

Modélisation numérique des tunnels

MÉCANIQUE DES
ROCHES ET
OUVRAGES
SOUTERRAINS

Dr. F. SANDRONE

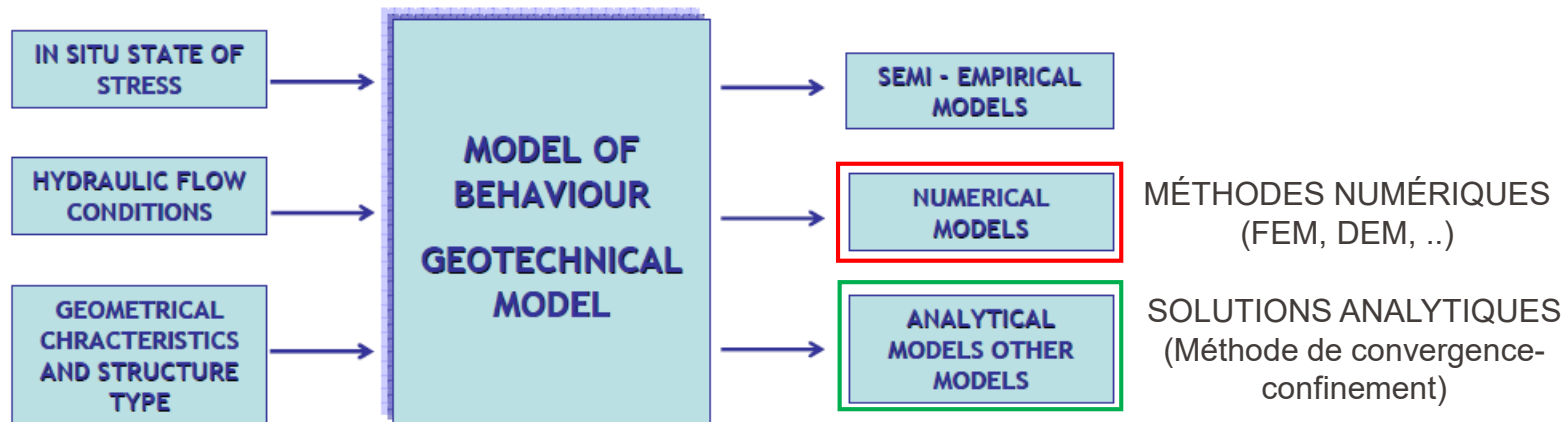
1. Modélisation numérique des tunnels

- 1.1. Objectif principal
- 1.2. Analytique ou numérique
- 1.3. Continuum vs. Discontinuum
- 1.4. Méthodes numériques

1.1 Objectifs principaux

Analyse et estimation du comportement du massif avant, pendant et après l'excavation du tunnel, et de son interaction avec la structure de soutènement / revêtement.

Calcul des déplacements, des déformations et des contraintes dus à une modification des conditions initiales.



1.2 Solutions analytiques vs. numériques



1. Les **méthodes analytiques** permettent d'obtenir une estimation du comportement du massif après l'excavation du tunnel, ces méthodes sont limitées par plusieurs hypothèses et s'adaptent principalement aux tunnels circulaires.
2. Les **méthodes numériques** permettent de simuler de manière plus détaillée toutes les étapes représentant la séquence d'excavation, ainsi qu'une géométrie complexe de l'excavation.

1.3 Analyse des contraintes



En modélisant le massif rocheux et la structure et en donnant les propriétés mécaniques ainsi que l'état initial des contraintes, il est possible de déterminer :

- Contraintes σ
- Déformations ε
- Déplacements u

Il existe deux approches différentes :

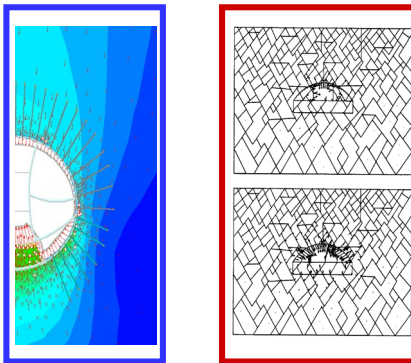
1. Le massif rocheux est représenté comme étant composé de deux éléments : la roche et les discontinuités sont décrites séparément → discontinuum
2. Le massif est décrit en considérant le comportement global → continuum équivalent

↘ méthodes analytiques

1.4 Méthodes numériques

Les modèles numériques sont également utilisés pour extrapoler, retro-analyser et vérifier les méthodes empiriques.

Comme pour tout travail de modélisation numérique, des **paramètres d'entrée corrects sont essentiels** pour obtenir de bons résultats.

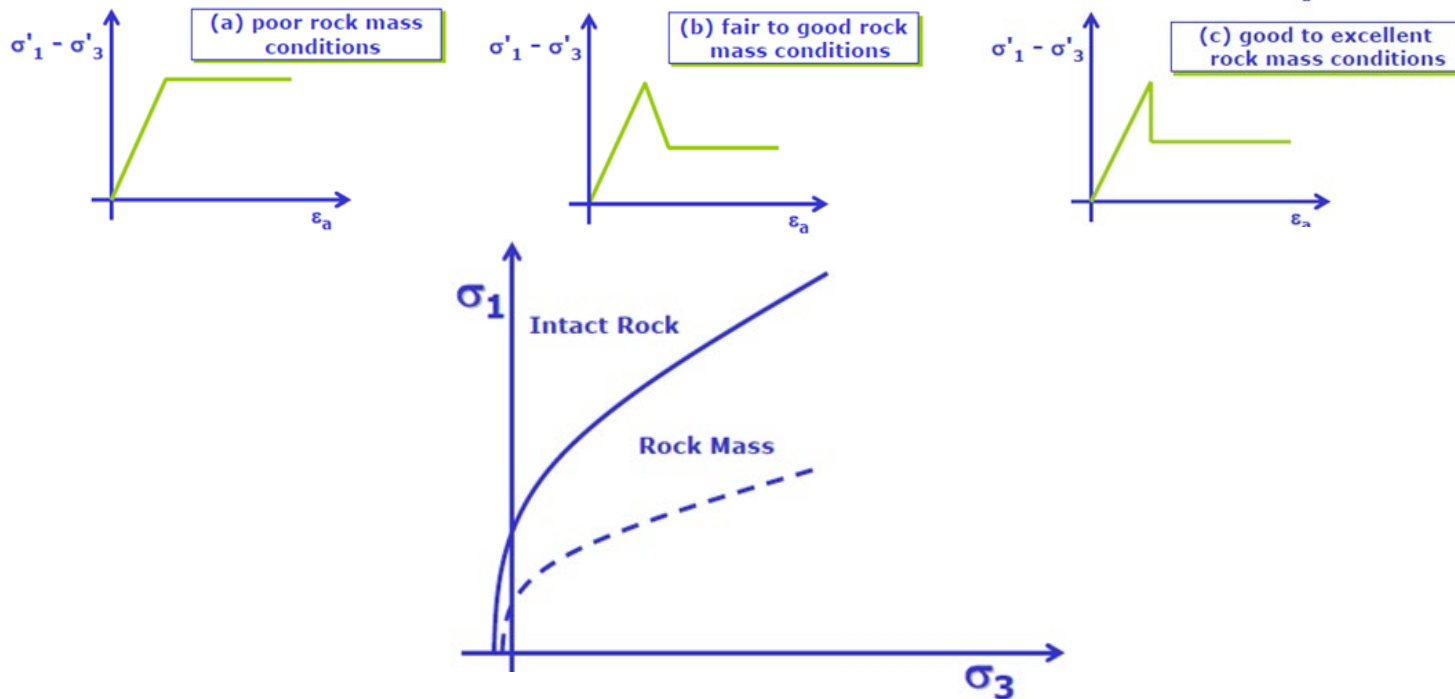


Les méthodes numériques peuvent être basées sur une approche **continue** ou **discontinue**.

- Les modèles basés sur une approche **continue** sont souvent utilisés pour obtenir les déformations.
- Les modèles basés sur une approche **discontinue** sont plus spécifiquement utilisés pour vérifier le comportement des blocs isolés.

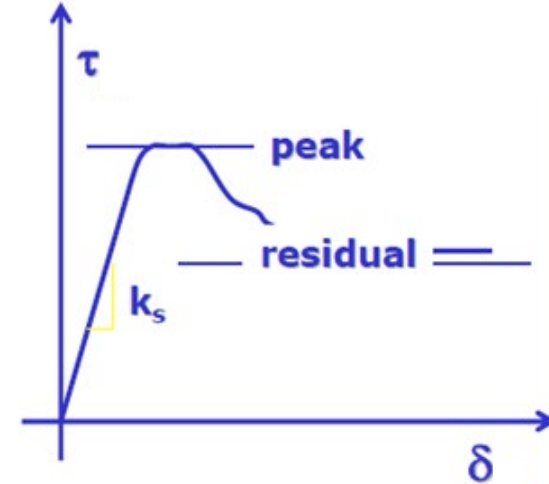
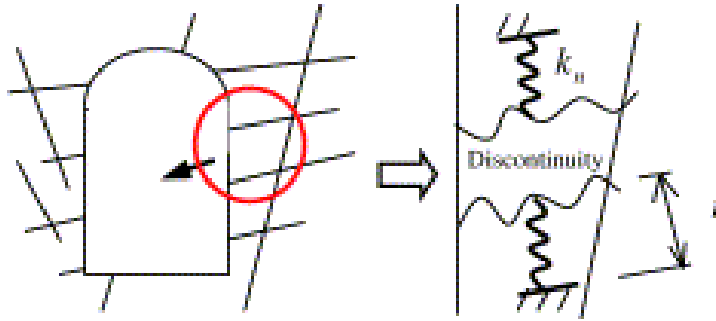
1.4 Modèle continu

Les propriétés de la roche intacte doivent être adaptées aux propriétés du massif rocheux (ex. σ_{ci} vs. σ_{cm}).



1.4 Modèle discontinu

Caractérisation des joints : le comportement des discontinuités et de la roche intacte doit être connu en détail

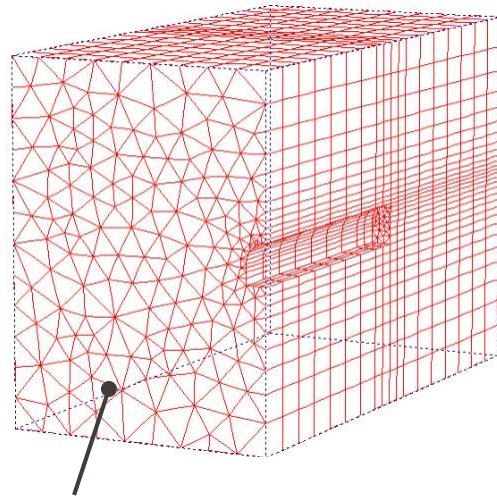


(Barla 2015)

1.4 Méthodes numériques

Méthodes numériques utilisées en mécanique des roches :

1. Méthode des éléments finis (FEM)
2. Méthode des éléments au contour (BEM)
3. Méthode des différences finies (FDM)
4. Méthode des éléments discrets (DEM)



Chaque nœud est caractérisé par deux vecteurs :

- Force
- Déplacement

1.4 FEM - Éléments



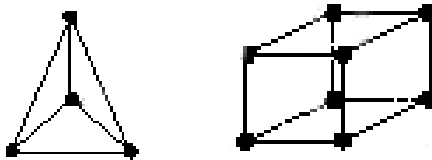
1D (éléments linéaires - poutres)



2D (Triangles, Quadrangles...)



3D (Tétraèdres, Pyramides, Prismes...)



1.4 Méthodes numériques

Intégration des équations différentielles qui décrivent le comportement mécanique, en considérant :

- Forces (F) / Contraintes (σ)
- Déplacements (δ, u) / Déformations (ε)

1.4 Méthode itérative



La non-linéarité des lois contraintes/déformations détermine les équations des éléments finis

$$[K]_G [u]_G = [R]_G$$

Qui peuvent être écrites en forme incrémentale

$$[K]^i_G [\Delta u]^i_G = [\Delta R]^i_G$$

où

$[K]^i_G$ est la matrice incrémentale du système globale

$[\Delta u]^i_G$ est le vecteur des déplacements incrémentaux du nœud

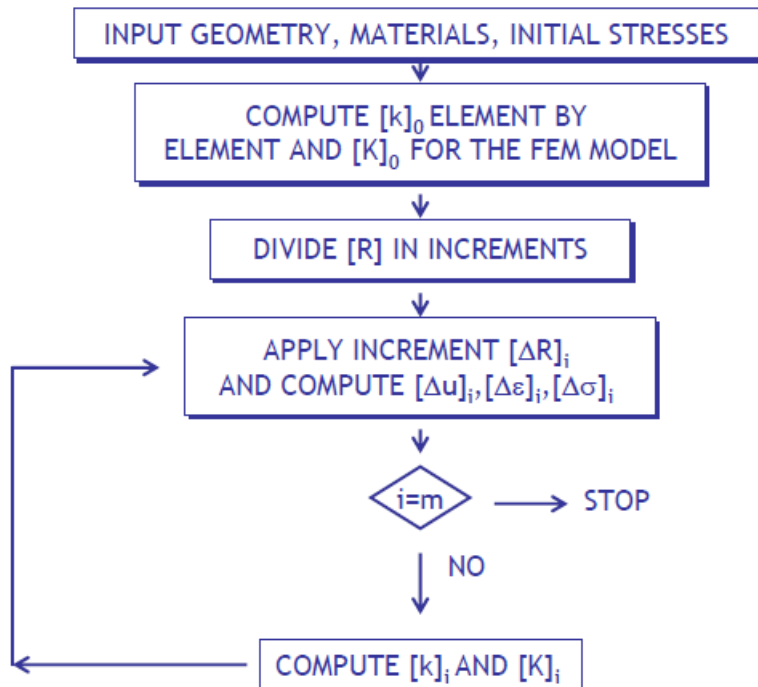
$[\Delta R]^i_G$ est le vecteur des forces incrémentales sur le nœud

i est l'incrément

1.4 Approche incrémentale



La précision de la solution dépend fortement du nombre d'incrémentes et de la taille de chaque incrément.

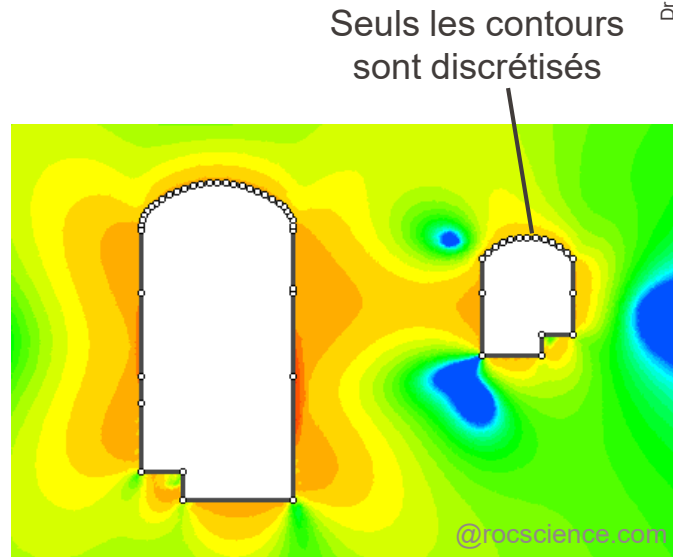


1.4 Méthodes numériques



Méthodes numériques utilisées en mécanique des roches :

1. Méthode des éléments finis (FEM)
2. Méthode des éléments au contour (BEM)
3. Méthode des différences finies (FDM)
4. Méthode des éléments discrets (DEM)

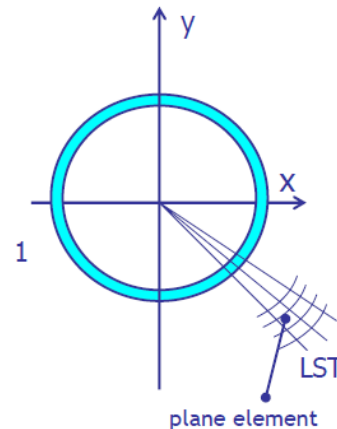
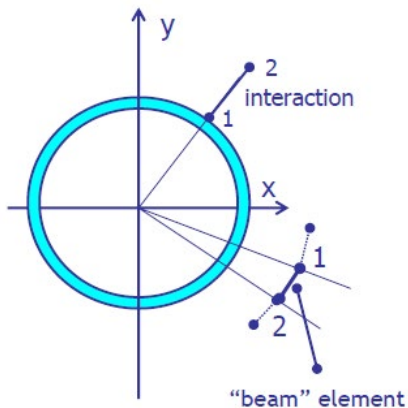


Le massif environnant
est traité comme C.I.L.E.
→ solutions analytiques

1.4 Méthode des éléments au contour

Le système de soutènement est discrétisé par :

1. des éléments « poutre »
2. des éléments « surface »

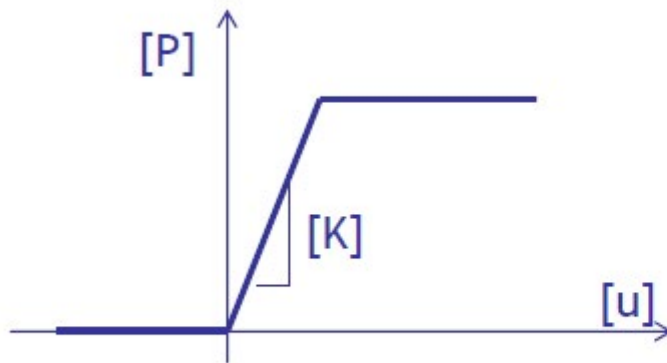


Les forces de réaction du terrain, qui résultent des déformations de la structure, sont simulées à l'aide d'un module d'assise ou d'un ressort appliqué au nœuds.

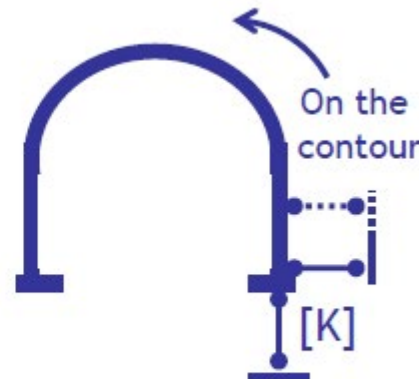
1.4 Méthode des éléments au contour



1. Définition des charges actives, qui ont un effet sur la structure et qui doivent être déterminées à l'avance en tant que charges externes.
2. Les forces de réaction du terrain, qui résultent des déformations, sont calculées et l'état des contraintes dans le soutènement / revêtement est calculé en conséquence.

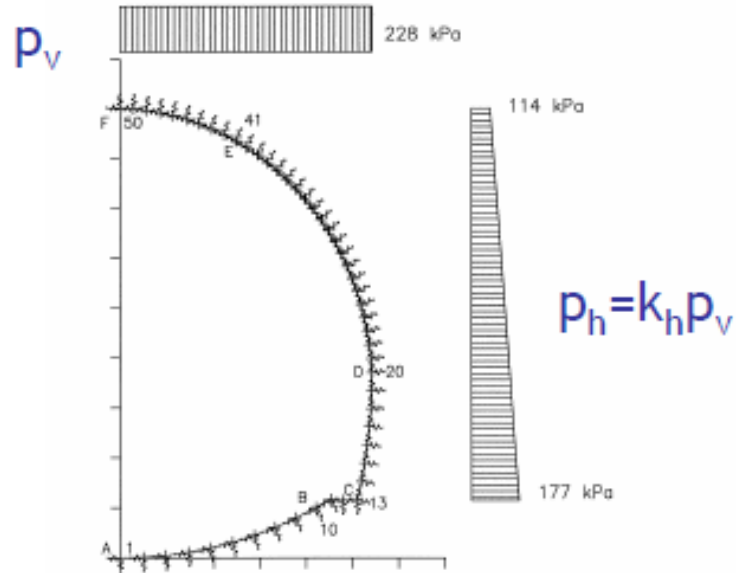


Interaction Model (spring)

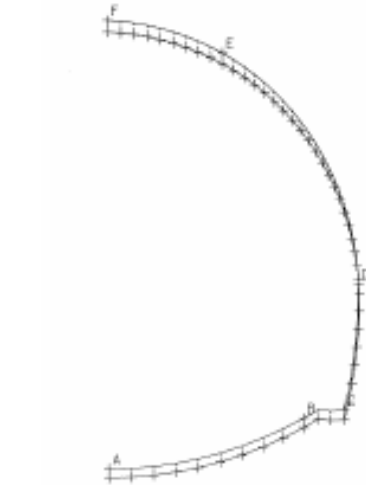


(d'après Barla 2015)

1.4 Méthode des éléments au contour - Exemple



FEM model: lining discretised
by using beam elements



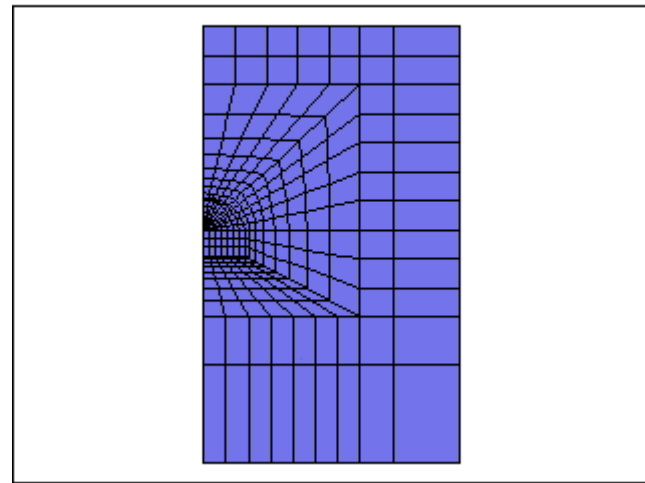
Lining following
load application

1.4 Méthodes numériques



Méthodes numériques utilisées en mécanique des roches :

1. Méthode des éléments finis (FEM)
2. Méthode des éléments de frontière (BEM)
3. Méthode des différences finies (FDM)
4. Méthode des éléments discrets (DEM)

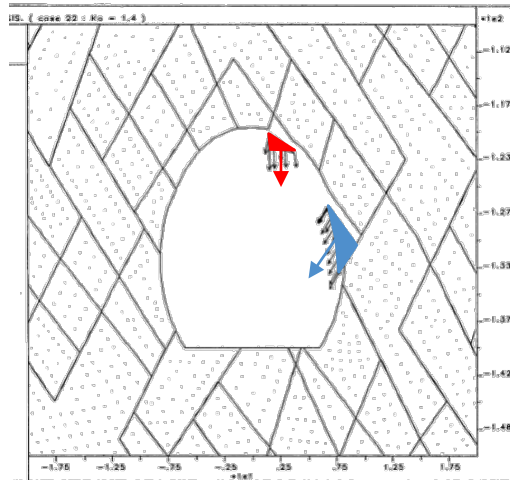


@.itascainternational.com

1.4 Méthodes numériques

Méthodes numériques utilisées en mécanique des roches :

1. Méthode des éléments finis (FEM)
2. Méthode des éléments au contour (BEM)
3. Méthode des différences finies (FDM)
4. Méthode des éléments discrets (DEM)



@.itascainternational.com

APPLICATIONS

1. Excavation des tunnels
2. Stabilité des pentes rocheuses
3. Comportement hydraulique des massifs rocheux avec discontinuités

Les propriétés de déformabilité et de résistance doivent être connues à la fois pour la **roche intacte** et pour les **discontinuités**

Le modèle constitutif généralement utilisé pour les joints est élastique-parfaitement plastique.

Les joints se déforment élastiquement jusqu'à ce que la limite plastique soit atteinte, puis commencent à glisser.

- La **rigidité normale** k_n , est la force normale appliquée divisée par le déplacement normal correspondant.
- La **rigidité tangentielle** k_s , est l'incrément de force de cisaillement divisée par déplacement de cisaillement correspondant.

1.4 Inconvénients des modèles numériques



Puissance de calcul (2D vs. 3D)

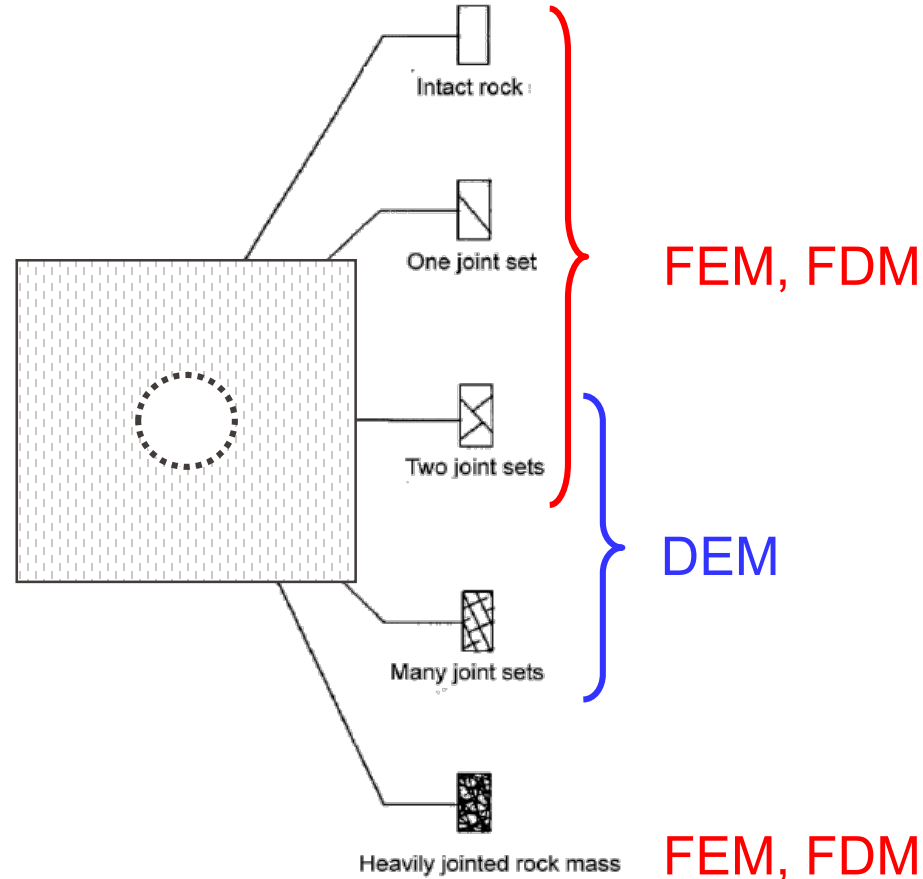
Nombre d'éléments

Maillage

Nombre de discontinuités vs. milieu continu (DEM vs. FEM, FDM)

Petites déformations et petits déplacements (FEM)

1.4 Méthodes numériques

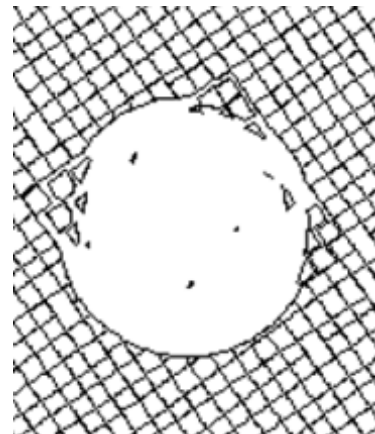
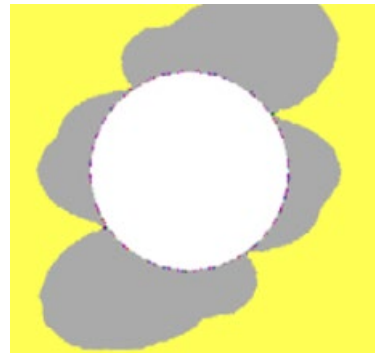


1.4 Méthodes numériques

MODÈLE CONTINU, le milieu est considéré comme un milieu continu.

MODÈLE CONTINU ÉQUIVALENT, un milieu discontinu est remplacé par un continu équivalent, de sorte que son comportement soit similaire à celui du milieu réel.

MODÈLE DISCONTINU, le milieu est considéré comme composé d'une matrice rocheuse intacte et de discontinuités localisées (joints et/ou interfaces) introduites dans l'analyse en tant qu'éléments spécifiques et prises en compte dans l'analyse.



1.4 Méthode des éléments finis



Étapes de calcul:

PRÉ-TRAITEMENT

1. Définition de la géométrie du problème et des conditions de chargement
2. Sélection des fonctions d'approximation et discrétisation

TRAITEMENT

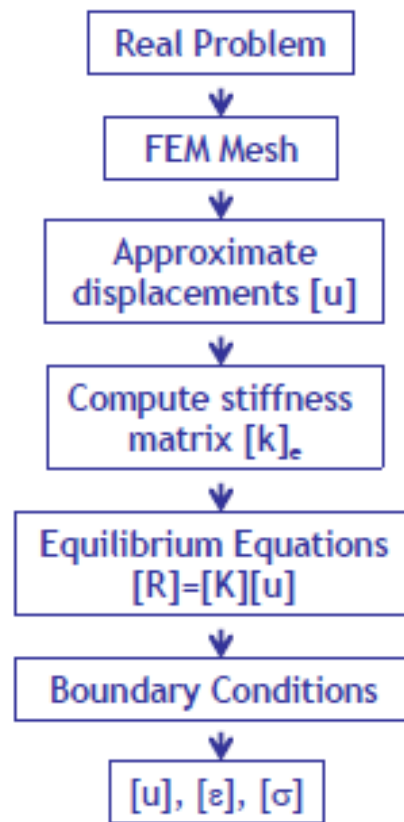
3. Dérivation des équations des éléments
4. Assemblage des propriétés des éléments pour obtenir les équations globales
5. Calcul

POST-TRAITEMENT

6. Analyse des résultats

1.4 Procédure

- Le **processus de discrétisation** doit être effectué avec beaucoup de soin
 - Attention aux *contours* des tunnels
- Présence d'une zone de gradients de déformation (comme on peut s'y attendre près de l'excavation et dans les zones d'angle, etc.)
 - utiliser un **nombre élevé d'éléments**
- En cas de problèmes contenant des **zones non homogènes**
 - **nœuds** situés le long des **contours** d'interface entre une zone et l'autre.



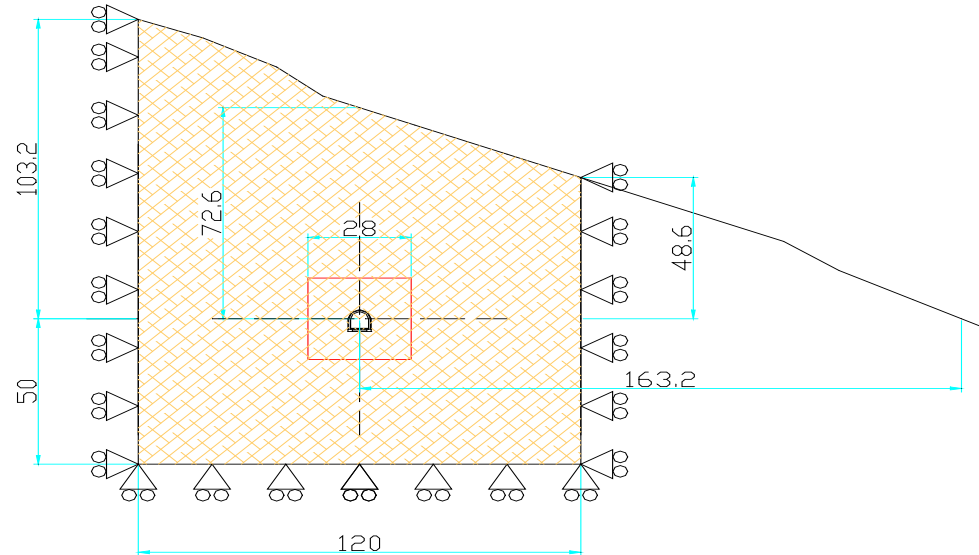
1.4 Pré-traitement

Définition de la géométrie

Propriétés des matériaux (massif, revêtement / soutènement,...)

Lois constitutives

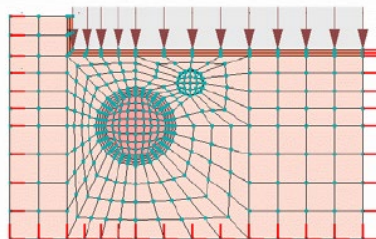
Conditions au contour (+ charges)



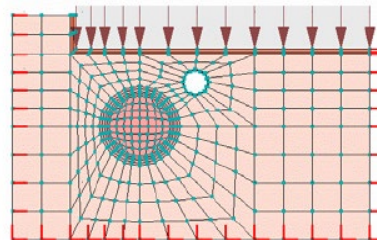
1.4 Traitement

Simulation des phases d'excavation et de mise en place du soutènement (définitions des étapes) :

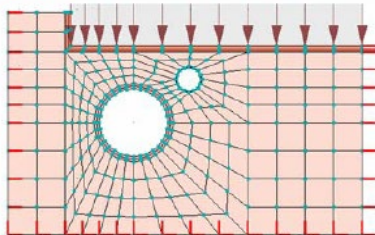
1. État initial



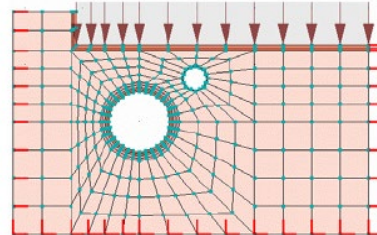
2. Excavation de la galerie pilote



3. Tunnel exc. + soutènement

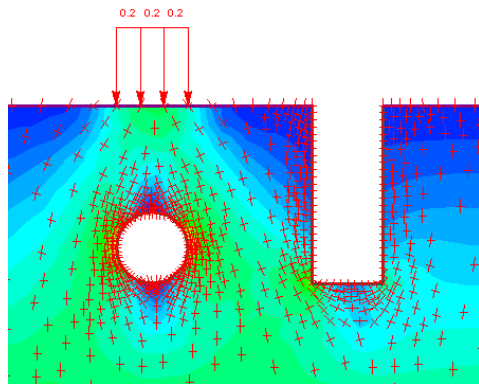


4. Équilibre final

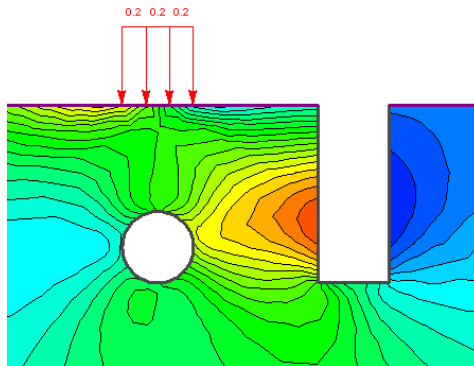


La FEM évalue les déplacements et les forces au nœuds.

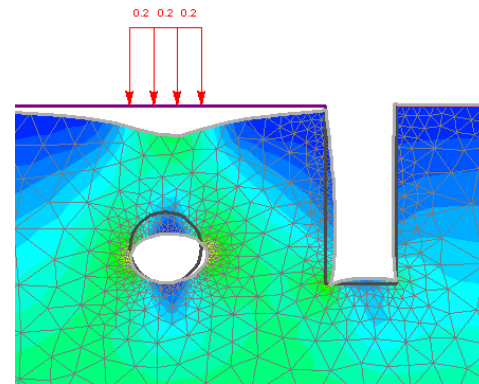
Contraintes



→
Déplacements
(isolignes)

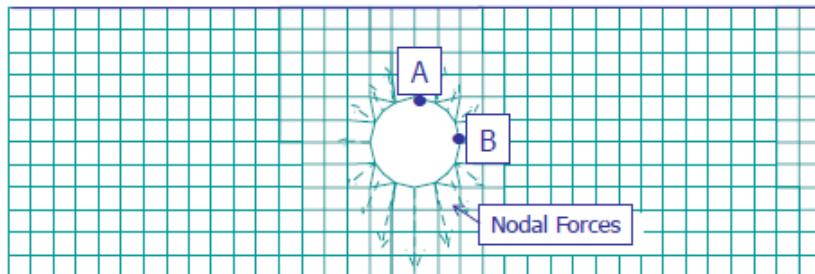


Maillage déformé

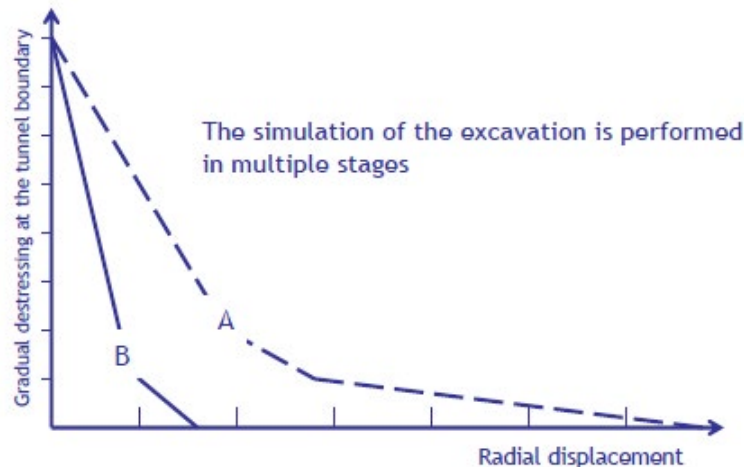


1.4 Simulation de l'excavation d'un tunnel

Surface Tunnel Problem



Nodal Forces applied at tunnel boundary



De nombreux problèmes géotechniques impliquent la mise en place de nouveaux matériaux, tels que la construction d'un remblai (1) ou la mise en place du soutènement d'un tunnel (2), etc. Il est possible de simuler ces activités avec une analyse par éléments finis. Cependant, le code doit permettre de simuler l'"activation" et/ou la "désactivation" d'éléments en fonction de la séquence / phasage du problème à simuler.

1.4 Méthodes de conception du soutènement



- La **méthode empirique** ne convient que pour les premières estimations pour des *études préliminaires*.
- Les **méthodes analytiques** permettent une estimation pour des phases d'*avant-projet* ainsi que pendant la *réalisation*
- Les **méthodes numériques permettent d'analyser des systèmes plus complexes** mais nécessitent des **précisions importantes pour les données d'entrée** et conviennent bien au *projet de construction* ainsi que pendant la *réalisation*

Avantages

- Bonne qualité des résultats (fonction de la qualité des données d'entrée)

Limites

- Nécessité d'une interprétation correcte du phasage de construction
- Temps nécessaire pour l'analyse
- N'est généralement utilisé qu'après plusieurs analyses préliminaires
- nécessité d'affiner les données d'entrée