

16e Session d'étude sur les techniques de sautage
Les 28 et 29 octobre 1993

*La physique et la mécanique des transferts d'énergie
lors de l'abattage des roches à l'explosif*

Wilfrid Comeau, Techniques Catnoo Enr.

**La PHYSIQUE et la MÉCANIQUE des TRANSFERTS d'ÉNERGIE
lors d'ABATTAGE des ROCHES à l'EXPLOSIF,**

RÉSUMÉ: Dans cette communication nous proposons de regarder les transferts d'énergie lors de l'abattage des roches à l'explosif sous trois aspects: 1. du développement des théories et de leur état actuel, 2. des observations de l'effet des tirs à l'explosif sur son environnement et 3. de la confrontation entre les théories et les observations pour en déterminer les contradictions, s'il y a lieu. De plus nous allons regarder, qualitativement d'abord ainsi que minutieusement et avec rigueur, la progression d'une explosion à l'intérieur d'un trou de mine dans le roc, en tenant compte des dernières connaissances de la mécanique des roches et de la conformité avec les observations.

ABSTRACT: In this paper we should like to look at energy transfers in rock blasting under three aspects: 1. the development of theories and their present state, 2. the observation of blasting effects on the environment and 3. the comparison of theories and observations in order to determine any contradictions. Furthermore, we shall conceptually visualise the progression of the blasting process in a blasthole in rock in the greatest detail, while rigorously respecting the latest known rock mechanics principles and the knowledge acquired from the observation of real blasts.

par: **WILFRID COMEAU**, ing., professeur adjoint, expert conseil,
Brossard, Québec, Canada.

1. INTRODUCTION: Dans cette introduction, nous allons fixer l'encadrement des connaissances théoriques sur la propagation des ondes, les propriétés et la fragmentation des matériaux fragiles dont nous avons besoin pour étudier les transferts d'énergie explosive. Cet encadrement déterminera les règles du jeu qu'il faudra suivre pour la fragmentation des roches à l'explosif. Pour qu'une théorie soit valable, il faut qu'elle respecte rigoureusement tous ces éléments et elle doit ainsi se conformer aux interprétations valables des observations recueillies des tirs.

1.1 - ONDES: La création et la transmission des **ondes de contraintes élastiques** créées autour d'un vide cylindrique de rayon ' a ', chargé instantanément par une pression fluide ' P_0 ', a fait l'objet d'études théoriques mathématiques et bien que les solutions soient complexes, nous pouvons en tirer les points essentiels. D'abord, théoriquement, seules les ondes de dilatation (compression-traction) sont créées.

La contrainte radiale, en compression, ' σ_r ' est évidemment ' P_0 ' à la paroi et décroît selon $-(a/r)^{1/2} \propto P_0$, ' r ' étant le rayon au point d'intérêt. Le front de cette onde est toujours en compression mais, à grande distance de la source, la queue de l'onde est en faible traction (environ 1/5 de la compression) de quatre à cinq rayons du front. La forme de cette onde quasi-monotonique (ou sa pseudo-fréquence) est fonction directe de la vitesse de propagation et fonction inverse du rayon du cylindre. Pour un trou de mine de 100mm, la pseudo-fréquence serait de l'ordre de 9000 à 15000 Hz. Le front de la contrainte tangentielle ' σ_θ ' de l'onde est aussi en compression, mais se transforme en forte traction (supérieure à la valeur au front en compression) à environ quatre rayons du front. Cette traction derrière le front diminue et devient faible à une grande distance de la source. La contrainte axiale (au cylindre) de l'onde est semblable à la contrainte tangentielle

mais le revirement se fait en traction faible, soit environ 1/5 de la valeur de la contrainte au front. Les décroissances des contraintes tangentielles et axiales, à partir de la source, suivent la même règle que la contrainte radiale. La Figure I. illustre ces quelques notions.

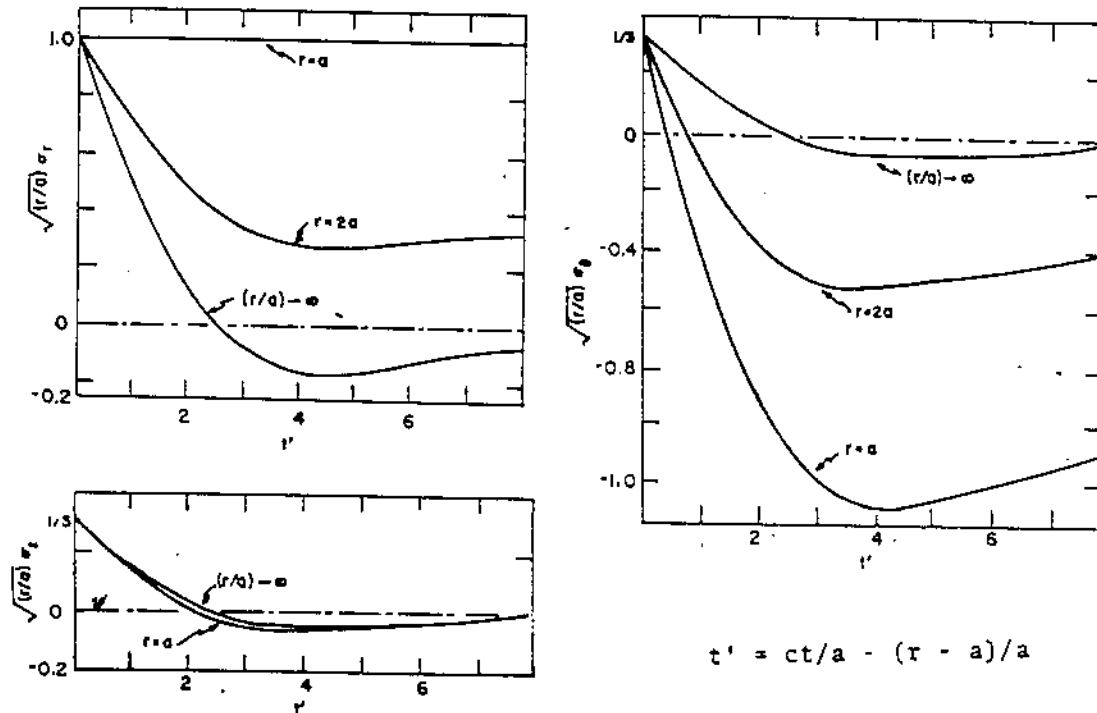


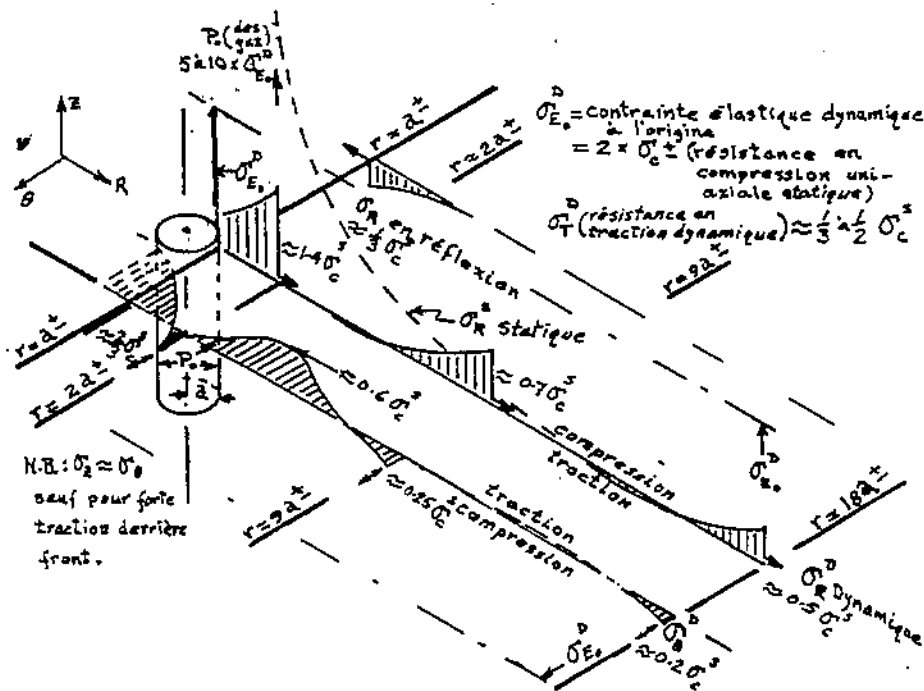
Figure I. Valeur relative des contraintes dans l'onde élastique (10).
(source Bibliographique indiquée par: ►(10))

Lorsque cette onde de dilatation se présente à une frontière, il se produit beaucoup de choses qui dépendent de la géométrie de la situation et des propriétés physiques de part et d'autre de la frontière. Dans le cas d'un tir à l'explosif en banquette, l'essentiel est que la contrainte radiale en compression, en incidence de 0° (perpendiculaire) à $40^\circ \pm$, soit réfléchi du front d'attaque en traction avec la même valeur absolue environ (à incidence 0°). A l'extérieur de ce secteur de 80° axé sur la normale au front d'attaque, le signe (traction (-) ou compression (+)) de la réflexion dépend du Rapport Poisson, que nous reverrons.

Également, la réflexion à plus grande incidence ($>40^\circ$) entraîne la génération d'ondes de distorsion (cisaillement). La réflexion de la contrainte tangentielle (et axiale) est compliquée par l'incidence déphasée de celle-ci (de 90°) et de même la génération d'ondes de distorsion en plus des ondes de dilatation. Toutefois, la réflexion de ces autres composantes de l'onde ainsi que la génération (par réflexion) des ondes de distorsion et de surface sont très complexes et leur importance pour la fragmentation des roches à l'explosif est le sujet de controverse. La Figure II. illustre le comportement des ondes élastiques.

Cette discussion, jusqu'à présent, porte sur des ondes élastiques. Leur vitesse de propagation et la contrainte maximale qui peut se propager dépendent des

La vitesse hydrodynamique n'est pas nécessairement plus rapide que la vitesse élastique mais, puisqu'elle croît avec la pression, elle peut dépasser cette dernière à très haute pression. Il est considéré que les ondes de choc ne se propagent pas très loin dans les roches. Entre les domaines élastique et hydrodynamique, il existe le domaine plastique où la vitesse de propagation est nettement inférieure à la vitesse élastique et dépend du rapport contrainte déformation (module) local. De toute façon, les ondes voyagent toujours à la vitesse maximale permise.



1.2 - **MÉCANIQUE** de la RUPTURE: L'analyse théorique de la mécanique de la rupture est un domaine d'étude récent (depuis environ 1960) qui s'est développé en fonction de la puissance de calcul des ordinateurs. Elle débute avec les travaux de A.A. Griffith publiés en 1921 et 1924. Celui-ci proposa que la rupture d'un solide prenne naissance aux pointes de petites faiblesses (fêlures, fissures ou fentes) microscopiques de forme ellipsoïde plate qu'il supposa exister dans tous les matériaux, i.e. **Fêlures Griffith**. Cette astuce a permis de concilier la résistance mesurée et la résistance théorique qui découle des forces atomiques.

Un traitement analytique est alors possible lorsqu'on superpose la contrainte moyenne sur des fêlures de forme géométrique simple. Cette théorie a été appliquée originellement au cas d'effort en traction, normal au grand axe de la fêlure elliptique. Il avait été démontré, par C.E. Inglis en 1913, que la concentration de contrainte à la paroi d'une ouverture dans une plaque en traction peut atteindre plusieurs fois la contrainte moyenne. Cette multiplication de la contrainte moyenne est fonction du rapport de la dimension de la fêlure avec le rayon de courbure à la pointe de l'ellipse. Quand l'ellipse est très plate, ce facteur ' F_c ' est égale à $2a/b$ où ' a ' et ' b ' sont les demi-axes de l'ellipse ($a \gg b$). La Figure III. illustre le concept des 'Fêlures Griffith'. Pour les roches, ce concept a beaucoup de sens car les fêlures se trouvent naturellement aux frontières entre les grains et cristaux et comme microfissures des roches silicieuses.

Trois modes de rupture à l'intérieur d'une masse sont étudiés dans cette théorie.

- Mode 1., traction normale au grand axe,
- Mode 2., cisaillement parallèle au grand axe, et
- Mode 3., une combinaison de Mode 1 et Mode 2.

L'application de cette théorie aux roches soumises aux efforts en compression a nécessité une modification de la '**Théorie des Fêlures de Griffith**'. En compression, les parois des ellipsoïdes plates se touchent et une résistance en frottement entre les parois se développe, augmentant la résistance à la rupture. Cette modification par McIntock et Walsh, présentée en 1962, a permis d'appliquer cette théorie aux roches. Cette théorie ne donne pas un critère de rupture mais permet d'établir, moyennant une connaissance de l'énergie spécifique de surface (γ_s) et la contrainte locale, la situation qui permet à une rupture de s'amorcer.

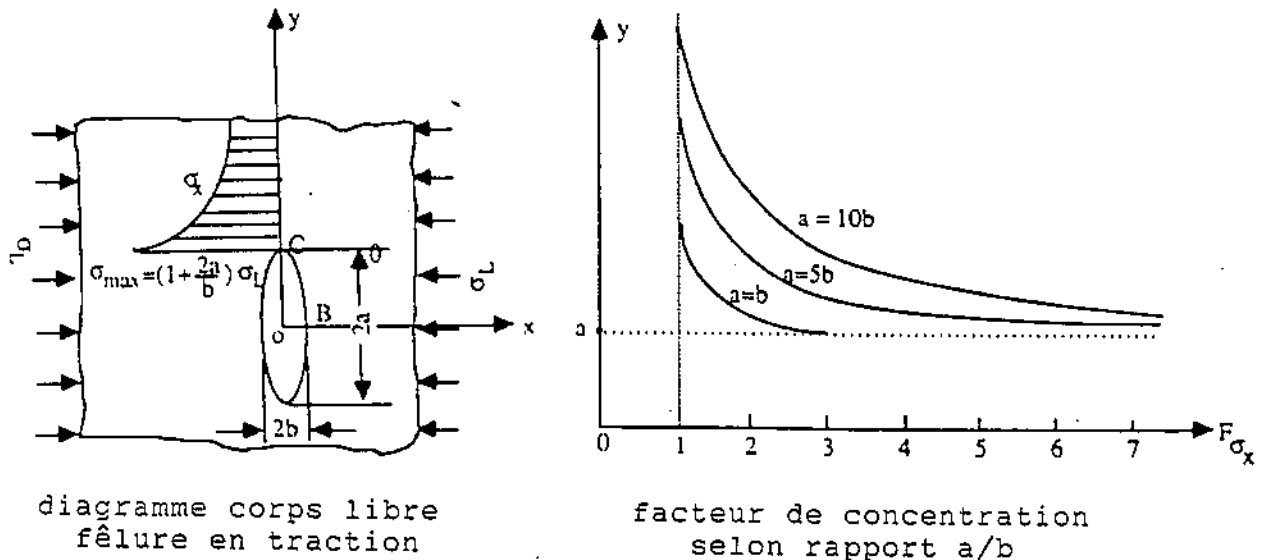
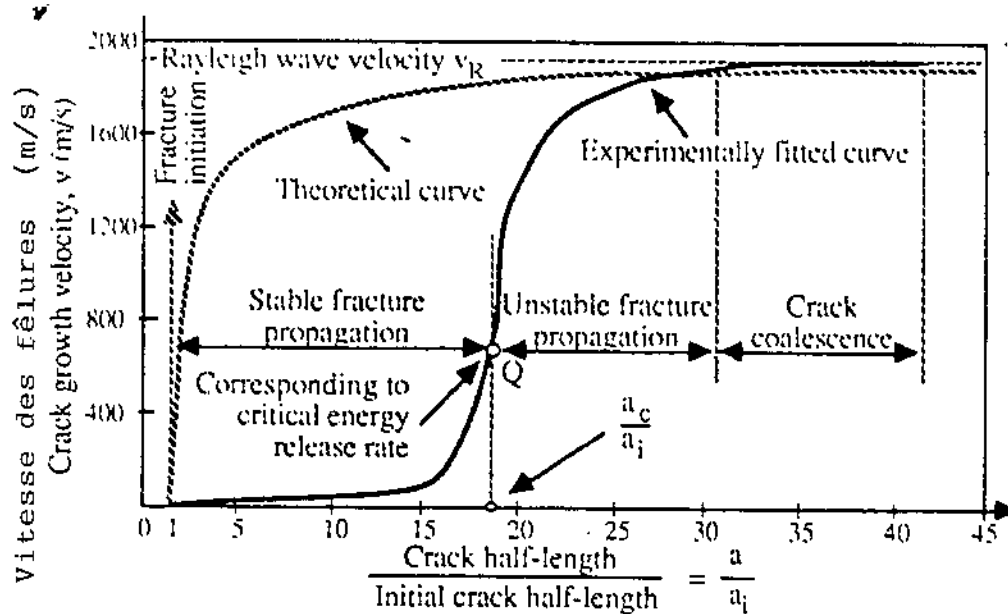


Figure III. Concept des fêlures de Griffith (11).

La rupture à la pointe de la fêlure peut se propager soit d'une façon stable (c'est-à-dire que la rupture avance proportionnellement au chargement) ou instable (c'est-à-dire que la rupture devance l'application du chargement). Dans le premier cas, l'énergie récupérée lors de la propagation de la fêlure compense exactement l'énergie nécessaire à la propagation et dans le deuxième cas l'énergie récupérée lors de la propagation de la fêlure est plus grande que celle nécessaire à la propagation. Puisque la concentration de contrainte à la pointe de la fêlure augmente en fonction de son rapport longueur/épaisseur, l'énergie emmagasinée élastiquement augmente. Par conséquent, celle récupérée lors de la propagation augmente également. Au début, la vitesse de propagation est lente mais elle accélère et peut atteindre la limite théorique qui est la vitesse Raleigh. Ce sont les propriétés élastiques à la pointe de la fêlure qui conditionnent sa propagation. La Figure IV. illustre ce concept de vitesse de propagation de la pointe des fêlures.

Afin d'appliquer cette approche aux cas plus pratiques, i.e. où le rayon de courbure à la pointe de la fêlure tend vers zéro, on a développé l'approche théorique du facteur d'intensité de la contrainte ($'K_{\sigma}' = \sigma \sqrt{\pi a}$ où σ est le mode de rupture), qui est plus ou moins une constante pour un matériau, pour un mode de chargement donné. Ce facteur est équivalent au facteur de récupération énergétique 'G' qui est égal à $'2\gamma.'$ développé dans l'approche classique 'Griffith'. La détermination du facteur d'intensité se fait par calcul théorique (suivant diverses méthodes selon le cas) en déterminant la contrainte à la pointe de la fêlure (avec rayon de courbure zéro) par rapport à la contrainte moyenne. Dynamiquement, ce facteur d'intensité peut être augmenté d'environ 25%.



Rapport: fêlure allongée / fêlure originale

Crack growth velocity related to crack length ratio, theoretically according to equation (3.45) and experimentally for norite rock (after Bieniawski, 1966b, 1967a)

Figure IV. Vitesse de propagation des pointes des fêlures (11).

1.3 - PROPRIÉTÉS ÉLASTIQUES: Il est connu que les contraintes et les déformations dans un solide sont entretenues par les propriétés élastiques du milieu, i.e. $\sigma = E \epsilon$ ou σ = la contrainte, ϵ = déformation unitaire ($\Delta l/L$) et E le module de

déformation (**module de Young**). La Figure V. illustre les diverses formes des courbes contrainte-rapport de déformation pour les roches. Au plus simple, pour définir l'état de contrainte dans un solide, il faut faire intervenir le **Rapport Poisson** qui est le rapport de: la déformation unitaire transversale et la déformation unitaire axiale, i.e. $\nu = \epsilon_t/\epsilon_1$ ou ν = le Rapport Poisson. Sa valeur maximale théorique est de 0.5 . La connaissance des contraintes ou des rapports de déformations et du Module de Young et du Rapport Poisson est suffisante pour définir l'état de contrainte dans un solide. Les autres 'constantes' élastiques, constante de Lamé (λ), module de rigidité (cisaillement, i.e. μ) sont définies par le module de Young et le rapport Poisson; i.e. $\lambda = \nu E/(1+\nu)(1-2\nu)$ et $\mu = E/2(1+\nu)$ (ou $\mu = \tau/\gamma$, où τ est la contrainte de cisaillement et γ la déformation unitaire en cisaillement). Est également important, pour ce qui se passe au voisinage du trou de mine, le module de compressibilité -K-, i.e. $K = E/(3(1-2\nu))$. Il est notable que ce module croît avec la croissance du rapport Poisson, ayant comme minimum $E/3$.

Ces propriétés sont supposées être des constantes élastiques et pour beaucoup de matériaux elles le sont à un approximation adéquate. Toutefois, pour les roches, ces propriétés sont loin d'être constantes et varient énormément surtout dans l'état près de la rupture. Pour compliquer d'avantage la situation, les roches ne sont pas en général homogènes, uniformes et isotropes. Donc, il faudrait définir 21 de ces 'constantes' élastiques (qui ne sont pas constantes) pour complètement définir l'état de contrainte et de déformation dans un massif rocheux. Dans la Figure V. on voit que le module de Young tangent peut passer assez graduellement d'une valeur positive à près de zéro dans la région de la rupture.

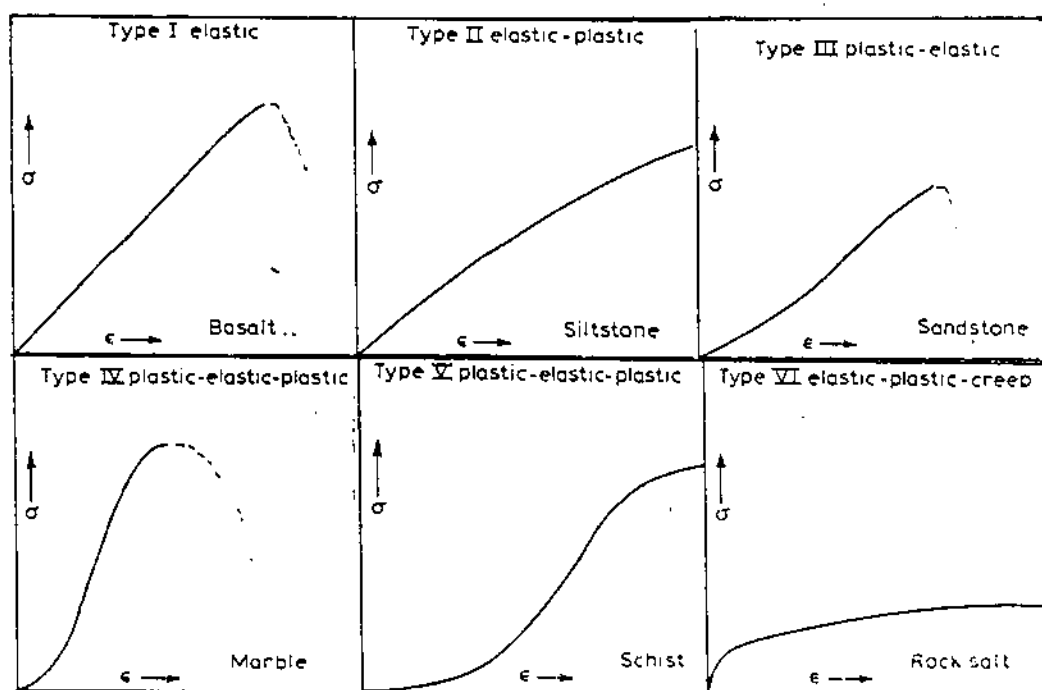


Figure V. Courbes types, contrainte -vs- déformation unitaire (1).

Le **rapport Poisson** est également une variable qui, à faible contrainte, peut être faible (disons 0.1) et, à la rupture, il peut être voisin (voir même dépasser ?) le maximum de 0.5 . La valeur du rapport Poisson supposée dans la majorité des

calculs géotechniques (0.25 à 0.35) est la valeur moyenne (sécante à la courbe $\epsilon_t - v_s - \epsilon_1$) à la rupture. Tel que mentionné par F.G. Bell dans 'Fundamentals of Engineering Géology' (1.) le rapport Poisson ponctuel (tangent), i.e. $\Delta\epsilon_t/\Delta\epsilon_1$ croît jusqu'à la rupture. Au 7ième Congress International de Mécanique des Roches, tenu à Aix-la-Chapelle en 1991, des chercheurs allemands (Mutschler et Natau) qui effectuaient des essais uniaxiaux à grande échelle (carotte de l'ordre du demi-mètre) ont rapporté avoir mesuré un rapport Poisson de zéro à la rupture. Étant donné ces constatations, il faut poser la question de la sensibilité des calculs théoriques aux valeurs réelles des 'constantes' élastiques, et la pertinence d'utiliser des valeurs moyennes, surtout dans le domaine de la fragmentation explosive des roches. Nous pourrions constater quelques-unes de ces sensibilités aux 'constantes' élastiques dans le prochain chapitre.

1.4 - PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES: Les propriétés mécaniques pertinentes pour la fragmentation explosive des roches sont:

- la vitesse de propagation des ondes élastiques,
- la vitesse de propagation des ondes de choc,
- la vitesse de propagation des fissures,
- la résistance mécanique statique et
- la résistance mécanique dynamique.

Les vitesses de propagation des ondes élastiques dans les solides sont en fonction des propriétés élastiques et de la densité du solide - ρ -. La plus rapide des ondes élastiques est l'onde de dilatation (compression-traction) - c_1 - où le sens de la déformation et la direction de propagation sont les mêmes et où il y a changement de volume. La moins rapide est l'onde de cisaillement - c_2 - où la déformation (distorsion) se fait perpendiculaire à la direction de propagation et où il n'y a pas de changement de volume.

$$c_1 = [(\lambda + 2\mu)/\rho]^{1/2}$$

$$c_2 = [\mu/\rho]^{1/2}$$

Les ondes qui voyagent en surface des solides - c_s -, les ondes Rayleigh principalement, sont encore un peu plus lentes, i.e. $c_s = 88\%$ à 96% de c_2 pour v d'environ 0.0 à 0.5,. Il est à noter que l'onde de dilatation est sensible à la valeur du module de Young et sa vitesse de propagation devient nulle quand le module est nul, i.e. à la rupture. Il paraît donc que la contrainte maximale des ondes élastiques serait limitée par la résistance mécanique. Ceci a été confirmé par les études de Hakalehto avec une barre Hopkinson divisée (K.O. Hakalehto, thèse de maîtrise, Université de Minnesota, 1967) et des carottes de roc où il a démontré qu'en essayant d'augmenter la contrainte, il n'a réussi qu'à augmenter la zone endommagée au bout de l'impact (condition analogue à celle à la paroi d'un trou de mine ?).

La vitesse de propagation de l'onde de choc-véritable dans un fluide - c_3 - est fonction de la pression hydrostatique dynamique et de la densité du fluid, i.e. $c_3 = (\Delta P/\Delta\rho)^{1/2}$ où P est la pression hydrostatique. Par analogie, la vitesse d'un front plastique ou quasi-plastique sera fonction du module de compressibilité de la matière au-delà de la rupture et pourra dépasser la vitesse maximale élastique quand $(\Delta P/\Delta\rho)^{1/2} > [(\lambda + 2\mu)/\rho]^{1/2}$. C'est ce phénomène qui se produit lors de la détonation d'un explosif.

La vitesse de propagation des fissures dans un milieu solide pur est limitée théoriquement par la vitesse Raleigh. Cette vitesse dépend des conditions à la pointe de la fissure et peut s'atténuer, rester stable ou s'accélérer selon que l'énergie récupérée par la propagation de la fissure est insuffisante, suffisante ou plus que suffisante pour entretenir la propagation. Dans les roches, la variabilité des propriétés élastiques (et plastiques) gouvernantes, de grain à grain, n'encourage pas une vitesse stable. Les vitesses mesurées et qui paraissent dans la littérature technique semblent supporter cette hypothèse de grande variabilité, allant de quelques dizaines de mètres par seconde à la limite théorique (et selon certaines observations même supérieure à la limite théorique).

Les essais de résistance mécanique, en compression, en cisaillement et en traction, effectués selon les protocoles acceptés servent à déterminer les contraintes nécessaires à leur rupture. Au point de vue statique, la résistance en compression des roches est la plus grande résistance, suivie de la résistance en cisaillement de l'ordre de la moitié de la résistance en compression et enfin de la résistance en traction, de un huitième à unquinzième de la résistance en compression pour les roches nécessitant l'explosif pour les fragmenter.

La résistance mécanique des roches est fortement conditionnée par le confinement et la vitesse d'application du chargement. Dans le domaine des tirs du roc à l'explosif la vitesse du chargement est de l'ordre de 10^0 à 10^4 (voir Figure VI.). Le confinement implique la contrainte transversale à la contrainte majeure et la vitesse d'application du chargement implique la vitesse de propagation des fissures. Évidemment, le confinement est fonction du rapport Poisson, étant nul si le rapport Poisson est nul. Enfin, le rapport Poisson a une influence de significative à majeure pour les propriétés mécaniques suivantes:

- vitesses des ondes (significative),
- réflexion des ondes de dilation (majeure voir Figure VII.),
- contraintes de confinement (majeure) et
- résistance mécanique (majeure).

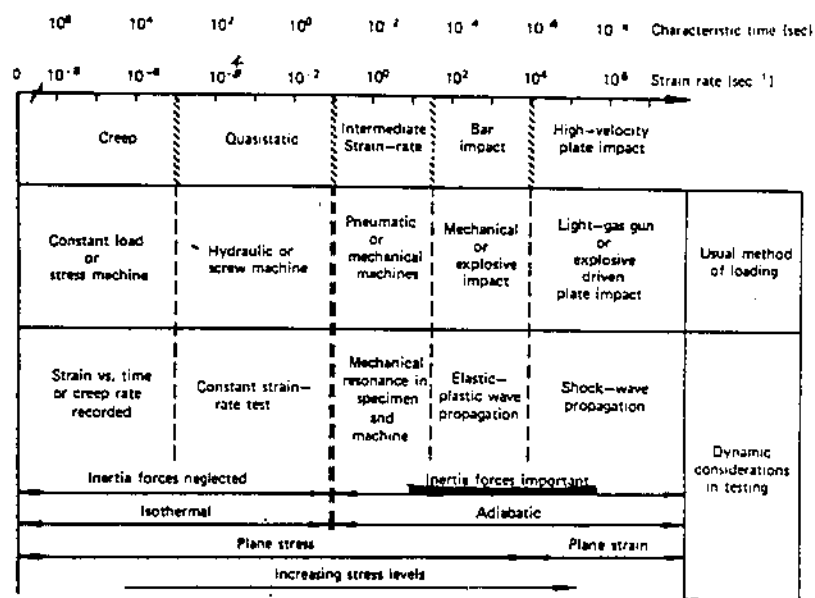
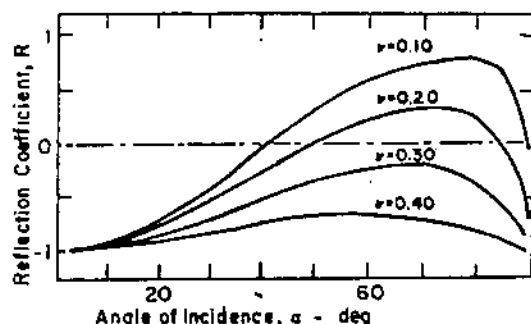
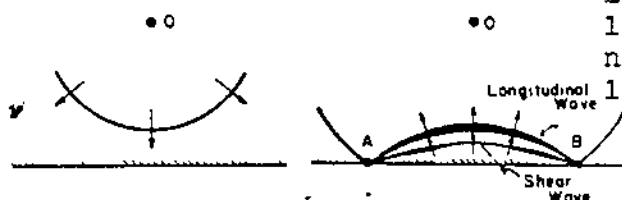


Figure VI. Tableau des vitesses de chargement selon le type de chargement (12).

En général, plus on applique le chargement rapidement, plus le matériau apparaît résistant. Ceci se comprend quand on reconnaît que la rupture se développe selon la vitesse de propagation des fissures qui est limitée. La Figure VIII. illustre l'effet de la vitesse d'application du chargement. Bien que la résistance dynamique en traction des roches est de cinq à dix fois celle de la résistance statique, la résistance dynamique en compression est de l'ordre du double de la résistance statique dans l'état qui règne lors d'un tir.

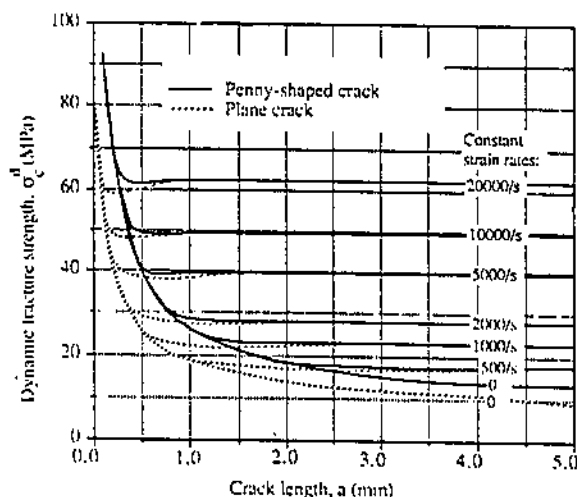


Le rapport Poisson a une grande influence sur le signe de la réflexion (traction ou compression) et la valeur de la contrainte par rapport à la contrainte incidente.

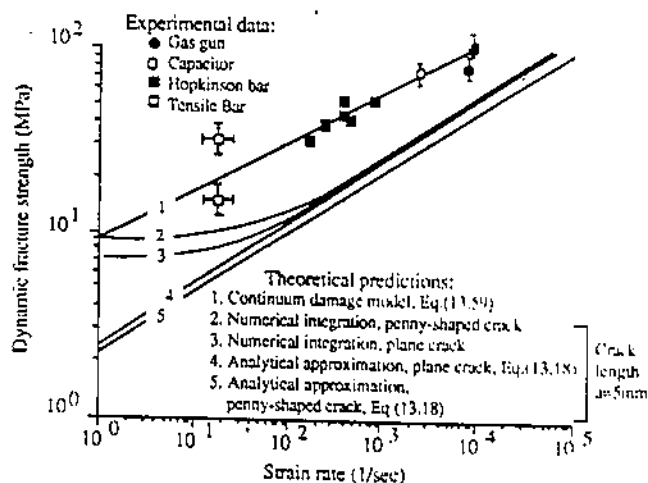


L'épaisseur de la ligne est proportionnelle à la valeur de la contrainte réfléchie.

Figure VII. Effet du rapport Poisson sur la réflexion des ondes (10).



Résistance en traction dynamique par rapport à la longueur de la fêlure et la vitesse de chargement.



Résistance dynamique par rapport à la vitesse de chargement, données expérimentales -vs- diverses théories.

Figure VIII. Effet de la vitesse d'application du chargement (11).

2. THÉORIES: Les théories expliquant la fragmentation des roches à l'explosif peuvent être regroupées en cinq catégories principales:

1. Théories de pénétration des gaz: quasi-statique.
2. Théories de réflexion de l'onde de dilatation: dynamique.
3. Théories d'interaction des ondes primaires et réfléchies avec les fêlures: dynamique.
4. Théories regroupant des éléments des autres théories: dynamique - quasi-statique.
5. Théories empiriques: mécanistes.

Dans les quatre premières catégories, on utilise la mathématique théorique et rigoureuse de la physique des matériaux et les équations constitutives des roches afin de décrire le phénomène. Les modèles mathématiques peuvent utiliser soit les équations à solution analytique ou solution numérique, selon la complexité et l'approche préférée (micro ou macro mécanique). La cinquième catégorie se base sur des relations mathématiques plus simples et des paramètres 'ajustés' selon les résultats des tirs prototypes dans le rocher en question.

2.1 PÉNÉTRATION des GAZ: Ces théories proposent essentiellement que lorsque la fissuration radiale est amorcée par la contrainte tangentielle en traction, d'abord dynamique et par la suite quasi-statique, la pression des gaz de l'explosion (quasi-statique) se fait sentir à l'intérieure de cette fissuration et complète la fragmentation ou la pression des gaz provoque une flexion de la masse qui réussit la fragmentation. L'énergie résiduelle a enfin la tâche de déplacer la masse fragmentée. Les analyses théoriques indiquent qu'il est important, pour la fragmentation, que les gaz pénètrent effectivement les fissures. Le facteur d'intensité de la contrainte, à la pointe de la fissure, étant trois à cinq fois plus élevé lorsque les gaz pénètrent. Quant à la flexion de la masse, cette théorie impose un rapport hauteur/banquette (fardeau)- X pour les tirs réussis, ou $3 < X < 4$.

2.2 RÉFLECTION de l'ONDE de DILATATION: Ces théories sont issues du fait que la résistance en traction des roches ait au moins un ordre de grandeur moindre que sa résistance en compression. La rupture et la fragmentation sont principalement censées être le produit de l'onde de traction produite lorsque l'onde de dilatation, en compression, est réfléchi en traction au front d'attaque. Les gaz complètent le travail et déplacent la masse.

2.3 INTERACTION des ONDES et FÊLURES: Il est reconnu que les ondes réfléchies peuvent s'additionner et entraîner des concentrations de contraintes considérables, dépassant largement la résistance du matériau qui les transmet. Plusieurs expériences à petite échelle avec des matériaux uniformes et isotropes et des ondes de courte longueur relativement aux dimensions de l'échantillon ont donné des résultats qui semblent défier la logique (voir Figure IX.). En admettant ces concentrations de contraintes lors des réflexions très complexes dans un milieu rocheux entrecoupé par plusieurs plans de faiblesses, on arrive à formuler les équations mathématiques décrivant la fragmentation du massif. Les gaz ne font que déplacer la masse fragmentée.

Progression d'une onde courte qui réfléchit des coins d'un prisme et rupture.

Ruptures par réfléchissement qui peuvent paraître illogiques.

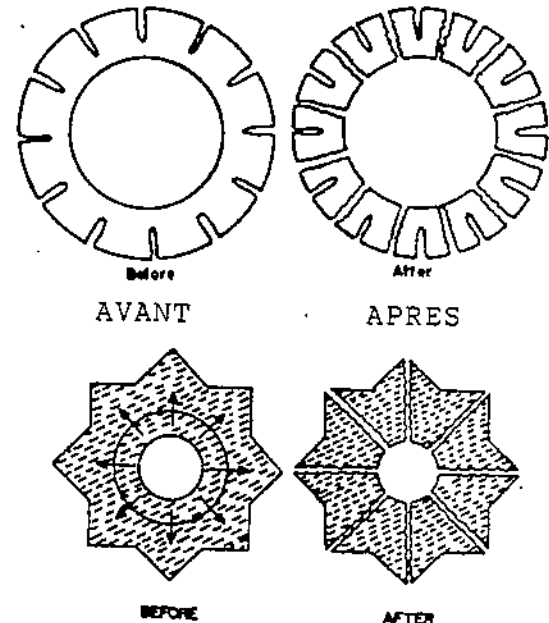
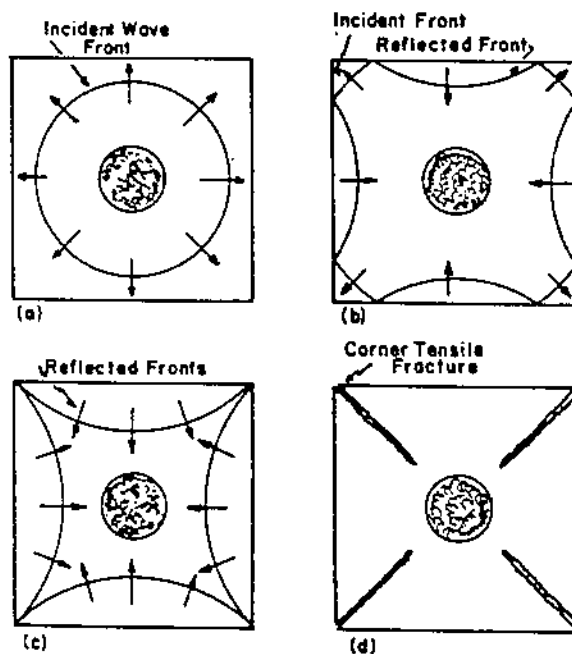


Figure IX. Effet de réflexion des ondes de courte durée (10).

2.4 CONCOURS DE MÉCANISMES STATIQUES et DYNAMIQUES: Ces théories proposent que les contraintes dynamiques des ondes élastiques sont des agents de préconditionnement essentiels et que la poussée des gaz engendre un front de contrainte, avançant en état quasi-statique vers le front d'attaque, qui complète la fragmentation. La vitesse d'avancement de ce front semble être fonction de la vitesse de propagation des fissures. La libération du massif de la masse fragmentée se fait lorsque le front quasi-statique est rendu (ou presque) au front d'attaque. La masse se déplace par la poussée résiduelle du front quasi-statique gazeux.

2.5 EMPIRISME: Les théories empiriques englobent, à leur limite technique inférieure, les règles de pouce, i.e. d'énergie spécifique ($\text{kg explosif}/\text{m}^3$), les formules basées sur le diamètre du trou de mine ou, en augmentant de rigueur technique, la Méthode des Cratères, les recettes de polynômes et au plus haut niveau technique des modèles numériques très sophistiqués, faisant appel à la mathématique des autres théories ainsi qu'à l'expérience vécue par l'entremise de paramètres déterminés empiriquement. Par exemple, le modèle SABREX de ICI, le modèle mécaniste de T.H. Kleine de l'Université de Queensland (décrit lors du 7ième congress SIMR) et la plupart des modèles commerciaux.

3. OBSERVATIONS: Nous introduisons dans ce chapitre des faits observés lors des tirs à l'explosif sans y apporter des jugements quant à leur interprétation. Nous insistons sur la véracité des observations rapportées par des observateurs non-profanes. Nous estimons que ces données devraient former la fondation d'une compréhension cohérente du phénomène de la fragmentation des roches par l'énergie explosive. Sans vouloir tomber dans le piège de la mesquinerie, il faut

reconnaître que les chercheurs théoriques trouvent souvent des preuves pratiques pour les appuyer sans pour autant que leur théories soient prouvées. Ceci souligne l'importance de l'interprétation correcte des observations.

Quelles sont toutes les observations que l'on a pu faire d'un tir à l'explosif. En voici plusieurs (sans être limitatives):

1. L'onde de contrainte mesurée est sensiblement d'accord avec la théorie.
2. Les premières fissures apparaissent au front peu de temps après la réflexion de l'onde de compression.
3. La masse fragmentée est considérablement gonflée au moment de l'éclatement, exhibant une flexion considérable du front.
4. Au moment de l'éclatement, il n'y a pas d'évidence de pénétration des gaz au front, sauf à travers des faiblesses géologiques.
5. La vitesse de déplacement de la masse est proportionnelle au chargement spécifique en explosif.
6. Les vibrations sont plus fortes lorsque le chargement spécifique est plus faible.
7. Les poussières soulevées par un tir paraissent provenir du plancher, devant le front.
8. Les projections de longue portée sont évitables.
9. Les vitesses de détonation des explosifs mesurées dans le trou de mine sont sensiblement celles publiées par le fournisseur.
10. Les détonateurs à retardement ne donnent pas toujours les résultats escomptés, à cause d'anomalies de retardement.
11. Les gaz pénètrent les fissures ouvertes et ils peuvent provoquer un allumage prématuré d'un autre trou de mine.
12. Le broyage autour d'un trou de mine est visible, sur le front ou sur le fond où il y a eu un tir.
13. Les dommages causés à une paroi rocheuse par un tir adjacent ne sont pas toujours attribuables aux trous de mines sur cette paroi.
14. Un tir bloqué propage la fissuration plus loin qu'un tir réussi.
15. Pour un diamètre donné de trou de mine et une fragmentation équivalente la dimension banquette de la maille de tir est généralement fonction inverse de la résistance en compression et de la densité de la roche.

4. CONFRONTATIONS: En regardant de près l'aspect théorique du transfert de l'énergie explosive en concours avec les propriétés des roches et avec les

observations qui découlent des tirs, il se déclare plusieurs confrontations troublantes, pour ne pas dire contradictoires. Il n'y a rien d'alarmant dans ces confrontations car ce n'est qu'un rappel que le phénomène est cohérent et que notre compréhension se doit être autant cohérente. C'est-à-dire que les divers événements qui se produisent lors de la fragmentation des roches à l'explosif ne se font pas en vases clos et doivent se respecter mutuellement quant à l'exploitation des propriétés élastiques, plastiques et physiques et les lois de comportement bien établies.

4.1 ONDES, FÊLURES et PROPRIÉTÉS PHYSIQUES: Il nous paraît assez évident, d'après les sources que nous avons consultées, que l'onde élastique susceptible de se propager à une distance d'au moins deux fois la banquette ne peut dépasser à l'origine, en valeur de contrainte en compression, environ deux fois la valeur statique de résistance en compression. Au front de cette onde élastique, dans une situation de tir normal, le confinement est voisin de nul et la résistance en compression uniaxiale est une bonne approximation de cette résistance mécanique statique. Nous rappelons que la résistance dynamique en traction est de cinq à dix fois celle de la résistance statique (voir Figure VIII.). Donc, en fonction de la résistance dynamique en traction, l'onde élastique, à son origine au trou de mine, aura une valeur au plus d'environ deux à six fois celle-ci.

Suivant la loi de décroissance dynamique et se rappelant que l'onde doit réfléchir du front pour se transformer en une onde de traction, le front ne peut être plus loin qu'un maximum d'environ neuf diamètres de trou de mine si tout le roc entre le trou de mine et le front est fragmenté par l'onde élastique en traction. Ceci suppose aucune perte de l'énergie de l'onde, soit en propagation ou à la réflexion, et ignore également la superposition des champs de contrainte quasi-statiques en compression. Il me paraît exister ici une confrontation contradictoire entre la pratique courante et la théorie de fragmentation par les ondes élastiques.

La durée de l'onde élastique, qui est fonction du rayon du trou de mine, est l'inverse de la pseudo-fréquence. Par rapport à l'estimation précédente de 9000 à 15000 Hz, pour un trou de mine de 100mm de diamètre, ceci donne une onde assez courte qui à cause de ceci et de la limitation de la contrainte, ne peut contenir beaucoup d'énergie. Toutefois, la théorie des ondes élastiques est favorisée par des ondes de courte durée (voir Figure IX.). Les mesures de contrainte effectuées autour des trous de mine sont assez rares et on ne donne pas toujours l'échelle du temps. Il paraît que les durées seraient sensiblement supérieures à la durée théorique, nuisant au bon fonctionnement de la théorie de réflexion des ondes élastiques.

Il n'est pas infirmé que d'autres ondes, i.e. plastiques ou choc-véritable, puissent être les porteurs des contraintes sensiblement supérieures à l'onde élastique. Toutefois, ces ondes voyagent moins rapidement (en général dans le domaine de fragmentation des roches à l'explosif) que l'onde élastique et, de plus, consomment beaucoup d'énergie, les faisant perdre rapidement de leur puissance. Selon les connaissances actuelles, il est invraisemblable que ces ondes, s'ils existent pratiquement, peuvent être importantes sauf près du trou de mine.

On a également proposé la création des ondes de cisaillement (théorie des interactions ondes-fêlures) à la paroi du trou de mine. Bien qu'il y ait des contraintes de cisaillement parce que les contraintes dans l'onde élastique ne sont pas hydrostatiques, cela n'implique pas nécessairement la formation des ondes de

cisaillement. Le fait que la pression des gaz n'est pas appliquée instantanément (fonction de la vitesse de détonation de l'explosif) est peut être la cause de génération d'une onde de cisaillement (dans un plan radial-axial au trou de mine) importante à la paroi. Ceci reste à prouver. Les illustrations présentées (5) pour le prouver nous paraissent plutôt prouver la présence d'une onde plastique ou de choc-véritable derrière l'onde élastique.

En général, il ne faut pas négliger l'effet que les ondes auront sur le massif à fragmenter mais il ne paraît pas qu'elles puissent être les seules responsables de la fragmentation.

4.2 FORCE, FRAGMENTATION et MOUVEMENT: Il est vraisemblable que les champs de contraintes quasi-statiques s'établissent derrière le front d'onde dynamique. Le champ statique décroît en fonction inverse du carré de la distance du trou de mine. Ceci implique qu'à quelques rayons de trou de mine, la contrainte radiale est voisine de nulle. Toutefois, il ne faut pas négliger que la contrainte quasi-statique à l'origine est égale à la pression des gaz dans le trou de mine. Cette pression peut être une dizaine de fois la contrainte de résistance mécanique statique en compression; ce qui fait qu'à l'origine la contrainte quasi-statique serait environ cinq fois la contrainte dynamique de l'onde élastique. Nous rappelons que les contraintes se superposent et le champ quasi-statique annule une partie de la contrainte dynamique réfléchiée en traction.

Dans le trou de mine, la pression des gaz exerce une force sur la paroi et cette force va accélérer la masse jusqu'à sa vitesse d'éclatement. Afin que la masse soit accélérée il faut qu'elle se soit détachée. Le temps que prend la fissuration pour délimiter la masse est inconnu mais demeure un facteur de première importance. D'abord avec les données de Noren (1956) telles que publiées dans *Detonics of High Explosives* (6) et la loi de Newton - $F = m \times a$ -, il est possible de calculer la force moyenne nécessaire à l'accélération. En connaissant le diamètre du trou de mine, on peut traduire la force en pression sur la paroi. Puisque le chargement est également donné pour les expériences de Noren, on trouve que la pression moyenne dans le trou de mine, pour effectuer l'accélération et en enlevant la force nécessaire au cisaillement du roc, est environ le tiers de la pression des gaz avant l'expansion du trou.

On peut démontrer que la pression des gaz est fonction inverse du carré du déplacement de la masse. Donc, pour un déplacement de masse selon les résultats de Noren, la pression serait tombée à un tiers de sa valeur maximale en ne tenant compte d'aucune perte, la valeur moyenne étant alors deux tiers de la pression maximale. Le calcul d'une pression moyenne de un tiers pour accélérer la masse indique qu'environ 50% de l'énergie des gaz sert à accélérer la masse. Ceci ne s'accorde pas avec les propositions de G. Berta (2).

Il est maintenant intéressant de constater que la force nécessaire à l'accélération de la masse, appuyée sur la paroi du trou, dépasse largement la résistance en compression du roc. De plus puisque la masse est détachée, elle ne subit aucun confinement, et autant que l'accélération est constante, la masse de roc subit une forte contrainte en compression, c'est-à-dire un essai en compression uniaxiale relativement quasi-statique et en mouvement. Une théorie de relativité explosive, quoi!

4.3 GAZ et FRAGMENTATION: Si le gaz doit pénétrer les fissures pour réussir

la fragmentation, il faudrait que l'évidence des observations des tirs le confirme. Des études détaillées par Fournery et al. (5) indiquent que la fissuration se déclare au front bien avant que les gaz aient pu s'y rendre. De plus, les photos des tirs dans les réclames de Nitro Nobel indiquent que les gaz semblent sortir du front seulement à travers une anomalie géologique.

Deux aspects devraient retenir notre attention: Le premier est que la coalescence des fêlures, telle que démontrée au 7ième congrès SIMR par Reyes et Einstein, a l'effet d'augmenter la vitesse apparente de propagation des fissures et le deuxième est que si les gaz pénètrent la masse fragmentée, l'accélération de la masse sera diminuée. Il n'est pas facile de concilier l'accélération de la masse que l'on observe avec une pénétration des gaz dans les fissures en dilatation.

Un fait que les photos de tirs au moment de l'éclatement indiquent, c'est la forte flexion du front. Ceci semble venir appuyer la théorie de rupture par flexion mais il n'est pas évident que la rupture est le résultat ou le précurseur de la flexion.

5. PROGRESSION d'une EXPLOSION: Dans ce chapitre nous voulons proposer qualitativement un processus de fragmentation de la roche par explosif en tentant de tenir compte de tous les mécanismes de transfert d'énergie, d'une façon cohérente. D'abord nous débutons par la détonation de l'explosif.

1. **DÉTONATION:** L'onde de détonation qui parcourt l'explosif à la vitesse de détonation (VDD) et véhicule une pression considérablement supérieure à la pression des gaz est de courte durée et contient une faible quantité de l'énergie de réaction, selon les experts en la matière. Il n'est pas certain que cette pression puisse se faire sentir sur la paroi du trou de mine car cette forte pression sert surtout à entretenir la réaction primaire de l'explosif. De toute façon, cette haute pression n'aurait pas d'impact sur l'onde élastique et elle est de trop courte durée pour avoir un impact sur le champ quasi-statique. Quant à la possibilité qu'elle puisse générer une onde de véritable choc, il paraît que même à proximité de détonations atomiques en souterrain où les pressions sont encore plus considérables, les manifestations d'onde de choc-véritable (i.e. transition $\alpha - \beta$ dans le quartz) sont assez rares.
2. **PRESSION des GAZ:** Le développement de la pression des gaz est considérablement (plus d'un ordre de magnitude) plus lent que celui de la pression de détonation. Ceci est évident en scrutant les jolies photos d'un bâton d'explosif en détonation. A une pression inférieure à la possibilité de transmission élastique de la roche, il se génère à la paroi du trou de mine une onde élastique qui prend son départ à cet instant. Cette onde est conditionnée par les propriétés et l'état du roc à la paroi, i.e. contraintes in-situ, rapport Poisson, Modules, résistance mécanique, etc.. Derrière ce front élastique, le roc entre la paroi et le front se trouve fortement comprimé et la paroi se fait déplacer vers l'extérieur.

Puisque le volume de roc à comprimer augmente (et par conséquent l'inertie) à la vitesse de propagation de l'onde élastique, il s'avère que le déplacement de la paroi est relativement lent et constant jusqu'à l'équilibre des forces ou le début du mouvement de la masse. On nous propose que l'augmentation du diamètre du trou de mine peut être le double de l'original. Ceci implique une vitesse de déplacement de la paroi de une dizaine à quelques dizaines de

mètres par seconde et une déformation unitaire impliquant une contrainte moyenne de plusieurs fois la résistance uniaxiale en compression. Des calculs simplistes en fonction de la force sur la paroi du trou, la masse entre la paroi et le front élastique et les lois de Newton, sans tenir compte de résistances autre que celle d'inertie, donnent des valeurs de déplacement de la paroi d'environ deux ordres de magnitude moindre et, par conséquent, une augmentation très faible du diamètre du trou de mine avant l'éclatement. Il est difficile de trancher cette question sans études et observations supplémentaires.

La compression entre la paroi du trou et le front élastique autorise une légère (de l'ordre de $10\pm\%$ pour l'état lors d'un tir) augmentation de la vitesse de propagation ainsi que de la résistance mécanique du roc au maximum de l'ordre du double de la résistance uniaxiale statique. Puisque cette compression est quasi-statique, son effet tombe en dessous de la contrainte élastique, très près de la paroi du trou de mine (voir à quelques rayons). Toutefois, il devrait exister autour du trou de mine une zone de broyage quasi-plastique et de rupture confinée avec fissuration en 'X' selon le confinement et l'angle de friction interne du roc (voir Figure X.). Effectivement, ces effets sont observés en pratique. La présence ou non de cette auréole de broyage pourrait dépendre de la saturation en eau du roc.

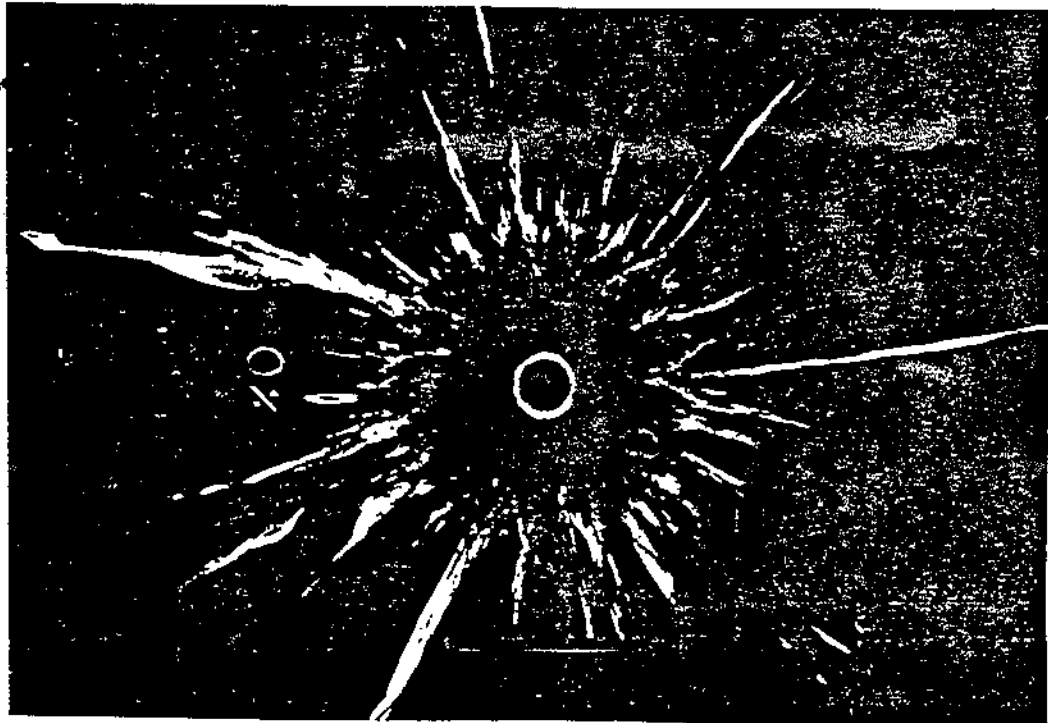


Figure X. Fissuration résultante d'une explosion (6).

La contrainte dynamique en compression et le champ quasi-statique vont infliger au roc, dès leur établissement, tout le dommage qu'ils peuvent, selon les propriétés et les états locaux. Lors de la réflexion de la contrainte compressive en traction au front et son balayage de retour vers le trou de mine, toutes les faiblesses seront exploitées et la rupture propagée selon les états locaux.

S'il y a pénétration des gaz dans les fissures, la rupture se propagera par ce moyen, soit par l'effet coin ou l'augmentation de la pression interne à la pointe de la fissure. Dans ce cas, la vitesse de propagation dépendra des obstructions rencontrées. Il est difficile à voir comment une fissure poussée par les gaz puisse traverser une faiblesse non-cohésive normale au plan de la fissure. Toutefois, en examinant le roc fragmenté après un tir, nous avons souvent observé l'évidence que les fissures traversent allègrement ces faiblesses. D'abord les expériences de Reybérrotte et Héraud (6ième Congress SIMR, Montréal, 1987) sur l'efficacité de divers explosifs utilisés pour le préclivage semblent appuyer cette thèse de l'arrêt des fissures poussées par les gaz qui rencontrent une fissure non-cohésive.

Avant que la masse soit détachée et que son accélération débute, le champ de contrainte quasi-statique est distribué plus ou moins uniformément autour du trou de mine, du moins jusqu'au retour de l'onde élastique qui annonce la présence du front. Le moment de détachement de la masse est inconnu mais c'est certainement après la réflexion de l'onde élastique au front et cela doit être assez précoce pour permettre l'accélération de la masse selon les forces en jeu.

3. **ACCELERATION de la MASSE:** Une fois la masse détachée, elle subit l'accélération et les contraintes qui en découlent selon les états actuels. A cette étape, le champ de contrainte majeur n'est plus distribué radialement mais il est concentré dans la masse en mouvement. De plus, il y a peu ou pas de confinement global (le confinement est interne et local) pour augmenter la résistance mécanique. Si l'on prend la pression des gaz, au moment de détachement, de l'ordre de la pression calculée par l'expression suivante (Explosives and Rock Blasting de Atlas Powder (9), pp 200),

$$P_o = 0.157 \times \rho \times VDD^2 \times [1/c \times de/dt]^{2.6}$$

où: P_o = pression des gaz d'explosion en MPa,
 ρ = densité de l'explosif en kg/m³,
 VDD = vitesse de détonation de l'explosif en m/s,
 c = fraction de la colonne chargée d'explosifs,
 de = diamètre de l'explosif et
 dt = diamètre du trou de mine.

et que cette pression soit appliquée sur la largeur du trou de mine par tranche de un mètre, et que la force qui en découle soit distribuée sur un secteur de roc détaché de 100°, on obtient une contrainte au front (pour des banquettes pratiques) de l'ordre de 50% ou plus de la résistance mécanique uniaxiale en compression d'une carotte. Il y a certainement matière ici à fragmenter la plupart des roches et, avec la coalescence et la poussée, assez de temps et d'énergie pour la réaliser pendant l'accélération.

4. **EPILOGUE:** Ce récit qualitatif d'un tir à l'explosif dans le roc n'est pas garanti correct. C'est le point de vue de l'auteur qui, sans vouloir prétendre à la vérité absolue, tente de construire une séquence logique des événements qui s'accorde avec ce qu'il comprend de la physique et de la mécanique de la matière en jeu.

6. **CONCLUSIONS:** En conclusion, je pense que cette communication a démontré

que notre compréhension du phénomène de la fragmentation des roches à l'explosif, par transferts physique et mécanique de l'énergie, est loin d'être parfaite. Toutefois, il n'y a pas de doute que tous les éléments du phénomène sont en place et il s'agit maintenant de bien les rassembler. La grande variabilité de la nature géologique milite contre une solution trop rigoureusement analytique, numérique et unique et il m'a paru dans cette recherche que notre capacité de calcul actuelle dépasse notre compréhension actuelle.

Enfin j'offre la suggestion: que le phénomène soit regardé de nouveau d'abord sous son aspect qualitatif. Ce regard devrait inclure les informations et observations du passé aussi bien que celles du présent, scrutées sous une nouvelle lumière cohérente incorporant les connaissances théoriques et pratiques. Il n'y a pas de doute dans mon esprit que cet exercice n'aura pas l'effet de simplifier l'approche mathématique mais devrait nous conduire à une utilisation plus efficace et correcte des calculs selon nos besoins.

BIBLIOGRAPHIE:

1. Bell, F.G., 1983, *Fundamentals of Engineering Geology*, Butterworth & Co., London.
2. Berta, Giorgio, 1990, *Explosives: an Engineering Tool*, Italesplosivi, Milano.
3. Carmichael, Robert S. (Ed), 1989, *Practical Handbook of Physical Properties of Rocks and Minerals*, CRC Press, Boca Raton, Fl., U.S.A.
4. Chernigovskii, A.A., 1976, *Application of Directional Blasting in Mining and Civil Engineering*, 2nd Ed., Nedra, Moscow, Translated from Russian by Dhamija, Subhash C., 1985, Oxonian Press Pvt. Ltd., New Delhi.
5. Fourny, W.L., Boade, R.R. and Costin, L.S., (Eds.), 1985, *Fragmentation by Blasting*, Society for Experimental Mechanics, Brookfield Center, Connecticut.
6. Johansson, C.H. and Persson, P.A., 1970, *Detonics of High Explosives*, Academic Press, London and New York.
7. Kolsky, H., 1963, *Stress Waves in Solids*, Dover Publications, New York.
8. McClintock, Frank A. and Argon, Ali S., (Eds.), 1966, *Mechanical Behaviour of Materials*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, Mass., U.S.A.
9. Morhard, Robert C., Chiappetta, R. Frank, Borg, David G., Sterner, Victor A., 1987, *Explosives and Rock Blasting*, Atlas Powder Company, Dallas, Texas, U.S.A.
10. Rinehart, John S., 1975, *Stress Transients in Solids*, HyperDynamicS, Santa Fe, New Mexico, U.S.A.

11. Whittaker, B.N., Singh, R.N. and Sun, G., 1992, Rock Fracture Mechanics, Principles, Design and Applications, Elsevier, Amsterdam.
12. Zukas, Jonas A., Nicholas, Theodore, Swift, Hallock F., Greszczuk, Longin B. and Curran, Donald R., 1982, Impact Dynamics, John Wiley & Sons, Inc., New York.

La bibliographie citée ci-haut est loin d'être complète en ce qui me concerne personnellement mais il serait fastidieux de citer en entier toutes les communications personnelles, tous les congrès (SIMR, SEE, SEEQ, FRAGBLAST, ALES, etc.), tous les articles techniques et bien d'autres. Toutefois, je considère que les livres ci-haut mentionnés sont le noyau d'une bibliothèque d'études sérieuses de la physique et de la mécanique des transferts d'énergie lors de la fragmentation des roches à l'explosif.