

**18e Session d'étude sur les techniques de sautage
Les 2 et 3 novembre 1995**

L'abattage des roches à l'explosif - mythes et réalité

*Wilfrid Comeau
Techniques Catnoo enr.*

L'ABATTAGE DES ROCHES À L'EXPLOSIF - MYTHES ET REALITES

(UNE NOUVELLE THÉORIE de FRAGMENTATION)

Wilfrid Comeau, ing., Techniques Catnoo enr.

Professeur adjoint, Fragmentation des roches, Génie minier, Université McGill

RESUME:

Alors que l'auteur préparait le sujet de sa présentation (Comeau, 1993¹) sur: 'La physique et la mécanique des transferts d'énergie lors d'abattage des roches à l'explosif', il s'est vu confronté à plusieurs concepts contradictoires dans les domaines suivants: les dernières théories sur l'abattage des roches à l'explosif, les principes physiques régissant les transferts d'énergie, les propriétés mécaniques des roches, et les observations et les données provenant de l'abattage des roches **grandeur nature**.

Cet exposé se propose d'examiner de près le processus d'abattage des roches, en commençant avec l'établissement de la pression des gaz dans le trou de mine après l'explosion ainsi que ses effets, et en terminant avec le mouvement de masse de la roche fragmentée.

Chaque étape du processus sera examinée de trois points de vue différents, en ayant soin de respecter la chronologie des faits. Ces points de vue sont:

1. Les prédictions basées sur la théorie de la physique,
2. Les limites mécaniques du milieu rocheux, et
3. Les preuves obtenues à partir d'observations et de données résultant de l'abattage des roches **grandeur nature**.

Cette présentation soulève des questions traitant: de l'onde de contrainte, de son atténuation et de son effet global, de la pénétration de gaz dans les fissures, de la quantité de fines, de l'Approche macro de la Mécanique de la fissuration, des chronologies relatives de la fragmentation et du mouvement de masse, et de la source des effets de vibration. On va aboutir avec une nouvelle théorie de fragmentation.

1.0 - INTRODUCTION

Bien que le voile se lève graduellement sur le mystère entourant les explosifs et l'abattage des roches, c'est un domaine où il existe encore beaucoup de mythes. Cependant, il n'est pas évident que nos progrès récents en informatique ont contribué à l'amélioration de la situation. Dans un rapport antérieur (Comeau, 1993²), on a proposé qu'un modèle physique cohérent soit mis au point par la communauté travaillant dans le domaine de l'abattage des roches. Ceci se ferait à l'aide des connaissances établies de mécanique des roches, des théories de physique et de la vaste quantité d'informations résultant des observations d'abattage des roches **grandeur nature**. À la suite de ces travaux, l'on devrait être capable d'établir un modèle mathématique avec facilité.

Le développement et l'utilisation valides de modèles mathématiques d'abattage des roches sont fonction de leur degré de compatibilité avec le monde réel, à l'échelle correcte. D'où l'importance fondamentale d'avoir un modèle physique cohérent qui serait accepté universellement. Les mathématiciens ont éprouvé moins de difficultés à décrire des mondes à dimensions multiples que de décrire notre propre monde à quatre dimensions (Peterson, 1990). Il est donc facile de voir pourquoi nous éprouvons autant de difficulté à le faire dans notre domaine assez restreint. Un modèle mathématique valide doit ainsi respecter de façon intégrale la physique, la mécanique et les données observées du système **grandeur nature** (Menzel, 1960, Vennard, 1961). Comme nous le verrons, les principes fondamentaux qui sous-tendent l'utilisation des mathématiques ne sont pas toujours totalement respectés.

Une bonne partie des preuves résultant des observations d'abattages des roches **grandeur nature** n'a pas été intégrée aux plus récentes théories d'abattage des roches à l'explosif. On semble ne pas tenir compte de facteurs tels que la relation inverse entre les vibrations et le facteur poudre, la quantité relativement grande de matériel fin dans les débris de tir, ou bien le manque de preuves visibles de la pénétration des gaz d'explosion dans la masse rocheuse fragmentée. Il existe d'autres irrégularités par rapport à la capacité des masses rocheuses de transmettre des ondes de contrainte, à la nature de la transmission et de la réflexion des ondes de contrainte dans des masses rocheuses **grandeur nature**, et à l'effet de la violente accélération de la masse rocheuse (fragmentée?).

La recherche en mécanique des roches, remontant à la fin des années 1950 et au début des années 1960, contient de précieuses informations qui apportent une perspective nouvelle au phénomène de l'abattage des roches à l'explosif. Ces informations méritent d'être réévaluées à la lumière des connaissances actuelles. Le défi est maintenant relancé pour réévaluer l'ensemble des connaissances de base afin de mettre au point un modèle physique d'abattage des roches qui serait accepté de tous.

2.0 - LES ONDES DE CONTRAINTE DANS LE MASSIF ROCHEUX

2.1 - Zone de dommages, paroi de trou de mine - Vitesses:

On croit connaître assez bien la physique et la thermo-chimie de la détonation pour pouvoir estimer, avec une bonne précision, les pressions de détonation dans les explosifs et la pression d'explosion des gaz dans le trou de mine. Nous partirons de cet état de fait pour l'évaluation du processus de l'abattage des roches à l'explosif. Des données publiées provenant d'expériences sur la vitesse de propagation des fissures (Beniawski, 1966) et une simple évaluation du taux maximum de déplacement de la paroi de trou de mine - imputable uniquement à la force de pression des gaz et à la résistance inertielle de la masse croissante entre le front d'onde de contrainte et la paroi de trou de mine - semblent indiquer qu'une pression quasi-instantanée et quasi-statique se forme dans le trou de mine.

En rapport avec la vitesse de l'onde de contrainte ' C_p ', on peut déduire, à l'aide des travaux de Beniawski, que la vitesse initiale de développement de la zone plastique (broyée) entourant le trou de mine ainsi que la vitesse maximum de la paroi de trou de mine sont très lentes, i.e., d'environ $1/30 \pm$ (peut-être encore plus bas) et de $1/25000 \pm$ de ' C_p '

respectivement. Les données observées aux fronts de taille semblent être plutôt en accord avec les conséquences de cette évaluation, et en opposition avec le concept d'une forte dilatation du trou de mine et de la déformation unitaire conséquente (Favreau, 1969).

2.2 - Transmission des ondes:

Malgré la pression des gaz très élevée dans un trou de mine, les roches possèdent une capacité maximale de transmission des ondes de contrainte, ce qui impose une limite sur la valeur de cette onde générée à ou près de la paroi de trou de mine. Hakalehto (1969), lors d'expériences avec la "Split-Hopkinson-Bar" (Fig. 1. *) menées très soigneusement, a découvert que la capacité portante maximale, pour des ondes de contrainte dynamique, pour des échantillons cylindriques de grès et de granite, équivalait plus ou moins à leur résistance en compression simple (**UCS**). Dans le cas d'échantillons de marbre, qui est une roche plus plastique, la capacité de transmission maximale était de 120% de son **UCS**. L'excédent de contrainte sur l'**UCS** dans l'onde est absorbé par des dommages localisés au point d'entrée. Les dommages débutent à une valeur de 55% à 85% \pm du maximum. Ce résultat surprend puisqu'on a toujours cru que la résistance dynamique de la roche était environ le double du **UCS**. Il faut admettre que dans cette expérience l'échantillon n'était pas confiné. Cependant, en situation de **grandeur nature**, les conditions pourraient bien ressembler à cela (Mutschler, 1993). Les données expérimentales relevées par la United States Bureau of Mines (**USBM**) (Atchison, 1959) et Bawden (1993), lorsqu'elles sont extrapolées vers l'origine jusqu'à près de la paroi du trou de mine à l'aide des coefficients d'atténuation géométrique appropriés (voir section 2.5), s'accordent avec une valeur maximum d'onde de contrainte qui équivaut à l'**UCS**. * Les figures se trouvent à la fin du document.

2.3 - Résistance dynamique des fractures en traction:

Il existe des preuves (Whittaker, 1992) à l'effet que, au taux de déformation unitaire imposé par une onde de contrainte explosive, la résistance dynamique des roches en traction, théorique et mesurée, est de 5 à 10 fois leur résistance statique. Ces résultats rendent difficile une crédibilité dans la théorie voulant qu'une fragmentation significative de la roche se fait lors de la réflexion en traction de l'onde de contrainte au front d'attaque. Puisque l'onde de contrainte (en compression) quittant le trou de mine est limité à l'**UCS** de la roche, il est probable que la valeur de la résistance dynamique de la roche en traction va dépasser celle de l'onde réfléchie en traction à la distance habituelle au front d'attaque, en tenant compte de l'atténuation.

2.4 - Superposition des ondes:

Une théorie récente a recours à la réflexion multiple sur des frontières internes et à la superposition des ondes réfléchies (en traction) pour fournir des valeurs de contrainte dépassant la résistance dynamique en traction de la roche. En effet, Rinehart (1975) démontre que ce processus, prédit en théorie et démontré expérimentalement, peut avoir des résultats surprenants. Il y a cependant une restriction majeure dont nous fait état Rinehart, voulant que les ondes de contrainte, dans ce cas, soient de très courte durée. Sinon, la queue d'onde compressive, arrivant à la frontière de réflexion, atténue fortement la réflexion en traction à la frontière, là où le matériau est le moins résistant. Alors que ce processus est facile à vérifier en laboratoire, où les ondes sont de courte durée dans la majorité des cas, les résultats des expériences *in-situ* n'appuient pas cette hypothèse (**USBM RI 5509 et 6434**). Les impulsions

positives de contrainte qui ont été mesurées possèdent une longueur d'onde allant de une demie à trois quarts de la dimension du fardeau.

2.5 - Atténuation géométrique:

On ne s'entend pas non plus au sujet de la propagation de l'onde de contrainte partant du trou de mine. La théorie (Rinehart, 1975) prédit l'atténuation géométrique dynamique dans le cas de plusieurs sources.

Pour une source sphérique, elle est proportionnelle à r^{-1} ,

Pour une source cylindrique, elle est proportionnelle à $r^{-1/2}$,

Pour le cas statique, l'atténuation géométrique est de r^{-2} .

On a démontré (Cooper, 1971) qu'une perturbation séismique provenant d'un réseau de charges explosives ponctuelles enfouies et disposées en forme de rectangle vertical (tableau plan) et qui sont détonées instantanément ressemble à celle générée par une charge ponctuelle sphérique équivalente, à une distance d'environ la racine carrée du produit des dimensions du tableau. Les analyses statistiques des données fournies par les tests USBM (Atchison, 1959, 1964) ont produit un coefficient global d'atténuation géométrique de $r^{-1,8\pm}$, ce qui se rapproche du coefficient statique.

Cette constatation peut induire en erreur car une analyse détaillée, non-statistique des données USBM suggère que l'exposant de 'r' varie de < -1 à des distances moindres que la longueur de la charge à environ $-1,2\pm$ à une distance équivalente à un fardeau normal pour le diamètre du trou de mine utilisé. Ces résultats pris ensemble montrent que la théorie et la pratique sont très cohérentes. Donc, pour une source cylindrique, l'exposant d'atténuation de l'onde de contrainte en fonction de 'r' varierait de façon continue de la valeur la plus conservatrice ($-\frac{1}{2}$), près de la source, à (-1), où la distance fait que cette source peut être confondue avec une source sphérique, et enfin, à ($-2\pm$) pour le cas statique lorsque les distances sont très grandes. La figure 2. illustre l'atténuation des contraintes statiques et dynamiques en fonction de la résistance de la roche (UCS et la résistance en traction non-confinée UTS) par rapport à l'éloignement de la source en fonction de 'r'.

2.6 - Ondes de cisaillement ?:

Rinehart (1975) déclare qu'aucune onde de cisaillement n'est générée par une source cylindrique qu'on active instantanément. Puisqu'un trou de mine **grandeur nature** n'est pas activé instantanément, il est possible que des ondes de cisaillement puissent être générées. Par contre, les investigateurs des expériences auxquelles on fait référence dans la section 2.5, n'ont décelé aucune onde de cisaillement. Le fait qu'on ait démontré la possibilité de générer des ondes de cisaillement dans le plexiglass (Fourny, 1985) pourrait n'être qu'une erreur, car Cook (1971) mentionne que le plexiglass transmet les **ondes 'Plastiques'**, induites par une contrainte explosive, dont la vitesse peut porter à confusion avec celle des ondes de cisaillement.

2.7 - Approche macro de la Mécanique de la fissuration des roches:

La prévision de la propagation d'une fissure dépend de la détermination de la concentration de l'intensité de la contrainte à l'extrémité de la fissure. La **Théorie des fissures de Griffith** (McClintock, 1966) constituait un progrès important, dans le domaine de la mécanique des fissures. Celle-ci expliquait la disparité entre la résistance mécanique en tenant compte de la résistance des liens atomiques et de la résistance actuelle des matériaux cohésifs. Cette théorie, reposant sur l'hypothèse que tous les matériaux contiennent des fissures en forme d'ellipsoïdes plates, nécessitait qu'on estime le plus grand et le plus petit rayon de la fissure afin de pouvoir déterminer la concentration de l'intensité de la contrainte. Puisque le rayon minimal à la pointe des fissures dans un matériau rocheux grandeur nature se rapproche vraisemblablement de '0' (pas prévu par la théorie de Griffith), le nouveau domaine de l'**Approche macro de la Mécanique de la fissuration des roches** (Whittaker, 1992) a établi un nouveau facteur d'intensité de la contrainte 'K' à la pointe des fissures, à l'aide d'équations mathématiques complexes nécessitant l'emploi de l'ordinateur. On détermine ce facteur pour une roche donnée, de façon expérimentale, à partir de tests soigneusement conçus et menés en laboratoire.

Bien que les études ci-haut nous aident à comprendre la propagation des fissures dans un milieu relativement homogène, il est difficile, voire impossible, du point de vue mathématique, de calculer une valeur réelle du facteur 'K' lorsque la fissure doit traverser un plan de faiblesse mal défini, comme on en trouve normalement dans un environnement géologique typique, **grandeur nature** (Bell, 1983, Carmichael, 1989). Il serait normal de s'attendre à ce que la concentration de l'intensité de contrainte disparaîsse dans ce cas et que la fissure s'arrête. Les résultats de tirs dans les roches contenant beaucoup de joints/diaclases présentent toujours des surfaces de fissuration fraîchement générées. Preuve que les fissures se sont de toute évidence propagées en travers de ces plans de faiblesse. Il semble alors évident que la théorie courante de la mécanique de la fissuration ne peut expliquer convenablement la fragmentation des roches à l'explosif, en grandeur nature.

2.8 - Les ondes de contrainte dans les roches - Résumé:

En guise de résumé de cette section sur les **ondes de contrainte**, nous pouvons souligner les facteurs suivants:

- la roche intacte possède une capacité de transmission limitée qui est reliée à son **UCS** et à son environnement géologique *in-situ*,
- le rapport entre la résistance dynamique et la résistance statique des roches en traction serait de l'ordre de cinq à dix fois plus élevé que le rapport entre leur résistance dynamique et leur résistance statique en compression,
- l'atténuation géométrique d'ondes de contrainte élastiques dans le roc, à partir d'une source cylindrique, n'est pas linéaire,
- la possibilité de réflexions multiples et de superposition d'ondes capables de générer des contraintes en traction élevées à une frontière réfléchissante, ce qui requiert des

ondes de courte durée, n'est pas appuyée par les résultats des tests effectués **grandeur nature**,

- on n'a pas trouvé que les ondes de cisaillement constituaient un facteur significatif lors des contrôles des tirs **grandeur nature**,
- les vitesses initiales du front plastique et de déplacement de la paroi de trou de mine sont de beaucoup plus basses que les vitesses des ondes,
- l'**Approche macro de la Mécanique de la fissuration des roches** a un long chemin à parcourir avant qu'on puisse l'utiliser pour modéliser l'abattage des roches à l'explosif **grandeur nature**.

Même si nous n'acceptons que quelques-uns des facteurs ci-dessus, nous devons sérieusement songer à remettre en question notre compréhension actuelle du rôle que jouent les ondes de contrainte dans l'abattage des roches à l'explosif. Une réévaluation de données expérimentales et d'observation et une reprise de travaux expérimentaux prometteurs, tels que ceux de Hakalehto, pourraient produire de nouvelles informations de valeur. Afin d'être valides, les modèles mathématiques sophistiqués devront incorporer de façon cohérente les principes physiques et mécaniques de base exprimés ci-dessus avec les données d'observation provenant de tirs **grandeur nature** - dans la mesure où nous comprenons et appliquons ces principes de façon correcte.

3.0 - MOUVEMENT DE LA MASSE ROCHEUSE

3.1 - Accélération de la masse rocheuse:

Des tests **grandeur nature** ont été menés par Noren (1956) afin de déterminer le moment de déplacement initial et l'historique position-temps du fardeau. Les données obtenues ont fait l'objet d'analyse de la part de Johansson et Persson (1970). En effectuant des calculs à rebours avec ces données et en appliquant les principes de la mécanique newtonienne simple, nous pouvons récupérer environ $80\% \pm$ de la valeur calculée de la pression d'explosion dans le trou de mine. C'est la réponse logique car la pression des gaz est la principale force motrice sur le fardeau (masse rocheuse). Mais puisque les déplacements mesurés ont eu lieu après le détachement de la masse rocheuse, il est difficile de réconcilier les accélérations et vitesses mesurées avec le concept d'un front de fragmentation poussé par la pénétration des gaz. Les gaz se dilatent et perdent leur chaleur en penetrant, phénomène qui se produirait avant la séparation de la masse rocheuse, selon Favreau (1984) et autres. Si c'était le cas, la perte de force motrice agissant sur la masse rocheuse varierait tellement dans le **monde réel** de terrains géologiques variables que la prédition du mouvement de masse ne serait que pur hasard et non un processus précis. Alors, cette précision de prédition de la vitesse de la masse rocheuse constitue un des principaux arguments utilisés pour justifier la justesse du code de simulation d'abattage des roches à l'explosif **BLASPA** de Favreau.

3.2 - Le gaz: poussée ou pénétration ? - Mécanique:

L'étude d'images vidéo à obturateur rapide et d'images cinématographiques à haute vitesse des tirs en carrière, dans les roches sédimentaires litées horizontalement, démontrent un déplacement relativement uniforme sur toute la hauteur du front. Là où il est possible de le vérifier, nous voyons que les fragments de roche les plus près du trou de mine ont tendance à devancer ceux qui en sont les plus éloignés. Si les gaz d'explosion en dilatation avaient pénétré la masse fragmentée, comme on le suppose généralement, les fragments de roche les plus près du trou de mine devraient être soumis à une force motrice moindre, puisqu'ils sont entourés de gaz à pression élevée. En conséquence, ce sont les fragments de roche au front qui seraient soumis à la force motrice la plus élevée. De plus, les gaz perdent leur énergie plus rapidement lorsqu'ils ont pénétré la masse fragmentée et alors ils auraient moins d'énergie pour accélérer la masse rocheuse une fois celle-ci détachée.

3.3 - Résultats visibles des gaz d'explosion:

Bien qu'on ne puisse garantir que les gaz d'explosion qui s'échappent soient toujours visibles, on peut observer qu'ils s'échappent soit par des plans de faiblesses géologiques majeurs ou par d'autres plans (de faiblesse - de rupture) de position particulière. L'examen d'images vidéo à obturateur rapide et d'images cinématographiques à haute vitesse n'appuie pas la supposition courante de la pénétration des gaz. De manière générale, la fumée provenant de l'explosion empêche l'observation du mouvement de masse seulement après qu'il y ait eu un déplacement appréciable et une forte dilatation de la masse rocheuse fragmentée.

3.4 - Mouvement de masse - Résumé:

Puisque: 1. l'accélération de la masse rocheuse requiert la plus grande partie de l'énergie d'expansion des gaz, fait qui se démontre par calcul; 2. que le déplacement observé des fragments semble signifier une force motrice plus élevée près du trou de mine; et 3. que, de façon générale, les gaz d'explosion en dilatation ne sont pas visibles lors du détachement de la masse rocheuse ni pendant un temps assez long par la suite, nous pouvons remettre en question le concept de pénétration des gaz.

4.0 - GRANULOMÉTRIE DES FRAGMENTS

4.1 - Les fines - quelle quantité ?:

La distribution des fragments selon leur grosseur constitue un domaine où la théorie et les mathématiques ont largement délaissé la réalité. Ceci dérangerait peut-être les adeptes du modèle universel **KUZ-RAM**, mais même son auteur admet que le modèle comporte des faiblesses en ce qui concerne l'extrémité fine de la courbe granulométrique. Cette extrémité de la courbe, comprenant les **particules de moins de 1 mm**, semble tout d'abord ne pas avoir beaucoup d'importance jusqu'à ce qu'on se rende compte que cette fraction de particules contribue habituellement de 5 à 10% \pm de la quantité totale de roche abattue en carrière et jusqu'à 15% et plus pour celle en tunnel. Enfin, environ 80% \pm de la nouvelle surface générée par l'abattage des roches à l'explosif se situe dans cette fraction (Comeau, 1993).

Ces informations semblent avoir été ignorées surtout à cause de: l'inexistence de courbes précises de distribution granulométrique **grandeur nature** établies à partir de pierre abattue et, à cause d'une trop grande confiance mise dans les résultats de tests à échelle réduite en laboratoire. La mention de la grande quantité de fines présente est étrangement absente de tests en laboratoire, comme l'a déduit l'auteur en se basant sur des travaux de Kristiansson (1990). Les études les plus récentes menées par l'**USBM** (Stagg, 1995) ont confirmé que l'on retrouve bel et bien une grande quantité de fines parmi les pierres de carrière abattues **grandeur nature**. L'importance de ce résultat pour l'aspect théorique de l'abattage des roches à l'explosif, pour la distribution de l'énergie explosive et pour la prédition de la distribution granulométrique attend d'être trouvée par la majorité des chercheurs.

4.2 - Provenance des fines -vs- Théorie:

La question à savoir d'où proviennent les fines est d'importance capitale pour l'acquisition de la théorie de l'abattage des roches à l'explosif. Un examen sommaire d'un front de taille nous permet de constater que l'image typique et universellement présentée des effets d'une explosion autour d'un trou de mine, image provenant le plus souvent de Johansson et Persson (1970), présente des contradictions évidentes. Ce n'est pas l'existence ou non d'une zone broyée autour du trou de mine qu'on cherche à déterminer mais plutôt ses dimensions. Cependant, il existe de nombreux exemples en réalité où il n'y a pas de zone broyée autour du trou de mine, ce qui nous pousse à poser la question suivante - **Pourquoi?**

Une analyse géométrique simple de la quantité de fines reliée à la dimension radiale d'un secteur cylindrique, ce dernier étant défini par un angle d'arrachement typique (voir Noren, 1956) et un rayon égal à la dimension du fardeau, est donné par:

$$r = B \times 10.705 \sqrt{\frac{K \times FF}{\theta}}$$

où: r = dimension radiale
 B = dimension du fardeau
 K = facteur d'espacement
 FF = fraction de fines
 θ = angle d'arrachement ($^{\circ}$)

Le volume que représentent les quantités (de $< 1\text{mm}$) mentionnées en 4.1, en relation avec le fardeau (où $B = 5$ et $\theta = 105$ degrés), fournit une dimension radiale variant de $0,237B$ (5% de fines) à $0,41B$ (15% de fines). L'on ne tient pas compte du volume du trou de mine qui est d'environ 0,1% du volume total. Une certaine quantité de fines pourrait provenir de granulation sur des surfaces de rupture ou de collisions entre blocs lorsque la masse fragmentée se dépose au sol, mais ceci n'est pas évident lorsqu'on examine des roches abattues à l'explosif. Donc, il est peu probable que ces derniers mécanismes puissent produire une quantité significative de fines. Il manque aussi des preuves visibles sur les fronts de taille de l'existence de zones broyées autour des trous de mine, de $0,126B$ à $0,219B$ (en supposant un broyage radial uniforme). La provenance de cette quantité de fines a un impact significatif

sur la manière d'établir le processus de fragmentation. La figure 3 illustre les conséquences géométriques de la quantité de fines dans les débris de tirs.

4.3 - Granulométrie - Résumé:

La détermination de la quantité réelle de fines générées lors de l'abattage des roches, la source de ces fines et la manière dont elles sont produites, là sont des questions qui doivent être résolues avant qu'on puisse établir une vision correcte des mécanismes de l'abattage des roches à l'explosif. La mise au point d'équations dont le but est de prédire la distribution granulométrique des fragments lors de l'abattage des roches devra découler d'une connaissance exacte des mécanismes en question. Des informations récentes et moins récentes concernant la distribution granulométrique de la roche fragmentée à l'explosif **grandeur nature** remettent en question les théories actuelles de fragmentation de même que les équations de granulométrie des fragments.

5.0 - VIBRATIONS

5.1 - L'approche classique courante:

Les vibrations font partie intégrante de l'abattage des roches à l'explosif et ont fait l'objet de nombreuses études. Malheureusement, on a accordé trop d'importance à l'analyse statistique des données, ce qui n'a fait qu'enterrer les informations qu'on aurait pu en retirer. Comeau (1977) a proposé une approche d'énergie cinétique pour l'analyse et la prédiction de la vitesse particulière résultante de pointe des vibrations dues à l'abattage des roches à l'explosif. Le coefficient dans l'équation proposée représente un facteur de transmission d'énergie ainsi qu'un outil de diagnostic pour les résultats d'abattage, plutôt qu'une simple valeur d'intersection de la courbe de régression avec l'axe unitaire qui n'a aucune signification physique. Cette équation proposée par l'auteur, semblable à celle utilisée dans la méthode d'analyse statistique classique, a malheureusement été mal comprise. Malgré une utilisation de prédiction et de diagnostic réussie par l'auteur depuis plus de trente ans, cette méthode n'a pas été retenue comme une approche alternative valide et utile.

On retrouve des concepts incohérents dans la bibliographie traitant des **véritables** mécanismes de génération et d'évaluation de la zone non-linéaire autour du trou de mine (Favreau, 1992, Reamer, 1992). Comeau (1994) vient de présenter une compréhension qualitative détaillée et cohérente des mécanismes de génération des vibrations lors de l'abattage des roches (figure 4.). Jusqu'à présent, les développements mathématiques nécessaires pour prêter de la crédibilité à cette approche n'ont pas été entamés. Il est souhaité que d'autres s'intéresseront à poursuivre des travaux dans cette voie prometteuse.

5.2 - Observations réelles et théoriques:

Des mesures et des analyses de vibrations ont fourni les observations suivantes, généralement acceptées, logiques et théoriquement compatibles les unes avec les autres:

1. une augmentation du **Facteur Poudre** entraîne des vitesses de particule résultantes plus basses par poids d'explosif par retard,

2. les vibrations ne sont pas générées de façon uniforme le long de la charge d'explosifs dans un trou de mine,
3. à des distances de plus de une ou deux longueurs d'onde de la source, les ondes de corps portent moins de 10% de l'énergie vibrationnelle élastique,
4. il ne semble pas y avoir d'axe dominant de vibration quel que soit l'environnement d'abattage des roches,
5. l'abattage des roches peut être représenté essentiellement par un impact en surface d'un corps semi-infini qui résulte en une déformation de ladite surface qui génère, en majorité, des ondes de surface élastiques qui se propagent d'une façon plus ou moins homogène,
6. les effets inertiels sont d'importance pour la génération de vibrations d'abattage des roches,
7. on peut générer des fréquences plus élevées à la source lorsque la charge d'explosifs est dans sa forme la plus compacte,
8. les vibrations élastiques ne comptent que pour un faible pourcentage de l'énergie explosive, tout au plus, dans les pires cas,
9. la rapport entre la longueur d'onde des vibrations élastiques et la dimension des caractéristiques géologiques et physiques qu'elles rencontrent en se propageant est d'importance en ce qui concerne leur propagation et leur réflexion.

Ces observations théoriques et pratiques sur les vibrations de tirs influencent de façon prédominante notre compréhension des mécanismes de l'abattage des roches à l'explosif. Alors qu'un bon nombre des arguments cités pourront sembler évidents aux yeux des initiés, d'autres sembleront soit plutôt controversés, soit appuyés par trop peu de preuves, ou bien les deux. Néanmoins, d'après l'auteur, il est possible de démontrer que ces arguments constituent un ensemble cohérent. Si c'est le cas, alors plusieurs concepts auparavant tenus pour vrais sont remis en question. Par exemple, le fait que le **Facteur Poudre** influe sur les vibrations de tirs nous fait douter des concepts exprimés par certains auteurs (Berta, 1990, Favreau, 1992, Kline, 1990 et Reamer, 1992) au sujet de la génération et de l'interprétation des vibrations.

Dans son analyse, Reamer (1992) transpose du domaine des explosifs nucléaires le concept mathématique d'une zone homogène, non-linéaire (inélastique?), ayant une étendue de quelques multiples de la dimension du fardeau, créée autour d'un trou de mine en carrière. Bien que cela puisse donner des résultats crédibles avec les explosifs nucléaires, dans notre domaine, ce concept ne tient pas compte du fait qu'il implique un effet cumulatif sur la transmission réelle des ondes, **grandeur nature**, lors du tir des rangées successives des trous de mine. La valeur théorique de la vitesse de l'onde P utilisée par Reamer dans son analyse nous paraît suspecte. Les observations de l'auteur de **Tests de cratère** menés par C. W. Livingston en 1964 suggèrent que le caractère non-linéaire qui s'étend, **grandeur nature**,

autour d'un trou de mine constitue un phénomène singulier (ouverture d'un joint/diaclase ou l'extension d'une fracture) plutôt qu'un homogène. Une étendue significative du phénomène non-linéaire et singulier se produit surtout en situation de sur-confinement (près de la profondeur critique d'enfouissement) - l'équivalent d'un **facteur poudre bas**.

5.3 - Vibrations - Résumé:

Il est d'une importance primordiale de connaître les mécanismes exacts de génération de vibrations de tirs afin d'arriver à produire un modèle cohérent d'abattage des roches à l'explosif. Un examen attentif des vibrations et l'analyse de données de vibration, dans un cadre pratique et théorique ainsi que détaillé et cohérent, peut fournir de précieuses informations en ce qui concerne les mécanismes de génération. La compréhension de ces mécanismes a été freinée par la surutilisation des méthodes d'analyse statistique. Plusieurs des concepts exprimés dans les communications techniques courantes sont incompatibles avec un ensemble cohérent d'arguments théoriques et d'observation.

Les ondes de surface sont dominantes dans les vibrations élastiques émanant des processus d'abattage des roches à l'explosif. L'auteur croit que dans un milieu géologique semi-infini, rigide, jointé/diaclasé et friable, ces ondes peuvent se propager d'une façon homogène selon les trois axes orthogonales. La **vitesse particulière résultante** est par conséquence la seule mesure réelle et complète de l'énergie de vibration élastique se propageant d'une source d'impact en surface d'un corps semi-infini.

6.0 - CONCLUSION

6.1 - Importance de l'échelle:

Le lecteur aura sans doute remarqué l'emphase répétée placée sur les mots '**grandeur nature**' dans le présent texte. L'emploi de modèles à échelle réduite repose sur une connaissance a priori correcte des principes physiques en cause ou bien une connaissance de ces principes au coefficient 'empirique' le plus près. L'utilisation de modèles physiques à échelle réduite afin de résoudre des problèmes d'hydraulique est bien connue (Vennard, 1961). Dans le cas de situations complexes, ces modèles fournissent une approximation utile des résultats qui, selon la plupart des experts en hydraulique, est plus ou moins validée par le prototype.

Beaucoup de la recherche sur les tirs et sur l'abattage des roches à l'explosif a été accomplie à l'échelle du laboratoire. A partir de comparaisons entre des résultats d'abattage des roches **grandeur nature** et ceux en laboratoire (Kristianson, 1990), il est douteux que des tests autres que ceux en **grandeur nature** constituent une méthode fiable pour les études sur l'abattage des roches à l'explosif. Une réduction d'échelle requiert une similarité de dimensions entre le modèle et le prototype. Bien que cette situation puisse être obtenue en ce qui concerne les relations entre l'inertie et la pression (nombres d'**Euler** sans unités), les relations entre l'inertie et la pesanteur (nombres de **Froude** sans unités) ainsi que celles entre l'inertie et l'élasticité - résistance mécanique (nombres de **Cauchy** sans unités) sont plus complexes.

La compréhension des principes physiques fondamentaux est essentielle si l'on veut s'assurer de l'utilité de l'expérimentation avec des modèles à échelle réduite dans la recherche sur l'abattage des roches à l'explosif. La pléthore de théories d'abattage des roches (Chiapetta, 1987) et les nombreuses questions soulevées dans cette communication au sujet de notre compréhension de la physique et de la mécanique des transferts d'énergie semblent indiquer que ces connaissances fondamentales n'existent pas à l'heure actuelle.

6.2 - Une nouvelle théorie de l'abattage des roches à l'explosif (NOR-HAK):

En guise de conclusion, je souhaiterais proposer une nouvelle théorie de l'abattage des roches à l'explosif. Cette théorie a été mise au point en tenant compte de: **ma compréhension de la physique et de la mécanique de l'abattage des roches additionnées des observations de TIRS GRANDEUR NATURE.**

On peut décrire la présente théorie en faisant le lien entre les processus et les quatre moments bien établis pour le processus de rupture, T-1. à T-4. de Chiapetta (1987).

T-1 La détonation:

Il y a peu de controverse à cette étape-ci (sauf parmi les thermo-hydrodynamicistes), et la théorie NOR-HAK admet un développement de la pression des gaz quasi instantané dans le trou de mine. Cette pression vaut environ la moitié de la pression de détonation dans les trous de mine bien remplis. Que le roc dans le trou de mine puisse en fait sentir la pression de détonation est une constatation un peu controversée. Je crois que l'énergie de pression de détonation est directionnelle (axiale), de courte durée et consommée surtout par le maintien de la détonation en état d'équilibre (vitesse stable). Puisque les roches possèdent une capacité limitée de transmission des ondes de contrainte, l'argument devient théorique pour la théorie NOR-HAK.

T-2 Génération-propagation de l'onde de contrainte et détachement de la masse:

C'est à ce stade des événements de rupture que la théorie NOR-HAK diverge sensiblement des théories courantes dynamiques et statique-dynamique combinées. Ceci repose sur la preuve, fournie dans cette communication, démontrant que les ondes de contrainte ont une capacité très limitée pour endommager les roches. Bien entendu, les ondes de contrainte feront les dommages qu'elles pourront mais elles perdront leur énergie en conséquence et elles s'atténueront rapidement en deçà de la résistance mécanique de la roche. La tâche principale des ondes de contrainte est d'annoncer la présence d'un front d'attaque aux événements de rupture quasi statiques qui se produisent autour du trou de mine. Ceci prépare le détachement de la masse rocheuse qui est encore relativement intacte et non fragmentée (par les explosifs). Le moment où le détachement a lieu, par rapport au moment de l'allumage, (pour une rupture choc-fragile) peut être prédit de façon assez précise grâce à l'équation suivante, ne contenant que des caractéristiques physiques faciles à déterminer.

$$t = \frac{2 \times B}{C_p} + \frac{B}{\cos \frac{\theta}{2} \times C_r}$$

où: t = temps écoulé à partir de la détonation de l'explosif jusqu'au début du déplacement de la masse rocheuse.

B = dimension du fardeau (distance au front d'attaque le plus proche),

C_p = vitesse de l'onde P de la roche,

θ = angle de secteur arraché sur un front d'attaque,

C_r = vitesse de l'onde Raleigh de la roche.

Cette équation a été mise au point à partir des travaux de Noren et de Beniawski ainsi qu'avec un peu de fortune et elle demeure non vérifiée pour le cas général. Certains facteurs de correction devraient y être inclus qui traitent du développement de la zone plastique autour du trou de mine. De plus, les facteurs qui contrôlent l'angle d'arrachement ont besoin d'études plus approfondies. La force responsable du détachement de la masse rocheuse le long d'un plan de rupture en cisaillement, ce dernier étant déterminé par l'angle d'arrachement, provient de la pression des gaz dans le trou de mine. La dilatation des gaz et en conséquence la diminution de leur pression ne sont significatives qu'après le détachement de la masse rocheuse.

T-3 Expansion initiale des gaz:

Au moment du détachement de la masse rocheuse, la force d'accélération est équivalente au produit entre la pression des gaz dans le trou de mine et l'aire projetée de la zone plastique autour du trou de mine au moment du détachement. Dans cette situation, il est évident que la masse rocheuse étant encore relativement non-fragmentée, en forme de coin, reçoit une très forte poussée au petit bout. Des effets inertIELS entrent en jeu (Zukas, 1982) et établissent un champ de contrainte quasi statique dans la masse détachée en accélération. Les contraintes y sont distribuées linéairement. Au début, la valeur pourra être de plusieurs fois la résistance UCS au petit bout du coin et d'environ la moitié de l'UCS au front d'attaque habituel.

Les fissures avancent à la vitesse Raleigh et l'écrasement intense au petit bout du coin génère la grande quantité de fines - fait tout récemment découvert dans les tirs en carrière **grandeur nature**. Ceci a pour effet d'accroître la zone plastique, et d'augmenter le gradient de contrainte entre la nouvelle limite de

la zone plastique et le front d'attaque. Si on se fie aux quantités de fines rapportées dans la documentation (Comeau, 1993, Kristianson, 1990, Stagg, 1995), la limite de la zone plastique se situerait, à sa position finale, à environ 20% à 40% de la dimension du fardeau. La pression des gaz demeure toujours assez élevée au début du déplacement. En l'intervalle de temps requis pour que la fragmentation complète atteigne le front d'attaque, l'avancement de la masse n'aura été que d'environ un-demi de un pourcent de la dimension du fardeau, ou d'environ 15% du diamètre du trou de mine. La masse, qui est présentement fragmentée, poursuit son accélération de manière plus ou moins cohérente. Les gaz en expansion poussent sur la masse fragmentée, au lieu de la pénétrer, à cause de l'effet colmatage des fines.

T-4 Mouvement de masse:

Pendant que les gaz complètent leur expansion jusqu'à la pression ultime dite 'utile' de 1000 atmosphères, les fragments de roches divergent alors que l'énergie élastique emmagasinée est libérée, et les fines sont expulsées dans les espaces entre les fragments de roches. Les fragments les plus rapprochés du trou de mine peuvent profiter davantage de l'énergie d'expansion lors du processus d'extrusion, et ils pourront être projetés avec plus de force que les fragments moins rapprochés du trou de mine. La masse détachée et fragmentée se pose enfin par terre, ce qui termine le processus de fragmentation d'une façon mineure. L'observation visuelle de tirs et le calcul à rebours de l'énergie nécessaire à l'établissement de la vitesse moyenne mesurée de la masse suggère fortement que les gaz en expansion ne pénètrent pas la masse de roche fragmentée qu'après un temps appréciable suivant la fin du processus majeur de fragmentation.

6.3 - Équation complète pour la détermination du fardeau:

Il est possible, en se basant sur la théorie NOR-HAK, d'établir une équation simple qui relierait la dimension du fardeau: à la résistance de la roche, aux caractéristiques de la masse rocheuse, au VOD d'explosion, à la densité des explosifs, au couplage explosif (remplissage du trou de mine) et à l'angle d'arrachement. Cette équation aurait l'apparence suivante:

$$B = \frac{\rho_e VOD^2 K_b \Phi_b K_r}{8 \times 10^6 UCS \tan \frac{\theta}{2}} \left(\left(\frac{l_e}{l_b} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\Phi_e}{\Phi_b} \right)^{2.6}$$

où:

B = dimension du fardeau (m),

ρ_e = densité des explosifs (kg/m^3),

VOD = vitesse de détonation de l'explosif (m/s),

K_b	=	facteur sans unité du trou de mine relié au diamètre de la zone broyée-plastique (> 1),
ϕ_b	=	diamètre du trou de mine (m),
ϕ_e	=	diamètre de l'explosif (m),
K_r	=	facteur sans unité de la roche relié à sa densité et à d'autres caractéristiques géologiques,
UCS	=	résistance en compression de la roche intacte et non-confinée (MPa),
θ	=	angle d'arrachement,
l_b	=	longueur du trou de mine moins la longueur du bourrage (m),
l_e	=	longueur de l'explosif (m).

Les principes de base de la théorie **NOR-HAK** sont (figure 5.):

1. **Les ondes de contrainte possèdent une capacité limitée pour causer des dommages à cause des propriétés dynamiques de la roche. Leur rôle principal est de signaler le front d'attaque et d'établir les conditions de détachement de la masse rocheuse.**
2. **La fragmentation du roc a lieu après le détachement de la masse rocheuse en forme de coin, et est causée surtout par un champ de contraintes quasi statique mis en place par les forces opposées que sont la poussée des gaz et l'inertie de la masse rocheuse.**
3. **La pénétration des gaz dans la masse rocheuse fragmentée est pratiquement inexisteante à cause de l'effet colmateur de la grande quantité de fines.**
4. **Une fragmentation mineure résulte de l'action des ondes de contrainte et des collisions.**

Pour ce vieux mineur, il est évident que beaucoup de propriétés fondamentales de la combinaison roches-explosifs demeurent inexplorées et restent à déterminer avant qu'on puisse dire que nous savons tout ce qu'il y a à savoir au sujet de l'abattage de roches à l'explosif et que les Mythes deviennent des Réalités.

J'aimerais remercier les organisateurs de ce colloque **SEEQ** de m'avoir accordé l'occasion de poursuivre ma 'joute' interminable.

BIBLIOGRAPHIE ET REFERENCES:

- Atchison, T.C. and Tournay, W.E., 1959,
COMPARATIVE STUDIES OF EXPLOSIVES IN GRANITE, USBM Report of Investigations 5509, United States Department of the Interior, Bureau of Mines.
- Atchison, T.C., Pugliese, J.M., 1964,
COMPARATIVE STUDIES OF EXPLOSIVES IN GRANITE (Second Series of Tests), USBM RI 6434, United States Department of the Interior, Bureau of Mines.
- Bawden, W.F., 1993,
AN INTEGRATED TECHNIQUE FOR VIBRATION MONITORING ADJACENT TO A BLASTHOLE, CIM Bulletin, July-August, Montreal.
- Bell, F.G., 1983,
FUNDAMENTALS OF ENGINEERING GEOLOGY, Butterworth & Co., London.
- Berta, G., 1990,
EXPLOSIVES: AN ENGINEERING TOOL, Italesplosivi, Milano.
- Bieniawski, Z.T., 1966,
STABLE AND UNSTABLE FRACTURE PROPAGATION IN ROCK, Report of the South African Council of Scientific and Industrial Research, No. MEG 493.
- Carmichael, R.S. (Ed), 1989,
PRACTICAL HANDBOOK OF PHYSICAL PROPERTIES OF ROCKS AND MINERALS, CRC Press, Boca Raton, Fl., USA
- Chiappetta, R.F., Morhard, R.C., Borg, D.G., Sterner, V.A., 1987,
EXPLOSIVES AND ROCK BLASTING, Atlas Powder Company, Dallas, Texas, USA
- Comeau, J.W., 1977,
BLASTING AND ITS CONTROL AT HYDRO QUÉBEC, Proceedings of the 3rd Conference on Explosives and Blasting Techniques, Society of Explosives Engineers, Pittsburg, Pa., USA.
- Comeau, J.W., 1993,
LA PHYSIQUE ET LA MÉCANIQUE DES TRANSFERTS D'ÉNERGIE LORS D'ABATTAGE DES ROCHES À L'EXPLOSIF, Abattage à l'explosif-Rock Blasting, 150e Anniversaire, École des Mines D'Alès, France.
- Comeau, J.W., 1993,
GENERAL REPORT: BLASTING TECHNOLOGY, International Society for Rock Mechanics, 7th International Congress, Volume 3, A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield.

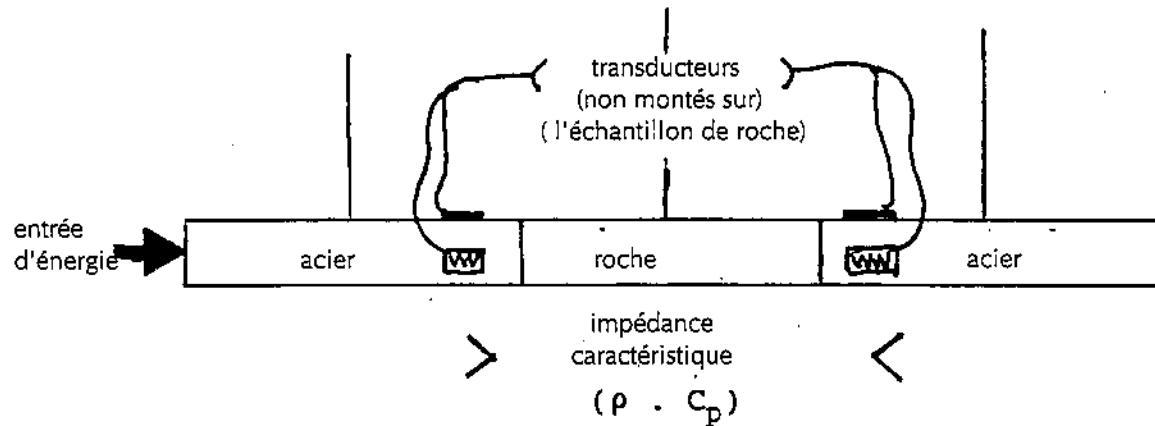
- Comeau, J.W., 1994,
HOW ELASTIC VIBRATIONS, FROM BLASTING IN ROCK, ARE GENERATED AND
WHY IT IS IMPORTANT TO YOU, Open Pit and Underground Blasting Seminar,
Queen's University, Department of Mining Engineering, Kingston, Ontario.
- Cook, M.A., 1971,
THE SCIENCE OF HIGH EXPLOSIVES, Robert E. Krieger Publishing Co. Inc.,
Huntington, N.Y.
- Cooper, H.F.Jr, Blouin, S.E., 1971,
DYNAMIC IN-SITU ROCK PROPERTIES FROM BURIED HIGH EXPLOSIVE ARRAYS,
Twelfth Symposium on Rock Mechanics, Rolla, Missouri, Society of Mining Engineers,
New York.
- Cunningham, C., 1983,
THE KUZ-RAM MODEL FOR PREDICTION OF FRAGMENTATION FROM BLASTING,
First International Symposium on ROCK FRAGMENTATION by BLASTING, Luleå,
Sweden.
- Favreau, R.F., 1969
GENERATION OF STRAIN WAVES IN ROCK BY AN EXPLOSION IN A SPHERICAL
CAVITY, Journal of Geophysical Research, Vol 74, No. 17.
- Favreau, R.F., 1984,
BLASTING SIMULATIONS - PRESENT AND FUTURE, Annual Meeting, Canadian
Institute of Mining and Metallurgy, Ottawa, April, 1984.
- Favreau, R.F., 1992,
EFFET DU GENRE DE SAUTAGE SUR LES VIBRATIONS, 15e Sessions d'Étude sur les
Techniques de Sautage, Université Laval, Québec.
- Fourney, W.L., Boade, R.R. and Costin, L.S., (Eds)., 1985,
FRAGMENTATION BY BLASTING, Society for Experimental Mechanics, Brookfield
Center, Connecticut.
- Hakalehto, K.O., 1969,
THE BEHAVIOUR OF ROCKS UNDER IMPULSE LOADS, A STUDY USING THE
HOPKINSON SPLIT BAR METHOD, Doctoral Thesis, Technical University, Otaniemi-
Helsinki, Acta Polytechnica Scandinavica, No. 81.
- Johansson, C.H. and Persson, P.A., 1970,
DETONICS OF HIGH EXPLOSIVES, Academic Press, London and New York.
- Kolsky, H., 1963,
STRESS WAVES IN SOLIDS, Dover Publications, New York.

- Kristiansen, J., Kure, K., Vestre, J., Bergquist, I., 1990,
AN INVESTIGATION OF HEAVE AND FRAGMENTATION RELATED TO EXPLOSIVE PROPERTIES, 3rd International Symposium on ROCK FRAGMENTATION by BLASTING, Brisbane, Australia.
- McClintock, F.A. and Argon, A.S., (Eds.), 1966,
MECHANICAL BEHAVIOUR OF MATERIALS, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, Mass., USA
- Menzel, D.H., 1960,
FUNDAMENTAL FORMULAS OF PHYSICS, Dover Publications, Inc., New York.
- Mutschler, TH, Natau, O., 1993,
FURTHER DEVELOPMENTS FOR THE DETERMINATION OF THE STRESS-STRAIN BEHAVIOUR OF JOINTED ROCK MASS BY LARGE SCALE TESTS, International Society for Rock Mechanics, 7th International Congress, Volume 3, A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield.
- Noren, C.H., 1956,
BLASTING EXPERIMENTS IN GRANITE ROCK, Colorado School of Mines, Quarterly, No. 51.
- Peterson, I., 1990,
ISLANDS OF TRUTH, W.H. Freeman and Co., New York.
- Reamer, S.K., Hinzen, K-G, Stump, B.W., 1992,
NEAR-SOURCE CHARACTERIZATION OF THE SEISMIC WAVEFIELD FROM QUARRY BLASTS, Geophysics, Journal of the International Society. No. 110.
- Rinehart, J.S., 1975,
STRESS TRANSIENTS IN SOLIDS, HyperDynamicS, Santa Fe, New Mexico, USA
- Stagg, M.S., Otterness, R.E., 1995,
SCREEN ANALYSIS OF FULL SCALE PRODUCTION BLASTS, Proceedings of the 11th Symposium on Explosives and Blasting Research, International Society of Explosives Engineers, Nashville, Tenn., USA.
- Vennard, J.K., 1961,
ELEMENTARY FLUID MECHANICS, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Whittaker, B.N., Singh, R.N. and Sun, G., 1992,
ROCK FRACTURE MECHANICS, PRINCIPLES, DESIGN AND APPLICATIONS, Elsevier, Amsterdam.
- Zukas, J.A., Nicholas, T.S., Hallock F., Greszczuk, L.B. and Curran, D.R., 1982,
IMPACT DYNAMICS, John Wiley & Sons, Inc., New York.

L'expérience d'Hakalehto sur la transmission des contraintes dans le roc

selon la méthode 'SPLIT HOPKINSON BAR'

(permet l'évaluation de la transmission des contraintes pour une compression pure en plan)



l'étape suivante dans la recherche 'SPLIT HOPKINSON BAR'

Transmission des contraintes dans des conditions de contraintes triaxiales

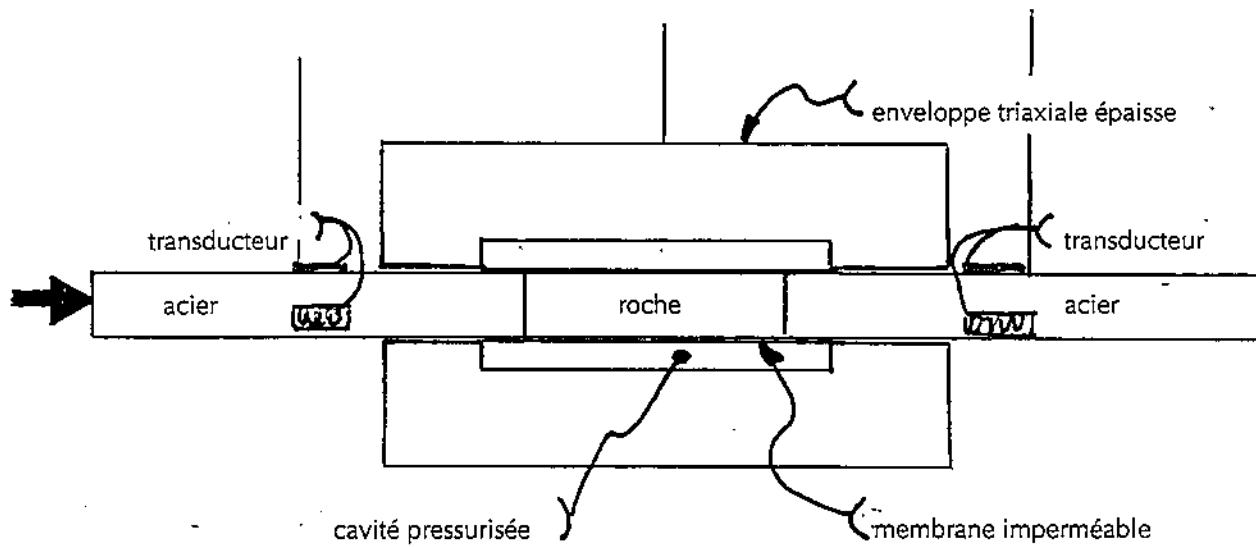


FIGURE 1. (pas d'échelle)

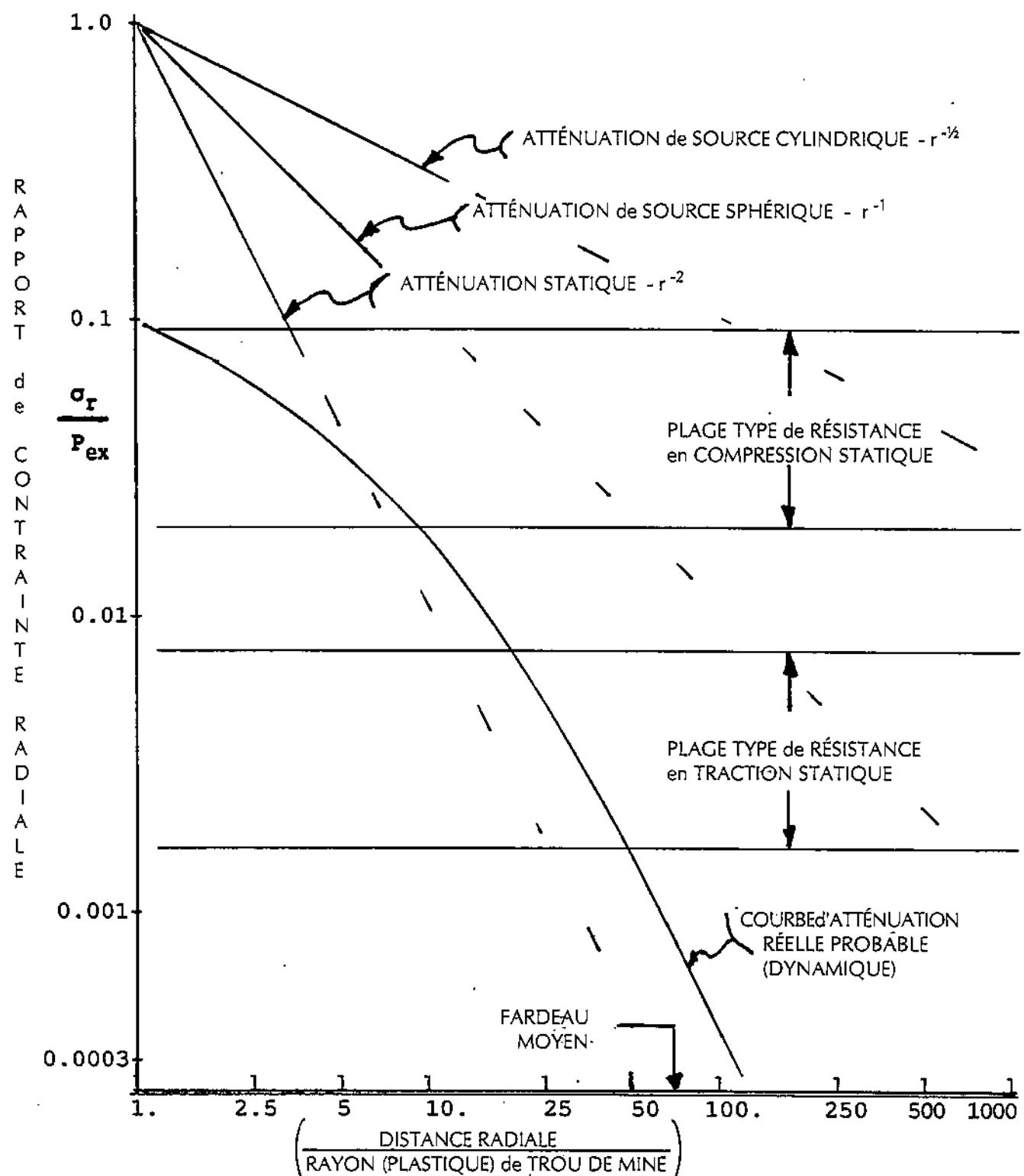
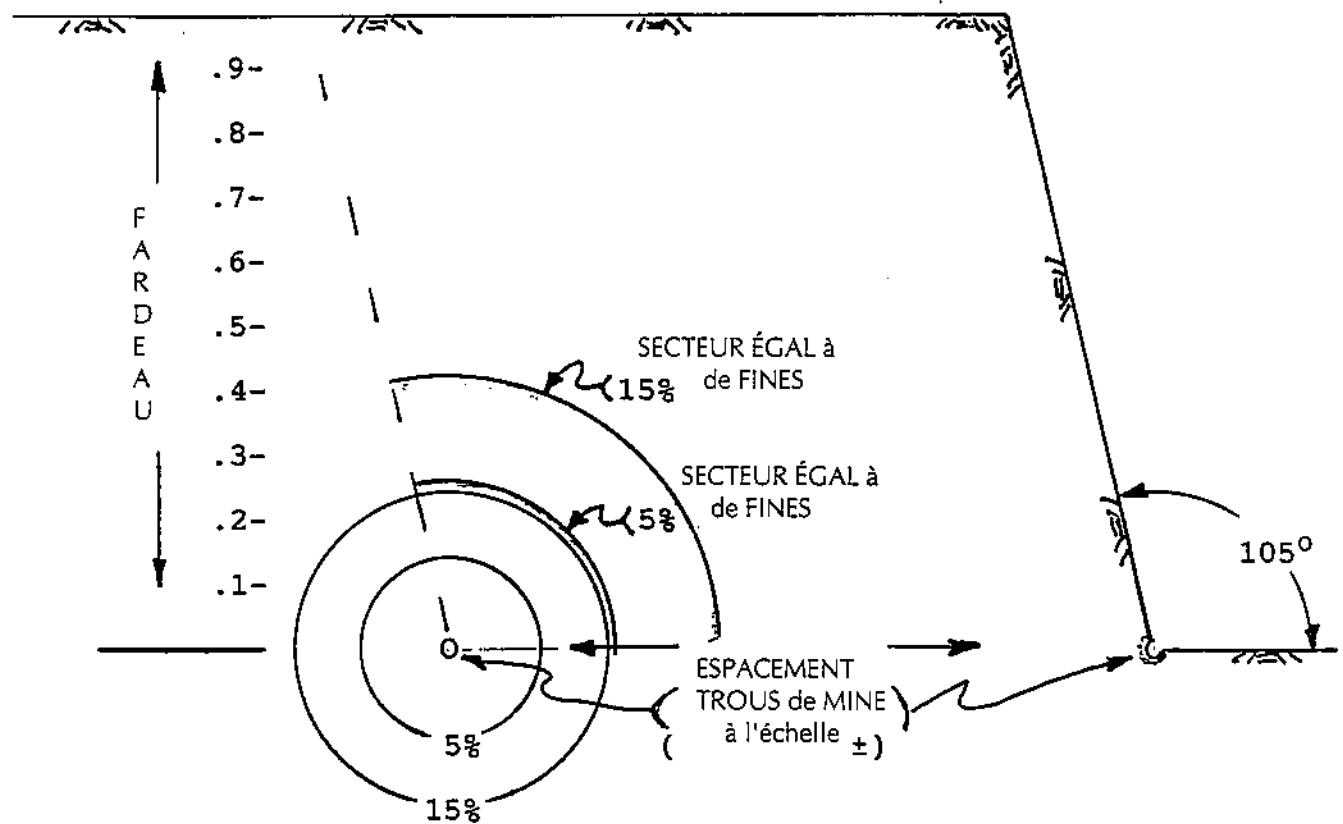


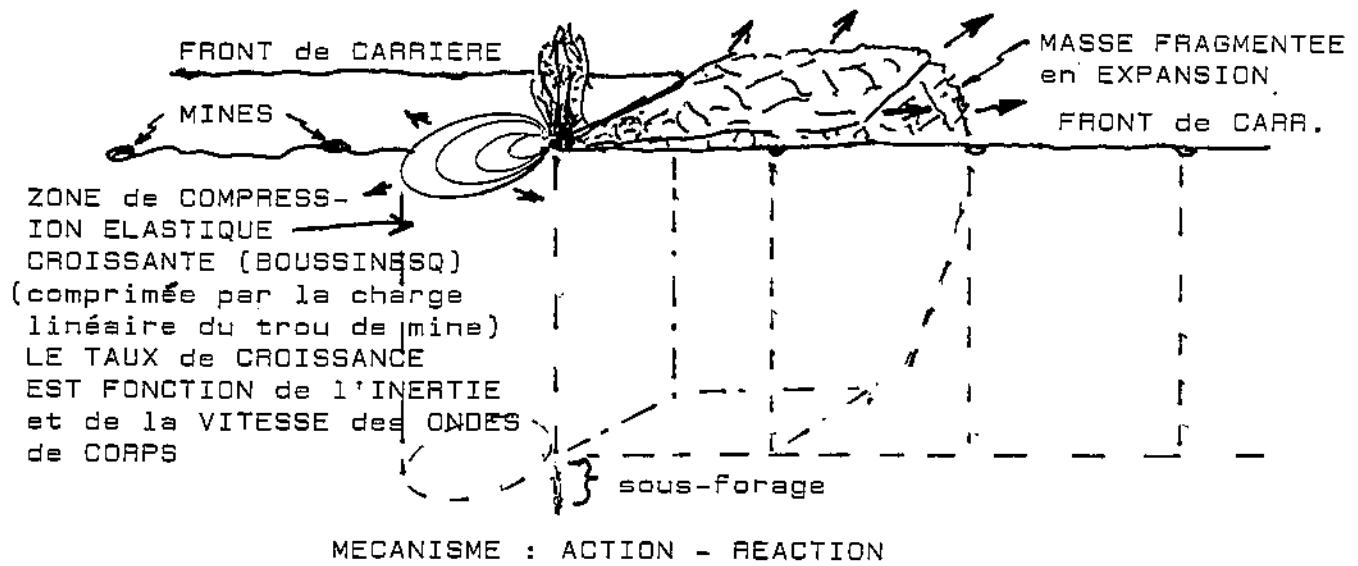
FIGURE 2.

FRONT de TAILLE (vue en plan)

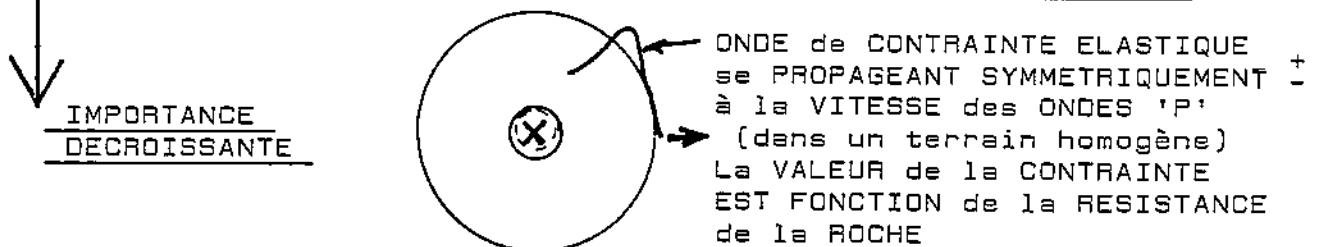


% FINES ($< 1\text{mm } \phi$) : RAPPORT avec la DIMENSION du FARDEAU

FIGURE 3.



MECANISME : DILATATION - EFFONDREMENT

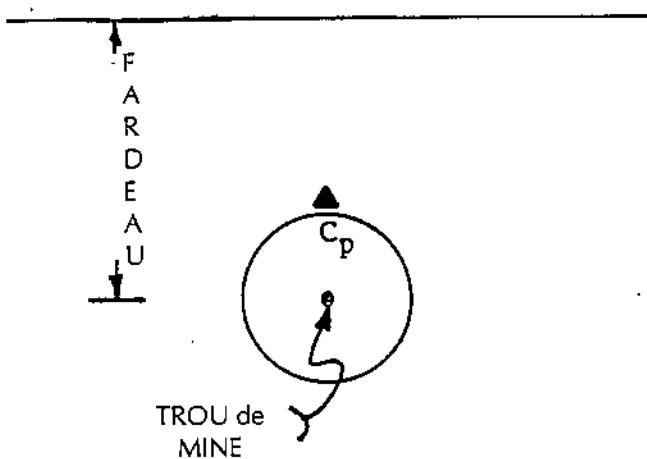


MECANISME : ONDE de CONTRAINTE (CHOC)

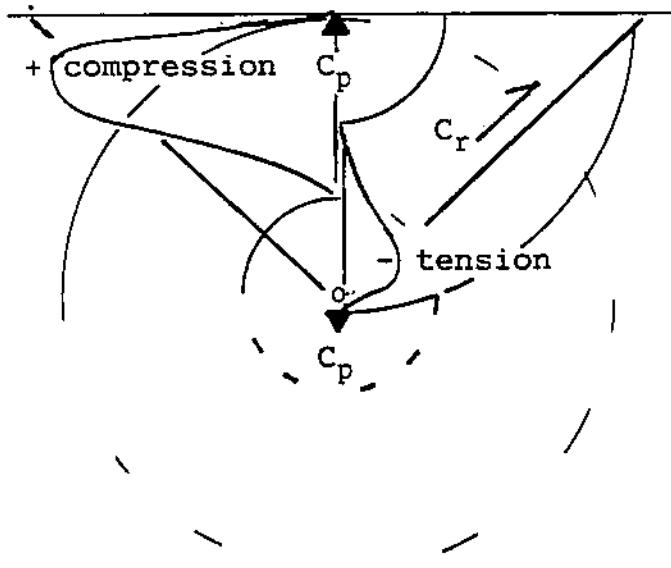
MECANISMES : THEORIQUEMENT SOURCES de VIBRATIONS de TIRS

FIGURE 4.

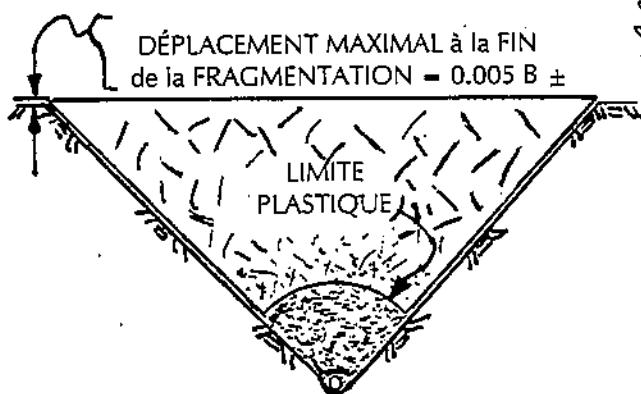
T-1. DÉTONATION et PRESSURISATION



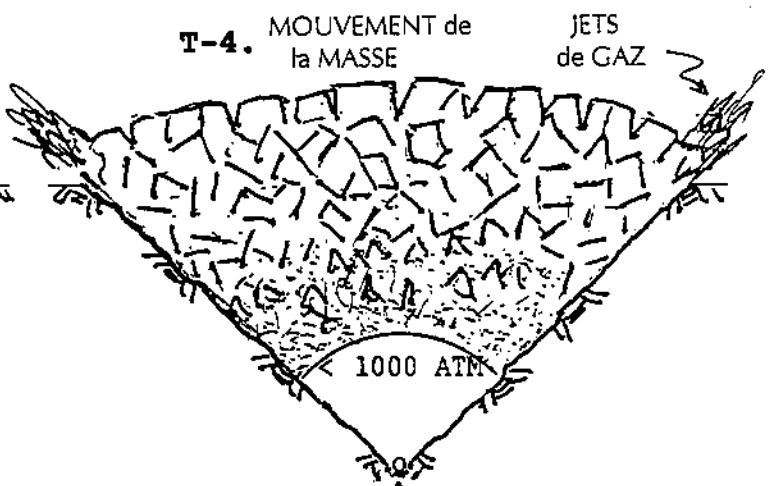
T-2. PROPAGATION des ONDES de CONTRAINTES et SÉPARATION de la MASSE ROCHEUSE



T-3. DÉTENTE des GAZ - FRAGMENTATION



T-4. MOUVEMENT de la MASSE



N.B. (les trous de mine sont à peu près à l'échelle)

SÉQUENCE des ÉVÉNEMENTS de la THÉORIE - NOR - HAK -

FIGURE 4.