

# Sur l'optimisation de la qualité des tirs, de la théorie à la pratique

Prof. Jean-Pierre TSHIBANGU K.

Service de Génie Minier | Faculté Polytechnique de Mons

# Sur l'optimisation de la qualité des tirs, de la théorie à la pratique

- Introduction
- Connaissance du massif à abattre
- Effets de l'explosion sur le massif
- Schéma de tir: estimation de la maille
- Foration : précision et contrôle (non abordé ici)
- Résultats en termes de fragmentation et forme du tas
- Maîtrise des vibrations (non abordé ici)

# Sur l'optimisation de la qualité des tirs, de la théorie à la pratique

- **Introduction**
- Connaissance du massif à abattre
- Effets de l'explosion sur le massif
- Schéma de tir: estimation de la maille
- Résultats en termes de fragmentation et forme du tas

# Contraintes, objectifs et outils de travail

## Contraintes

- **Production** (journalière, hebdomadaire, annuelle)
- **Géologie du gisement et des épontes** :
  - Orientation des fronts par rapports aux défauts structuraux
  - Propriétés mécaniques des terrains : massif élastique à rupture fragile, massif élasto-plastique
  - Hauteur des gradins compte tenu de la sélectivité
- **Equipements utilisés pour manipuler les produits** : chargeuses, pelles, excavatrices de découvertures (draglines)
- **Nuissances tolérables** : bruits, poussières, vibrations

# Contraintes, objectifs et outils de travail

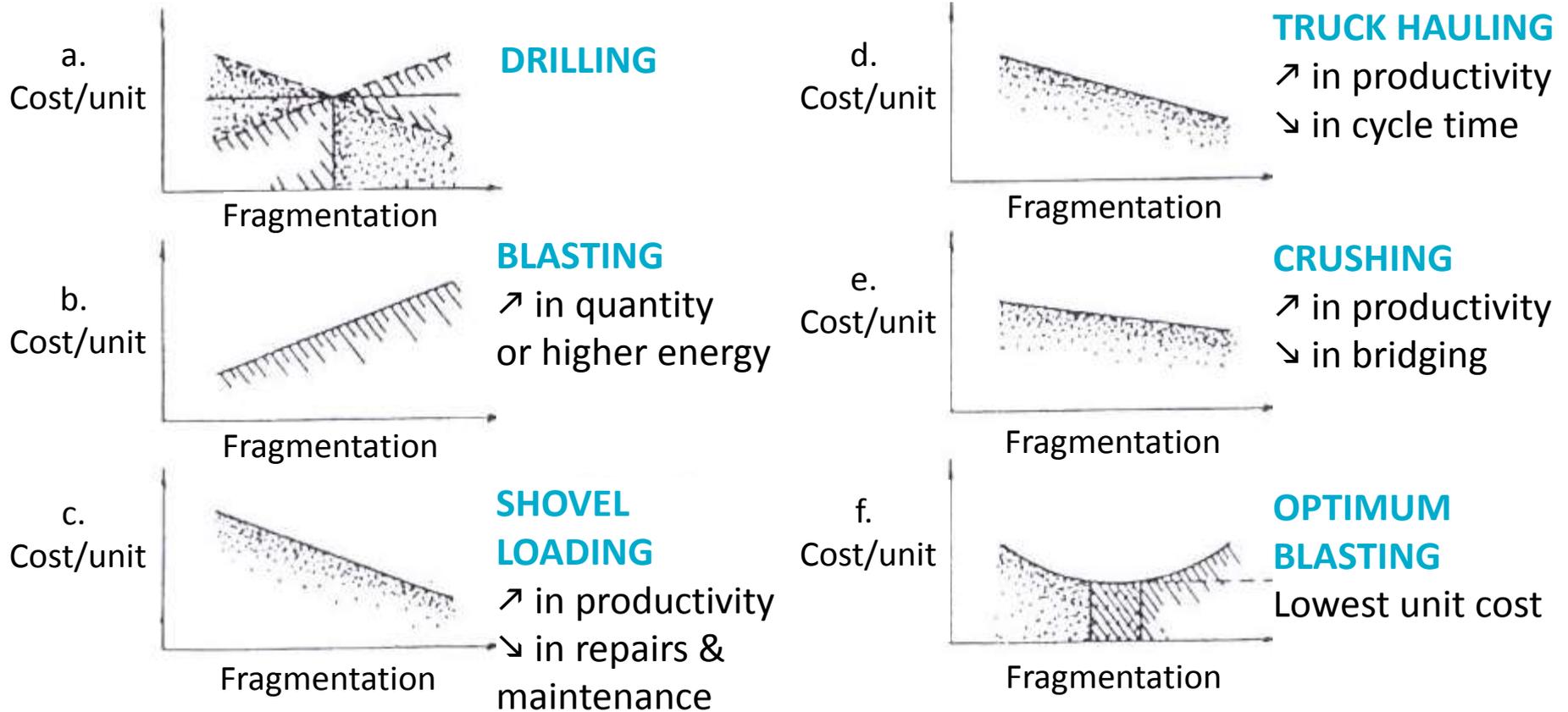
## Objectifs

- **Granulométrie-blocométrie** : distribution théorique
- **Forme des tas** : ébranlement ou étalement

## Outils de travail

- Règles du pouce
- Modélisations géomécaniques

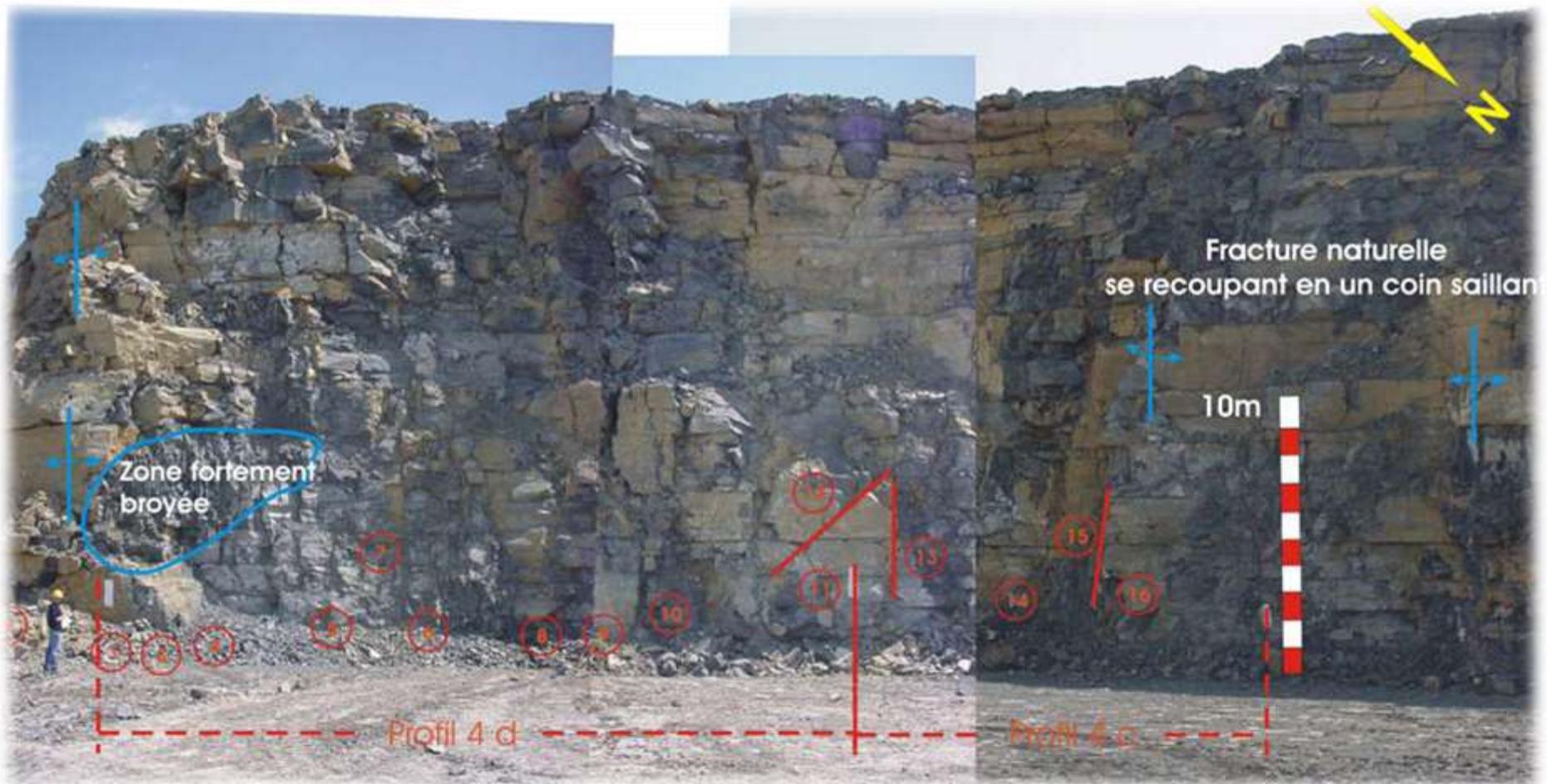
# Optimisation des coûts en abattage, chargement et transport



# Sur l'optimisation de la qualité des tirs, de la théorie à la pratique

- Introduction
- **Connaissance du massif à abattre**
- Effets de l'explosion sur le massif
- Schéma de tir: estimation de la maille
- Résultats en termes de fragmentation et forme du tas

# Description des parois



# Exploitation des diagraphies des forages

- Traitement des 2300 diagraphies réalisées en 2006
- Modélisation de  $e'$  moyen par fourneaux dans le logiciel Gemcom



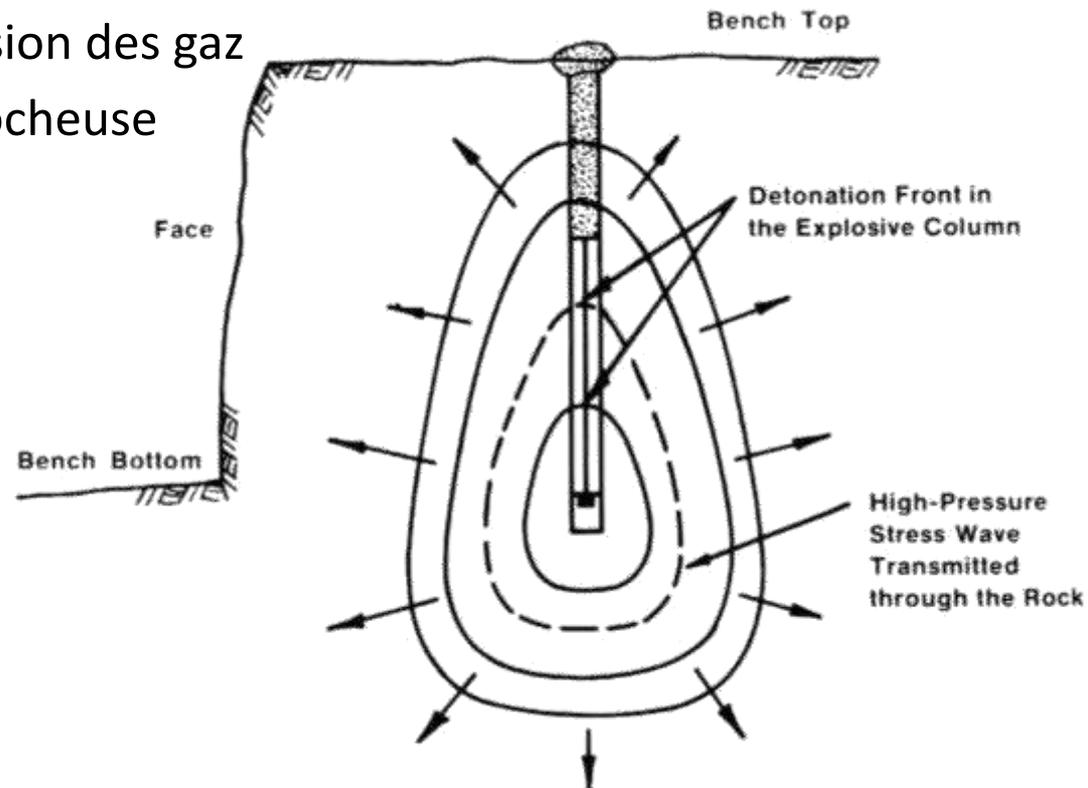
# Sur l'optimisation de la qualité des tirs, de la théorie à la pratique

- Introduction
- Connaissance du massif à abattre
- **Effets de l'explosion sur le massif**
- Schéma de tir: estimation de la maille
- Résultats en termes de fragmentation et forme du tas

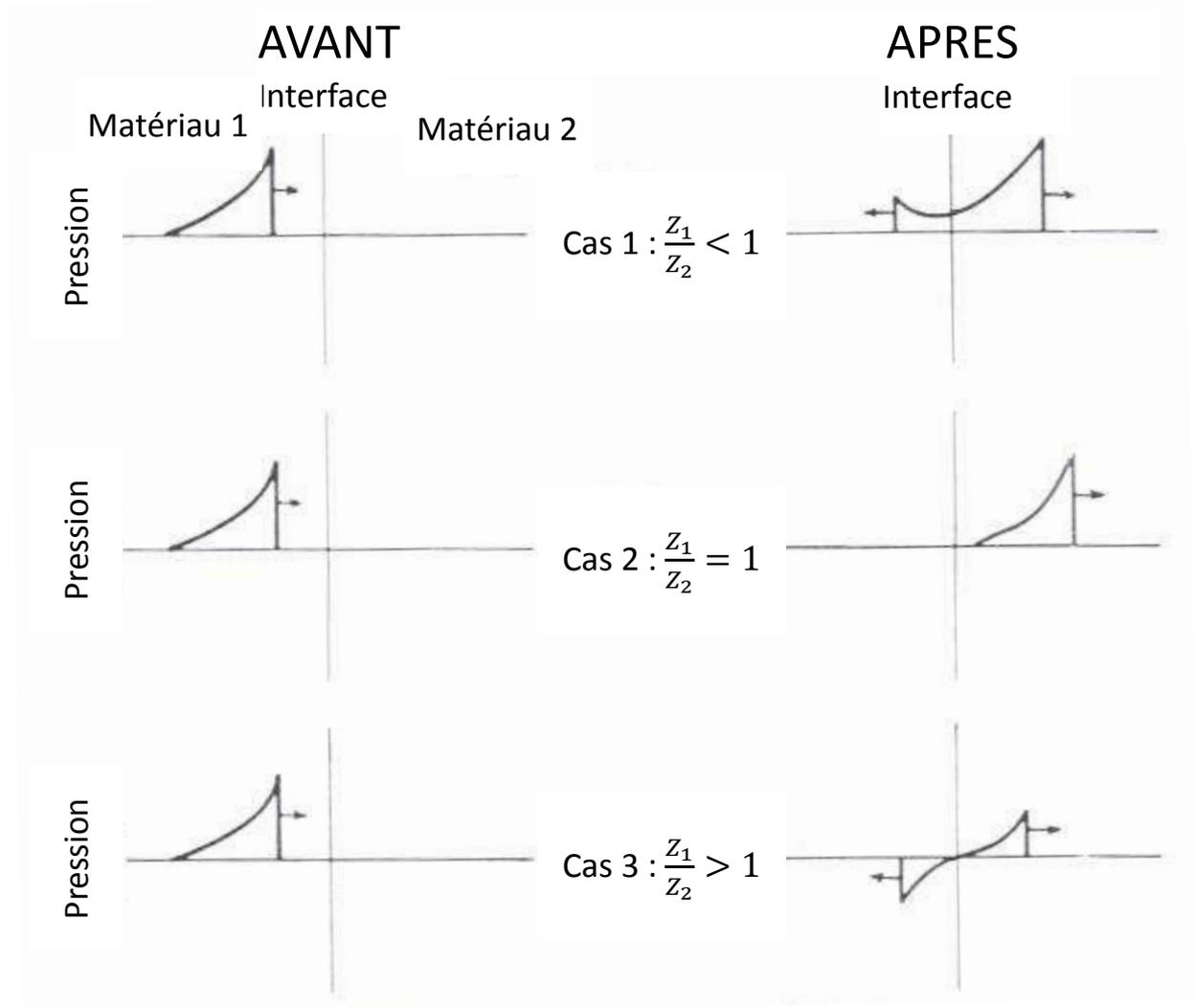
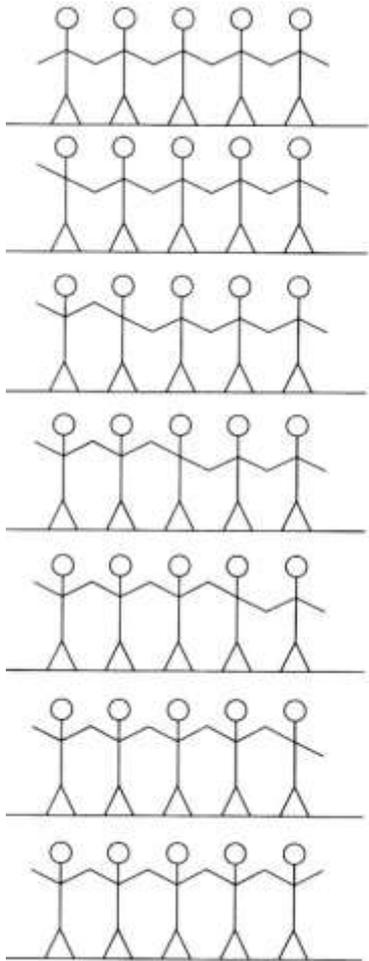
# Effet de l'explosion sur le massif

## Périodes de temps dans la fragmentation

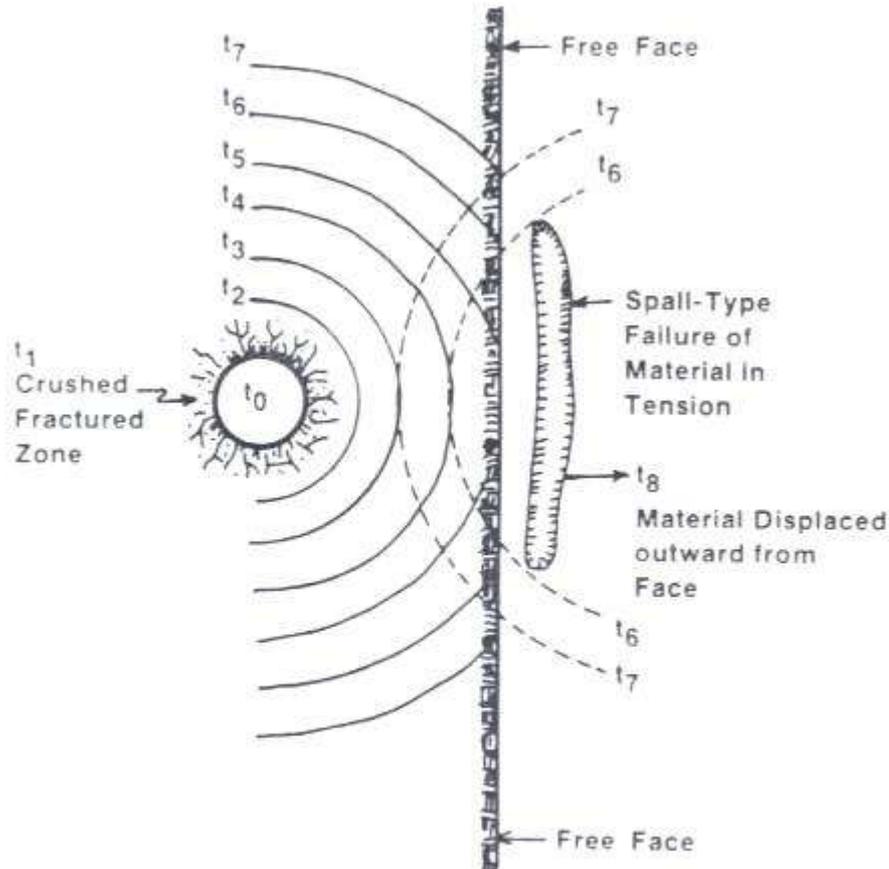
- T1 : Détonation
- T2 : Propagation de l'onde de choc et de pression
- T3 : Développement de la pression des gaz
- T4 : Mouvement de la masse rocheuse



# Propagation de l'onde de choc



# Fissuration due à l'onde de choc



$t_0$  — detonation, generation of high pressure, high temperature gases

$t_1$  — borehole walls are crushed and slightly fractured due to high gas pressure, and borehole expands

$t_2$ - $t_4$  — compressional strain pulse propagates outward in all directions

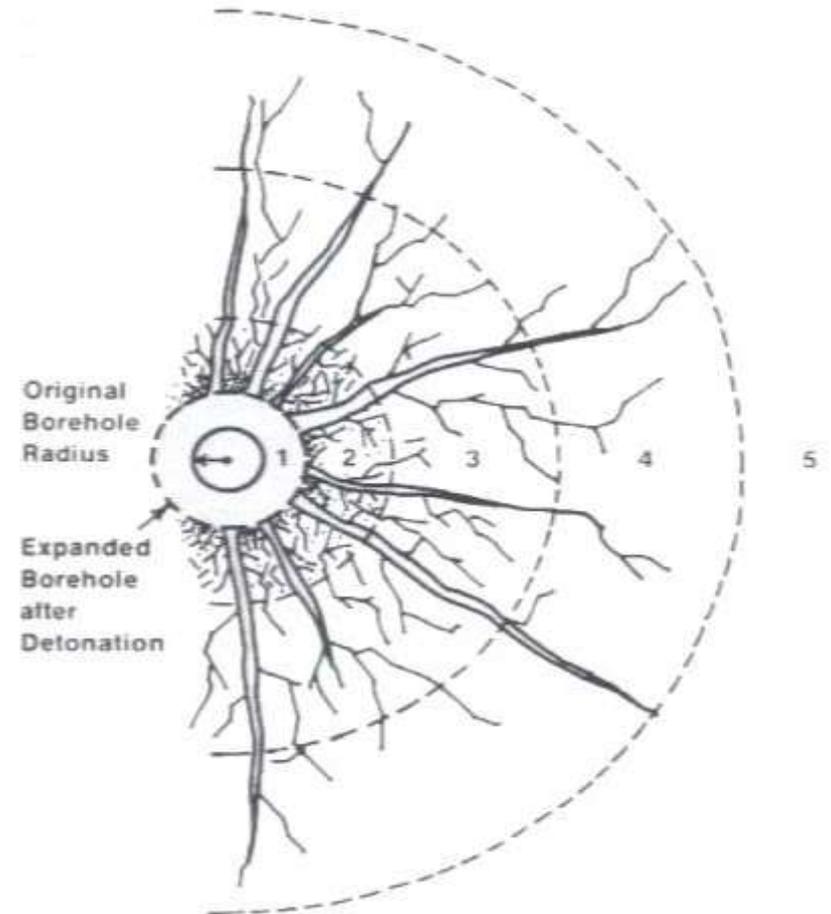
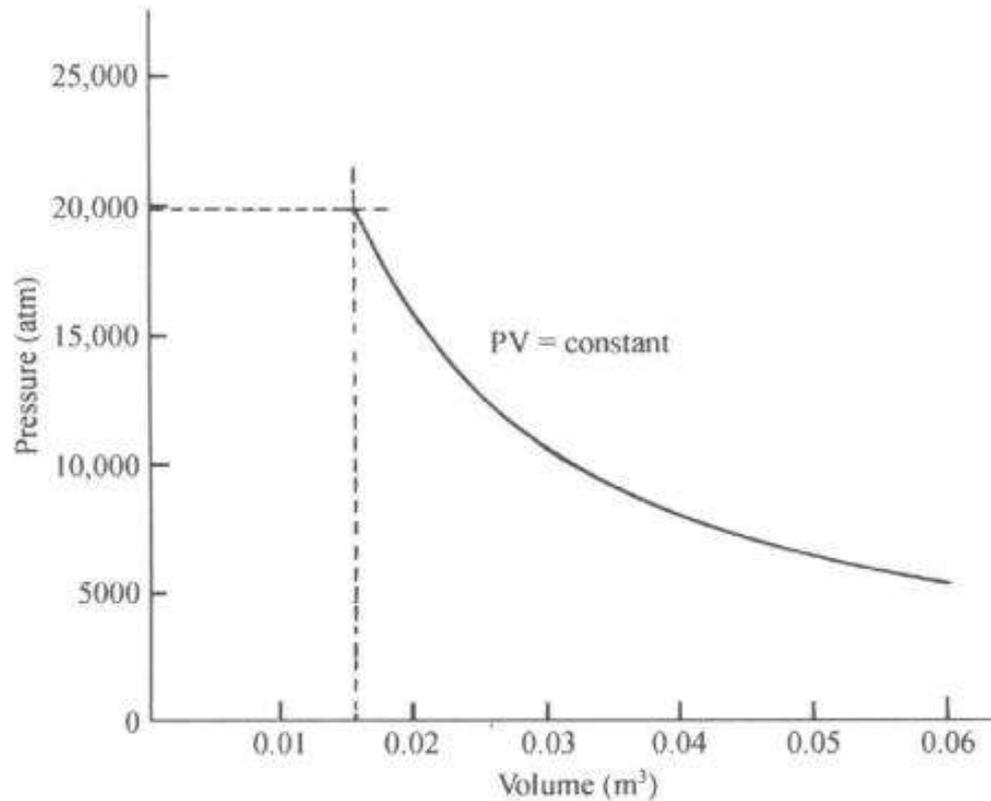
$t_5$  — part of compressional strain pulse impinges on free surface

$t_5$ - $t_6$  — part of pulse continues to travel outward and part of it is reflected at the free surface as a tensile strain pulse

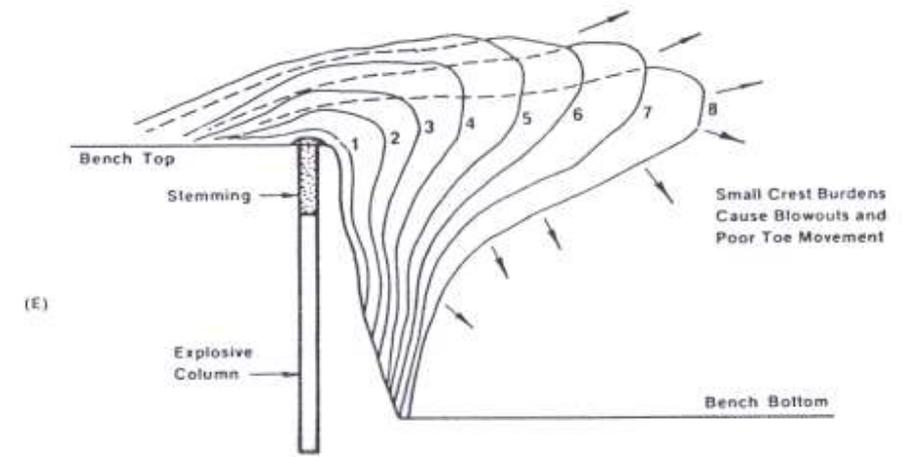
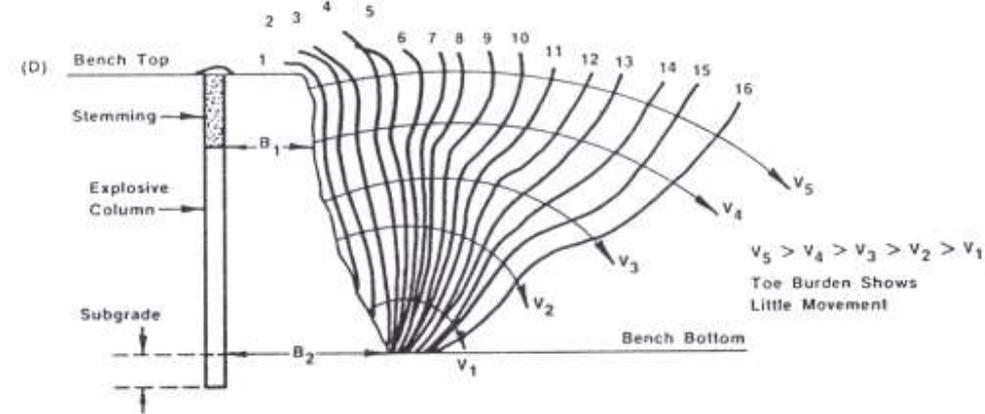
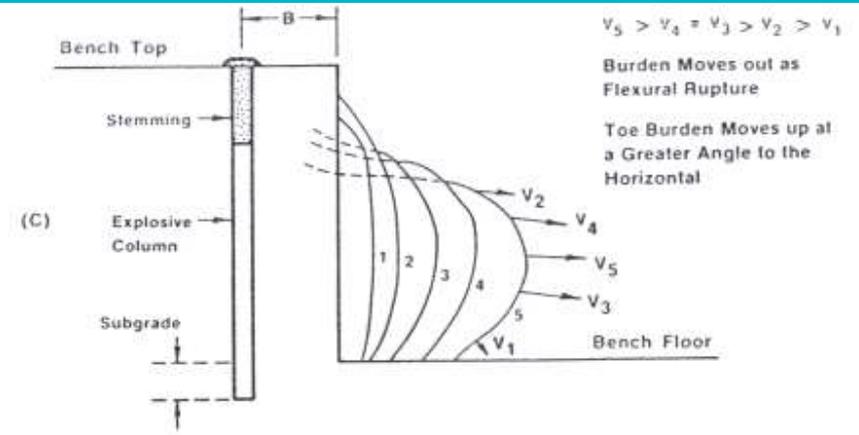
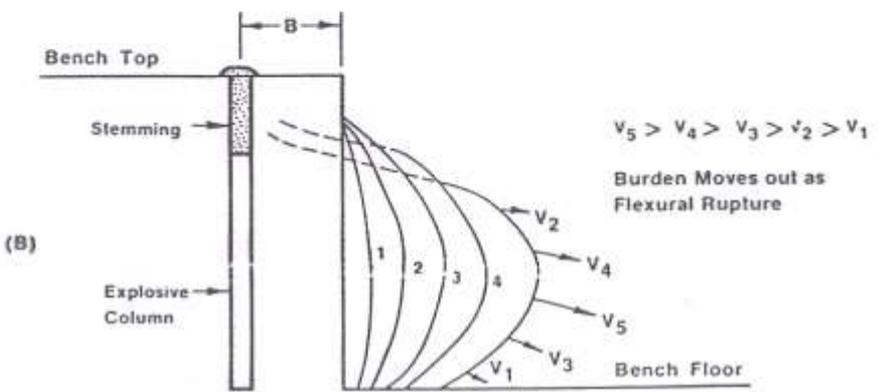
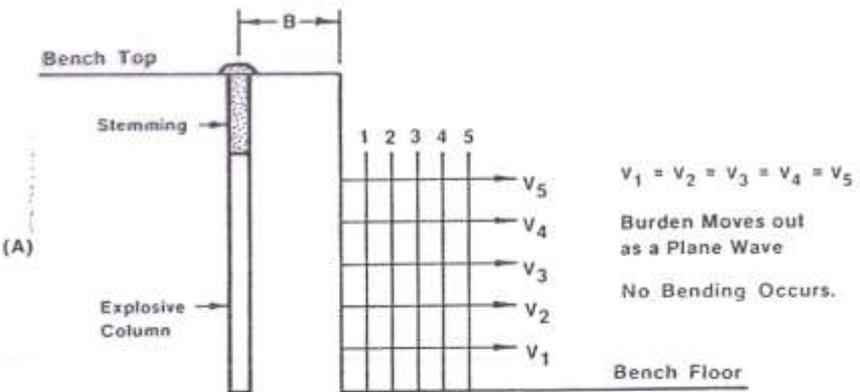
— slab of rock begins to detach from free face and moves forward

$t_7^*$  — other compressive stress pulses arrive at the newly formed face and repeats breaking process

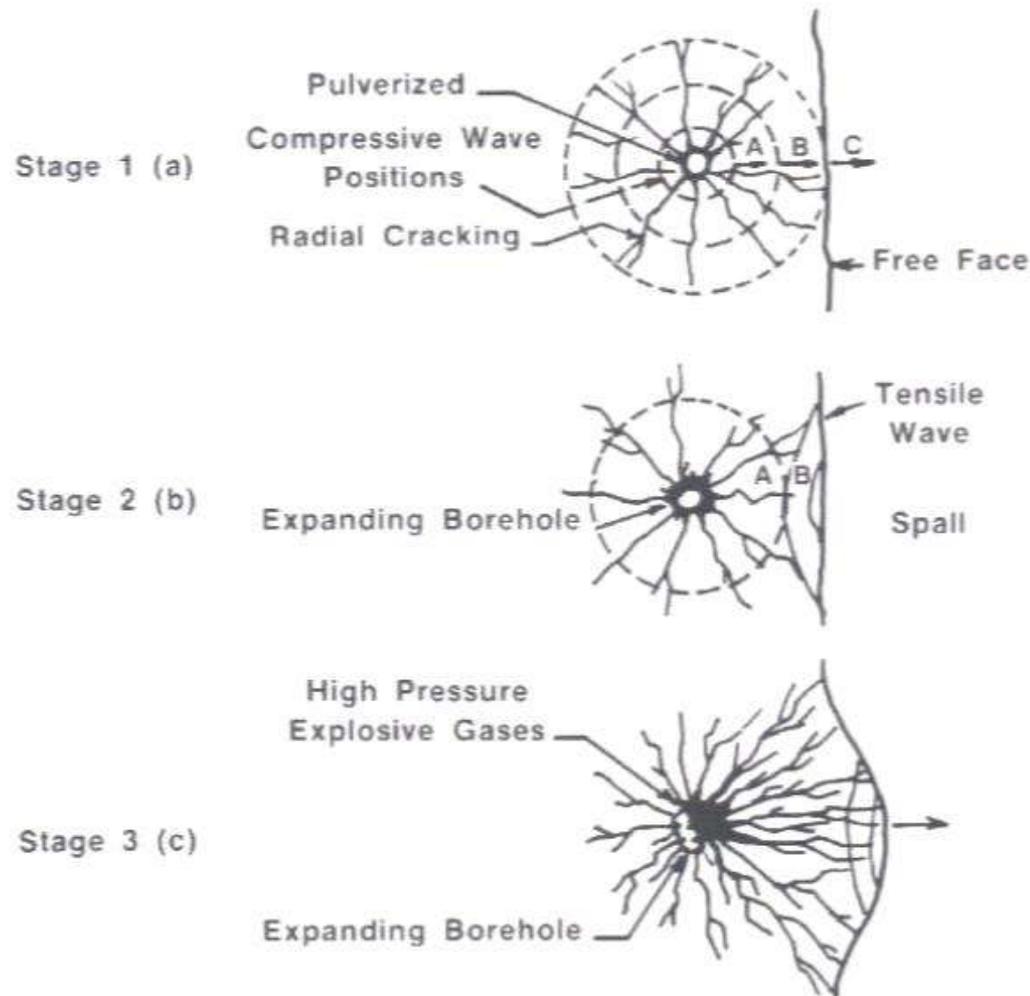
# Pression des gaz : énergie développée et fissuration



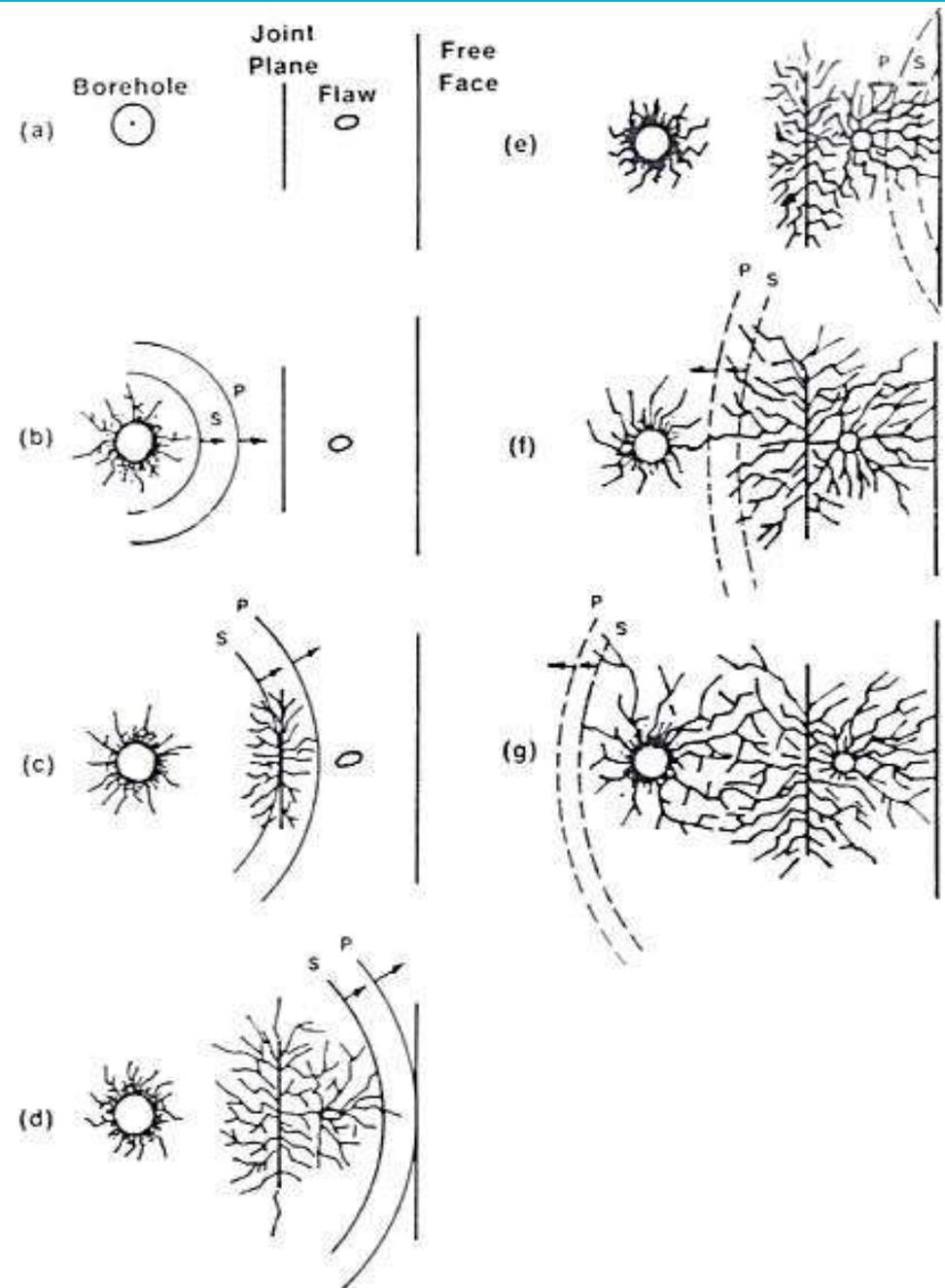
# Mouvement de la masse rocheuse



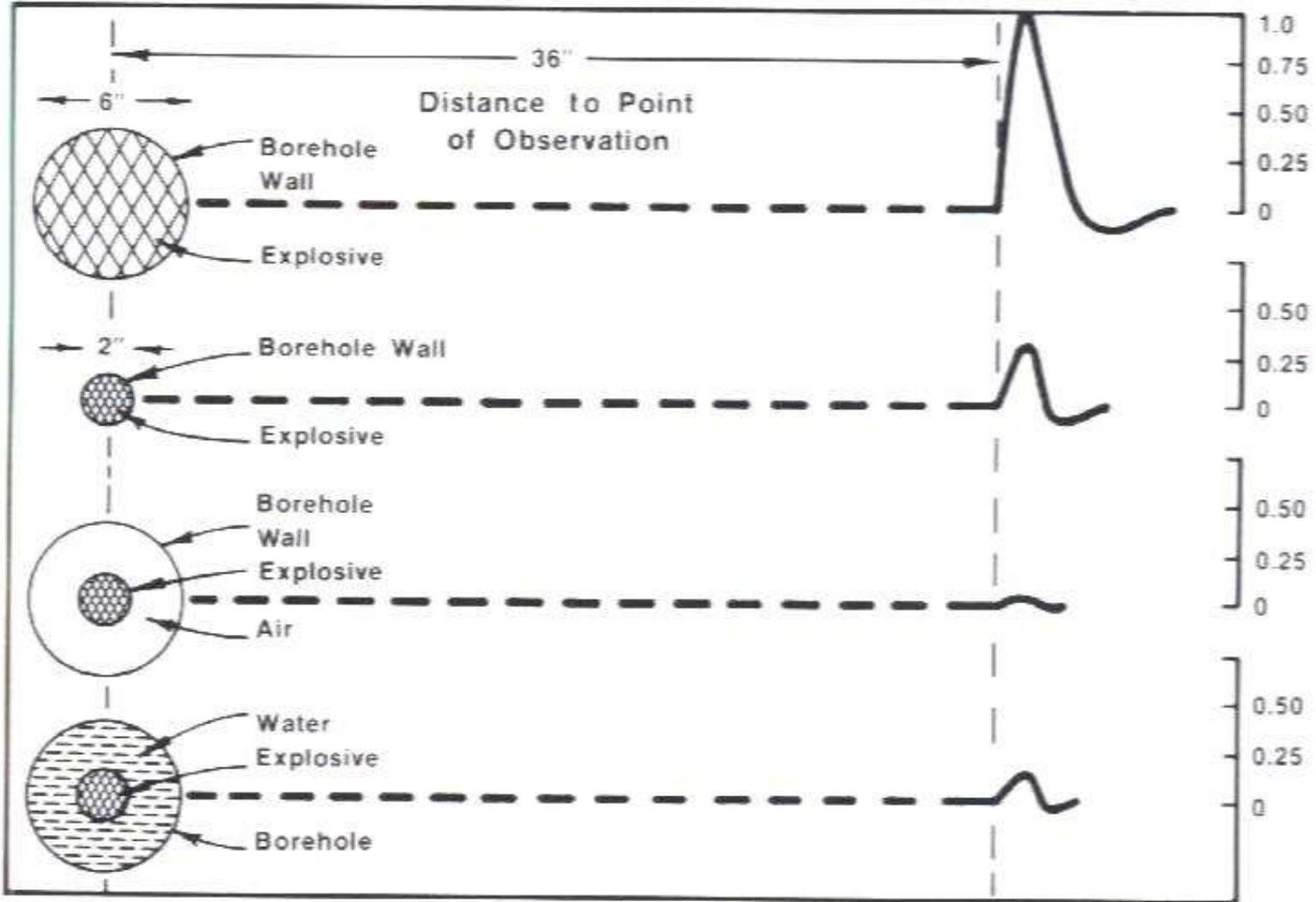
# Théorie combinée (onde de contrainte et expansion des gaz)



# Théorie du noyau



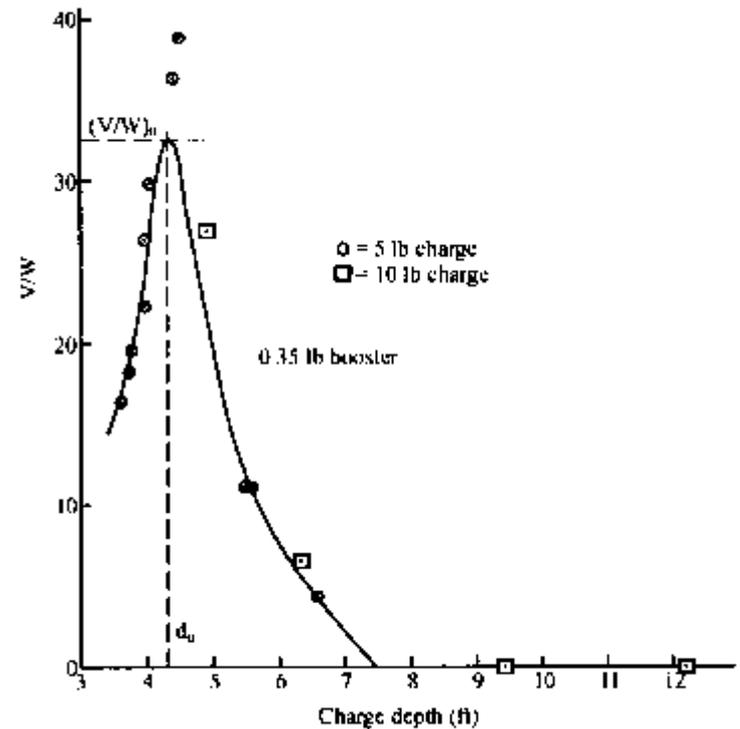
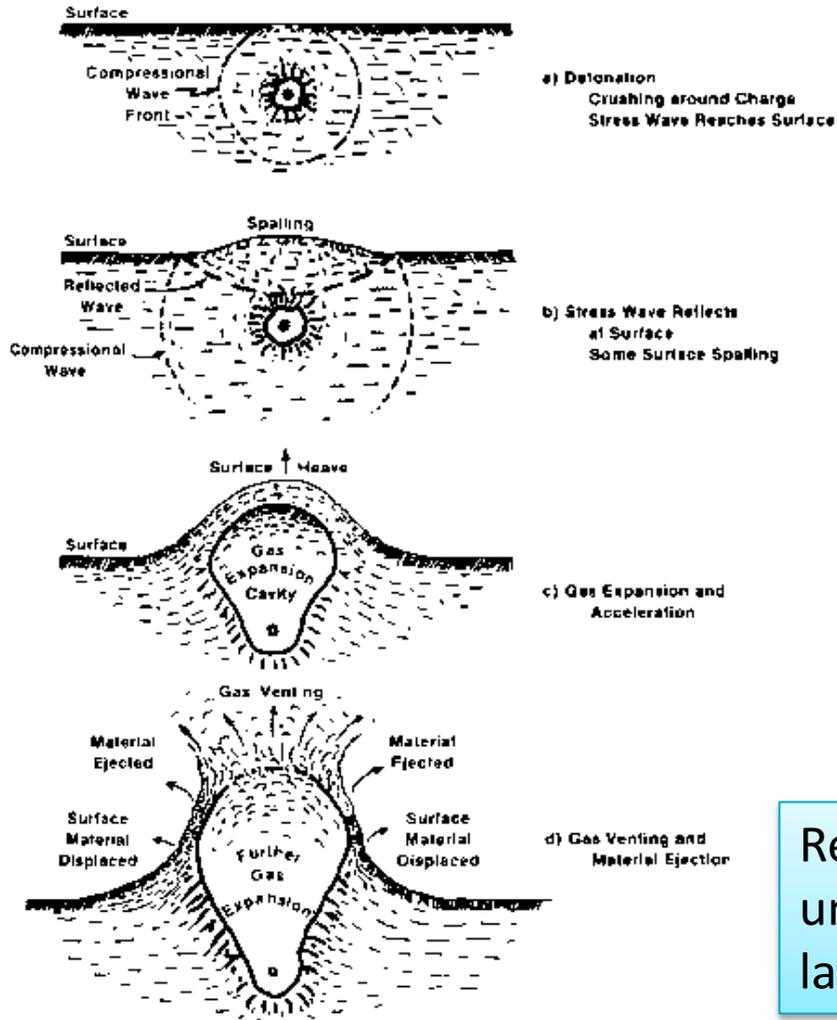
# Découplage



# Sur l'optimisation de la qualité des tirs, de la théorie à la pratique

- Introduction
- Connaissance du massif à abattre
- Effets de l'explosion sur le massif
- **Schéma de tir: estimation de la maille**
- Résultats en termes de fragmentation et forme du tas

# Estimation de la banquette: théorie du cratère



Recherche de l'optimum permettant d'obtenir un bon rapport entre le volume abattu (V) et la charge explosive (W)

# Règles du pouce

$$D = \frac{H}{10}$$

$D$ , diamètre du fourneau (pouces)

$H$ , hauteur du fourneau (pieds)

$$V = d$$

$V$ , volume du godet (m<sup>3</sup>)

$D$ , diamètre du trou (cm)

$$B = \frac{25 - 35D_e}{12}$$

$B$ , banquette (pieds)

$D_e$ , diamètre de la colonne d'explosifs (pouces)

$$s = 1 - 1,8B$$

$s$ , espacement (pieds)

$B$ , banquette (pieds)

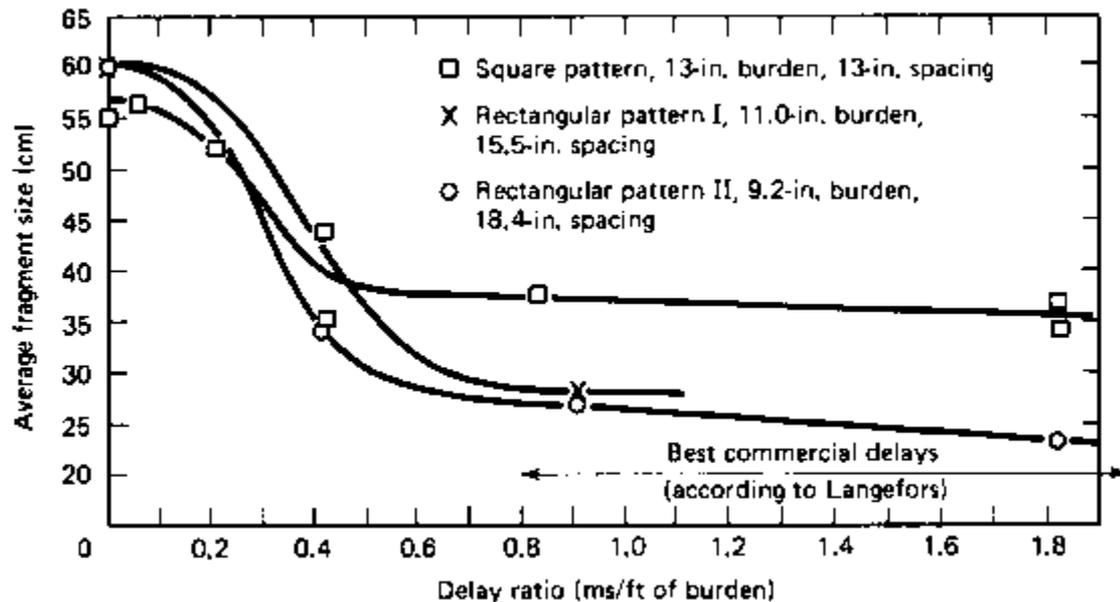
# Formule de Langefors

$$B_{max} = \frac{d}{33} \sqrt{\frac{p s}{\bar{c} f S/B}}$$

- $B_{max}$  maximum burden (m)
- $d$  diameter in the bottom of the blasthole (mm)
- $p$  packing degree (loading density) (kg/l)
- $s$  weight strength of the explosive
- $c$  rock constant (kg/m<sup>3</sup>)
- $\bar{c}$  =  $c + 0.05$  for  $B_{max}$  between 1.4 and 15m
- $f$  degree of fixation (1 for vertical holes; 0.95 for holes with inclination 3:1)
- $S/B$  ratio of spacing to burden

# Délai entre les trous d'une même rangée

Pour une fragmentation optimale à n'importe quelle densité de chargement, l'intervalle de temps entre les explosions des trous d'une même rangée doit être au moins de 3 ms par m de banquette (Bergman et al, 1974):



# Utilisation de la géométrie pour varier la maille

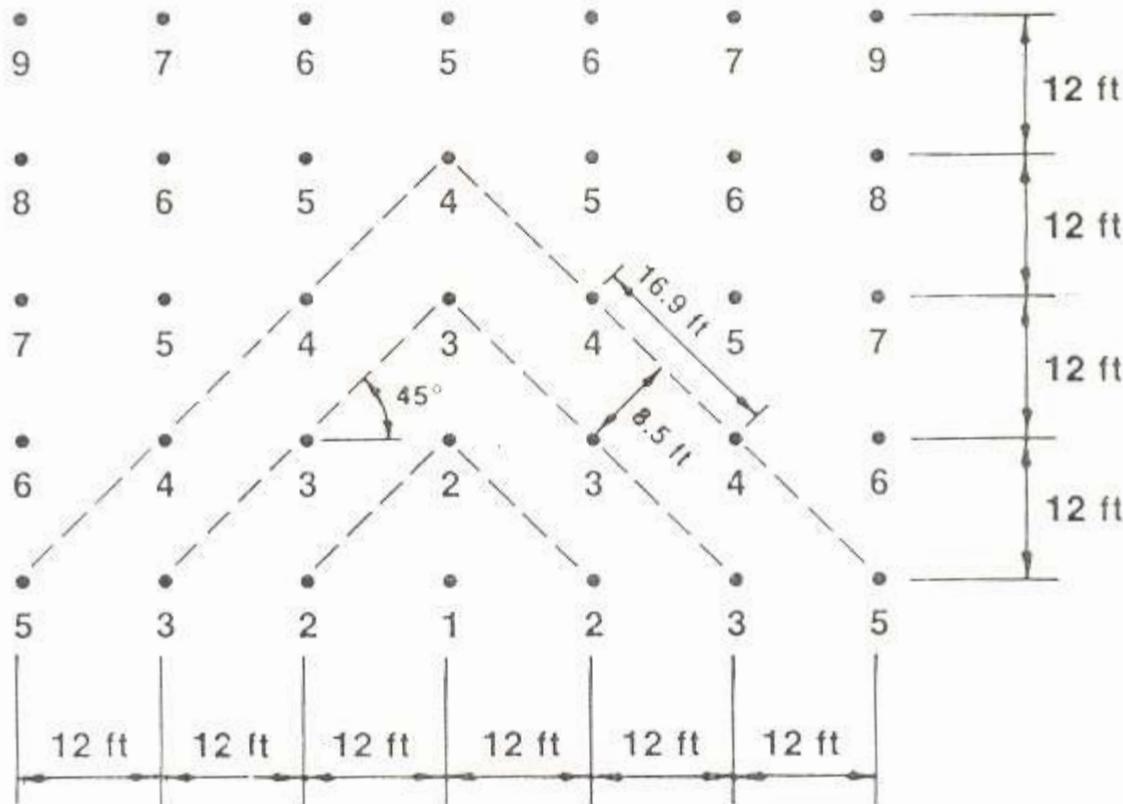
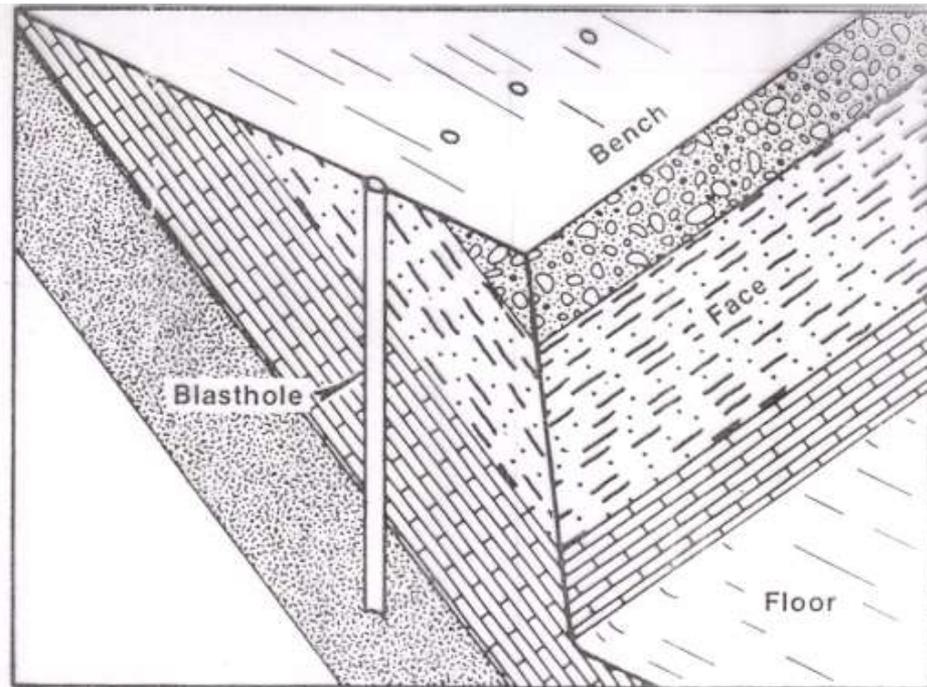


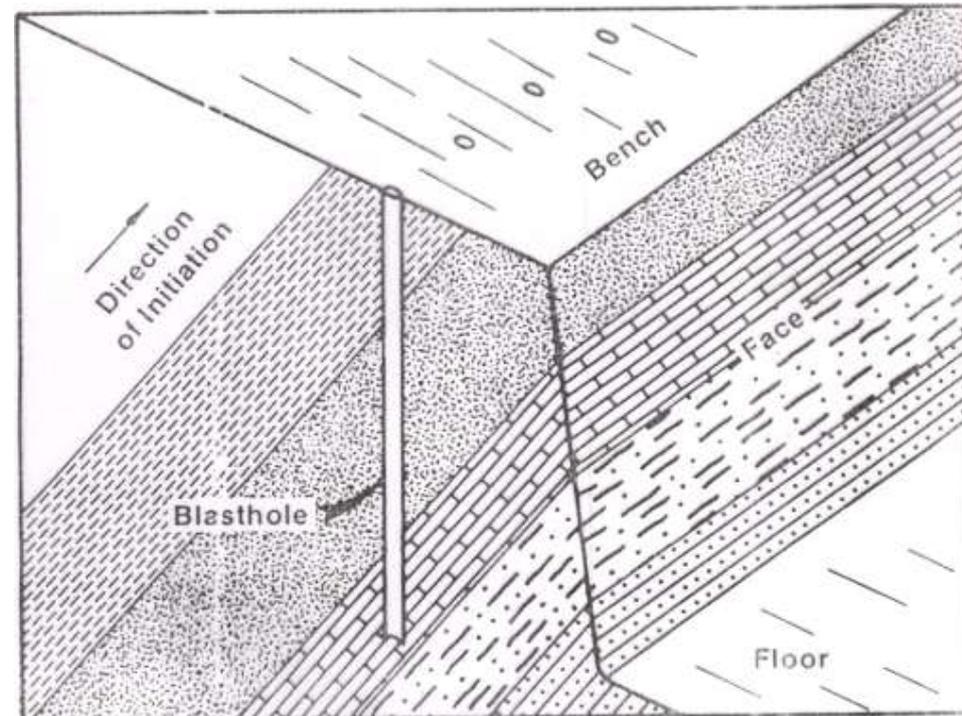
Illustration de l'introduction d'un délai de 5 ms sur la banquette et l'espacement. Passage d'un schéma carré 12 x 12 ft à un schéma rectangulaire de 8.5 x 16.9 ft

# Orientation des fronts

◀ Bonne sortie de pied mais effets arrières importants



Peu d'effet arrière  
mais mauvaise sortie du pied ▶



# Mesures sur le terrain

- Relevé de front : station totale
- Mesure de déviation : le "Boretrack"
- Mesure d'épaisseur de pieds : le "Diadème"

# Relevé de front : station totale



# Consommation spécifique d'explosifs

- Charge spécifique (ou facteur de poudre) = quantité d'explosif nécessaire pour fragmenter et déplacer la roche.
- Facteur d'énergie (EF) = Kilocalories (Q)/quantité de roche

Type de roche	Facteur de poudre (g/t)	Facteur d'énergie (kcal/t)
Granite	68-90	495-660
Roche trapéenne	68-158	495-1050
Calcaire	90-136	660-990
Calcaire fortement lité ou diaclasé	136-227	990-1650

# Sur l'optimisation de la qualité des tirs, de la théorie à la pratique

- Introduction
- Connaissance du massif à abattre
- Effets de l'explosion sur le massif
- Schéma de tir: estimation de la maille
- **Résultats en termes de fragmentation et forme du tas**

# Mesure de la blocométrie

Fragmentation : distribution granulométrique des tas abattus

► approximation par la **distribution dite de Rosin-Rammler** :

$$F(x) = 100 \left[ 1 - e^{-\left(\frac{x}{x_c}\right)^n} \right]$$

$F(x)$  pourcentage de blocs inférieurs à la taille  $x$

$x_c$  taille caractéristique de la courbe correspondant à  $F(x) = 63.3\%$

$n$  paramètre de forme de la courbe (augmente quand la distribution tend à être uniforme)

→ Permet de comparer différentes courbes à partir de 2 paramètres  $x_c$  et  $n$

→ Application de l'analyse d'images

# Mesure de la blocométrie

Equation de Kuznetsov (1973) :

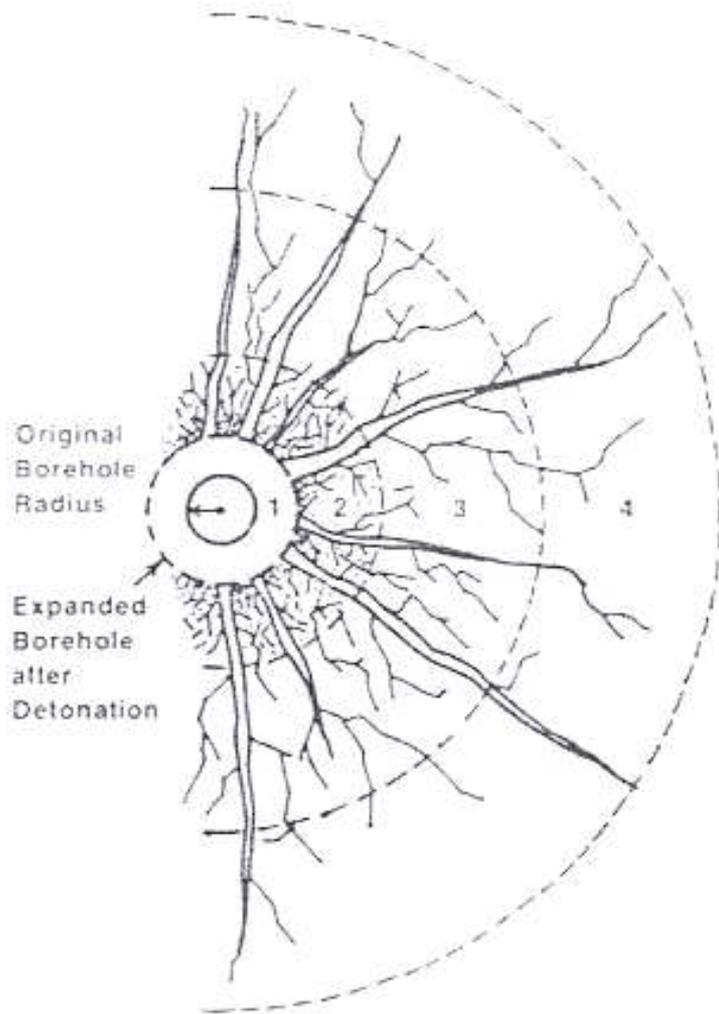
$$x_m = A \left( \frac{V_0}{Q} \right)^{0.8} Q^{0.17}$$

- $x_m$  dimension moyenne des fragments (cm)
- $A$  facteur lié à la roche (7 à 13)
- $V_0$  volume de roche abattue par fourneau (V x E x H; m<sup>3</sup>)
- $Q$  masse de TNT équivalente à la charge d'explosif dans chaque fourneau (kg; explosif dans la surprofondeur exclu)

# Modélisation géomécanique

- Fissuration par la pression des gaz
- Prédiction de la taille des blocs
- Mouvement de la masse rocheuse
- Simulation

# Fissuration par la pression des gaz



Nombre de fissures radiales :

$$n = 2\pi R \left( \frac{d \dot{\epsilon} c}{6 K_{Ic}} \right)^{2/3}$$

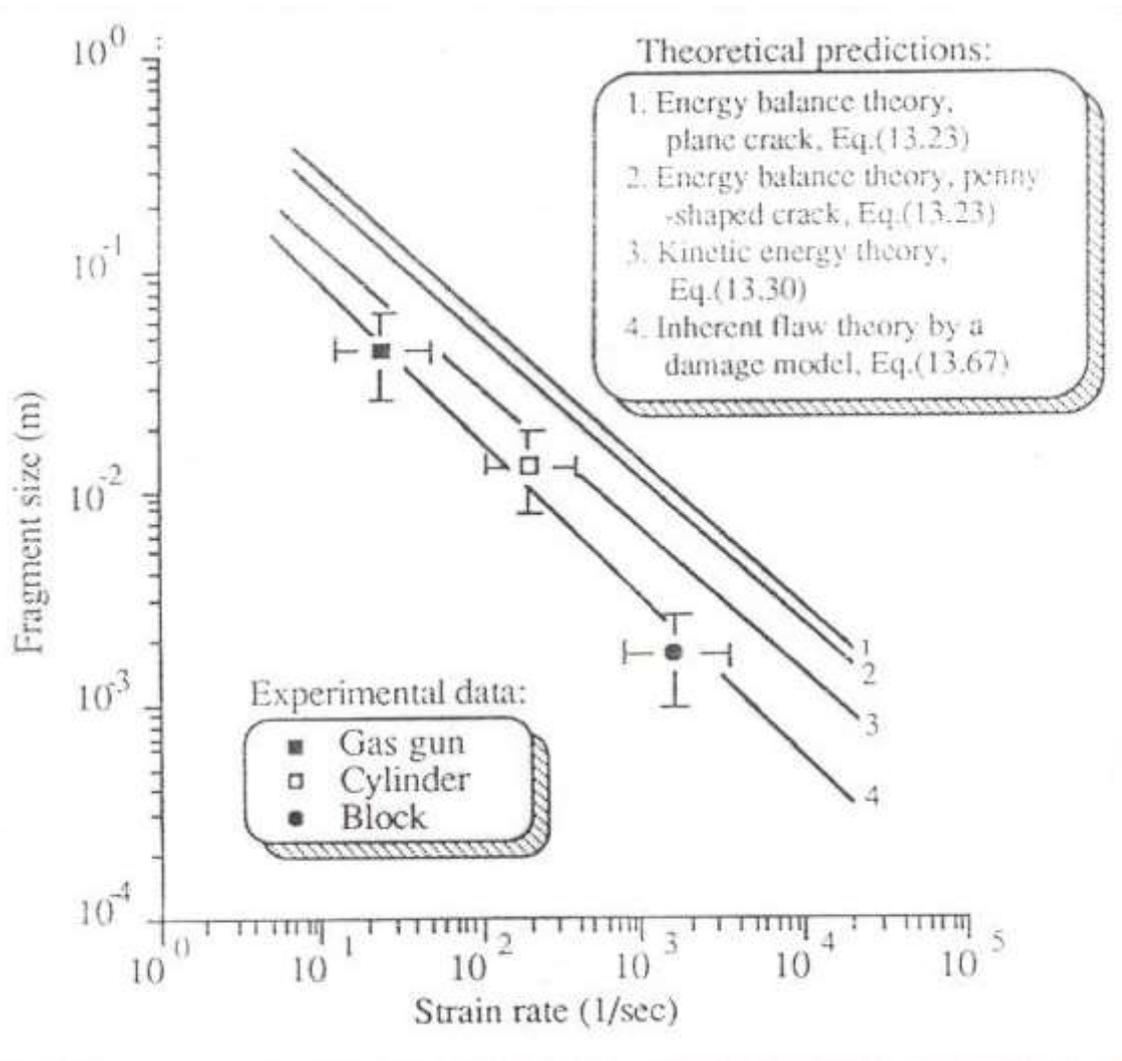
$R$  rayon du trou

$d$  densité de la roche

$c$  vitesse de l'onde de contrainte

$\dot{\epsilon}$  vitesse de déformation volumétrique à la rupture

# Prédiction de la taille des blocs



La taille des blocs est donnée par :

$$D = 6 \left( \frac{K_{Ic}}{\sigma_{cd}} \right)^2$$

avec la résistance dynamique

$$\sigma_{cd} = \sqrt[3]{\frac{9EK_{Ic}^2}{4\pi N^2 v_s}} \dot{\epsilon}^{1/3}$$

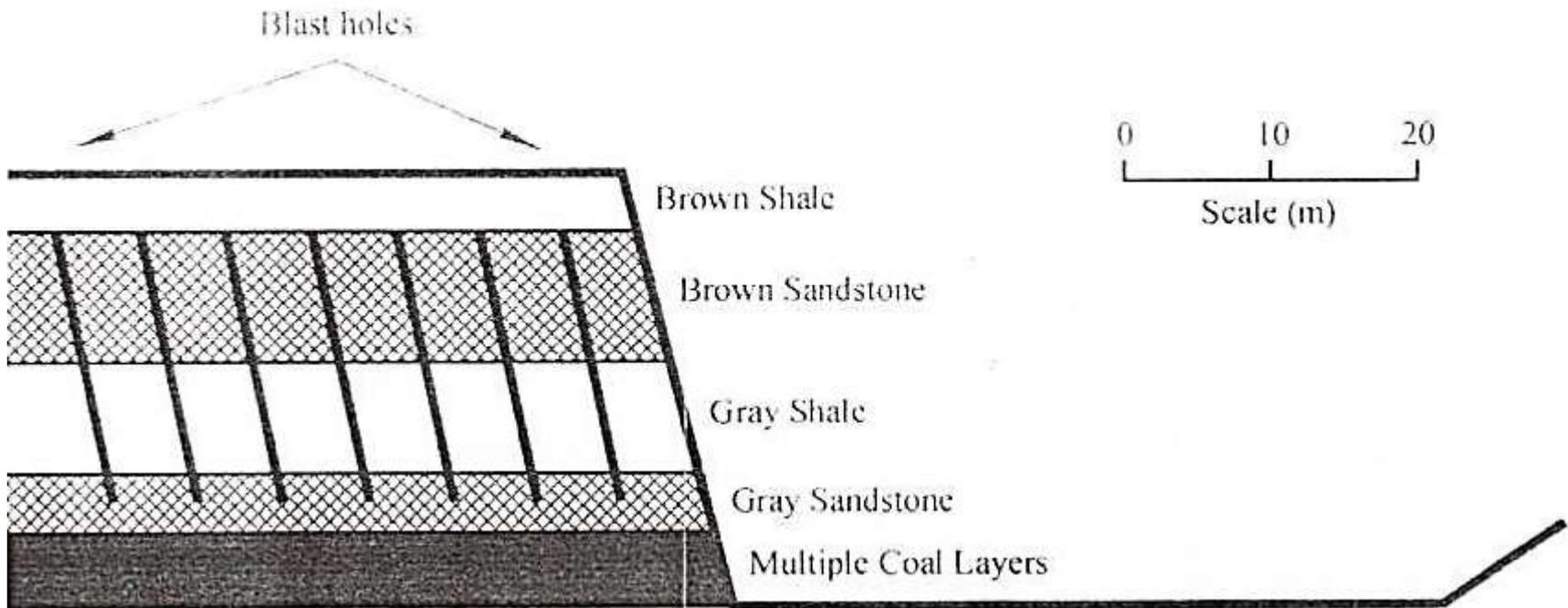
- $v_s$ , vitesse de l'onde de cisaillement
- $N$ , coefficient dépendant de la forme de la fissure

# Modélisation du mouvement de la masse rocheuse

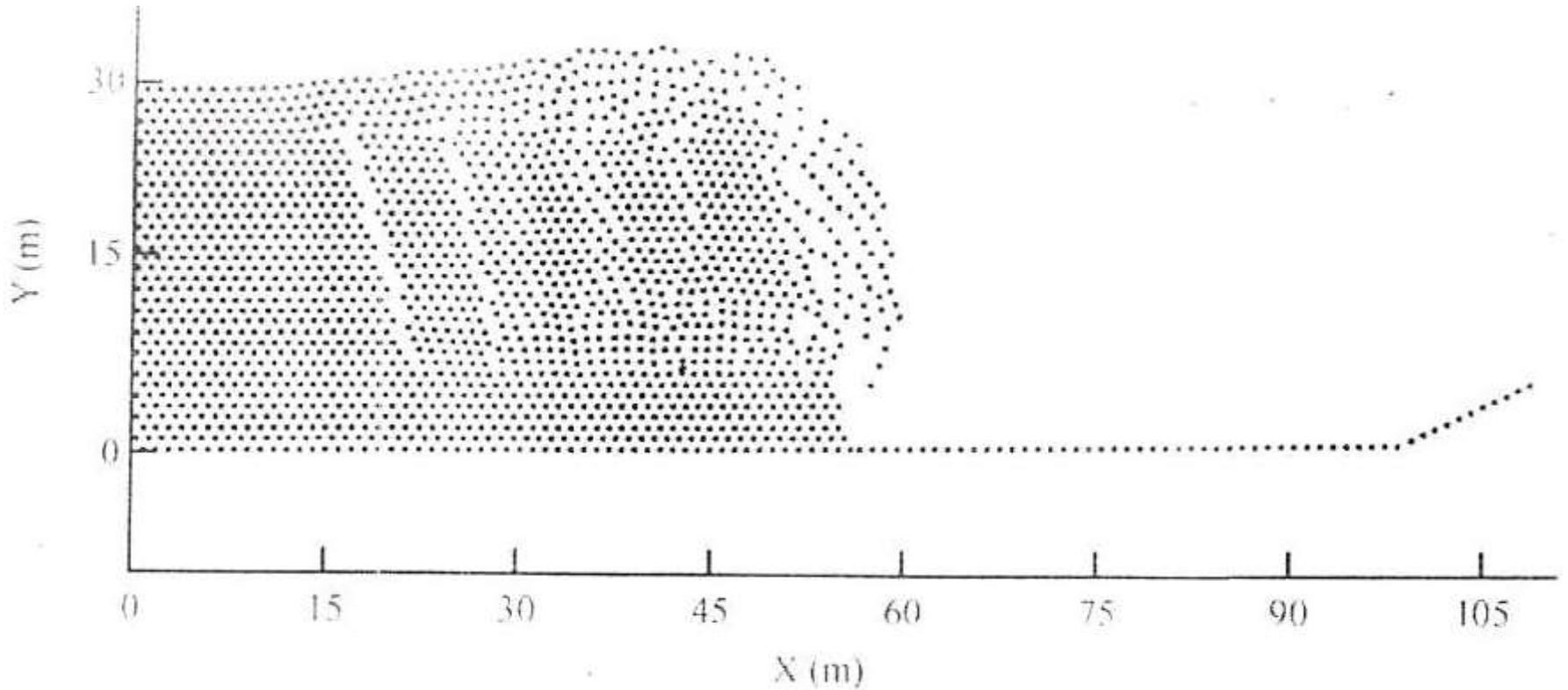
Utilisation d'un code de mouvement distinct :

- On considère que le matériau est déjà fragmenté
- Le talus est modélisé par un assemblage de sphères de taille constante
- Le modèle doit être calibré par rapport aux propriétés mécaniques ( $E$ ,  $\nu$ )
- On calcule la courbe pression-volume des gaz d'explosion
- On fait un calcul couplé du mouvement des sphères et de l'écoulement des gaz

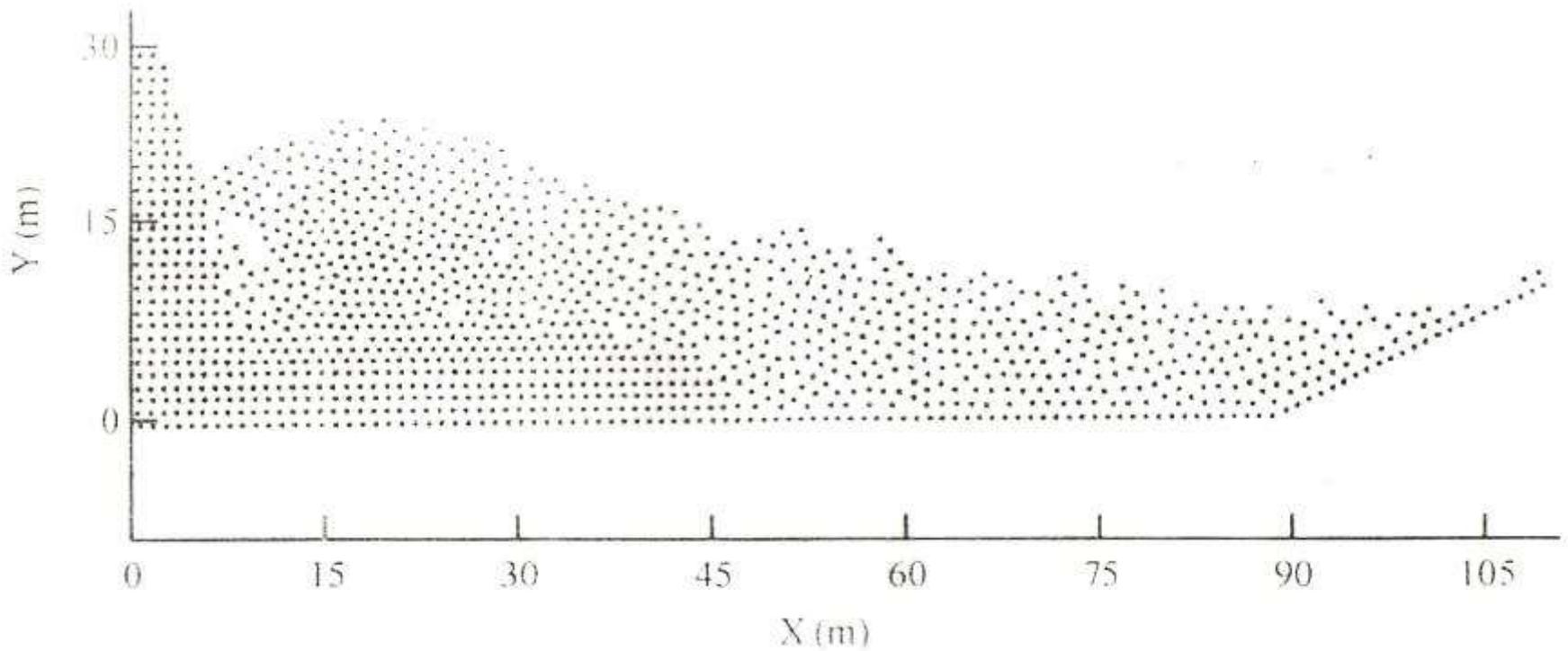
# Simulation numérique



**t = 300 ms**



**t = 7000 ms**



# Conclusions

L'optimisation des tirs des mines est un processus qui nécessite une bonne connaissance du massif à abattre, le choix des explosifs adaptés (brisance et poussée) ainsi que l'estimation de la maille pour rencontrer des exigences de granulométrie et forme du tas sans oublier les impacts sur l'environnement en termes de vibrations.

Des outils de calcul de plus en plus performants existent pour estimer les paramètres des tirs; mais ils doivent encore être confrontés à la réalité du terrain et un bon compromis doit être trouvé en termes de coûts.