

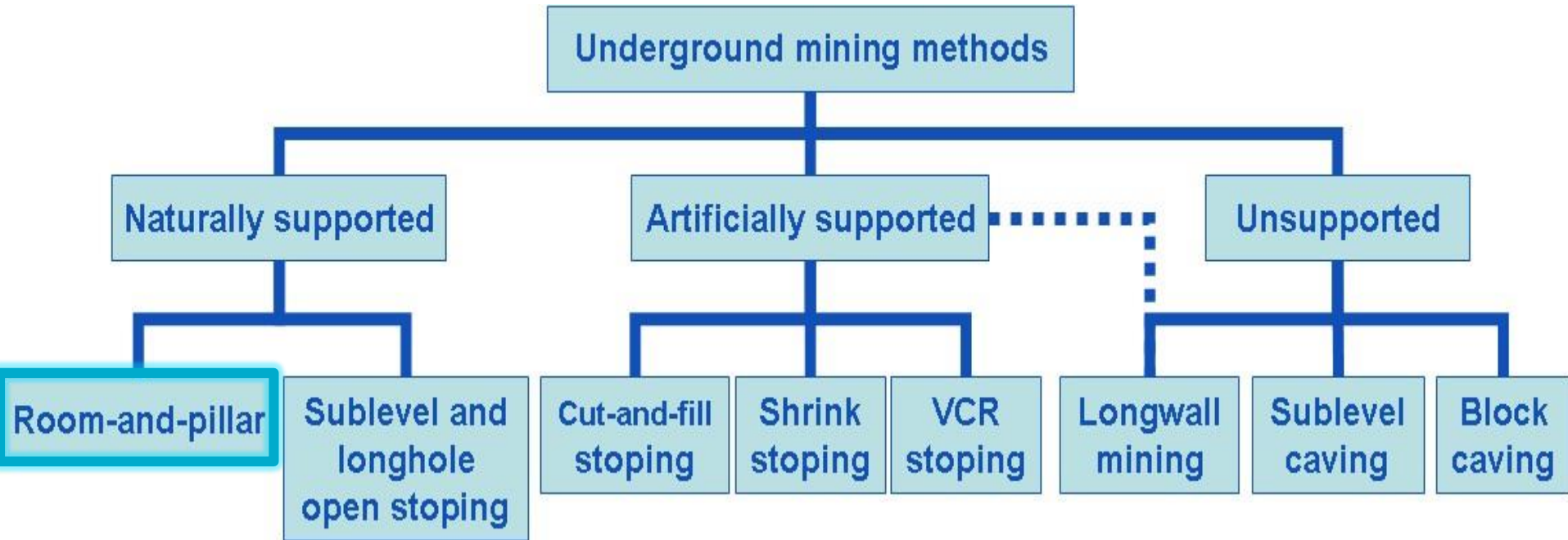
# La méthode des chambres et piliers : design et implications géomécaniques

Prof. Jean-Pierre TSHIBANGU

# La méthode des chambres et piliers : design et implications géomécaniques

- Choix et champ d'application
- Principe de la méthode des chambres et piliers – variantes
- Cas particulier des roches ornementales
- Quelques considérations de mécanique des roches

# Choix d'une méthode d'exploitation vis-à-vis de la géomécanique



Amplitude des déplacements dans le massif encaissant



Stockage d'énergie dans les roches du champ proche

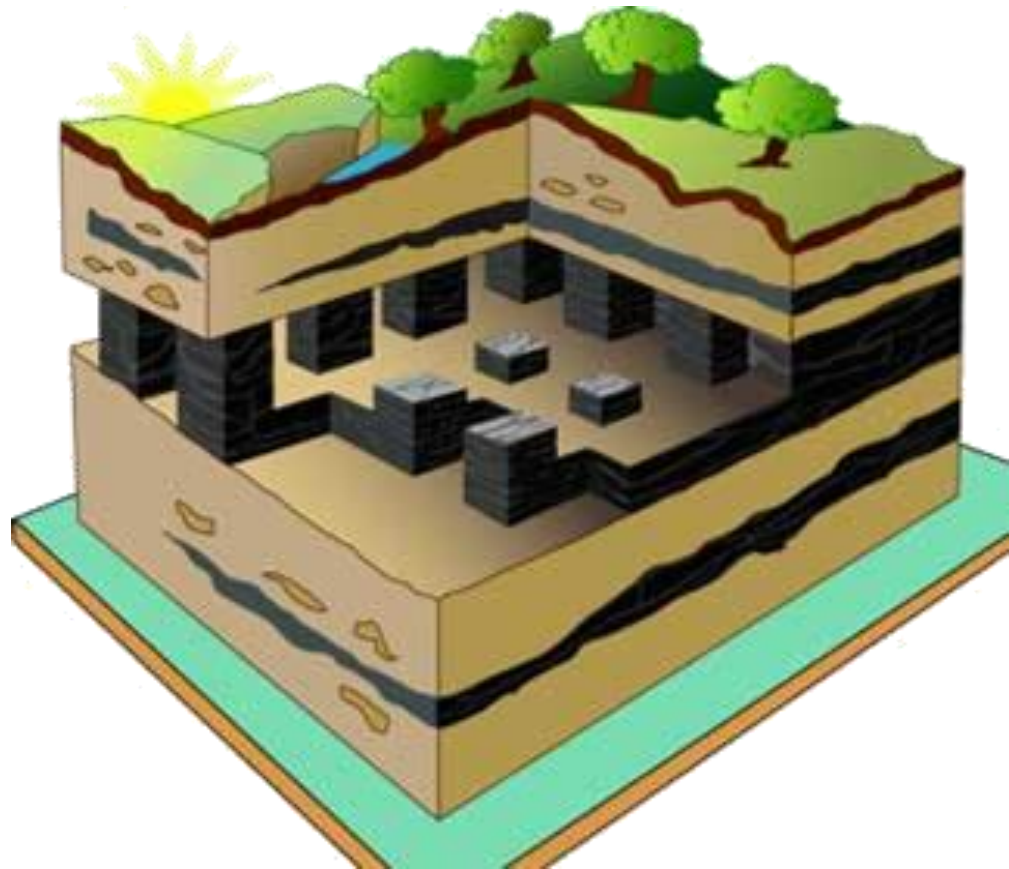


# Champ d'application

- Gisements horizontaux ou à faible pendage : plateures ( $\leq 30^\circ$ )  
Typiquement : dépôts lités sédimentaires  
→ charbon, sel, potasse, shales cuprifères, craies
- Puissance moyenne (10 m)
  - Si trop épais : mauvaise tenue des piliers et augmentation de leur section, soutènement + important
  - Si trop mince : accès au gisement → on exploite + de stérile

# Principe de la méthode des chambres et piliers

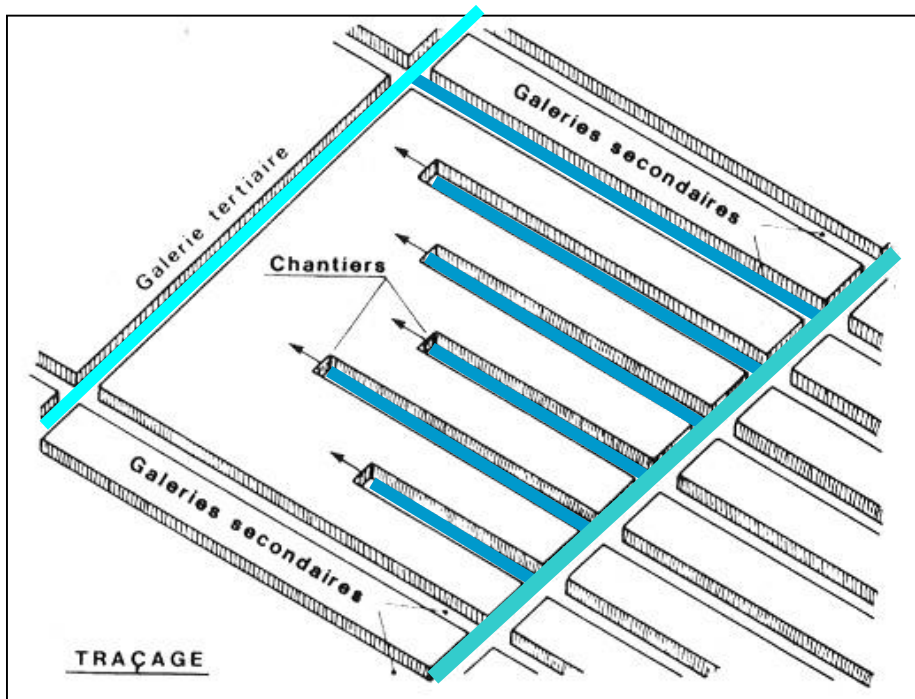
- Ouvrir des chambres (*stopes, rooms*)
- Laisser des piliers (*pillars*)
  - Circulaires
  - Carrés
  - Murs longitudinaux
- Fin d'exploitation
  - Remblayer, foudroyer



# Développement en 2 phases

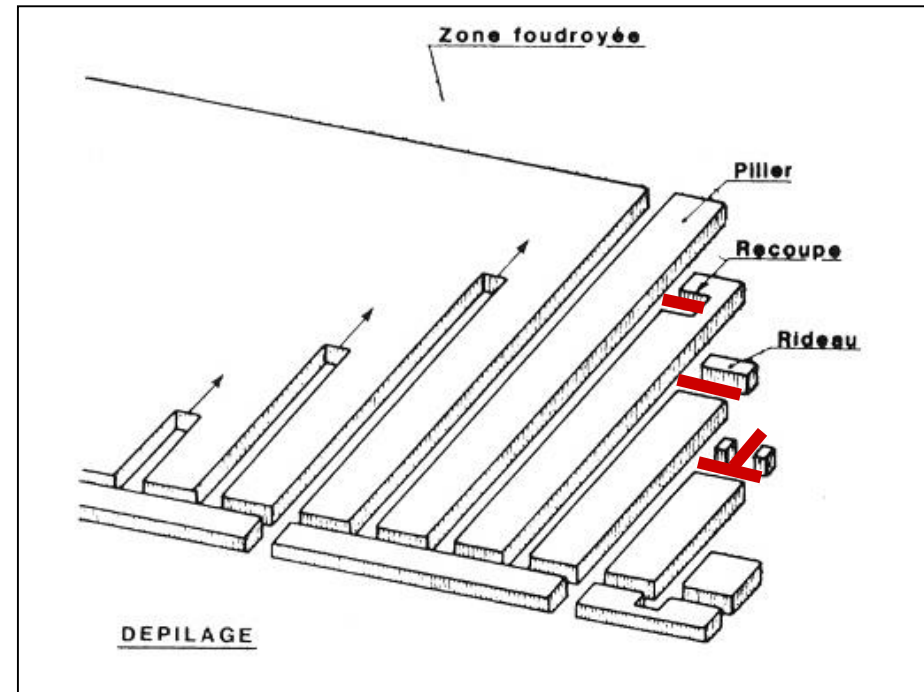
## Traçage (*drifting*)

Ouverture des voies



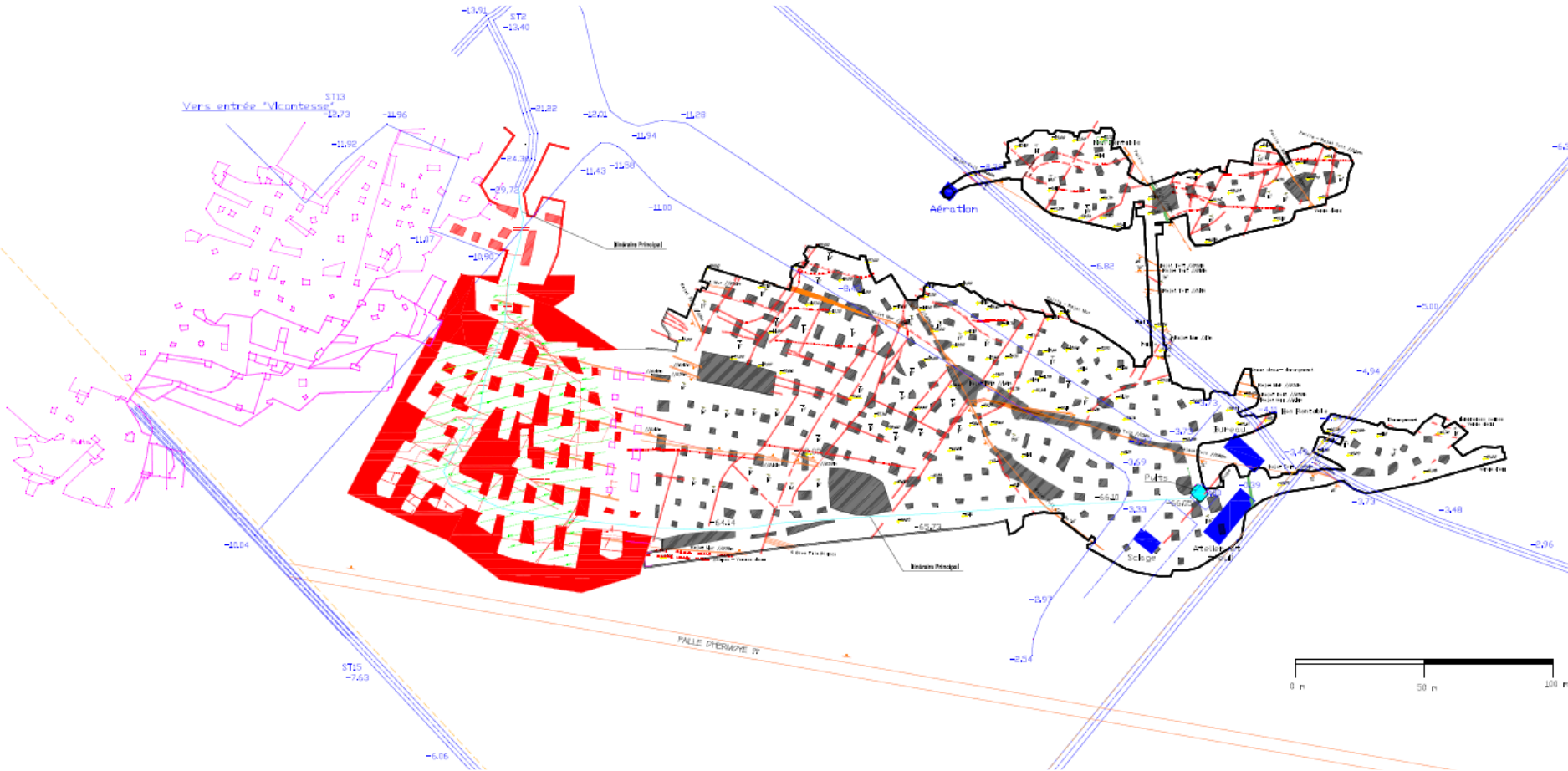
## Dépilage (*stopping*)

Recoupes (*cross-cuts*) et rideaux (*long pillars*) pour exploiter les piliers





# Exemple de géométrie à la carrière de Golzinne

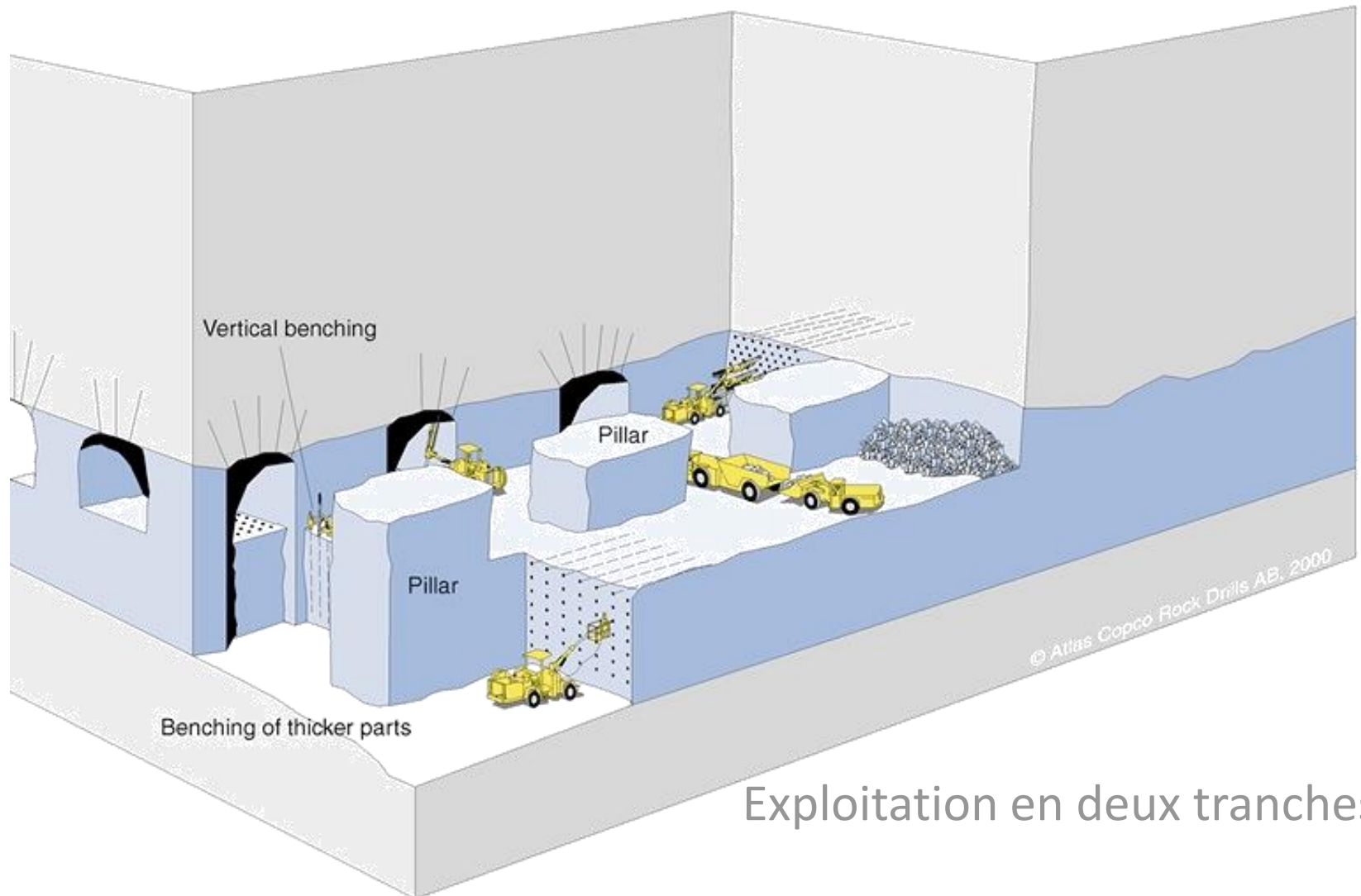


# 3 techniques en fonction du pendage

- **Méthode horizontale**
  - Gisements (sub)horizontaux
  - Gisements inclinés épais
- **Méthode inclinée** :  $20^\circ < \text{pendage} < 30^\circ$
- **Marche d'escalier - *Step mining*** : adapte la méthode horizontale pour des gisements inclinés



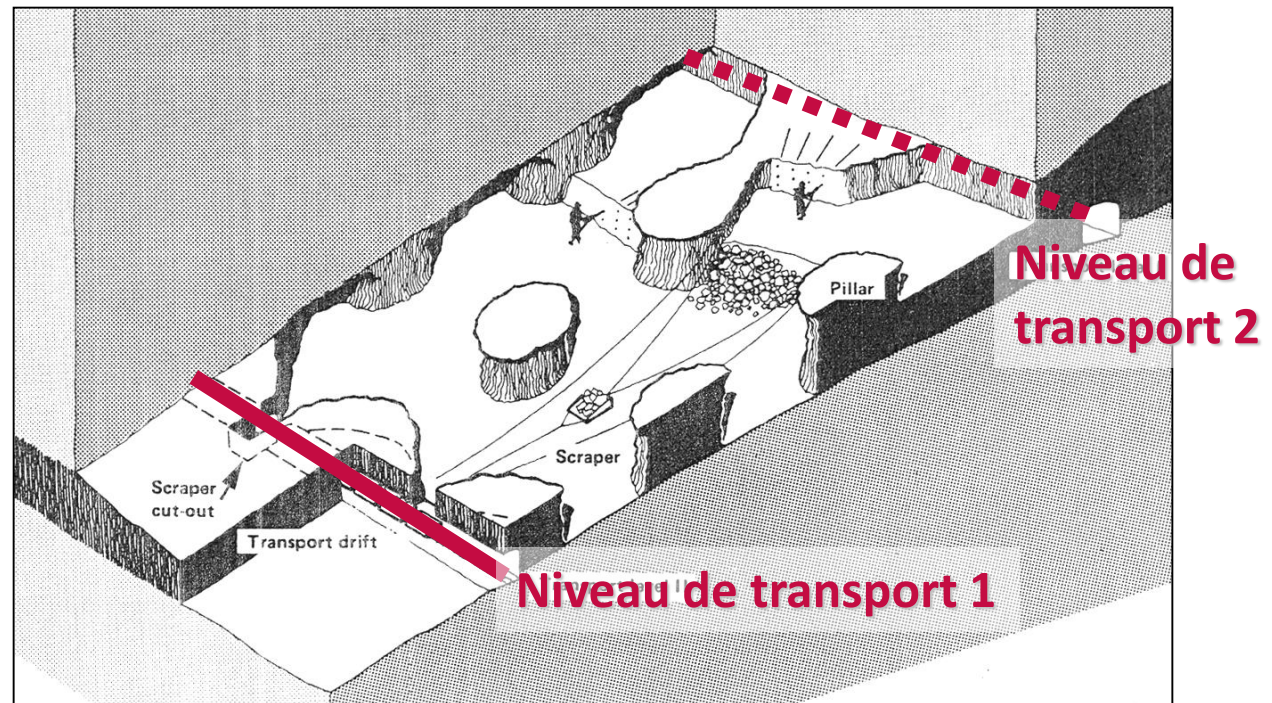
# La méthode horizontale



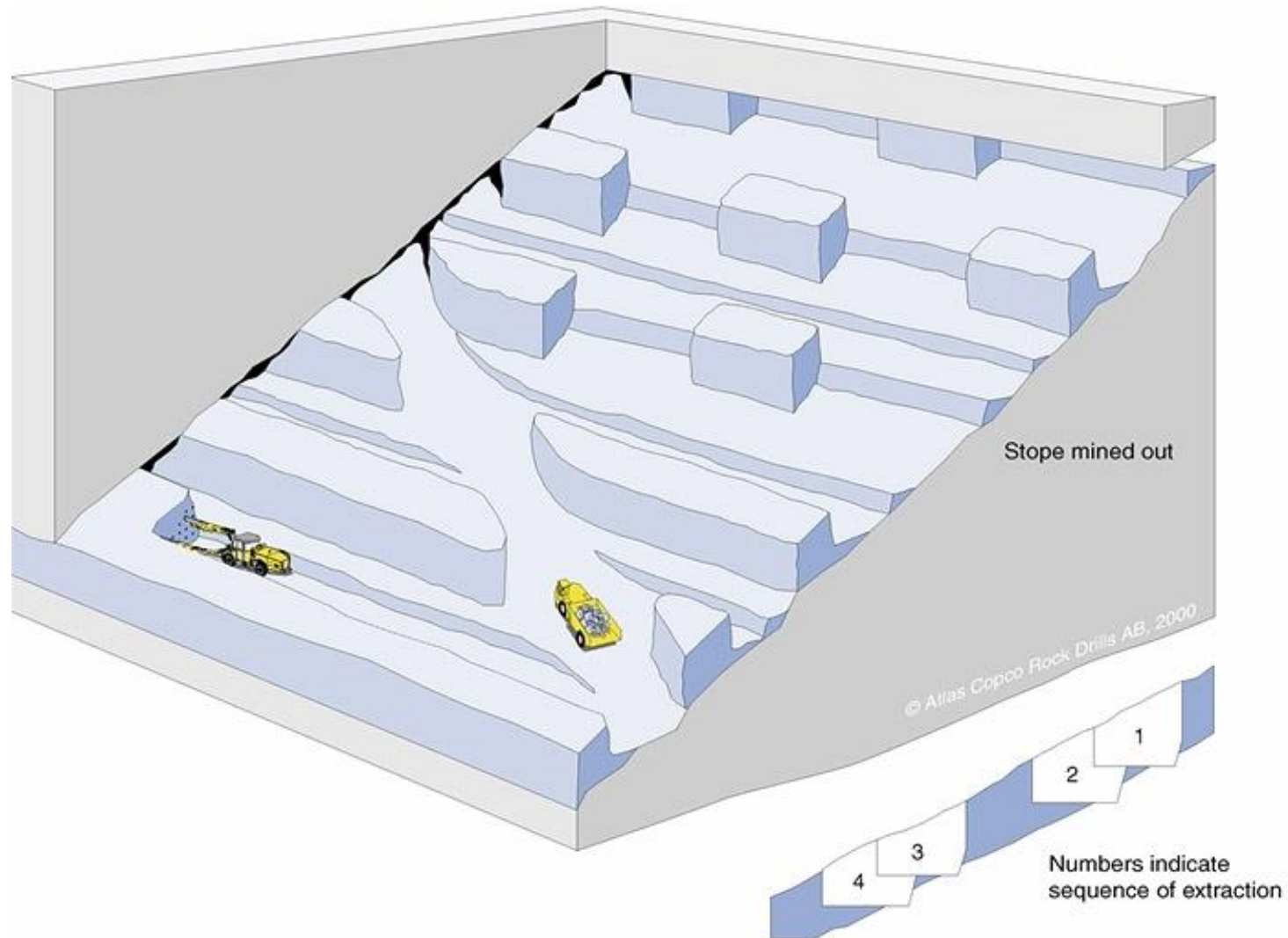
Exploitation en deux tranches

# La méthode inclinée

- Développement :
  - Niveaux horizontaux à intervalles
  - 1 desserte par niveau (accès aux chantiers, transport des déblais)

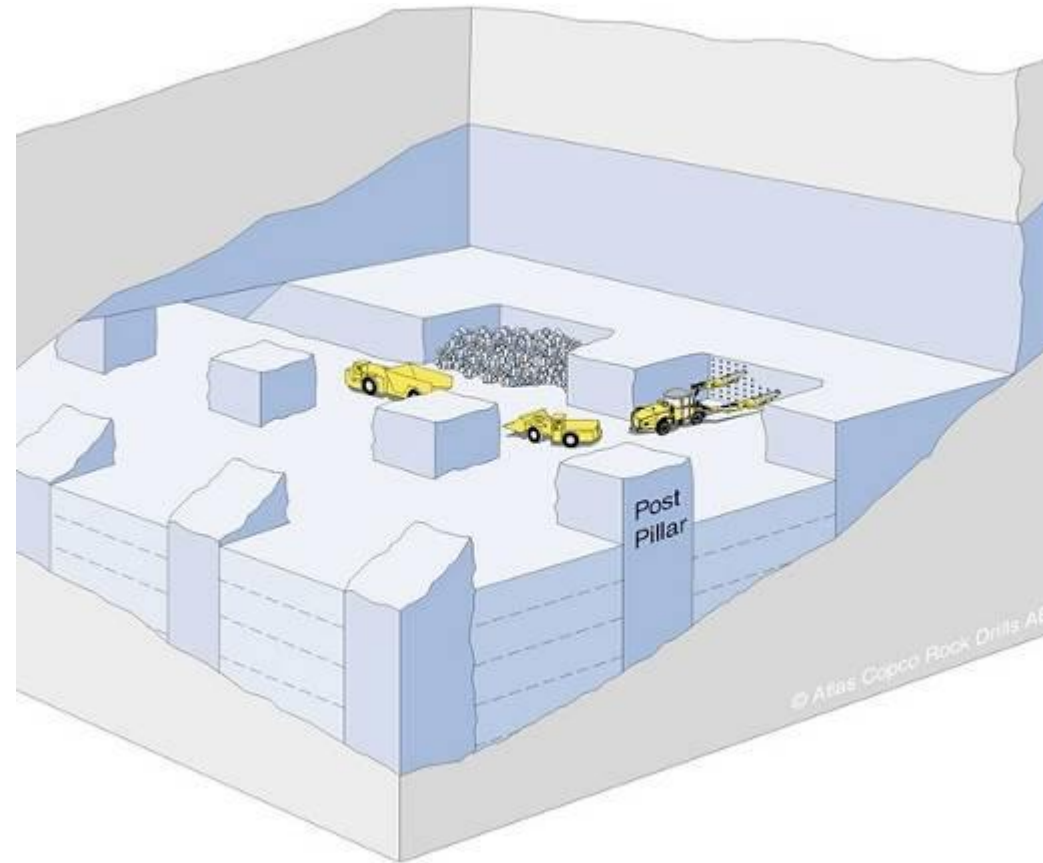


# Marche d'escalier – *Step mining*



# Post room-and-pillar

- Mélange de C&P avec CAF
- Tranches horizontales, de bas en haut
- Soutènement :
  - Piliers
  - Chambres remplies avec des *tailings*
  - Le remblai contribue à la stabilité des piliers
- Tranche suivante : machines travaillant sur le remblai
- Les piliers s'élèvent sur plusieurs couches de remblai

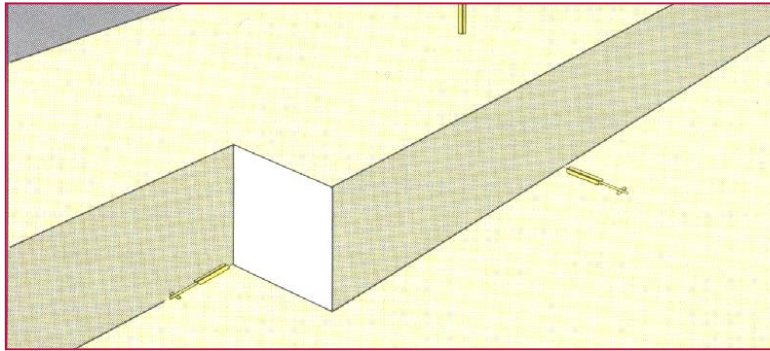


# Moyens de creusement

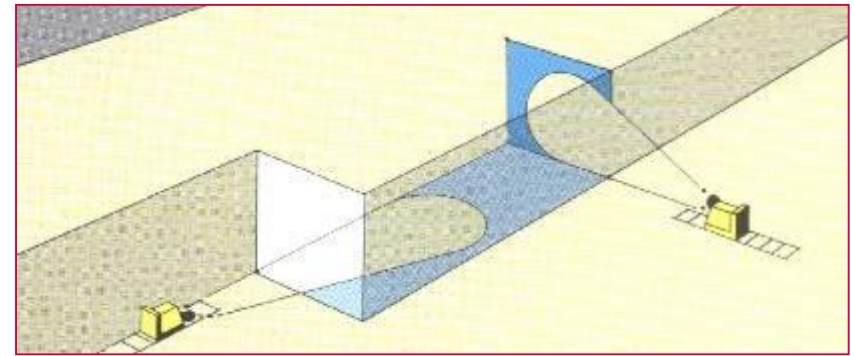
- En roche dure ( $UCS > 60 - 80$  MPa): foration et minage aux explosifs
- En roche tendre à moyenne (potasse, sel, U, Fe):
  - Abattage mécanique : mécanismes de coupe, impact, poinçonnement
  - Utilisation des mineurs continus



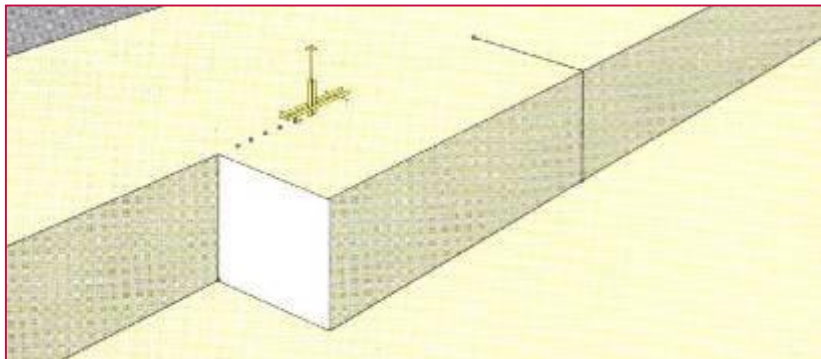
# Roches ornamentales – principe de découpage



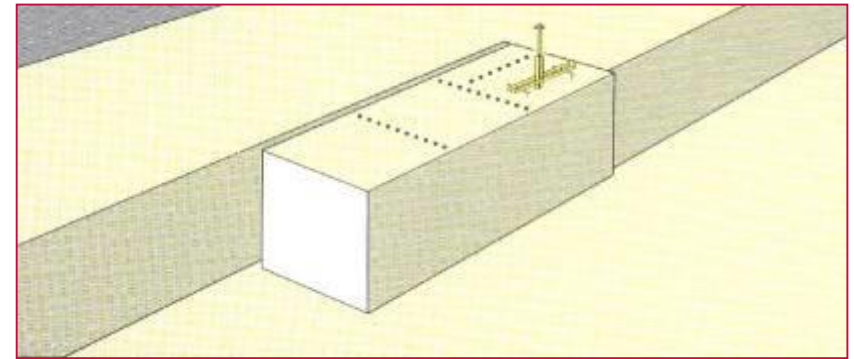
1. forage des trous pour l'enfilage



2. Sciage au fil diamanté après enfilage

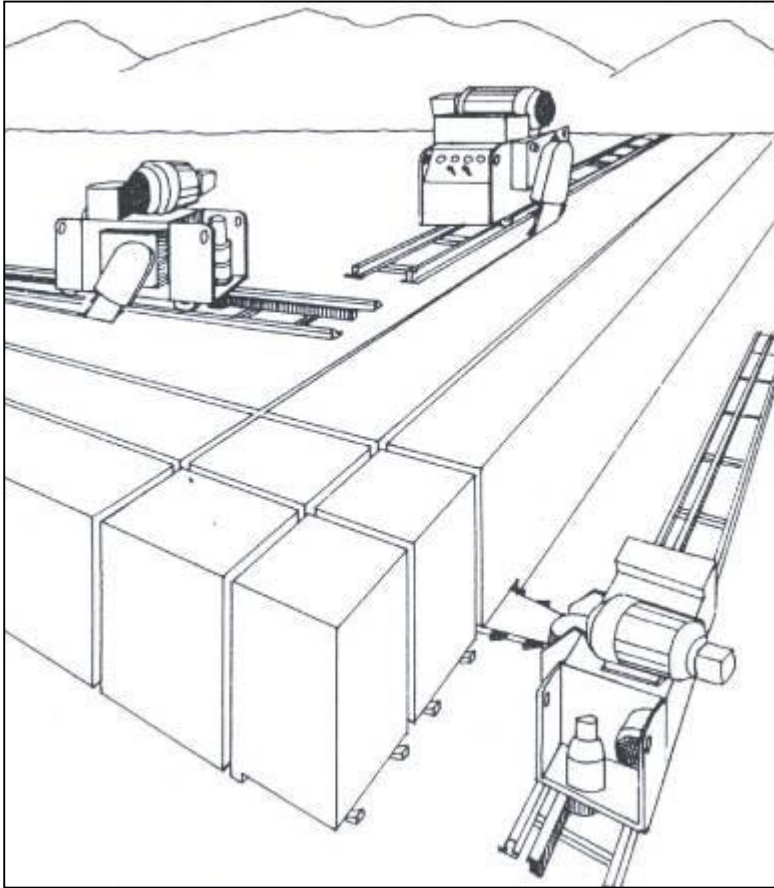


3. Forage des trous pour la découpe et le poussage du bloc



4. Redécoupage du bloc détaché en plus petits blocs par foration et éclatement

# Haveuses rouilleuses sur rail pour extraction à ciel ouvert

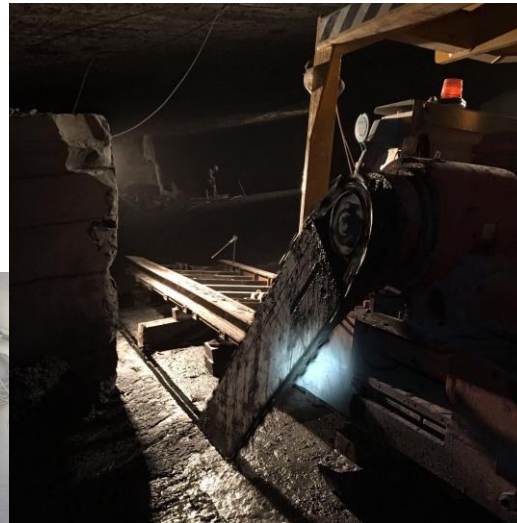
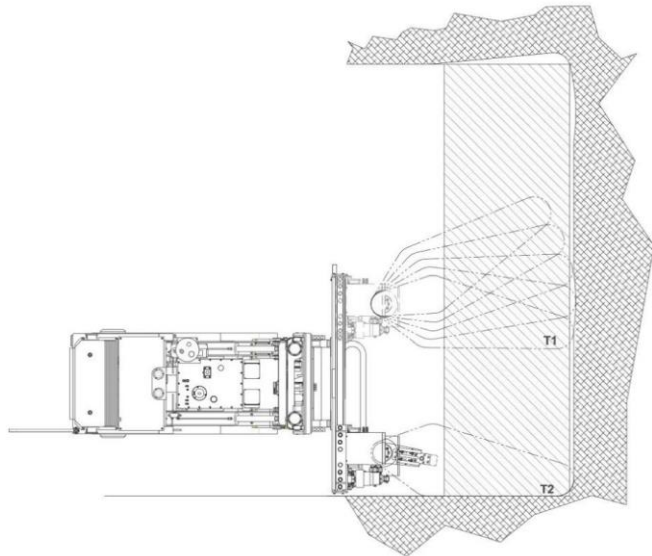
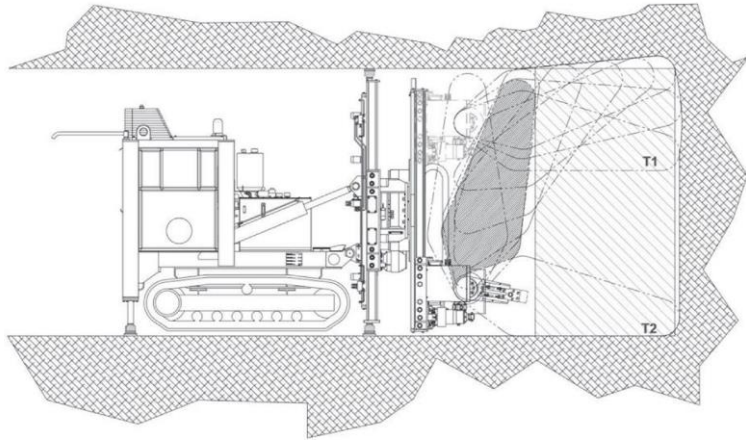


Découpage par havage  
(horizontal)

Rouillage (vertical)



# Haveuse pour la découpe en souterrain




# Découpage à l'explosif

Explosif doux et non brisant :

- Poudre noire = la plus répandue
- Nitrate de potassium, charbon, soufre
- Déflagre → grand volume de gaz sans onde de choc
- Minage doux ou “ smooth blasting ”
- Déplacer des masses importantes en un seul tir sans risque de briser le matériau

Explosif brisant :

- Dynamites + tir ménagé (découplage) en centrant une charge entourée d'air pour atténuer la transmission de l'onde de choc au massif.



La mécanique des roches montre que, si les trous sont rapprochés, l'effet de la pression des gaz est de superposer les contraintes de traction le long de la ligne passant par les trous tandis que partout ailleurs ces tractions se soustraient. Le résultat final est l'obtention d'une face découpée selon le plan des trous des mines.

# Exemple de foration en souterrain Golzinne

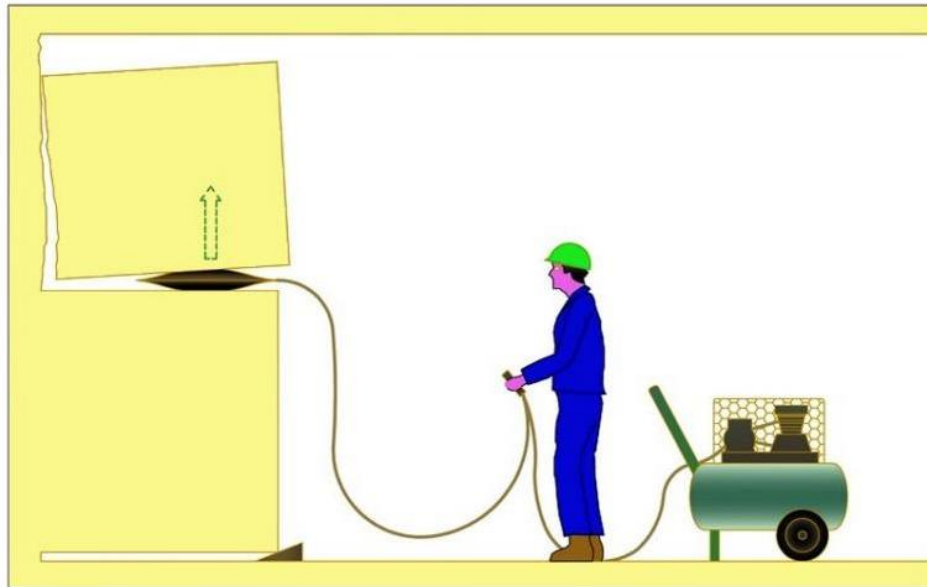


Chariot de perforation téléguidé au travail dans le banc dit « de minage »



# Transport des blocs

- Levage (coins et coussins de levage)
- Déplacement des blocs



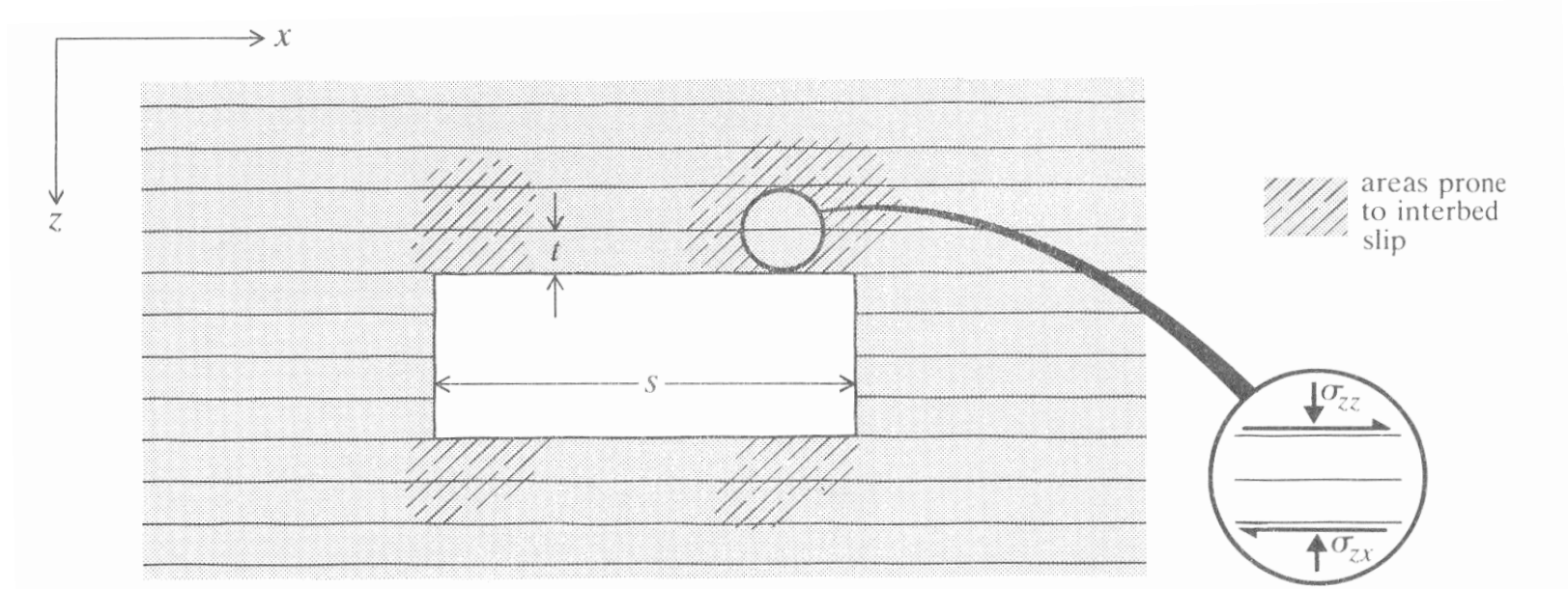
# La méthode des chambres et piliers : design et implications géomécaniques

- **Quelques considérations de mécanique des roches**
  - Méthodes empirico-analytiques : comportement du toit, comportement du pilier
  - Méthodes numériques

# Comportement du toit en terrain stratifié

## Mécanismes généraux :

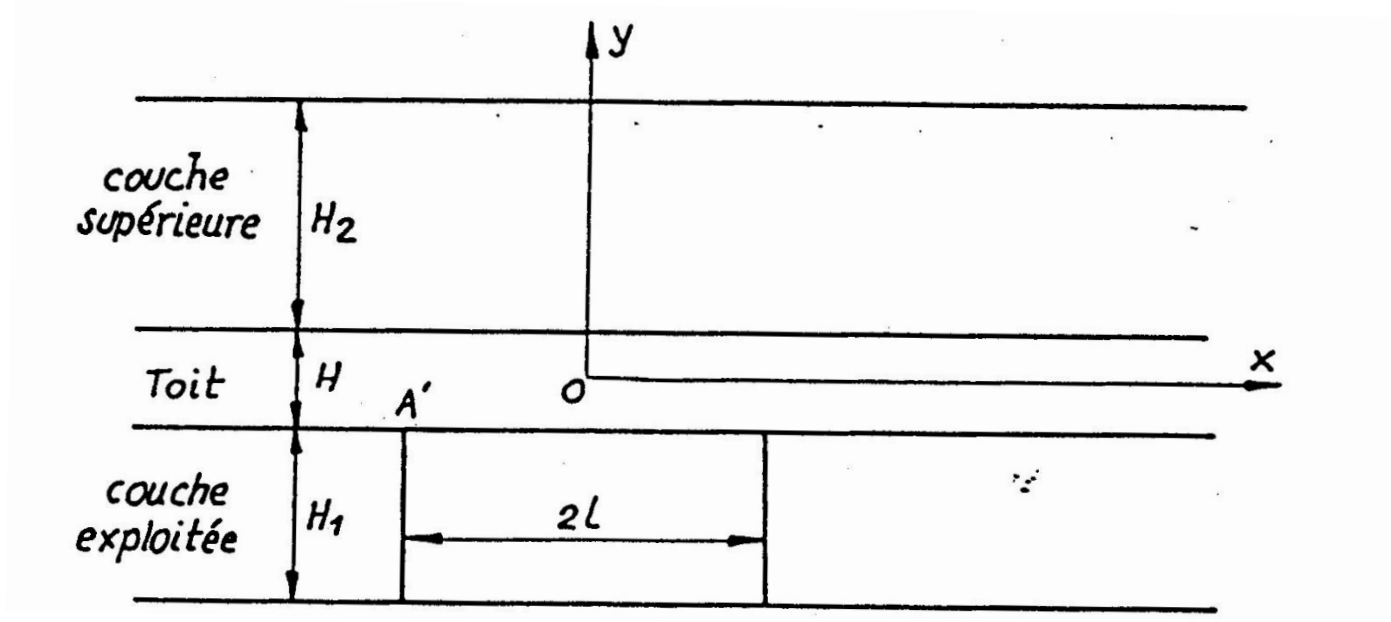
L'expérience montre qu'au-dessus d'un vide d'exploitation d'une certaine taille en roches sédimentaires, les couches se décollent car la rigidité flexionnelle de la couche du toit est généralement inférieure à celle du massif surincombant.



# Comportement du toit en terrain stratifié

## Théorie de la dalle élastique :

Un toit décollé peut être considéré comme une dalle (chambres et piliers carrés) ou, si nous nous bornons aux équilibres de déformation plane (chambre de grande longueur), comme une poutre encastrée à ses deux extrémités.





# Théorie de la dalle élastique

On peut calculer :

- le moment fléchissant

$$N = \frac{1}{2}p \left( \frac{l^2}{3} - x^2 \right) + \frac{E'I}{l}w$$

- la flèche maximum

$$f = bl^2 - \frac{pl^4}{24E'I} = \frac{wl}{2} + \frac{pl^4}{24E'I}$$

Avec

$p = gh$  poids de la poutre par unité de longueur

$E' = E / (1 - \nu^2)$  équivalent de E pour les problèmes plans

$I = H^3 / 12$  moment d'inertie de la section droite par rapport à l'axe central de la poutre

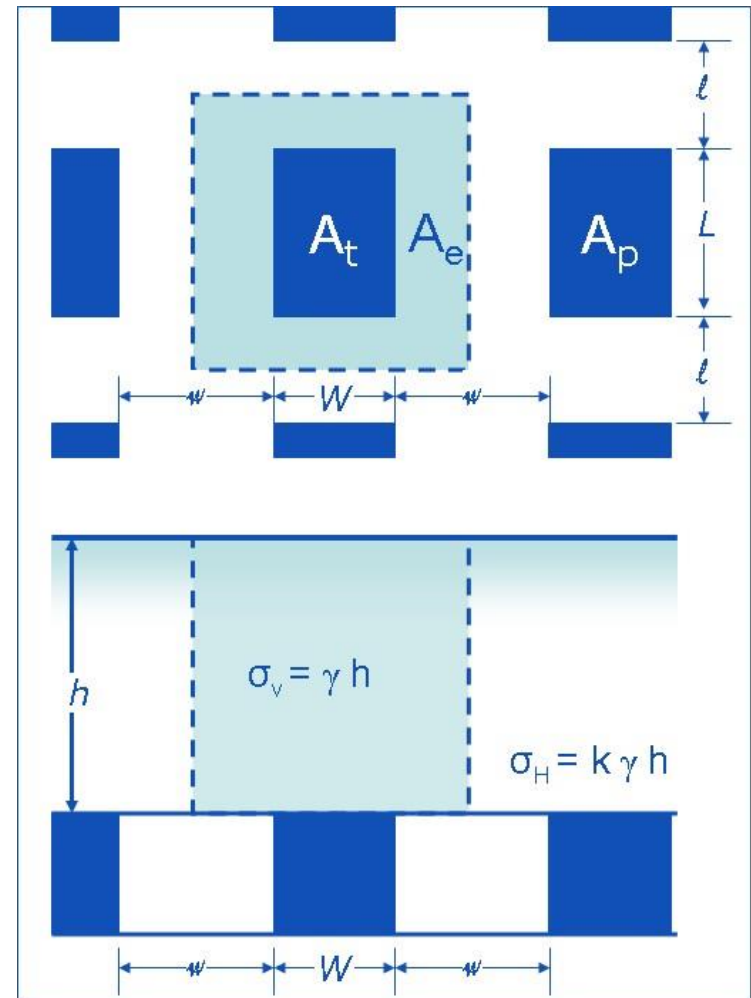
$w$  rotation autorisée aux extrémités

# Comportement du pilier

## Méthode des aires tributaires

### Hypothèses :

- Sur les piliers agit le poids des roches de couverture qui se trouvent au-dessus des piliers jusqu'à la surface.
- Les contraintes verticales de compression dans les sections horizontales des piliers sont considérées uniformément réparties.
- La valeur de la résistance à la rupture par compression est obtenue par des essais de laboratoire.



# Méthode des aires tributaires

Ces hypothèses conduisent à la condition de stabilité suivante :

$$SH\gamma + sh\gamma_1 \leq s \frac{\sigma_c}{n}$$

$S$ : base du prisme de roche supporté par le pilier

$s$  : section du pilier

$H$ : hauteur du massif sur-incombant

$h$  : hauteur du pilier

$\gamma, \gamma_1$ : poids spécifiques du massif et du pilier

$\sigma_c$ : résistance en compression simple

$n$  : coefficient de sécurité ( $n = 2,5$  pour le smooth-blasting ou minage doux).

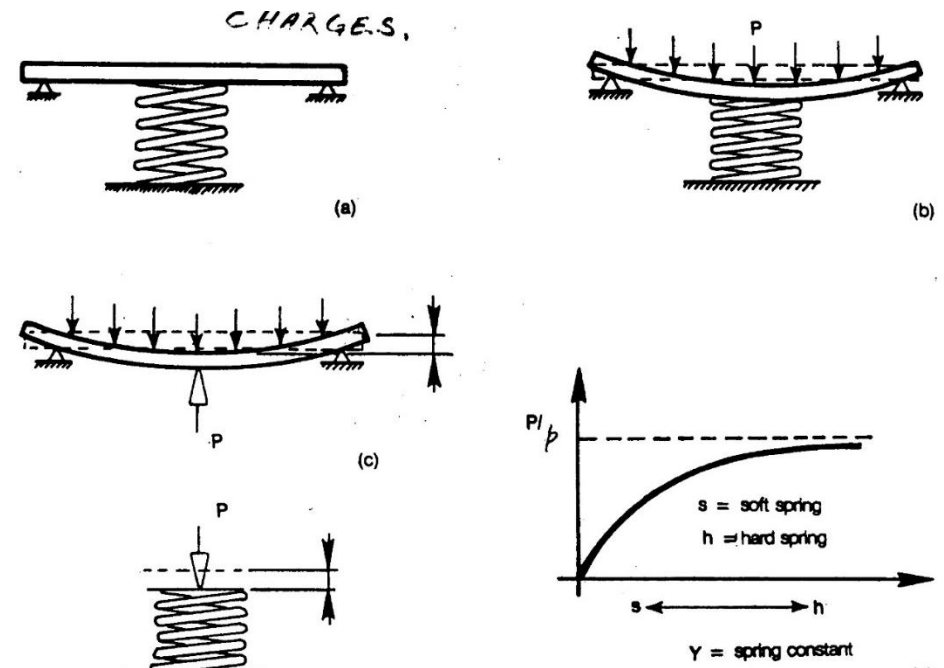
# Méthode des aires tributaires

## Charge réelle sur le pilier:

L'hypothèse des aires tributaires peut être acceptée lorsque la largeur du panneau exploité est supérieure à la profondeur de la couche exploitée (cas de la Malogne), sinon elle conduit à une surestimation de la charge. Il y a en général report des contraintes sur les piliers périphériques (appuis). La charge reprise par les appuis sera d'autant plus élevée que le déplacement autorisé dans les piliers sera important.

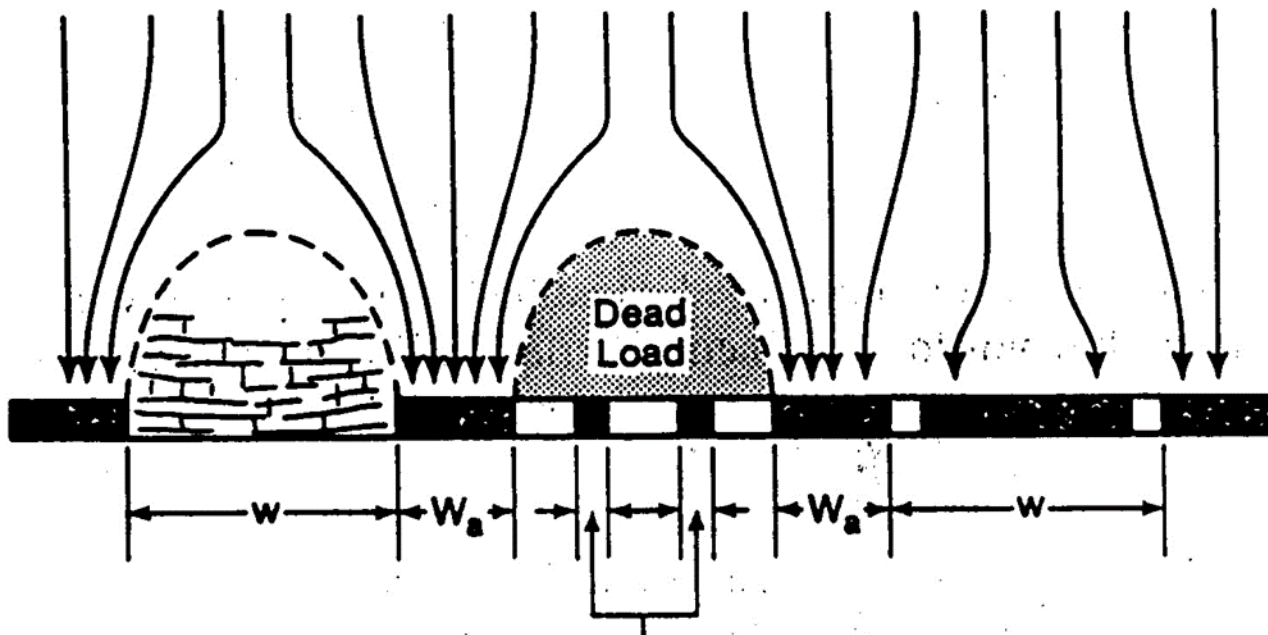
Analogie:

Pour un ressort tendre ( $s$ ) le rapport  $P/p$  de la charge du pilier à la charge totale sera nul, tandis que pour un ressort rigide ( $h$ ) ce rapport sera proche de 1.



# Concept de pilier barrière dans une exploitation

Il s'agit de piliers qu'on laisse entre les panneaux exploités pour reprendre les charges et éviter ainsi que les ruptures se propagent jusqu'en surface



# Estimation de la résistance réelle des piliers

Trois méthodes peuvent être utilisées:

- Extrapolation à partir des essais à petite échelle comme la compression uniaxiale;
- Réalisation des essais in situ pour estimer la résistance (expériences faites essentiellement dans le charbon);
- Analyse statistique du comportement des piliers (rupture et stabilité par rapport à la charge qu'ils sont supposés reprendre.

Formule générale d'estimation:

$$R_p = k w^a h^b$$

$k$  : constante  
 $a, b$  : paramètres  
 $w$  : largeur du pilier  
 $h$  : hauteur du pilier

# Effet de la taille sur la résistance du pilier

Evolution de la résistance en fonction de la taille des échantillons (résultats obtenus sur des cubes de charbon)

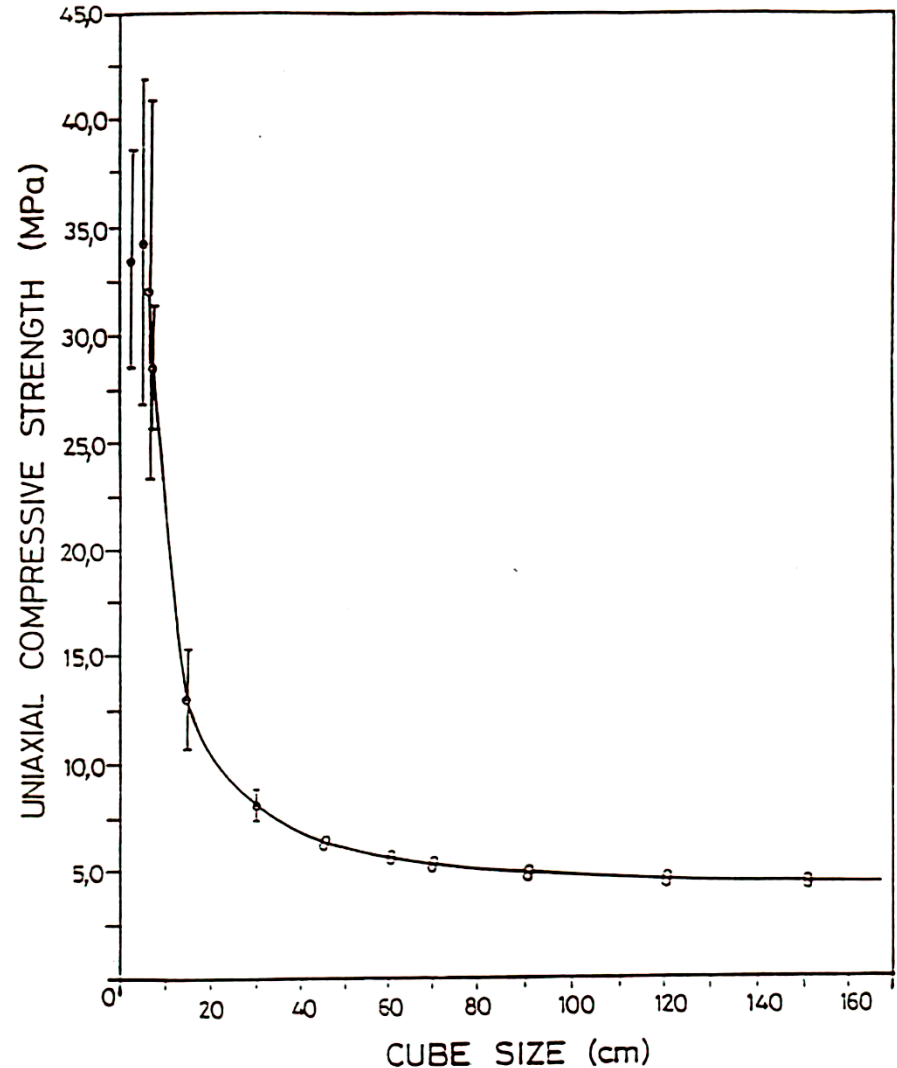
Exemples de formules d'ajustement :

Holland et Gaddy (1956)

$$\sigma_p = k \frac{\sqrt{w}}{h}$$

Bieniawski (1967)

$$\sigma_p = k \frac{w^{0.16}}{h^{0.55}}$$





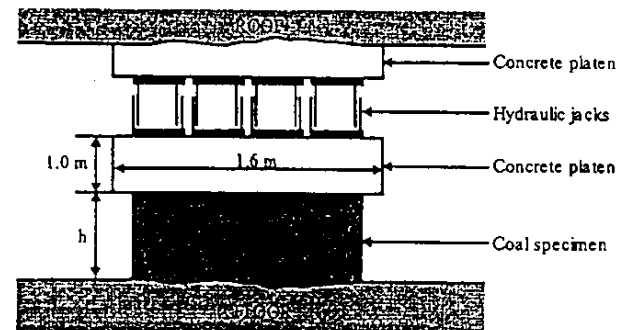
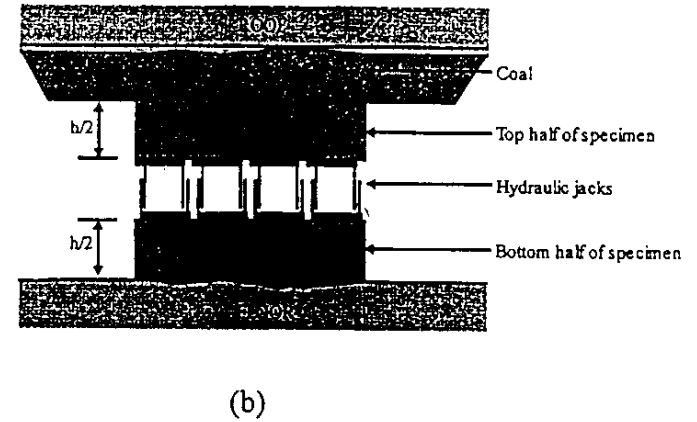
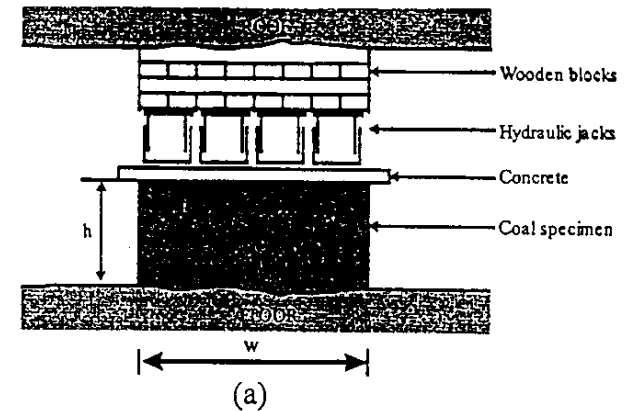
# Expériences in situ sur des piliers de charbon

Coupe du pilier et chargement par systèmes de vérins hydrauliques placés entre le toit et le mur

a) Bieniawski

b) Cook et al et Wagner

c) Van Heerden



# Résultats des essais

## Cas de la courbe contrainte - déformation

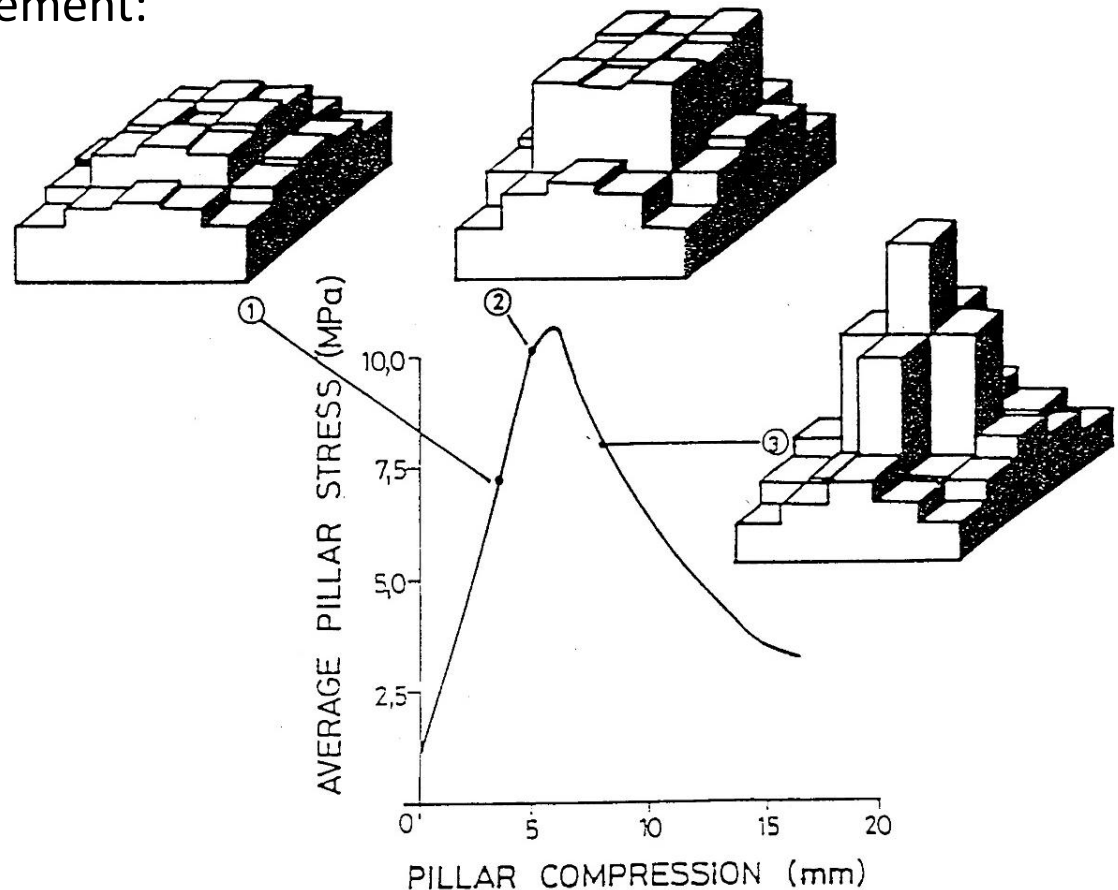
Exemples de formules d'ajustement:

Wagner (1974)

$$\sigma_p = k \sqrt{\frac{w_{eff}}{h}}$$

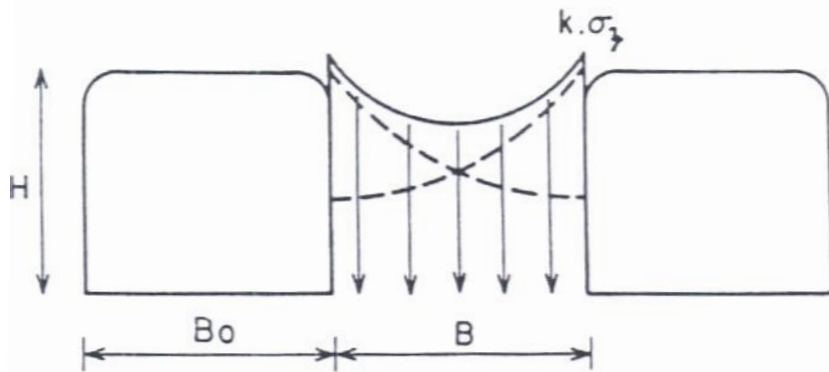
Wang et al (1977)

$$\sigma_p = 0.78 + 0.22 \frac{w}{h}$$

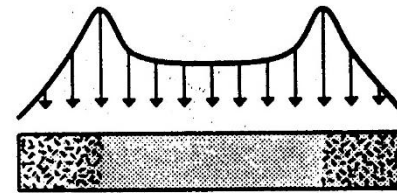


# Distribution réelle des contraintes dans les piliers

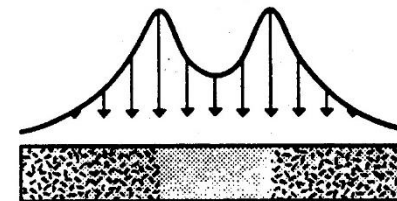
Contraintes élastiques verticales :  
les pics sont sur la paroi



Evolution des contraintes après rupture

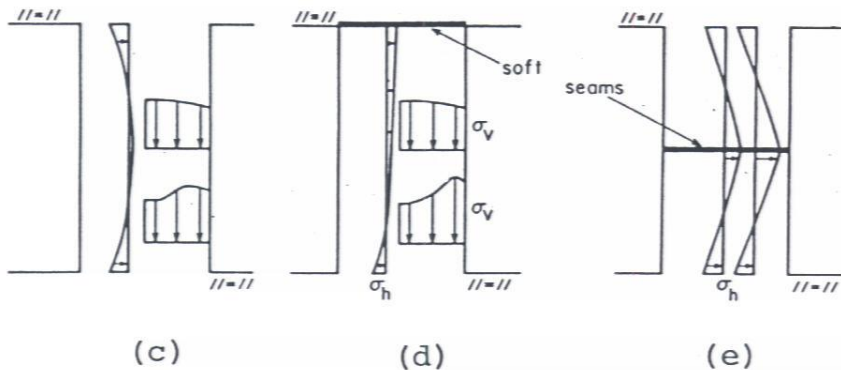


Front abutment stress  
after pillar loading



Front abutment stress  
pushed toward pillar center

Contraintes élastiques horizontales

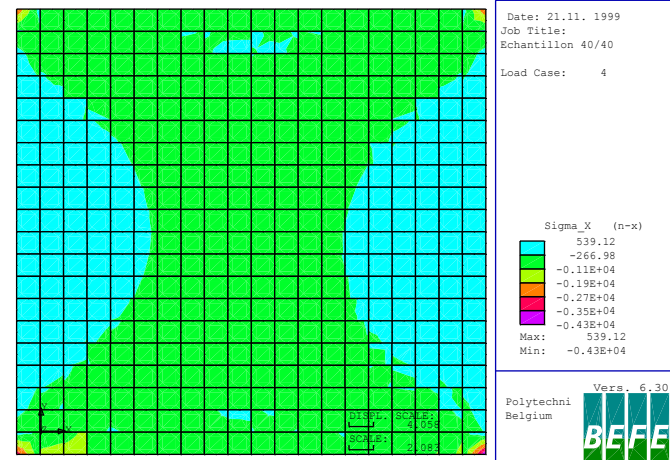


# Forme de la rupture des piliers

La rupture des piliers commence souvent par un écaillage dû au fait que les tensions latérales engendrées par la contrainte verticale ne sont pas compensées sur les parements.



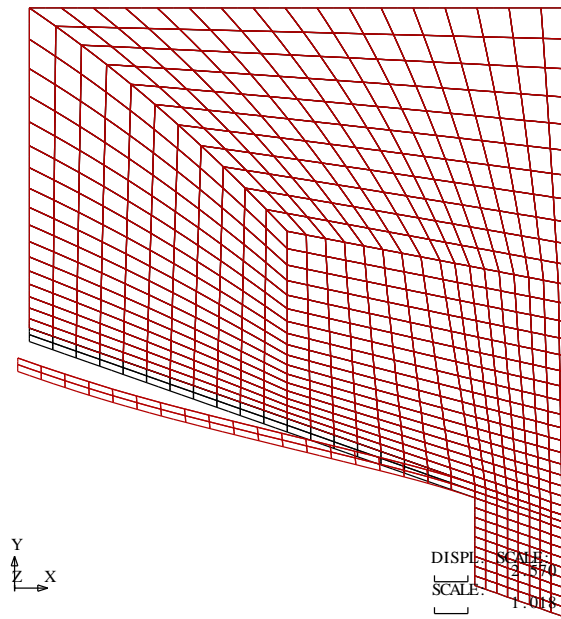
*Exemple de pilier écaillé dans les carrières souterraines de la Malogne.*



*Simulation du comportement mécanique d'un échantillon de roche pour comprendre le mécanisme d'écaillage*


# Méthodes numériques

## Exemple d'application MEF à la carrière Saint-Martin Villeret



Date: 27. 5. 2000  
Job Title:  
Run on 2000/ 5/22  
Load Case: 1

Vers. 6.30  
Polytechni  
Belgium



*Simulation d'un décollement de joint par MEF*

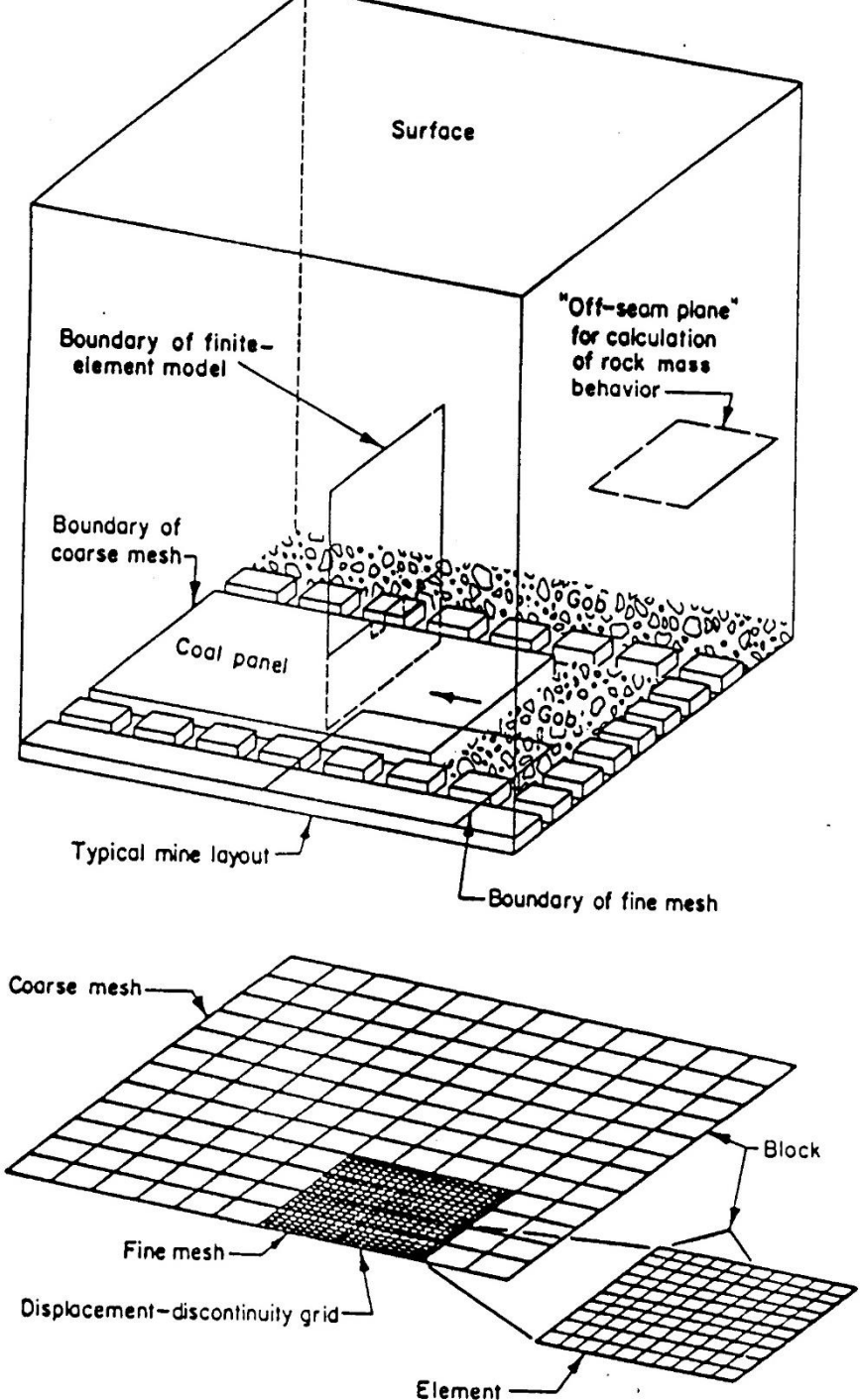
*Vues de la carrière avec décollement de toit*



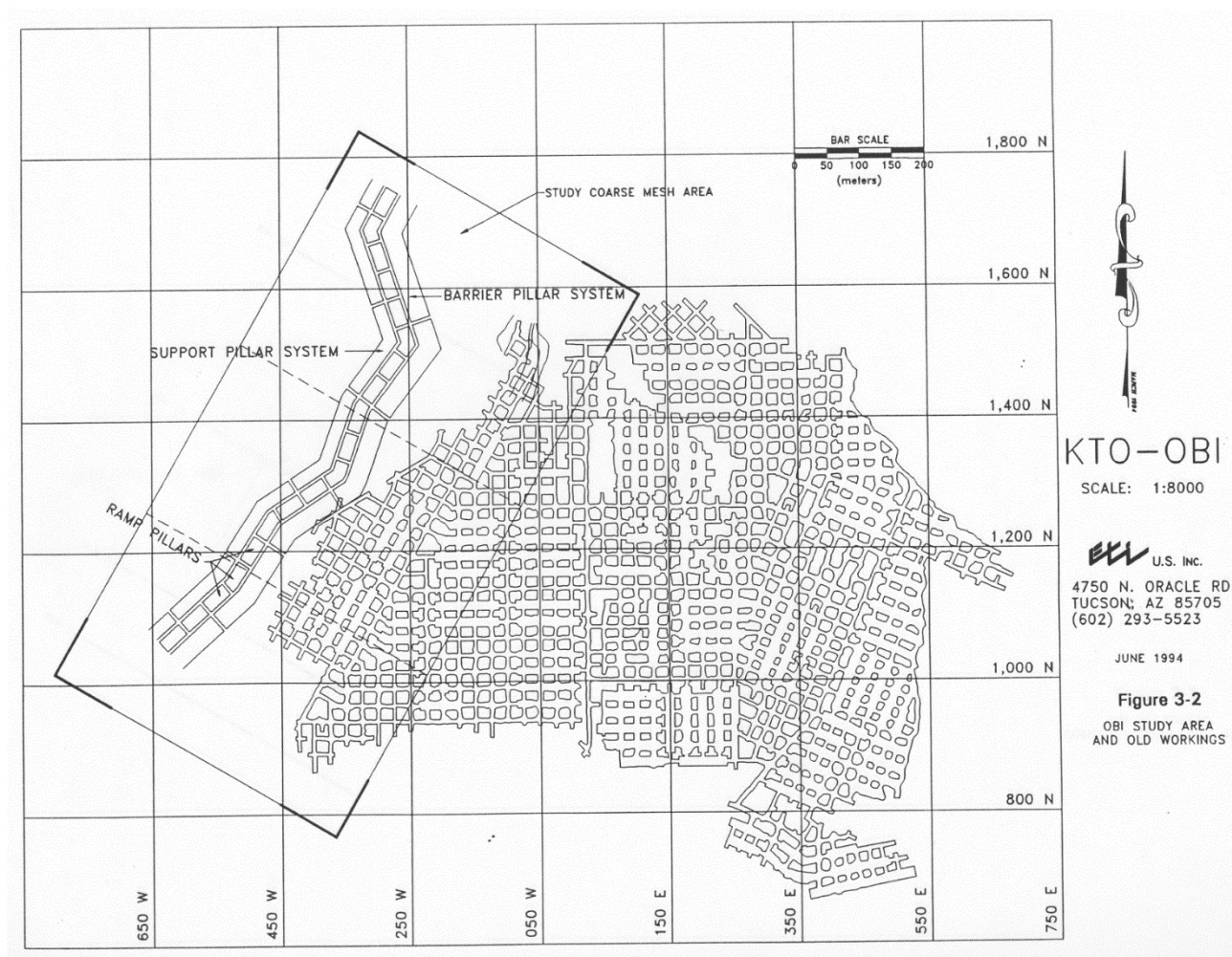
# Utilisation des méthodes combinées : MEF & BEM

Le modèle des éléments aux frontières permet de voir la cinématique et les efforts globaux qui peuvent être utilisés pour fixer les conditions aux limites du modèle des éléments finis.

Le logiciel utilisé ici est Mulsim du USBM



# Exemple de modélisation BEM d'une exploitation par chambres et piliers (Mine de Kamoto, R.D. Congo)



# Résultats en contraintes et déplacements verticaux par la méthode des éléments aux frontières

Figure 3-28

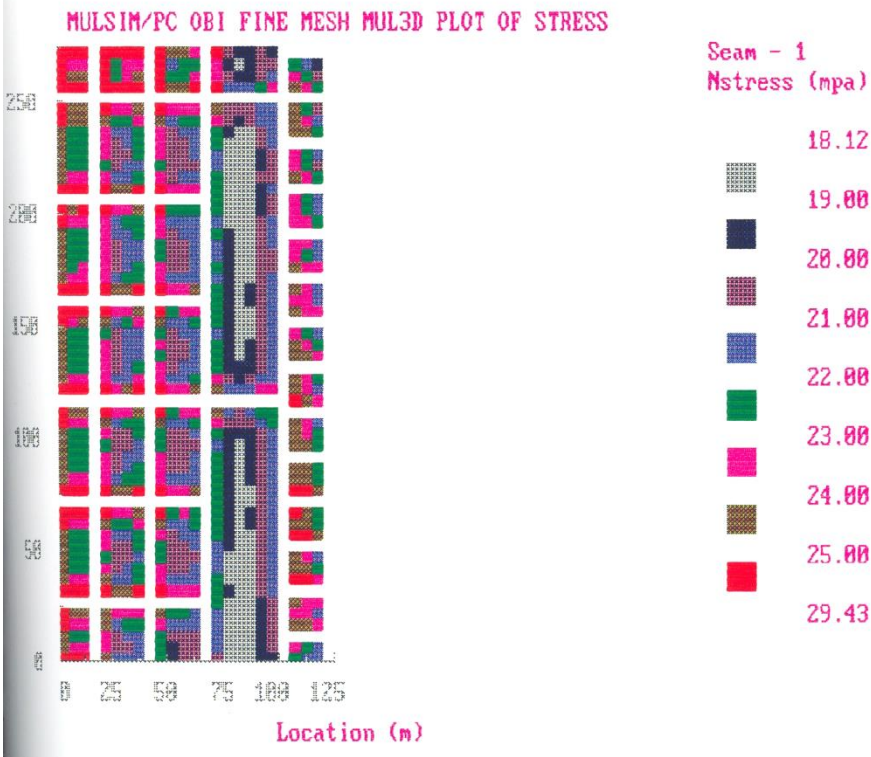
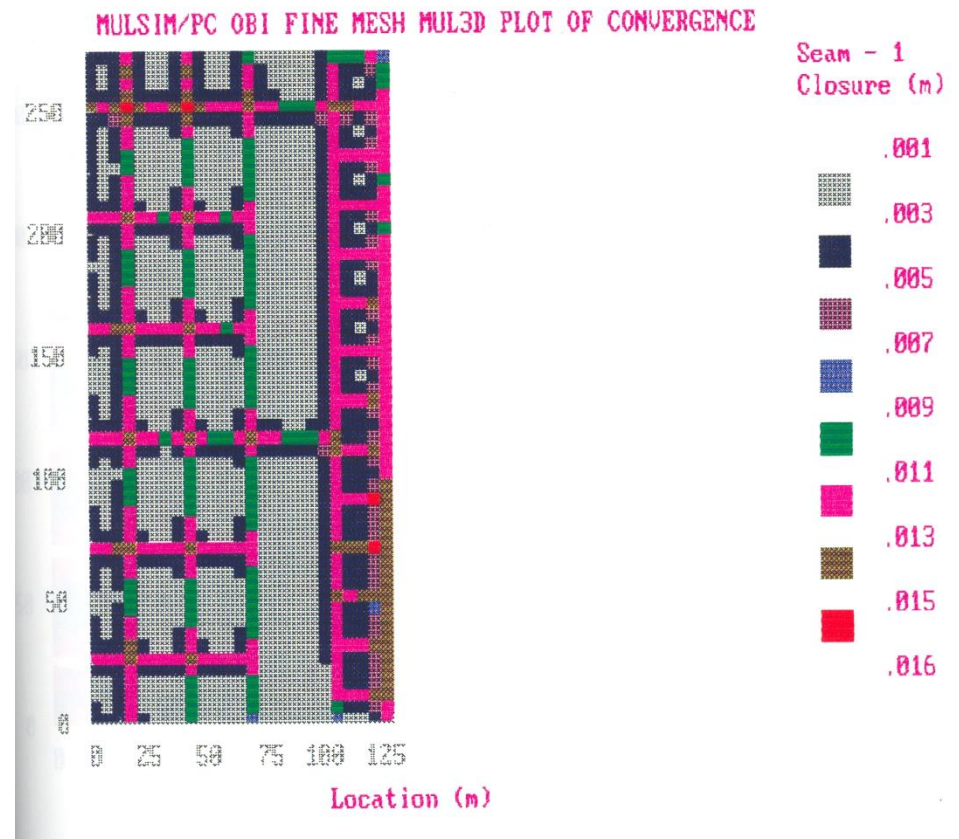
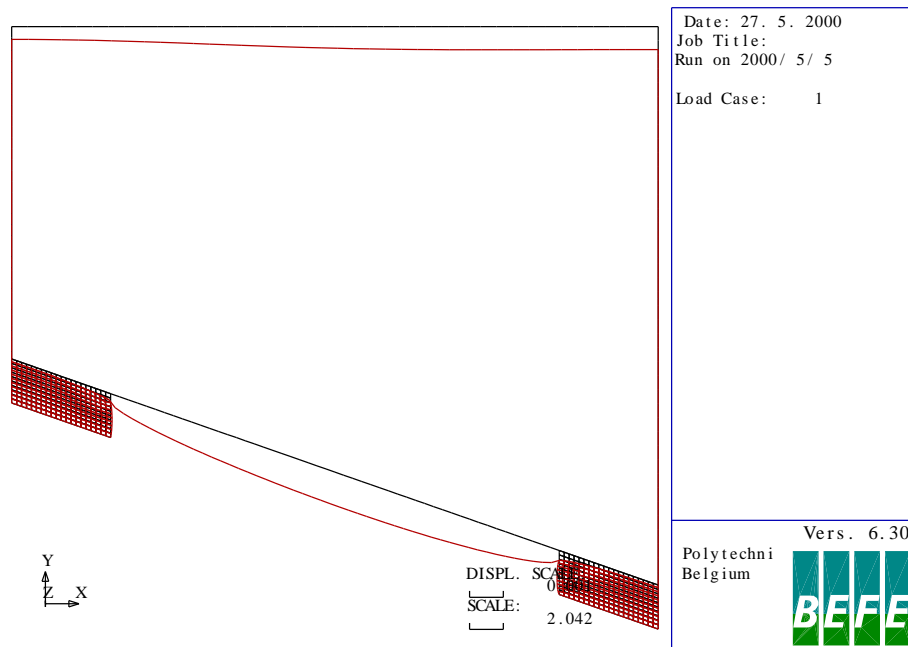


Figure 3-29

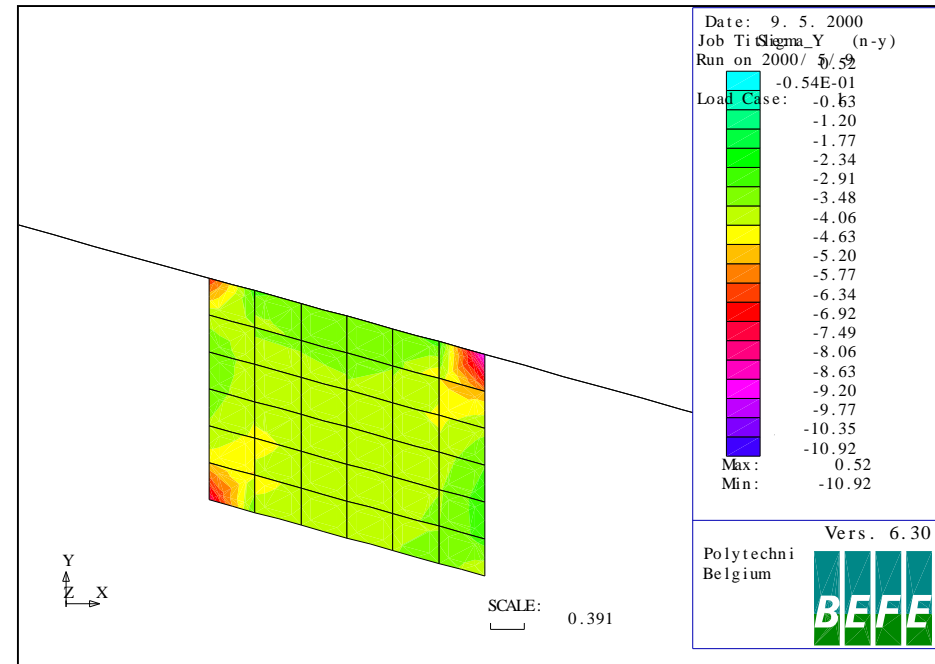




# Exemple de modèle combiné à la carrière Saint Martin



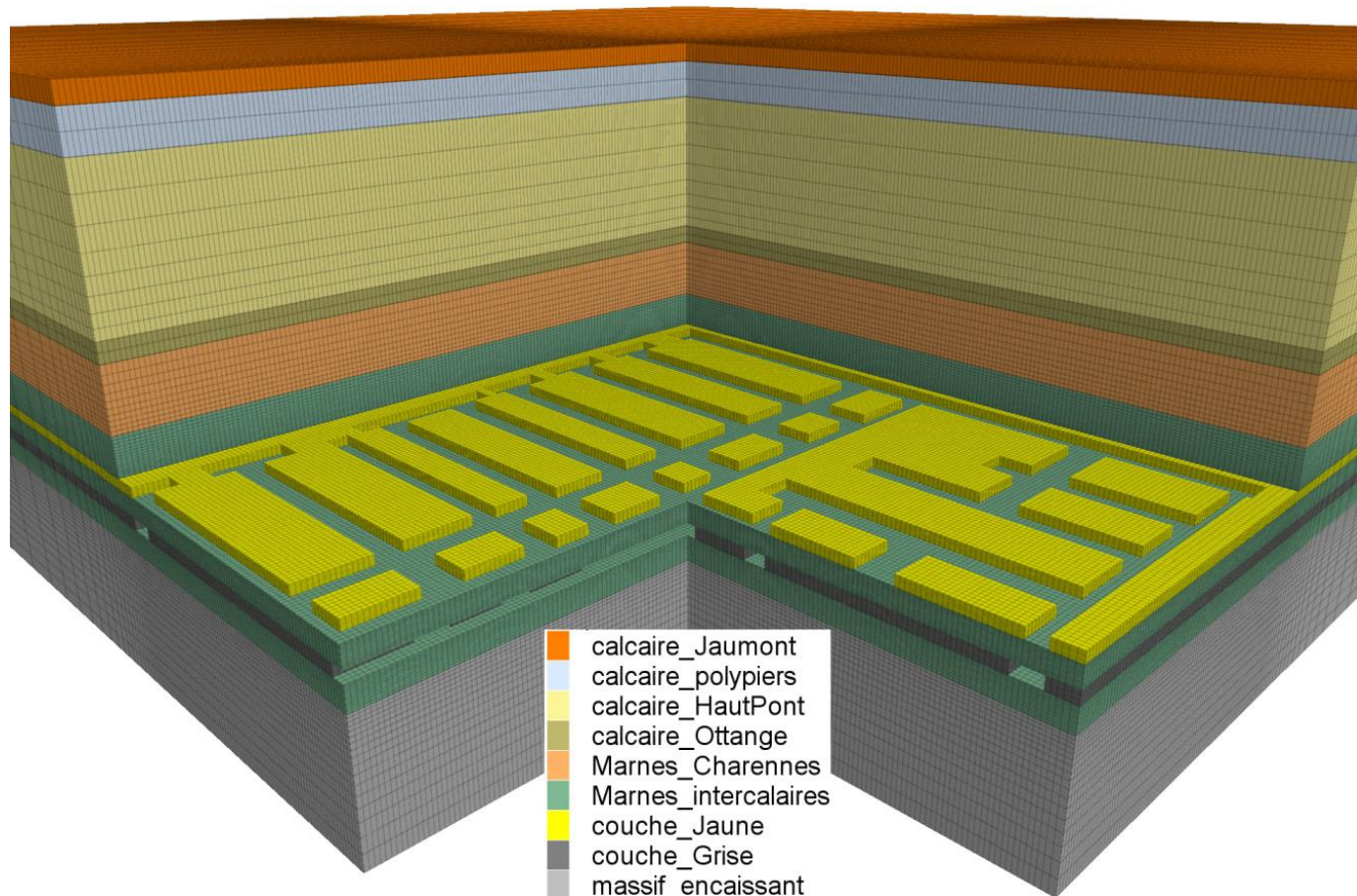
*Déformée globale  
du modèle en élasticité*



*Distribution des contraintes  
dans un pilier*

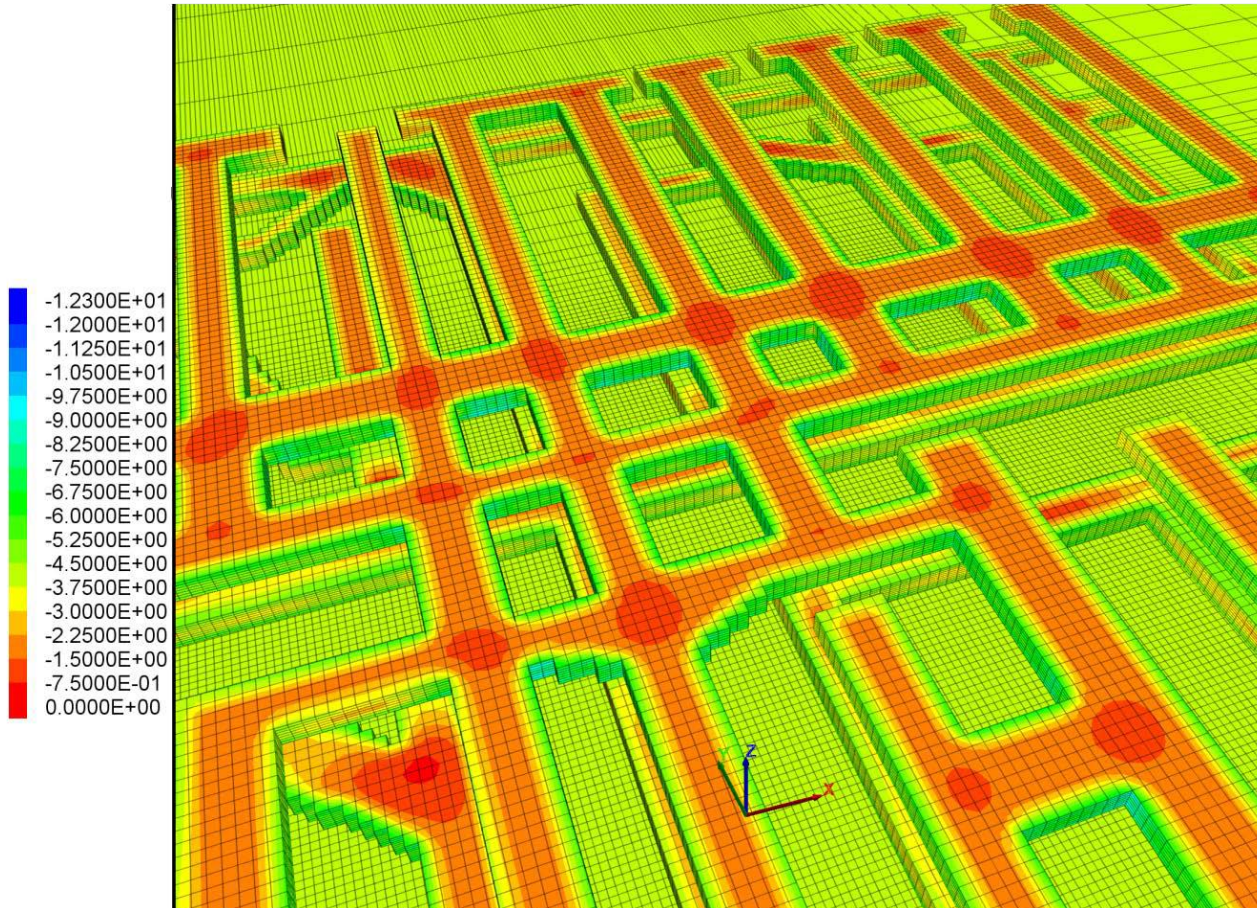
# Exemple de modèle sur FLAC 3D

## Application au Bassin ferrifère lorrain (Géoderis)





# Exemple de calcul sur modèle FLAC 3D



*Contrainte  
principale  
majeure*



# Merci pour votre attention



Impala Platinum Mine, Rustenburg, South Africa