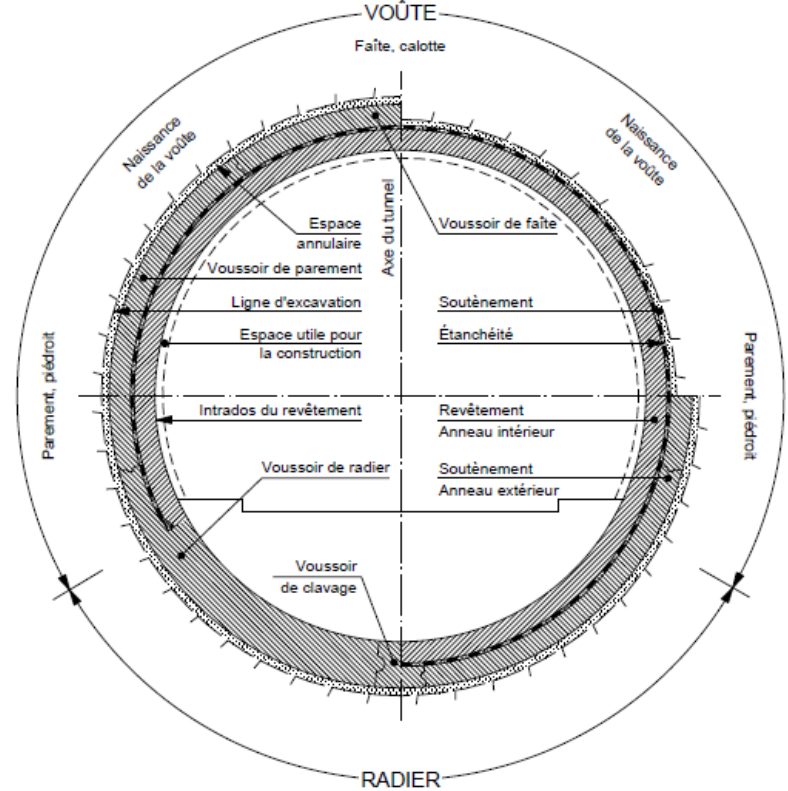
La norme **SIA 198** ne s'applique pas aux:

- Tranchées couvertes (voir Norme SIA 267)
- Puits d'une profondeur inférieure à 20m (voir Norme SIA 267)
- Fonçage de tubes - Pousse tube et battage (voir Norme SIA 195)

2. Lexique de base pour les tunnels



Méthode d'excavation conventionnelle



Excavation au tunnelier

Introduction générale aux ouvrages souterrains

1. Types de tunnels
2. Normes et directives / Lexique de base
- 3. Influence des conditions géologiques sur l'excavation**
 - 3.1 Méthodes de reconnaissance**
4. Méthodes d'excavation et consolidation du terrain
5. Influence de la taille et de la séquence d'excavation
 - 5.1. Géométrie du tunnel
 - 5.2. Influence de la taille
 - 5.3. Excavation en section divisée ou en pleine section
6. Redistribution des contraintes et déformations
 - 6.1. Solutions analytiques (Lamé & Kirsch)
7. Influence de la forme du tunnel sur contraintes et déformations
 - 7.1. Forme elliptique
 - 7.2. Forme et effets K_0

3. Influence des conditions géologiques sur l'excavation

Critères de base pour le choix de la méthode d'excavation (d'après SIA 198)

- Massif rocheux / Conditions géologiques
- Eaux souterraines / Conditions hydrogéologiques
- Conditions locales (topographie, aspects environnementaux, présence de structures / infrastructures dans le voisinage, etc.)
- Aspects liés à la conception (profil normal standard, longueur de l'excavation, couverture, type d'excavation, délais, etc.)

3. Influence des conditions géologiques sur l'excavation



De mauvaises conditions géologiques peuvent influencer l'excavation et la pose de soutènements.

Il est nécessaire d'investiguer aussi bien que possible les conditions du massif rocheux / du terrain avant de procéder à la construction.

L'analyse des conditions géologiques est partie intégrante du processus de conception d'un ouvrage souterrain:

- La **caractérisation du massif rocheux** est nécessaire pour la conception (**Systemes de classification du massif rocheux**)
- La **récolte d'informations détaillées** est nécessaire pour le dimensionnement (**Optimisation de la construction et du soutènement → Influence sur les coûts finaux et la durée du projet**)

Adapter le projet aux conditions géologiques locales

Avant de creuser un tunnel, il est important de tenir compte de l'**orientation des contraintes** in situ par rapport à l'axe du tunnel ainsi que de la forme du tunnel.

En cas de conditions de couverture importante (tunnels à grande profondeur), des fortes pressions d'eau, des mauvaises conditions géologiques et/ou de la présence de roches gonflantes un **radier voûté ou le choix d'une section circulaire** peuvent réduire les problèmes liés à l'instabilité de l'excavation.

Éviter **les accidents géologiques majeurs** : par exemple, les failles, présence de mylonites et cataclases, roches trop fissurées, roches altérées, roches peu résistantes à grande couverture et contraintes élevées, les terrains gonflants, terrains non cohésifs...

3. Influence des conditions géologiques sur l'excavation



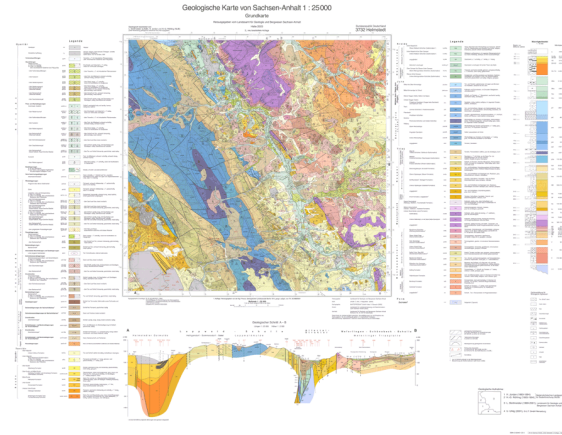
Les données peuvent provenir de **plusieurs sources** :

- Données provenant d'autres sites d'excavation / construction,
- Cartographie géologique et géotechnique,
- Reconnaissance in situ (sondages / géophysique),
- Essais en laboratoire et in situ

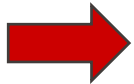
3. Influence des conditions géologiques sur l'excavation

Analyse documentaire et études photographiques

- Cartes, photographies aériennes, imagerie et données satellitaires relatives au site
- Informations complémentaires provenant d'autres projets
- Visite du site



Identifier où des informations plus détaillées sont nécessaires



Campagne de reconnaissance in situ

3.1 Méthodes de reconnaissance



Objectif :

Identifier les conditions géologiques et hydrogéologiques les plus probables lors de l'excavation et les problèmes potentiels (par ex. infiltration d'eau, failles, gaz...) + améliorer la connaissance du comportement du massif (**déformation et résistance**)

→ Confirmer la cartographie de base par des **tests simples effectués in situ**

Deux types d'exploration :

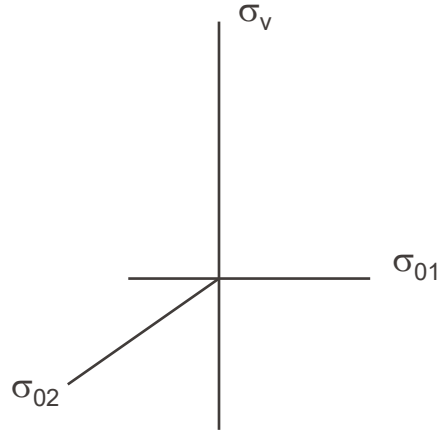
- Exploration indirecte → géophysique
- Exploration directe → sondages



3.1 Méthodes de reconnaissance – Essais in situ



Contraintes in situ



Hypothèse la plus utilisée:

$$\sigma_v = \gamma Z$$

$$\sigma_{01} = K_{01} \sigma_v$$

$$\sigma_{02} = K_{02} \sigma_v$$

$$K_{01} = K_{02} = K_0$$

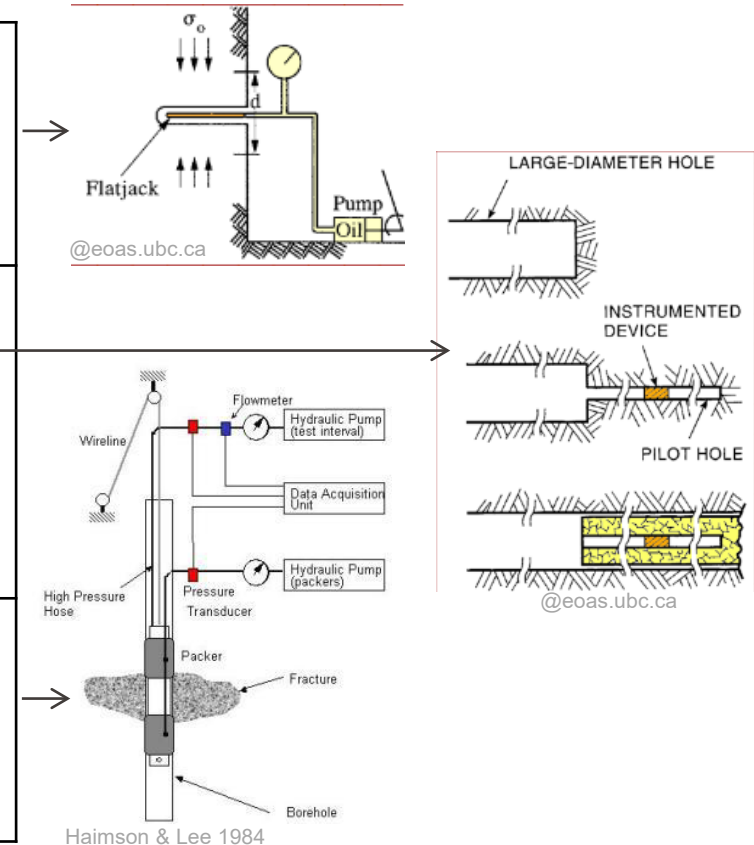
en conditions oedométriques, matériau linéaire élastique:

$$K_0 = \nu / (1 - \nu)$$

→ Essais in situ pour estimer des valeurs plus précises des contraintes

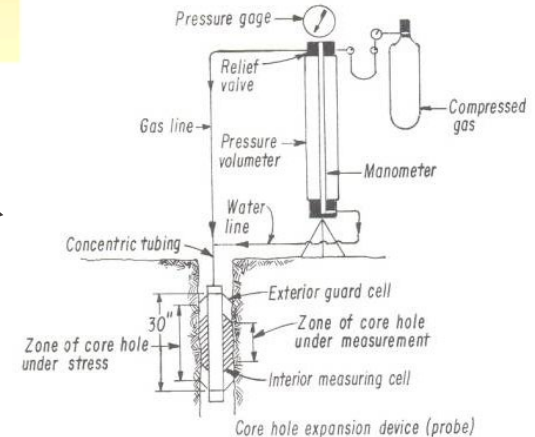
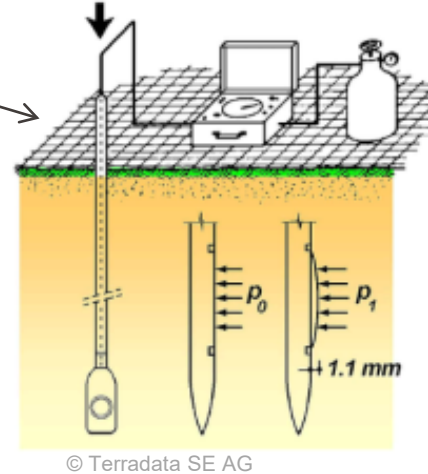
Contraintes in situ

Vérin plat	Principe de compensation des contraintes : insertion d'un vérin plat dans une fente taillée dans la roche et remise de la roche dans sa position d'origine avant la réalisation de l'entaille au moyen du vérin.
Surcarottage	Un petit forage est instrumenté et surcarotté : la déformation due à la libération des contraintes est mesurée pendant le surcarottage. Les contraintes peuvent être estimées (déformation + propriétés élastiques de la roche).
Fracturation hydraulique	Le forage est scellé et pressurisé. La contrainte in situ est induite par les pressions nécessaires à ouvrir une fracture, la maintenir ouverte et en permettre sa propagation.


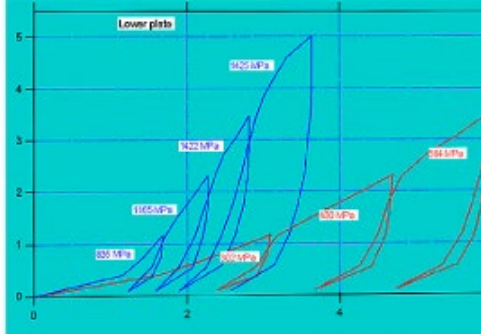


Modules in situ

Dilatmètre plat	<p>Le dilatmètre plat, ou DMT, est un dispositif in situ utilisé pour déterminer la contrainte latérale et la rigidité latérale du sol. Le test consiste à enfoncer une lame d'acier dans le sol, à gonfler la membrane d'acier et à mesurer la pression et la déformation correspondantes.</p>
Pressiomètre	<p>L'essai pressiométrique consiste à appliquer progressivement une charge latérale au terrain à l'aide d'une sonde cylindrique à réglage radial qui est introduite dans le soil. On obtient ainsi une courbe montrant les variations de déformation du sol correspondant à la pression appliquée.</p>



Modules in situ

Vitesses des ondes P et S	Mesure la vitesse des ondes P et S → modules élastique et de cisaillement dynamiques
Essai de charge sur plaque	Utilisé pour déterminer la déformabilité de la roche à travers la mesures de la charge et des déplacements des parois. Les essais sont généralement effectués avec des plaques de charge opposées. Des vérins hydrauliques sont utilisés pour presser les deux plaques contre les parois de la galerie. <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div>

! Les essais à grande échelle peuvent être assez coûteux et difficiles à réaliser.



Détermination indirecte des propriétés de la roche (ex. marteau de Schmidt) + Essais en laboratoire

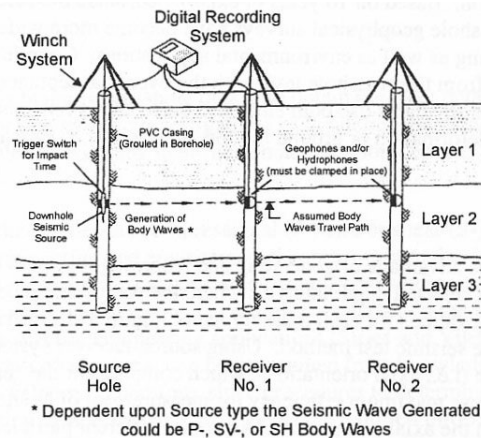
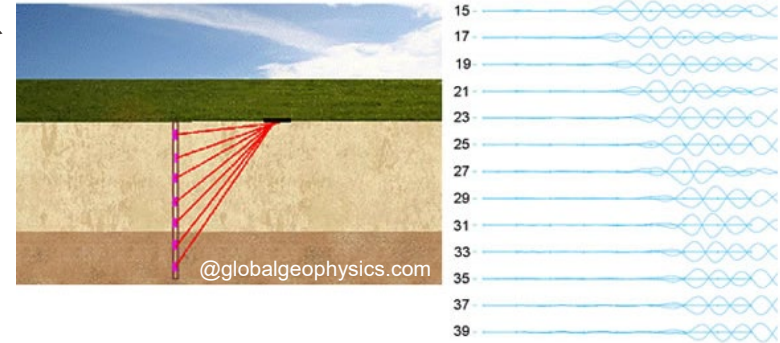
3.1 Méthodes de reconnaissance – Essais in situ



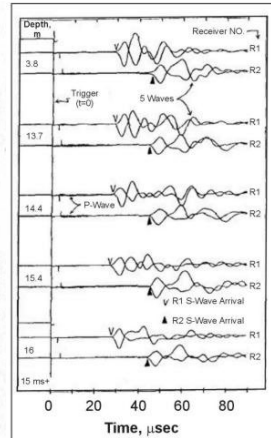
Essai sismique en forage (géophysique)

Forage unique (profil sismique vertical)

C'est la technique sismique la plus simple à mettre en œuvre. Une source d'énergie sismique externe est appliquée à une certaine distance du forage. Un ensemble de géophones le long des parois du forage mesure le temps de trajet des ondes sismiques.



* Dependent upon Source type the Seismic Wave Generated could be P-, SV-, or SH Body Waves



Méthode sismique transversale (cross-hole) :

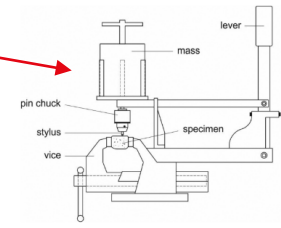
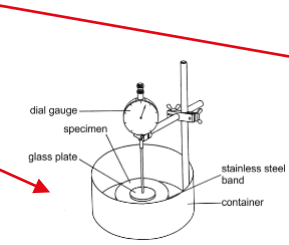
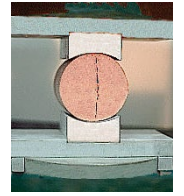
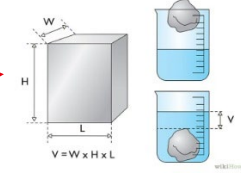
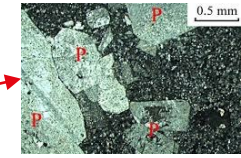
Consiste à mesurer les temps de propagation des ondes sismiques de compression (P) et de cisaillement (S) entre plusieurs forages afin de déterminer les paramètres géodynamiques.

Une source d'énergie sismique est utilisée dans le forage et des réseaux de géophones récepteurs sont descendus dans les forages voisins.

3.1 Méthodes de reconnaissance – Essais en laboratoire



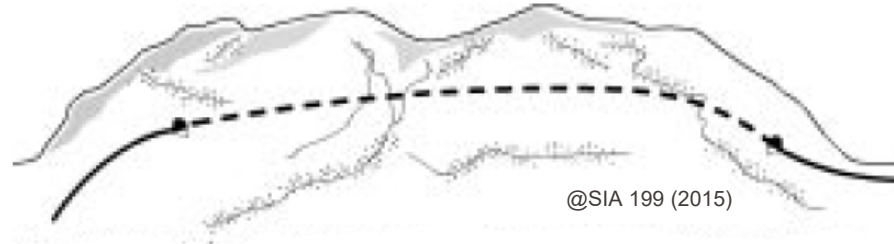
<p>Pétrographie, Examen visuel, Minéralogie (ratio roche/sol)</p>	<p>Minéralogie et altération</p>
<p>Densité, porosité, teneur en eau, vitesse du son</p>	<p>Propriétés physiques</p>
<p>Point Load Test, Compression uniaxiale / triaxiale, Essai de traction indirecte (brésilien), Essai de cisaillement</p>	<p>Résistances et modules de déformation, conditions des joints</p>
<p>Durabilité / Alterabilité / Abrasivité</p>	<p>Résistance à l'alteration / Abrasivité</p>
<p>Test d'indice de gonflement</p>	<p>Propriétés de gonflement</p>



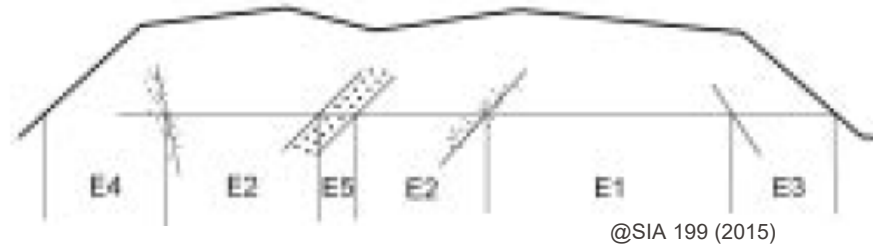
3.1 Méthodes de reconnaissance – Synthèse



Souterrain : invisible, inconnu, incertain



Reconnaissance et études de terrain → Synthèse



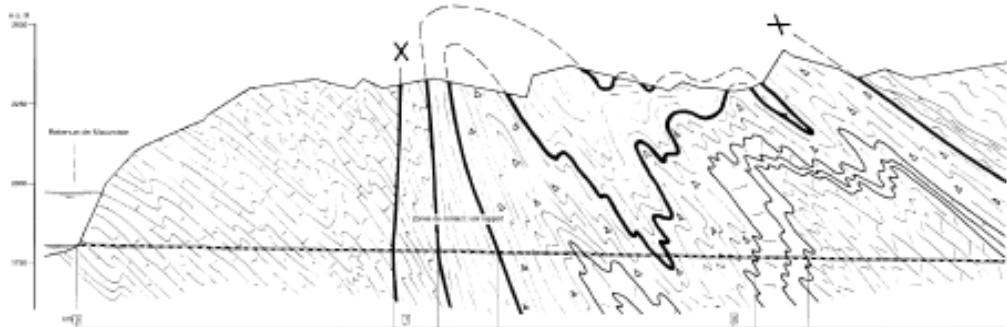
Modèle géologique et géotechnique :

Segmentation et hiérarchisation → Sous-unités homogènes

3.1 Méthodes de reconnaissance – Synthèse



SIA 199 - Etude du massif encaissant pour les travaux souterrains



COGÉNÈSE	Stratigraphie	Unité	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000
GÉOLOGIE	Unité stratigraphique	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	
	Unité géologique	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	
NATURE DE LA ROCHE	1. Type de roche	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	
	2. Nature de la roche	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	
ROCHE	1. Résistance à la compression	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	
	2. Résistance à la traction	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	
DISCONTINUITÉS	1. Orientation	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	
	2. Angle d'inclinaison	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	
HYDROGÉOLOGIE	1. Perméabilité	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	
	2. Conductivité	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	
MASSIF ROCHEUX	1. État de conservation	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	
	2. Niveau de saturation	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	
RISQUES	1. Type de risque	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	
	2. Niveau de risque	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	

- Géologie,
- Description de la roche,
- Comportement de la roche,
- Discontinuités,
- Hydrogéologie,
- Massif Rocheux,
- Risques

Introduction générale aux ouvrages souterrains

1. Types de tunnels
2. Normes et directives / Lexique de base
3. Méthodes de reconnaissance
4. **Méthodes d'excavation et consolidation du terrain**
5. Influence de la taille et de la séquence d'excavation
 - 5.1. Géométrie du tunnel
 - 5.2. Influence de la taille
 - 5.3. Excavation en section divisée ou en pleine section
6. Redistribution des contraintes et déformations
 - 6.1. Solutions analytiques (Lamé & Kirsch)
7. Influence de la forme du tunnel sur contraintes et déformations
 - 7.1. Forme elliptique
 - 7.2. Forme et effets K_0

4. Principes de base de l'excavation



Le creusement d'un tunnel nécessite l'**enlèvement** de roches et de terrains meubles.

Les roches doivent être concassées à une taille appropriée pour être **transportées** du front de taille du tunnel vers l'extérieur. Les tunnels dans la roche sont creusés à l'aide d'**explosifs** ou de différents types de **machines d'excavation**.

Le défi de l'excavation d'un ouvrage souterrain est toujours la **stabilité des parois et du front** pendant l'excavation.

Cela a conduit au développement historique des machines avec **boucliers** et de plusieurs méthodes de **consolidation du terrain**.

4. Critères de sélection des méthodes d'excavation



- **Profondeur du tunnel**
- **Emplacement du tunnel**
(vibration, place)
- **Longueur du tunnel (coûts)**
- **Temps** (livraison et installation)
- **Utilisation finale**
- **Conditions géologiques :**
 - Roche ou terrain meuble
 - Résistance et abrasivité de la roche
 - Cohésion et distribution de la taille des grains
 - Présence d'eau
 - Homogénéité

4. Méthodes d'excavation courantes



ROCHE

- Excavation à l'explosif (pleine section ou calotte-stross)
 - Résistance de la roche, discontinuités, abrasivité
- Machines à l'attaque ponctuel et haveuse
- Tunnelier (TBM)
- Excavation séquentielle / cyclique et fermeture du radier
 - contraintes/déformations, stabilité du front de taille

TERRAIN MEUBLE

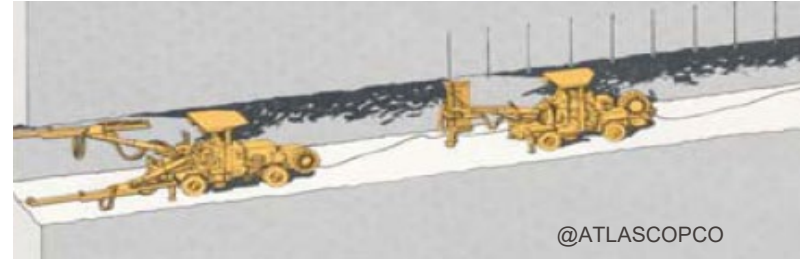
- Machines à l'attaque ponctuel et pelleteuses
- Excavation séquentielle
 - Résistance du sol, déformabilité, cohésion (! stabilité du front de taille)
- Excavation en pleine section (tunnelier à bouclier*, EPB et slurry shield)
 - courbe de distribution des grains, perméabilité

*Brunel père et fils, 1825; Greathead, 1864
Construits pour le creusement de tunnels sous la Tamise

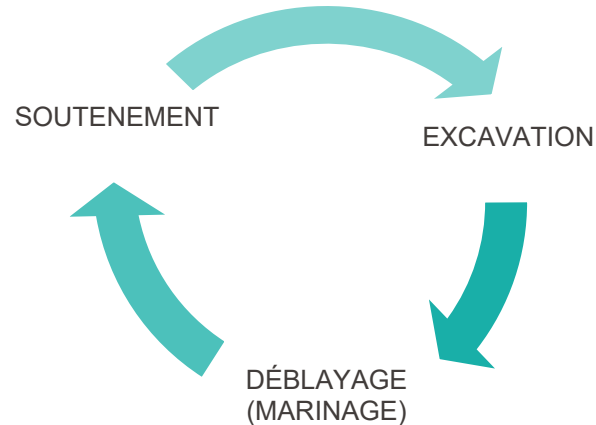
4. Méthode conventionnelle



- Processus d'excavation cyclique
- Avancement par petites étapes
- Attaque en pleine section complète ou partielle



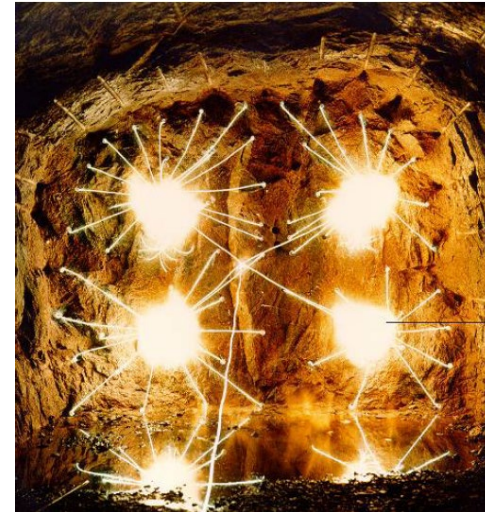
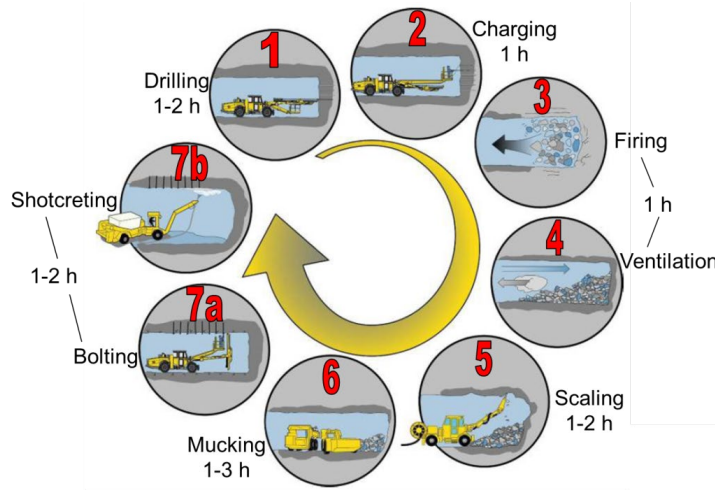
@ATLASCOPCO



4. Abattage à l'explosif



La méthode d'excavation à l'explosif est généralement utilisée dans **les roches dures**. Des trous sont forés dans le front de taille et chargés. Cette méthode est parmi les plus utilisés en roche dure, en particulier pour les excavations de **forme non circulaire**. L'excavation est généralement soutenue par des **boulons et du béton projeté**. Dans des conditions défavorables, il est possible d'utiliser des cintres métalliques. Le revêtement final peut être en béton coulé sur place.



4. Machines à l'attaque ponctuel



L'**excavation conventionnelle** à l'aide de machines à l'attaque ponctuel consiste à creuser soit en pleine section soit en section divisée (excavation séquentielle). L'excavation est soutenue à l'aide de boulons, de béton projeté et/ou de cintres en acier. Le revêtement définitif est en béton coulé sur place.

MAP {
Pelleteuse
Haveuse

Brise-roche à percussion, ripper, marteau piquer et pelle mécanique pour roches altérés et terrains compact

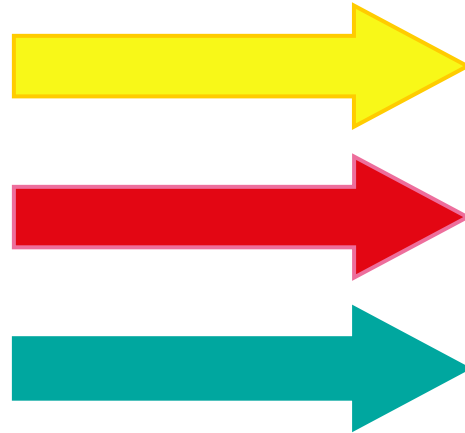
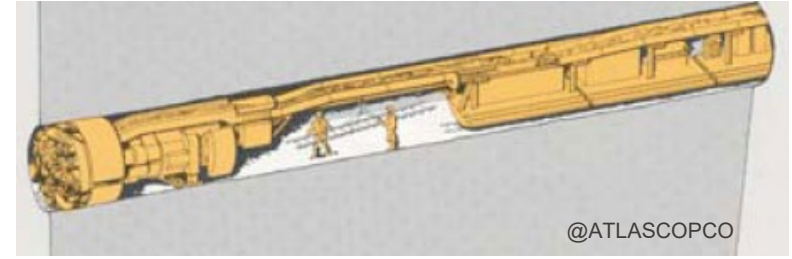
Roche compacte



4. Excavation mécanisé en continu



- Excavation en continu
- Déblayage des matériaux excavés
- Mise en place de soutènements

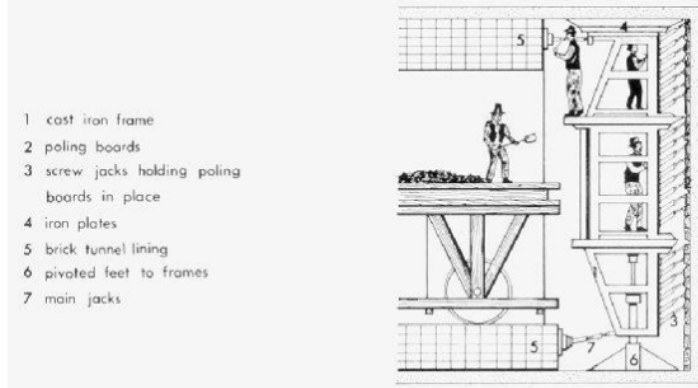


EXCAVATION

DÉBLAYAGE (MARINAGE)

SOUTÈNEMENT

4. Tunneliers avec bouclier - Histoire



Le creusement de tunnel avec un bouclier date de 1825 pour le creusement d'un passage sous la Tamise par Brunel père et fils. Ce bouclier rectangulaire a permis la construction d'un tunnel en brique de 366 m en 16 ans sans incident grave. Ce passage sous la Tamise est toujours utilisé



En 1864 James Henry Greathead démarre le creusement d'un tunnel circulaire revêtu d'un anneau de voussoirs en acier circulaire et boulonné. Le bouclier s'appuie et avance en s'appuyant sur le voussoir, et le front est stabilisé par une pression d'air. Ce tunnel sous la Tamise est généralement considéré comme le fondateur des tunnels moderne en sol.

4. Tunneliers aujourd'hui



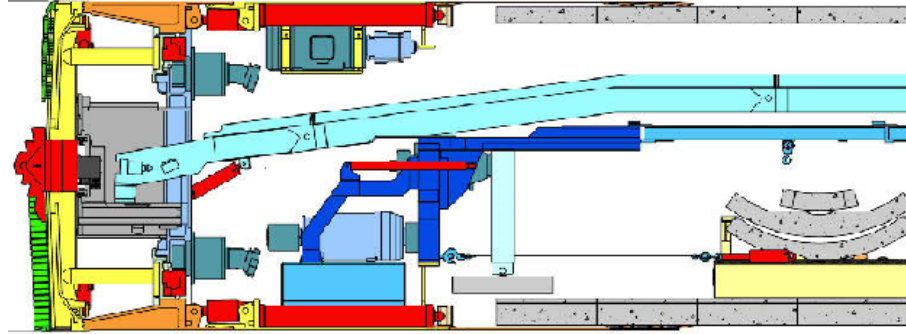
Les tunneliers sont utilisés **pour les roches dures et fragiles**. Ils **réduisent généralement la perturbation des roches encaissantes et assurent une meilleure exécution des travaux**. Le soutènement des roches encaissantes est généralement assuré par des **boulons et du béton projeté**. Un revêtement de **voussoirs en béton préfabriqués** est également fréquemment utilisé.

Grande section circulaire :

- 12 m pour le tunnelier à gripper
- 15-17 m pour le tunnelier à bouclier



4. Tunneliers : Marinage et soutènement



Marinage continu



Érection des anneaux de voussoir (tunnelier avec bouclier): ca. 20-40 min. par anneau





*Tunnelier
pour
roche*

Tunnelier sans
bouclier

Aléseur

Tunnelier ouvert (à gripper)

*Tunnelier
pour
terrains
meubles*

Tunnelier à
bouclier

À soutènement mécanique

À soutènement à air comprimé

À soutènement de boue

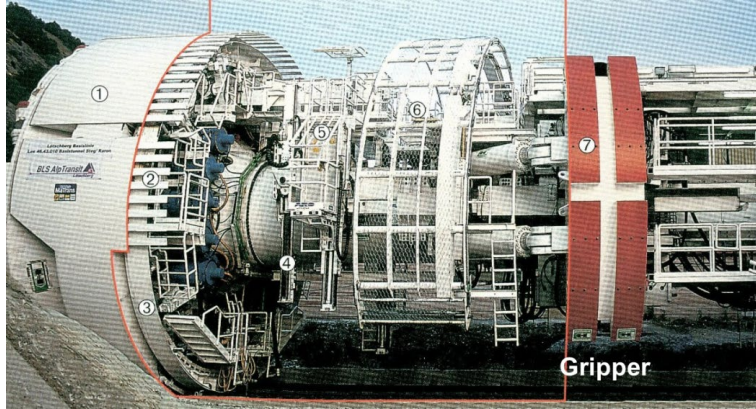
*À soutènement à la pression de
terre*

Bouclier
hybride

Double bouclier

Bouclier convertible EPB-Slurry

4. Tunneliers pour roche



TBM à gripper

Massif stable et résistant

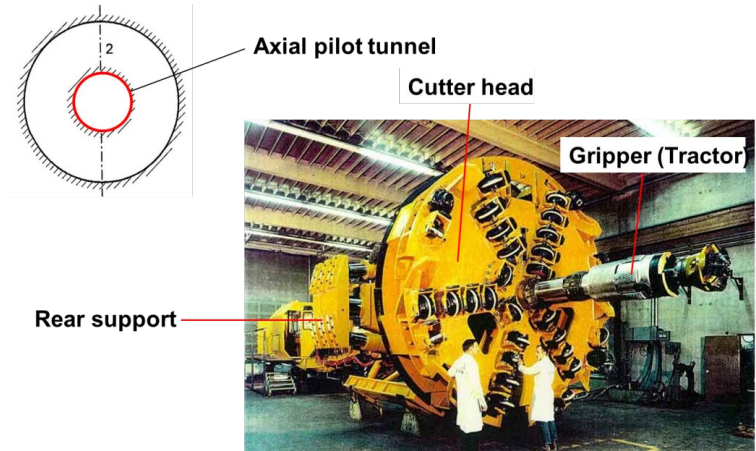
Homogénéité

Les grippers assurent l'avancement de la machine (appuis latéraux)

Tunnelier aléueur

Élargissement de l'excavation après forage pilote

Traction sur les parois du forage pilote (grippers)

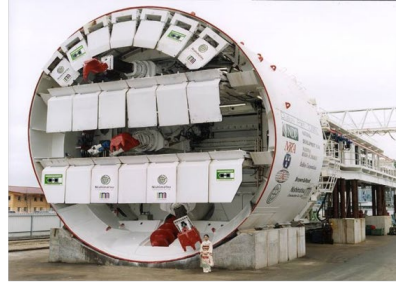


4. Tunneliers pour terrains meubles



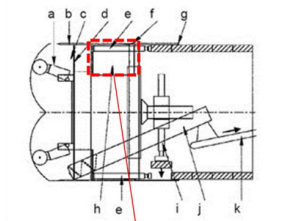
Un anneau de voussoirs en béton préfabriqué est utilisé comme soutènement.
Différents types de boucliers sont disponibles pour le creusement de tunnels dans des conditions variées :

Bouclier ouvert



Bouclier à pression de boue (slurry)

Bouclier à l'air comprimé



Airlock Cutting Chamber



Bouclier à la pressions de terre

4. SIA 198 (2023) - Annexe D : Champ d'application des tunneliers



Critères	Géologie, terrain	Rocher			Terrain meuble				
		Stable ou légère tendance à l'éboulement	Tendance à l'éboulement ou à la rupture	Front de taille instable	Front de taille stable		Front de taille instable ($c_u < \sigma_v/6$)		
					Durée de stabilité du pourtour du tunnel Suffisant	Durée de stabilité du pourtour du tunnel Insuffisant	Instabilité du pourtour du tunnel		
Résistance de la roche, critères géotechniques, composition	$\sigma_c > 2 \sigma_v$	Plastification du pourtour du tunnel $1,5 \sigma_v < \sigma_c < 2 \sigma_v$	Plastification / instabilité du front $\sigma_c < 1,5 \sigma_v$, $c < \sigma_v/6$	Résistance > contrainte verticale initiale $c_u > \sigma_v/2$	Résistance < contrainte verticale initiale $\sigma_v/2 > c_u > \sigma_v/6$	Sans cohésion	Pastique et sensible à l'eau	Causes multiples	
Description des terrains meubles	Remarque: Pour l'appréciation des conditions de stabilité de la roche en place, on tiendra compte non seulement des caractéristiques géomécaniques, mais également de la fracturation ou des effets tectoniques.			Argile consolidée	Argile consolidée	Gravier – sable – (argile)	Limon argileux – argile		
Classification des terrains meubles (USCS) Position du niveau de l'eau souterrain (NES): <u>souligné</u>				CL, CH <u>En dessus du NES:</u> ML, GM, SM	CL, CH	<u>En dessus et sous du NES:</u> GW, GP, SW, SP <u>En dessus du NES:</u> GM, SM, ML, classes combinées	CL, CM, GC, SC		
Champs d'application	TBM sans bouclier								
	TBM avec bouclier								
	Bouclier avec soutènement mécanique du front								
	Bouclier à air comprimé	Soutènement étanche en voissours			1)	1)	2)		
	Bouclier à pression de boue				3)	3)		4)	
Bouclier à pression de terre				5)	5)			6)	

NES: niveau de l'eau souterrain; σ_v : contrainte verticale initiale; σ_c : résistance à la compression uniaxiale; c: cohésion; c_u : cohésion apparente

adéquat possible inadéquat

Points à considérer en cas d'avancements en terrain meuble:

- 1) Nécessité d'un contrôle des venues d'eau
- 2) Danger de pertes d'air et d'éboulements
- 3) Contrôle éventuel des venues d'eau
- 4) Problèmes d'adhérence ou d'engorgement
- 5) Abrasion élevée
- 6) Avec ajouts

Remarques générales:

- Le tableau ne donne qu'une vue très générale des champs d'application possible en se basant sur un choix réduit de critères. Les conditions spécifiques à l'ouvrage sont seules déterminantes. En effet, de petites modifications de la composition du terrain meuble ou des conditions hydrogéologiques suffisent à générer d'importantes variations de comportement du terrain.
- En cas de grandes hauteurs de couverture combinées avec une qualité médiocre du terrain, les boucliers risquent d'être coincées à la suite de convergences trop importantes.

4. Autres méthodes d'excavation



Pousse-tube	Enfoncer des éléments en béton ou des tuyaux en acier sous la protection d'un bouclier. Cette méthode est utilisée dans des conditions de terrain allant d'un terrain mou à une roche fragile. Excavation de tunnel de petit diamètre.
Tranchée couverte	Principalement utilisé dans les terrains meubles, avec une tranchée ouverte en surface qui va être recouverte par la suite. Pendant l'excavation, le terrain doit souvent être soutenu temporairement. Le soutènement définitif est généralement assuré par des structures en béton coulé sur place.
Tunnel immergé	Cette méthode ne s'applique qu'aux tunnels sous-marins (sous-eau). Le tunnel est construit à l'aide d'éléments préfabriqués assemblés sur le rivage /quai, flottés et coulés en place sur le lit de la rivière ou de la mer, soudés ensemble et drainés.

4. Consolidation du terrain



Lorsque le massif rocheux est instable, pour assurer la stabilité de l'excavation

Il peut s'agir d'une **intervention locale** ou d'un **renforcement systématique**.

Dans le premier cas, il s'agit principalement d'une **solution temporaire**, tandis que dans le second cas, le **comportement du terrain/massif rocheux est amélioré** et les caractéristiques du terrain/du massif changent.

Le renforcement des tunnels doit être pris en compte lors du dimensionnement et de l'installation des soutènements.

L'efficacité des mesures apportées doit être vérifiée et la solution adaptée à l'évolution des conditions du massif pendant l'avancement.

4. Mesures de stabilisation à l'avancement



Cohésion et résistance très faibles



Excavation instable



Mesure de soutènement à l'avancement :

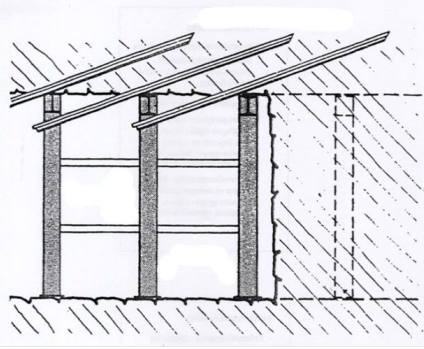
- Lances
- Voûte parapluie
- Ancrage du front (fibre de verre)



Consolidation :

- Injections
- Jetting
- Congélation (temporaire)
- Drainage

4. Mesure de soutènement à l'avancement



Lances (*Spiles*) / "Marciavanti"



Forepoling (*Pipe umbrella*)



Steel rods ~ 4 m

Prevent large
surface settlements
(low overburden
and/or poor ground)

! friction, stress and
deformability



Lunardi Method:
VTR face bolting (*Face anchors*)

Injection (coulis)

↑ Cohésion du massif

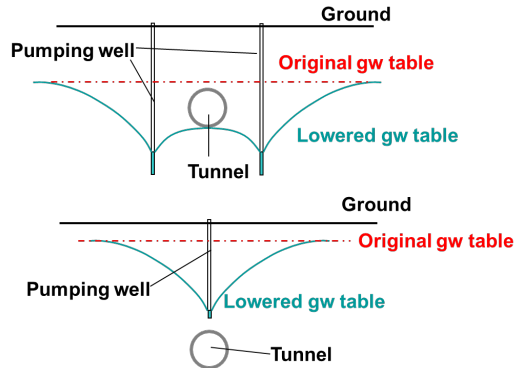
! Perméabilité et porosité du terrain

- Coulis de ciment, microciments
- Suspensions de silice colloïdale
- Coulis chimiques, polyuréthanes, coulis acryliques, résines époxy.
- Matériaux thermoplastiques (asphalte ou polyamides fondus)

Drainage

Collecte les infiltration d'eau et réduit la pression d'eau

↑ Stabilisation du front

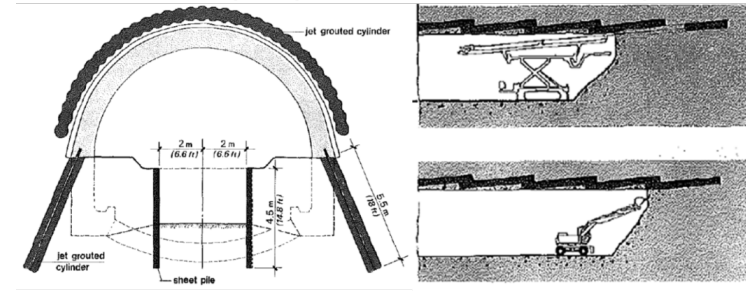


Jetting

↑ Qualité du terrain autour de l'excavation

! Perméabilité et porosité du terrain

→ Imperméabilise le tunnel et prévient des infiltration d'eau par le front d'excavation (instabilité)



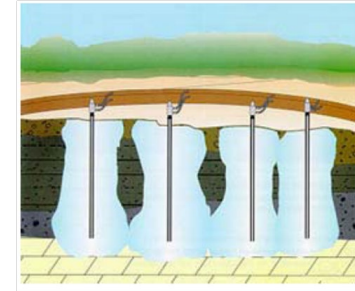
Congélation

Circulation d'un liquide de refroidissement réfrigéré dans une série de tuyaux souterrains.

Amélioration temporaire

→ l'eau devient glace en créant ainsi un matériau solide et étanche

! Perméabilité et conductivité thermique du terrain



4. SIA 198 (2023) - Annexe E :

Mesures de stabilisation à l'avancement



Méthode	Caractéristiques du terrain						
	Rocher		Terrain meuble				
	Stable ¹⁾²⁾	Instable	Cohésif, stable	Cohésif, instable	Compacité variable	Sans cohésion	Présence de blocs
Lances							
Voûte-parapluie							
Jet grouting (jetting)							
Injections							
Congélation							
Tirants du front de taille							
Drainages							

	Méthode adéquate
	Application envisageable (essais préalables éventuels)
	Méthode inadéquate, application inopportune ou pas nécessaire

- 1) Si des mesures doivent être prises pour éviter des répercussions indésirables dans le voisinage
- 2) Si des mesures doivent être prises en présence de surfaces de glissement

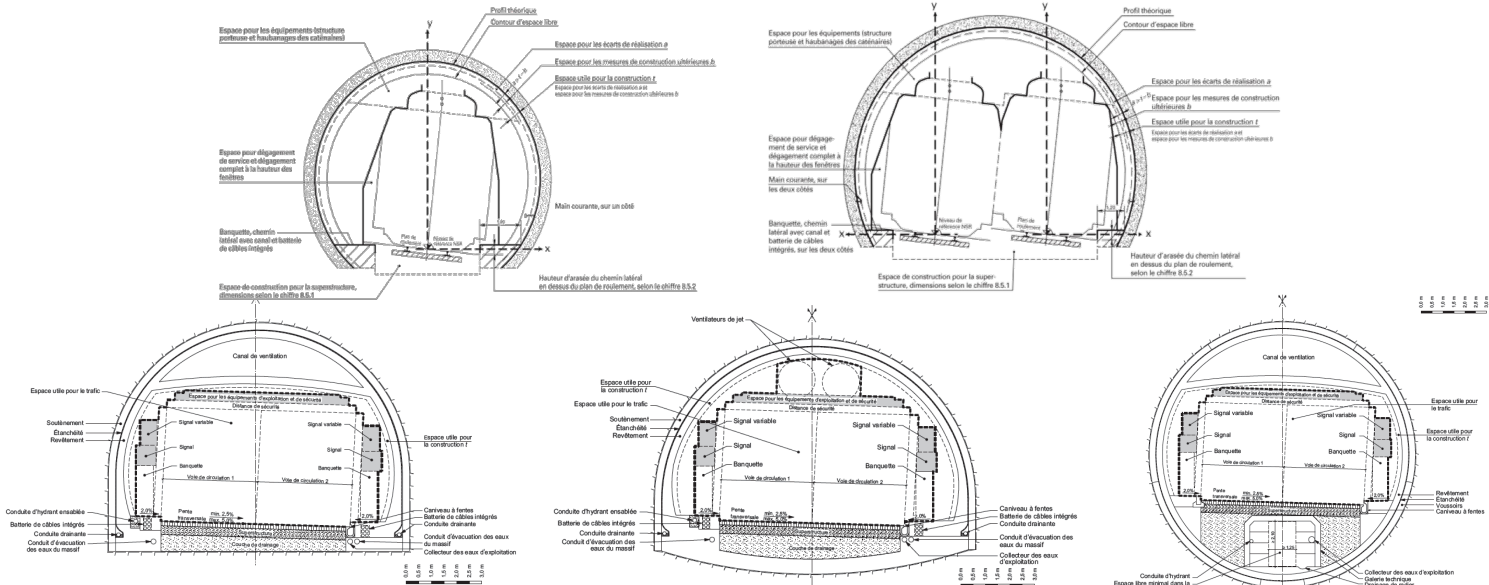
Introduction générale aux ouvrages souterrains

1. Types de tunnels
2. Normes et réglementations / Lexique
3. Méthodes de reconnaissance
4. Méthodes d'excavation et consolidation du terrain
- 5. Influence de la taille et de la séquence d'excavation**
 - 5.1. Géométrie du tunnel**
 - 5.2. Influence de la taille**
 - 5.3. Excavation en section divisée ou en pleine section**
6. Redistribution des contraintes et déformations
 - 6.1. Solutions analytiques (Lamé & Kirsch)
7. Influence de la forme du tunnel sur contraintes et déformations
 - 7.1. Forme elliptique
 - 7.2. Forme et effets K_0

5.1 Géométrie du tunnel



- Objectifs, fonction (par ex. génie civil)
- Emplacement et conditions géologiques
- Méthode d'excavation (traditionnelle ou mécanisée)
- Réglementation suisse Normes SIA: SIA 197 (2023), SIA 197/1, (2019), SIA 197/2 (2023)



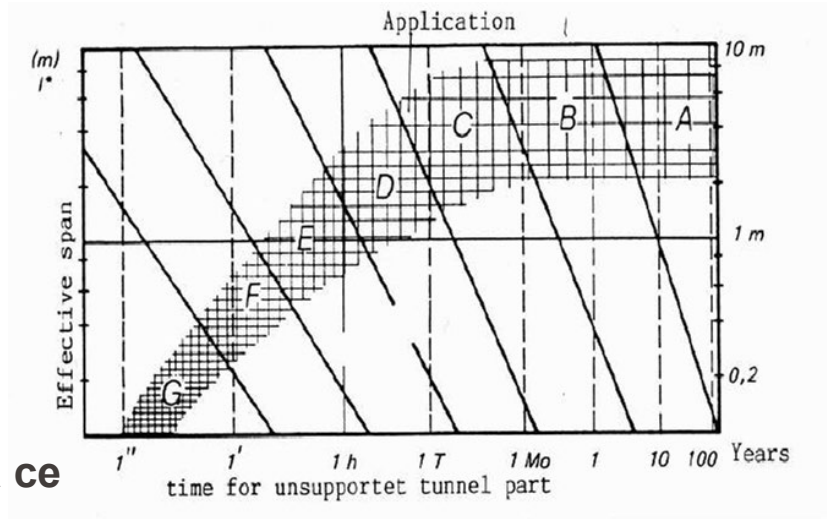
5.2 Stabilité de l'excavation



La durée pendant laquelle l'excavation est stable dépend:

- de la largeur (portée) du tunnel (b)
- du comportement géomécanique du massif rocheux :
 - A = très bonnes conditions
 - G = très mauvaises conditions

L'excavation doit rester stable jusqu'à ce que le soutènement soit mis en place (largeur non soutenue b ou l)

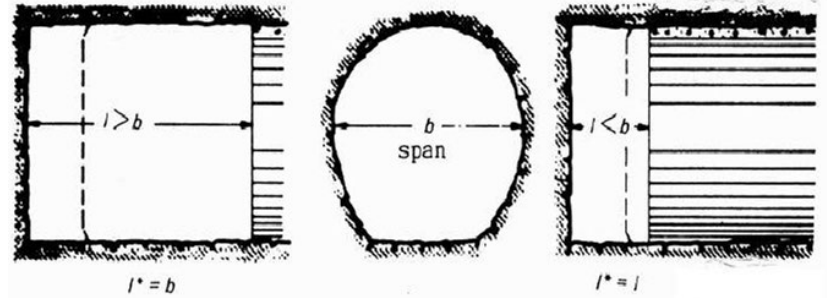


Excavation size \nearrow = Unstable rock volume \nearrow

The rock volume to be supported is directly proportional to:

$$(b)^2 \times l \text{ — elementary length (m) of tunnel}$$

tunnel principal dimension

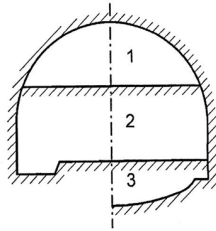


5.3 Excavation en section divisée

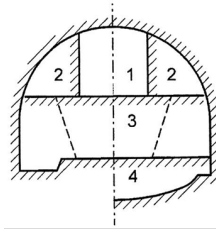


- La surface du front est trop grande (p. es. Cavernes)
- Avancement en parallèle
- Optimisation du taux d'avancement
- Des mesures de soutènement peuvent être mises en place en temps utile

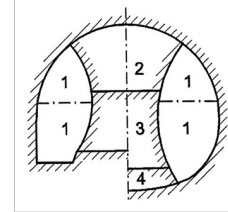
@SIA 198 (2023)



1. Top heading
2. Bench
3. Invert

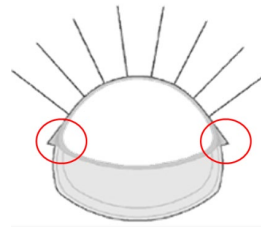


1. Top drift
2. Enlargement
3. Bench
4. Invert



1. Sidewalls drift
2. Crown
3. Central Core
4. Invert

“Méthode allemande”



Cintres en acier à “patte d'éléphant”

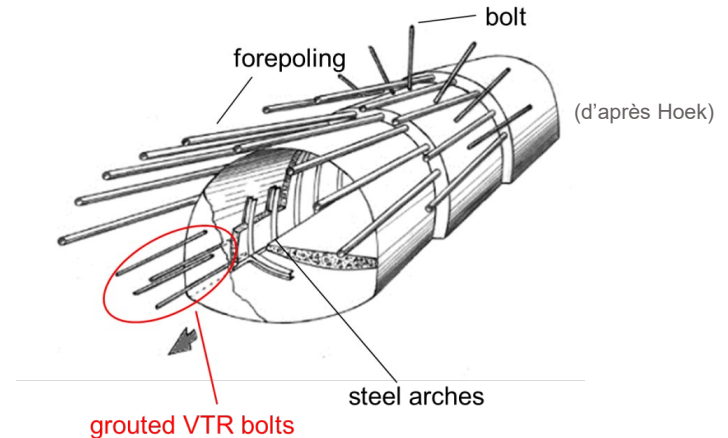
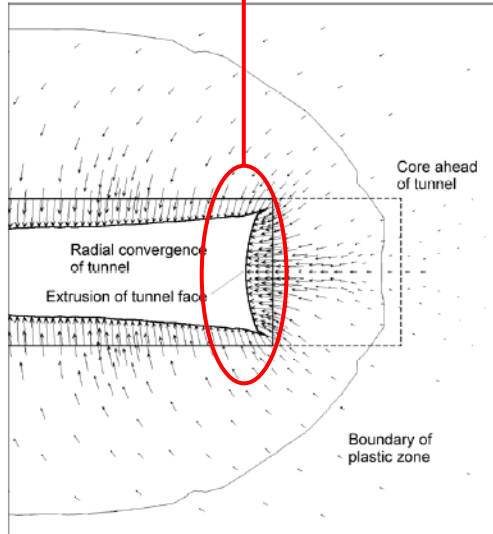
5.3 Excavation en pleine section



Toute la section du tunnel est ouverte / **excavée en une seule fois**



Il peut être nécessaire de **stabiliser le front d'excavation pour en contrôler les déplacements** :
boulons en fibre de verre (méthode Lunardi)



5.3 Séquence d'excavation vs. géologie



Conditions du massif	Pleine section	Section divisée	Détails / Type
Bonne qualité	 	 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Calotte-Stross, (radier voûté)
Qualité moyenne	 	 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Calotte-Stross, (radier voûté) ▪ Consolidation
Mauvaise qualité	 	 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Méthode allemande ▪ Bouclier ▪ Consolidation

Ancrage du front
(boulons en fibres
de verre)



“Excavation Disturbed Zone” / “Excavation Damaged Zone”

Le creusement d'un tunnel entraîne des changements dans les roches environnantes :

- Déformation mécanique localisée (déplacement notable des blocs)
- Modification de la distribution des contraintes
- Modifications de l'écoulement de l'eau et des propriétés hydrauliques du massif rocheux environnant (les propriétés hydrauliques de la roche ont été altérées par la déformation de la matrice / des blocs ou par l'ouverture / la fermeture des joints)

Introduction aux ouvrages souterrains

1. Types de tunnels
2. Normes et réglementations / Lexique
3. Méthodes de reconnaissance
4. Méthodes d'excavation et consolidation du terrain
5. Influence de la taille et de la séquence d'excavation
 - 5.1. Géométrie du tunnel
 - 5.2. Influence de la taille
 - 5.3. Excavation en section divisée ou en pleine section
6. **Redistribution des contraintes et déformations**
 - 6.1. **Solutions analytiques (Lamé & Kirsch)**
7. Influence de la forme du tunnel sur contraintes et déformations
 - 7.1. Forme elliptique
 - 7.2. Forme et effets K_0

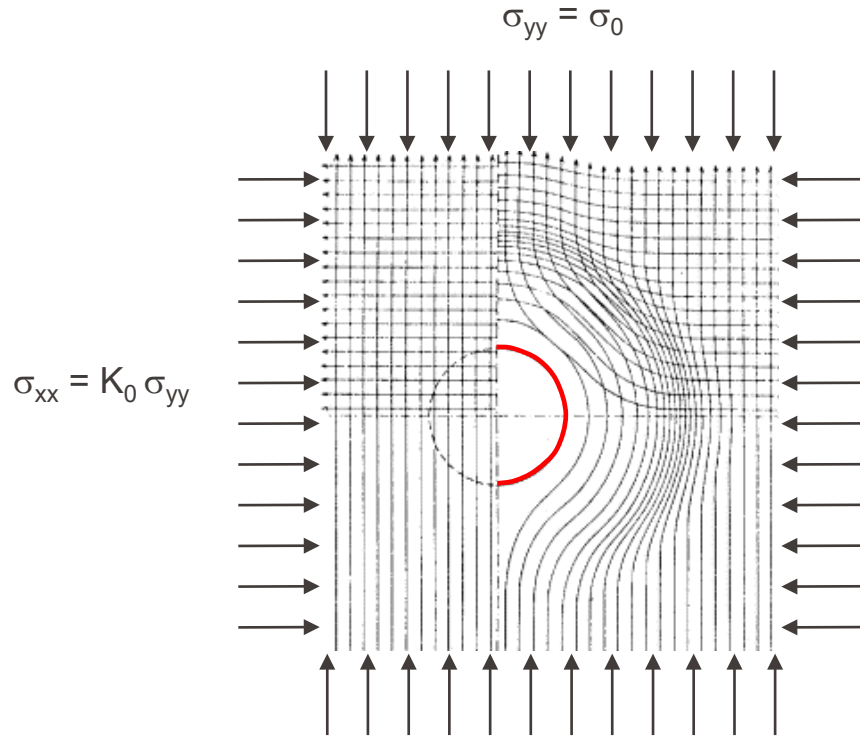


Lorsqu'un ouvrage souterrain est creusé, les contraintes à proximité de l'ouvrage sont redistribuées.

3 effets principaux de l'excavation :

1. La roche a été dégagée → **Déplacements**
2. Il n'y a pas de contraintes normales ni de cisaillement sur une surface d'excavation non soutenue → **Rotation des contraintes** : la limite de l'excavation devient un plan de contraintes principales avec l'une des contraintes principales ($\sigma_{zz}=0$) normale à la surface.
3. L'excavation agit comme un **drain**, tout fluide présent dans la massif rocheux aura tendance à s'écouler vers / dans l'excavation.

6. Redistribution des contraintes



(d'après Weismann 1912)

Champ de contraintes naturelles
préexistant dans le massif
(contraintes du champ lointain)



Creusement du tunnel



Modification du champ de
contraintes naturelles du massif
rocheux "Effet de voûte".

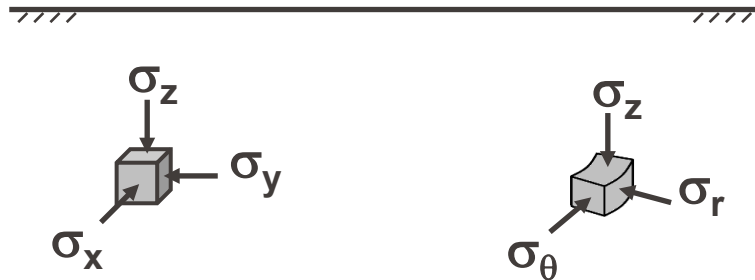
6. Champ de contraintes in situ



Le champ de contraintes avant l'excavation est représenté par 3 contraintes principales :

1. La contrainte verticale est généralement égale à la contrainte de recouvrement.
2. Les contraintes horizontales sont influencées par la contrainte tectonique (dans la roche) et par la poussée de terre (dans le sol).

Si l'excavation se trouve sous la nappe phréatique, il est nécessaire de tenir compte de la pression de l'eau (contrainte hydrostatique).

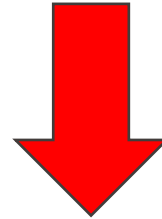


6. Contraintes in situ : contrainte verticale



Profondeur de l'excavation / couverture, $z = 1'000$ m

Poids volumique de la roche, $\gamma = 0,027$ MN/m³



27 MPa

Contrainte verticale sur l'élément =
action du poids du massif au dessus du
point considéré

$$\sigma_v = \gamma z$$

6. Contraintes in situ : contrainte horizontale



Rapport entre la contrainte horizontale moyenne et la contrainte verticale, K_0

K_0 augmente lorsque la profondeur diminue



Contrainte horizontale sur l'élément

$$\sigma_h = K_0 \sigma_v = K_0 \gamma z$$

Terzaghi & Richart (1952) :

massif rocheux chargée gravitationnellement, pas de déformation latérale pendant la formation des couches supérieures indépendante de la profondeur : $K_0 = \nu (1 - \nu)$

↓
Coefficient de Poisson du massif rocheux

6. Conditions du problème

1. Conditions au bord: état imposé de traction ou de déplacement à la surface de l'excavation et contraintes du champ lointain.
2. Équations différentielles d'équilibre
3. Équations constitutives du massif (matériaux)
4. Équations de compatibilité des déformations

6. Contraintes principales



Aucune contrainte de cisaillement n'agit sur les plans principaux

Contraintes du champ lointain : $\sigma_{yy} = \sigma_0$, $\sigma_{xx} = K_0 \sigma_{yy}$, $\sigma_{zz} = 0$

Contraintes principales

$$\begin{pmatrix} \sigma_{yy} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{zz} \end{pmatrix}$$

6.1 Solutions analytiques



- Les premières solutions analytiques ont été développées par **Lamé en 1852** pour évaluer la **distribution des contraintes autour d'une excavation cylindrique (sphérique)** dans un milieu élastique sous charge **hydrostatique**. Ces solutions ont été développées par **Kirsch en 1898** considérant des **conditions de charge non uniformes**.
- Les **solutions analytiques** ont encore une grande valeur pour la **compréhension du comportement d'une excavation** et pour la **validation des modèles numériques**.
- Elles ont une **valeur pratique limitée** : principalement utilisées pour la **conception préliminaire** d'un tunnel, ces modèles sont limités à des géométries et des modèles de comportement (lois constitutives) très simples.

6.1 Solutions analytiques : Hypothèses



- Sous-sol : espace semi-infini, isotrope, linéaire et élastique
- Limite supérieure : surface horizontale correspondante à la surface du terrain
- Tunnel : cavité de forme tubulaire avec section circulaire (problème axisymétrique)
- État de contrainte principales : avant la construction du tunnel. Cet état prévaut également après l'excavation du tunnel à une distance suffisamment grande du tunnel (c'est-à-dire contrainte du champ lointain).

6.1 Solutions analytiques : Fondamentaux



Équation d'équilibre de la mécanique des milieux continus en coordonnées cylindriques (problème axisymétrique plan) → équation différentielle

Equation d'équilibre de la mécanique du continuum (en coordonnées cylindriques) en contraintes principales :

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{r} = 0$$

$$\sigma_r = (\lambda + 2G)\varepsilon_r + (\lambda\varepsilon_\theta)$$

$$\sigma_\theta = (\lambda + 2G)\varepsilon_\theta + (\lambda\varepsilon_r)$$

avec λ , G = constantes de Lamé :

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$



Le tenseur de déformation 2D dans des conditions axysymétriques est décrit par :

$$\begin{aligned}\varepsilon_{rr} &= \frac{\partial u_r}{\partial r} \\ \varepsilon_{\theta\theta} &= \frac{u_r}{r} \\ \varepsilon_{r\theta} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} \right)\end{aligned}$$

En supposant que le vecteur déplacement n'a pas de composante dans la direction tangentielle $\rightarrow u_\theta = 0$ (déformation plane)

Le tenseur de déformation se réduit à : $\varepsilon_{rr} = \frac{\partial u_r}{\partial r}$, $\varepsilon_{\theta\theta} = \frac{u_r}{r}$, $\varepsilon_{r\theta} = 0$

6.1 Solution de Lamé (1852)

Section transversale circulaire

r = rayon du tunnel

Contrainte hydrostatatique principale

$$\sigma_v = \sigma_h = \sigma_0$$

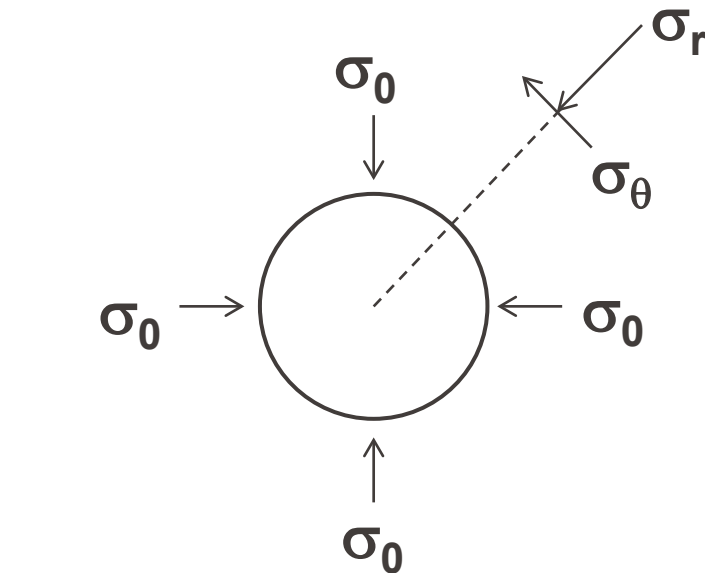
Milieu élastique linéaire

E, ν

PROBLÈME AXYSIMÉTRIQUE PLAN

$$\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{u_r}{r^2} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} \right) = 0$$

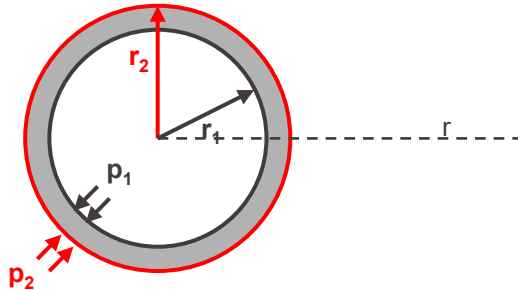


Avec solution générale: $u_r = Ar + \frac{B}{r}$

6.1 Solution de Lamé (1852)



1. Contrainte primaire hydrostatique
2. Symétrie axiale
3. Tube épais - matériau élastique linéaire



$$r_2 \rightarrow \infty$$

$$p_2 \rightarrow \sigma_0$$

$$r_1 \rightarrow R$$

$$p_1 \rightarrow 0$$

$$\sigma_{rr} = \sigma_0 \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \sigma_0 \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right)$$

Équilibre radial (direction r) :

$$\sigma_{rr} = \frac{p_2 r_2^2 - p_1 r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{p_2 - p_1}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \frac{r_2^2 r_1^2}{r}$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{p_2 r_2^2 - p_1 r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{p_2 - p_1}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \frac{r_2^2 r_1^2}{r}$$



$$\sigma_r = 0$$

$$\sigma_{\theta} = 2\sigma_0$$

6.1 Solution de Kirsch (1898)



Section transversale circulaire

R = rayon du tunnel

H = profondeur du tunnel

Contrainte biaxiale

$$\sigma_{yy} = \sigma_v = \sigma_0$$

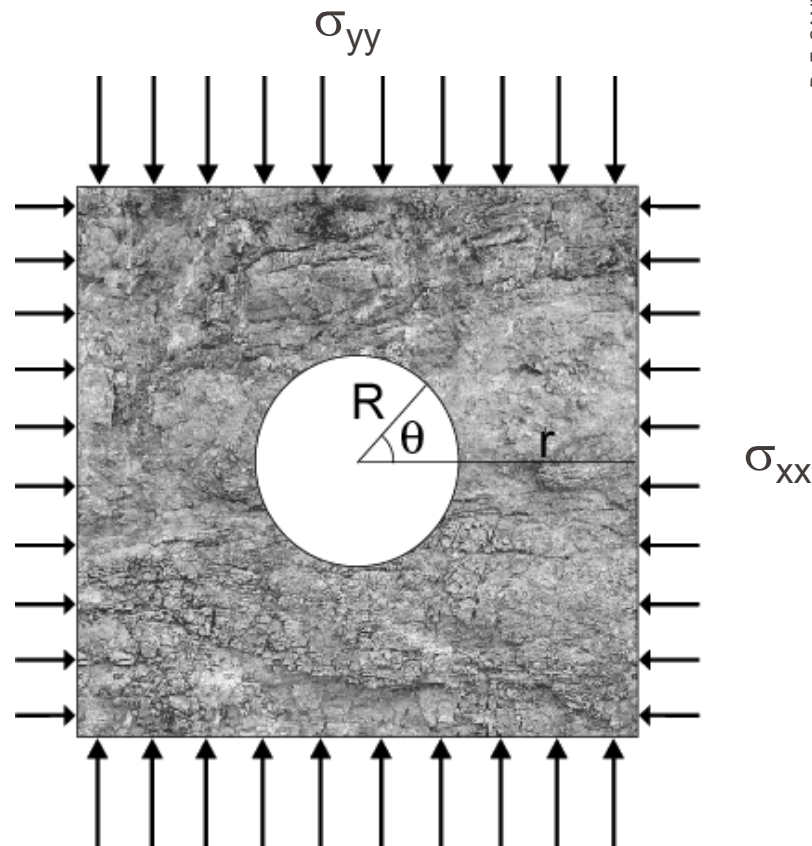
$$\sigma_{xx} = \sigma_h = K_0 \sigma_v$$

$$\sigma_0 = \gamma H$$

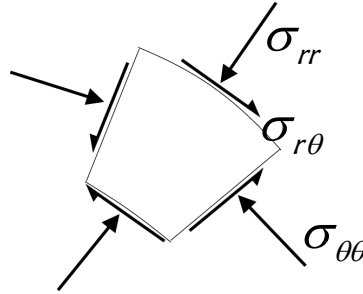
Lois constitutive des matériaux

E, ν

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$



6.1 Contraintes après excavation

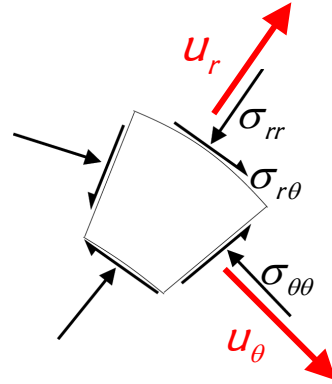


$$\sigma_{rr} = \frac{\sigma_v}{2} \left[(1 + K_0) \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) - (1 - K_0) \left(1 - 4 \frac{R^2}{r^2} + 3 \frac{R^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right]$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{\sigma_v}{2} \left[(1 + K_0) \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) + (1 - K_0) \left(1 + 3 \frac{R^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right]$$

$$\sigma_{r\theta} = \frac{\sigma_v}{2} \left[(1 - K_0) \left(1 + 2 \frac{R^2}{r^2} - 3 \frac{R^4}{r^4} \right) \sin 2\theta \right]$$

6.1 Déplacements induits par l'excavation



$$u_r = -\frac{\sigma_v \cdot R^2}{4 \cdot G \cdot r} \left\{ (1 + K_0) - (1 - K_0) \left[4(1 - \nu) - \frac{R^2}{r^2} \right] \cos 2\theta \right\}$$

$$u_\theta = -\frac{\sigma_v \cdot R^2}{4 \cdot G \cdot r} \left\{ (1 - K_0) \left[2(1 - 2\nu) + \frac{R^2}{r^2} \right] \sin 2\theta \right\}$$



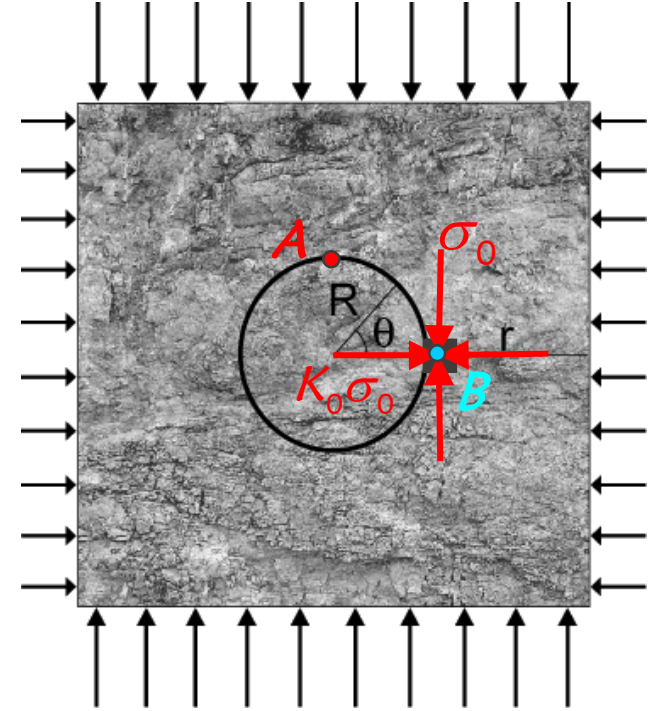
$$r \rightarrow \infty \quad \left\{ \begin{array}{l} \sigma_v = \gamma H \\ \sigma_h = K_0 \gamma H \end{array} \right.$$

$$r \rightarrow R \quad \left\{ \begin{array}{l} \sigma_{rr} = \frac{\sigma_v}{2} \left[(1+K_0) \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) - (1-K_0) \left(1 - 4 \frac{R^2}{r^2} + 3 \frac{R^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right] \rightarrow 0 \\ \sigma_{\theta\theta} = \frac{\sigma_v}{2} \left[(1+K_0) \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) + (1-K_0) \left(1 + 3 \frac{R^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right] \rightarrow \sigma_v \left[(1+K_0) + 2(1-K_0) \cos 2\theta \right] \\ \sigma_{r\theta} = \frac{\sigma_v}{2} \left[(1-K_0) \left(1 + 2 \frac{R^2}{r^2} - 3 \frac{R^4}{r^4} \right) \sin 2\theta \right] \rightarrow 0 \end{array} \right.$$

Avant excavation $r = R$

$$\mathbf{B}: \theta = 0^\circ \quad \left\{ \begin{array}{l} \sigma_{rr} = K_0 \sigma_v \\ \sigma_{\theta\theta} = \sigma_v \\ \sigma_{r\theta} = 0 \end{array} \right.$$

$$\mathbf{A}: \theta = 90^\circ \quad \left\{ \begin{array}{l} \sigma_{rr} = \sigma_v \\ \sigma_{\theta\theta} = K_0 \sigma_v \\ \sigma_{r\theta} = 0 \end{array} \right.$$



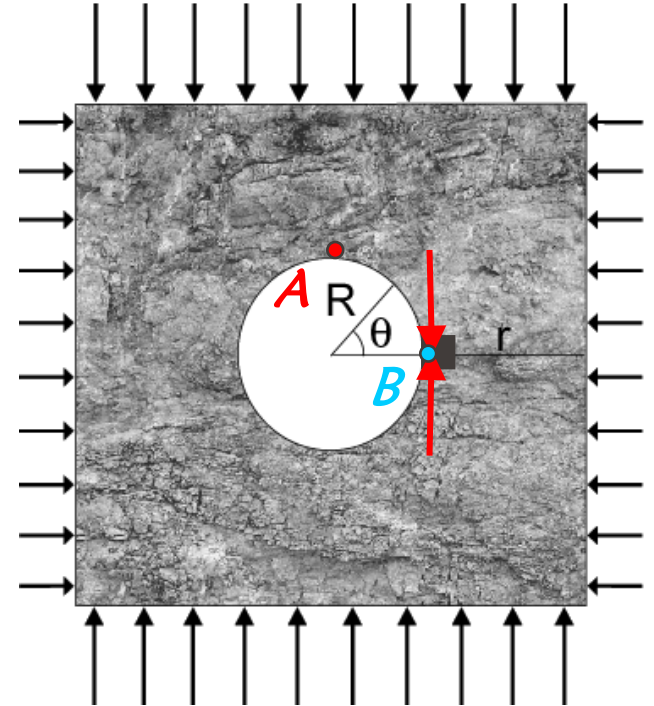
Après excavation

 $r = R$

$$B: \theta = 0^\circ \quad \begin{cases} \sigma_{rr} = 0 \\ \sigma_{\theta\theta} = \sigma_v (3 - K_0) \\ \sigma_{r\theta} = 0 \end{cases}$$

$$A: \theta = 90^\circ \quad \begin{cases} \sigma_{rr} = 0 \\ \sigma_{\theta\theta} = \sigma_v (3K_0 - 1) \\ \sigma_{r\theta} = 0 \end{cases}$$

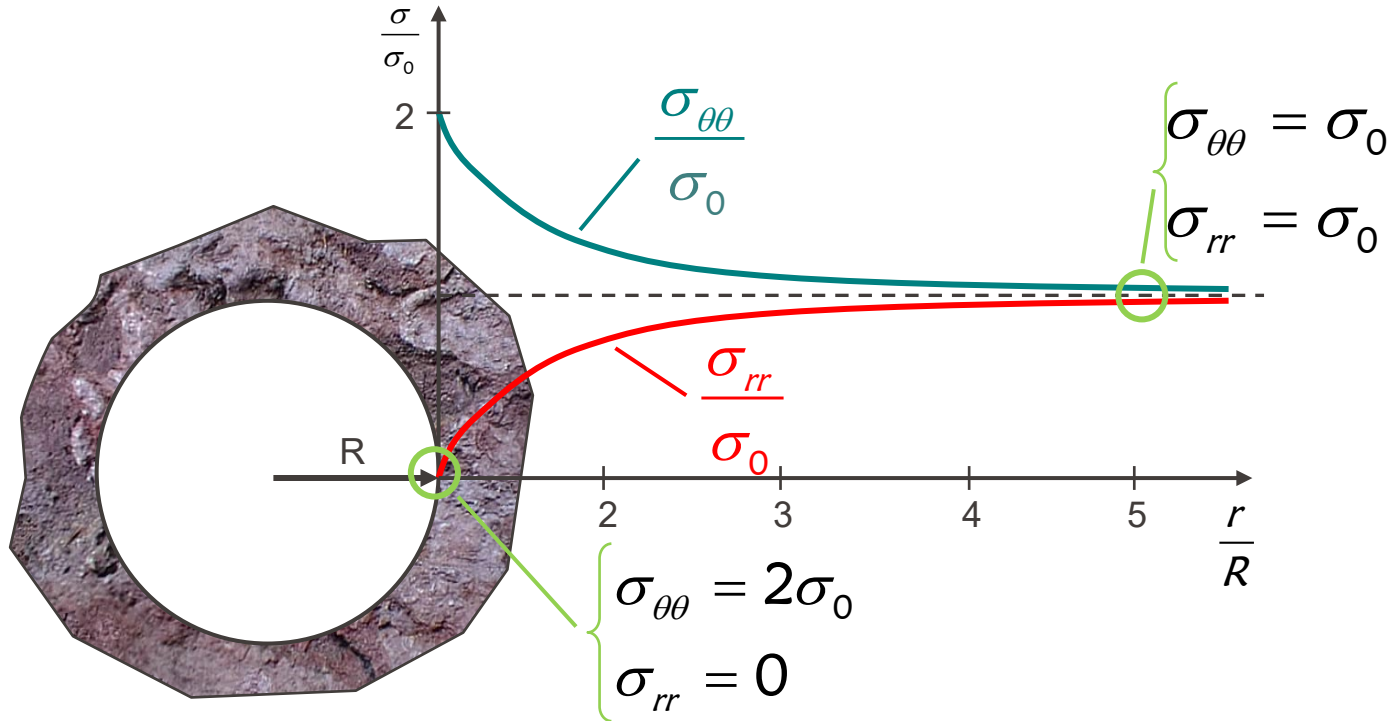
La seule composante non nulle est la contrainte tangentielle $\sigma_{\theta\theta}$



6.1 Contraintes dans le massif



Champ de contraintes hydrostatiques, $K_0=1$



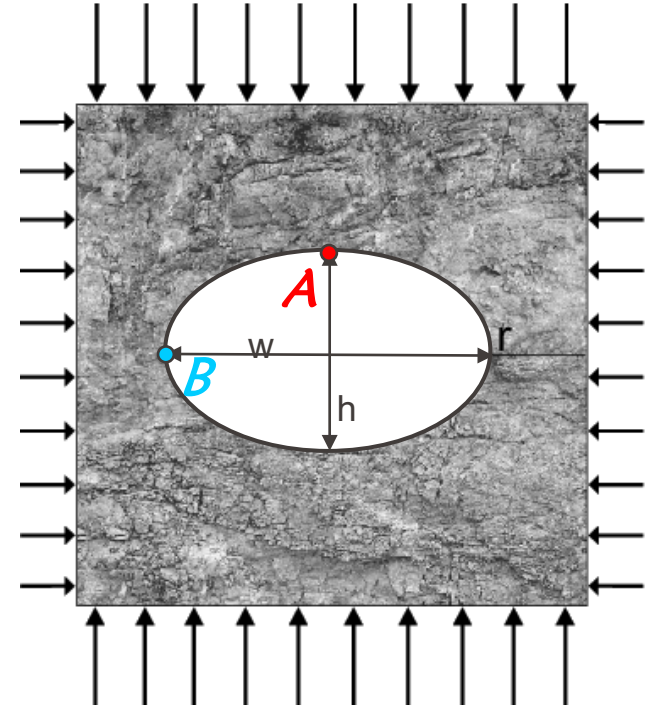
Introduction aux ouvrages souterrains

1. Types de tunnels
2. Normes et réglementations / Lexique
3. Méthodes de reconnaissance
4. Méthodes d'excavation et consolidation du terrain
5. Influence de la taille et de la séquence d'excavation
 - 5.1. Géométrie du tunnel
 - 5.2. Influence de la taille
 - 5.3. Excavation en section divisée ou en pleine section
6. Redistribution des contraintes et déformations
 - 6.1. Solutions analytiques (Lamé & Kirsch)
- 7. Influence de la forme du tunnel sur contraintes et déformations**
 - 7.1. Forme elliptique**
 - 7.2. Forme et effets K_0**

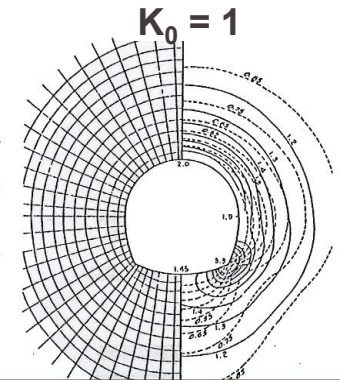
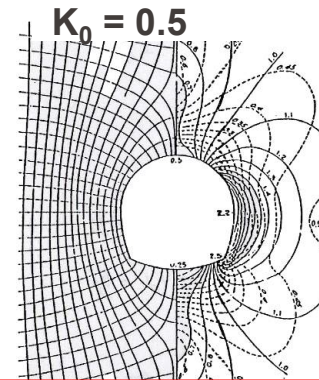
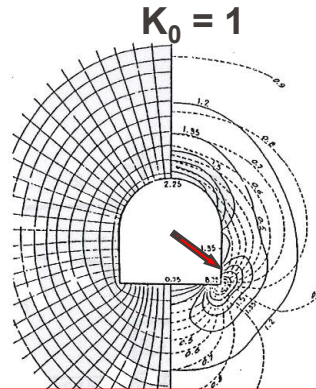
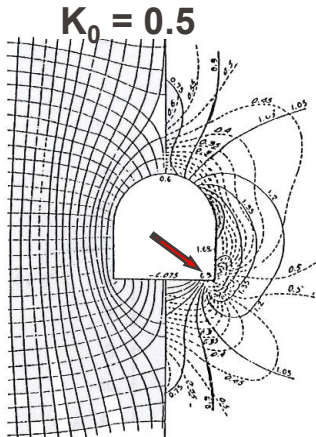
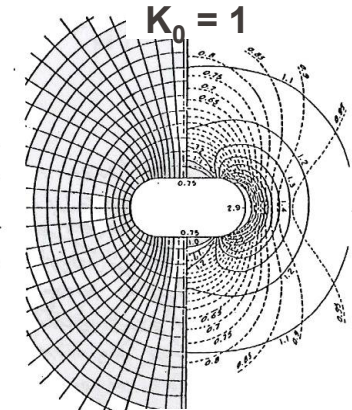
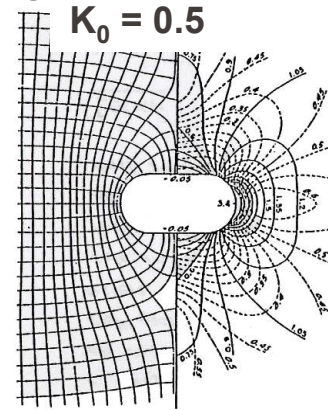
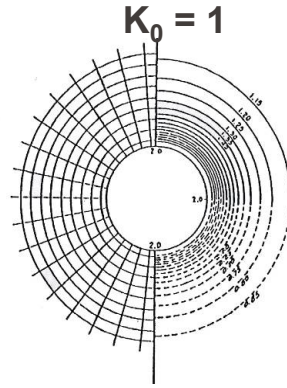
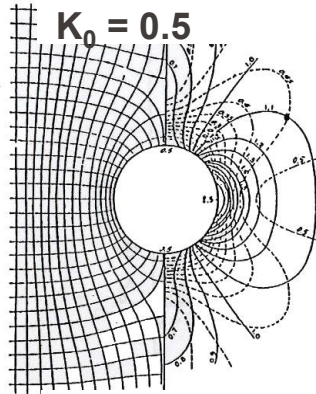
7.1 Forme elliptique

$$A: \theta = \frac{\pi}{2} \quad \sigma_{\theta\theta} = \sigma_v \left(K_0 - 1 + 2K_0 \frac{h}{w} \right)$$

$$B: \theta = \pi \quad \sigma_{\theta\theta} = \sigma_v \left(1 - K_0 + 2 \frac{w}{h} \right)$$



7.2 Influence géométrie et K_0 (Hoek & Brown, 1980)



Radier plat: à cause de la concentration des contraintes une rupture du radier peut se produire. Soulèvement / rupture du radier sont considérablement réduits par:

1. Radier vouté /
2. Profil circulaire de l'excavation