

**RISQUE DE RÉSULTATS DE SAUTAGE DE MAUVAISE
QUALITÉ SI LE RESPONSABLE DES TIRS SE FIE AUX
JOINTS NATURELS DU MASSIF ROCHEUX AFIN D'OBTENIR
DE LA FRAGMENTATION 'GRATUITE'**

R. F. Favreau Ph. D., Royal Military College, Kingston

P. Favreau P. Eng., Blaspa Inc.

Pour présentation à la 34^e Session d'étude sur les techniques de sautage,
Université Laval, Québec, 17-18 novembre 2011.

Téléphone 613 541 6000 poste 6198

450 563 4587

Rogerfavreau@earthlink.net

www.Blaspa.com

RISQUE DE RÉSULTATS DE SAUTAGE DE MAUVAISE QUALITÉ SI LE RESPONSABLE DES TIRS SE FIE AUX JOINTS NATURELS DU MASSIF ROCHEUX AFIN D'OBTENIR DE LA FRAGMENTATION 'GRATUITE'

R. F. Favreau Ph. D., Royal Military College, Kingston

P. Favreau P. Eng., Blaspa Inc.

Pour présentation à la 34^e Session d'étude sur les techniques de sautage, Université Laval, Québec, 17-18 novembre 2011.

I) AVANT-PROPOS : Le but principal d'un tir à l'explosif dans le massif rocheux disons d'une carrière est de créer une bonne granulométrie et un bon déplacement du roc fragmenté. Ceci permettra un marinage efficace et des coûts de concassage faibles.

Les coûts du concassage prennent de plus en plus d'importance, car un concasseur est énergivore et les coûts de l'énergie haussent continuellement et de façon de plus en plus vertigineuse.

Dans un massif rocheux on voit une structure naturelle composée de joints ; ces joints sont des plans de faiblesse. Or, l'auteur a remarqué que plusieurs responsables des tirs se fient sur la présence de ces joints naturels dans le massif rocheux afin d'obtenir ce qu'ils appellent de la 'fragmentation gratuite'. Le but de la présentation est de démontrer que cette fragmentation prétendue 'gratuite' peut être loin d'être avantageuse.

II) EXPLICATION DE COMMENT LA FRAGMENTATION SE CRÉE LORS D'UN TIR :

Afin de démontrer rigoureusement que la fragmentation 'gratuite' due aux joints naturels n'est pas nécessairement avantageuse, on commence par un rappel des mécanismes qui se passent lors de l'excavation d'un massif rocheux à l'explosif.

Se référant à la figure 1(a), le premier mécanisme qui débute le processus de fragmentation est le suivant. Immédiatement après que la colonne

d'explosif a détoné, les gaz d'explosion imposent une expansion très rapide du volume du trou de mine, comme on le voit à la Fig. 1(a). Cette expansion brutale cesse après quelques dizaines de microsecondes, à cause de la résistance élastique du roc.

Mais néanmoins, la poussée des gaz a créée une onde de choc très intense en compression, laquelle traverse le massif rocheux à la vitesse C_r d'environ 5 000 m/sec. Cette onde étant en compression, elle ne cause que peu de dommage, car le roc est très résistant en compression.

Par contre, à son arrivée à la face libre, l'onde incidente est réfléchiée en traction (voir la Fig. 1(b)); elle rebrousse alors chemin à travers le massif rocheux, créant dans celui-ci une foule de petites fissures primaires qui affaiblissent le roc.

Or, même si l'affaiblissement du roc expliqué aux paragraphes précédent est absolument nécessaire, il ne donne pas la bonne fragmentation et granulométrie finale que l'on souhaite ; celle-ci provient d'un second mécanisme, comme l'expliquent les paragraphes suivants.

L'affaiblissement du massif rocheux dû aux ondes réfléchiées en traction permet aux gaz d'explosion de reprendre leur expansion, imposant au roc une deuxième action de fragmentation.

Celle-ci ne se produit pas partout en même temps dans le massif; plutôt, comme le montre la Fig. 1(c), elle se produit via la progression graduelle vers la face libre d'un front de contraintes semi-statiques SS, à l'arrière duquel le roc est pleinement fracturé et en avant duquel il n'est qu'affaibli par les fissures primaires.

Ainsi quand l'onde de choc réfléchiée en traction à partir de la face libre a rejoint le trou de mine, le gaz d'explosion, dont la pression est encore énorme, reprend son expansion et impose au massif un champ semi-statique de contrainte d'intensité SS. Ce champ se propage du trou vers la face, et c'est ce champ SS qui fragmente pleinement le roc déjà affaibli par l'onde de choc.

La pleine fragmentation se produit au front de fragmentation SS, comme le montre la figure 1(c), là où la pente de la courbe du champ SS est la plus raide. Par contre, à mesure que le front SS progresse du trou vers la face,

l'intensité de SS diminue. Or, afin de pleinement fragmenter le roc, il faut que la valeur de SS excède la valeur minimum SSo nécessaire à pleinement fragmenter le massif rocheux.

Ainsi, afin que l'action de l'explosif fragmente pleinement tout le roc entre le trou et la face libre, il est nécessaire que l'intensité SS excède SSo partout durant le passage du front de fragmentation entre le trou et la face. La figure 2 montre un exemple de la bonne granulométrie finale obtenue lors d'un tir pour lequel SS excède SSo partout durant le passage du front de fragmentation entre le trou et la face libre. Comme on peut le constater à partir de la figure 2, les valeurs de D20, D50 et D80 sont excellentes, soient :

$$D80=24.15 \text{ cm} \qquad D50=12.15 \text{ cm} \qquad D20=6.00 \text{ cm}$$

Où la définition de D80 est que 80 % des fragments sont de dimensions inférieures à la valeur D80 en centimètres et 20 % des fragments sont de dimensions supérieures à la valeur D80, etc. pour D50 et D20.

Par contre, si le massif rocheux a une valeur de résistance SSo plus importante que celle assumée au fig. 2, et que pour ce tir le responsable du sautage a conservé la même quantité faible d'explosif, car il se fie sur la présence des joints naturels dans le massif rocheux afin d'obtenir ce qu'ils appellent de la 'fragmentation gratuite', alors la granulométrie peut être très différente de celle de la figure 2. La section suivante présente trois exemples de résultats possibles.

III) EXEMPLES DE RÉSULTATS DE TIRS POUR LEQUEL ON SE FIE AUX JOINTS NATURELS POUR OBTENIR DE LA FRAGMENTATION 'GRATUITE' :

Exemple 1 :

Au dessin 3 le fardeau est de valeur B = à 10 pieds. Le dessin 3 montre une situation pour laquelle un front de fragmentation SS de valeur SS supérieure à SSo a progressé de la région du trou de mine jusqu'à 6 pieds vers la face libre, où l'intensité de SS a baissé à la valeur SSo. Ainsi pour le reste de sa progression vers la face libre, soit pour la région entre 6 pieds du trou jusqu'à la face sur une distance de 4 pieds, l'intensité SS du front de fragmentation était inférieure à la résistance SSo du massif rocheux.

Donc dans cette région de 4 pieds, le roc n'est pas pleinement fragmenté par l'action du champ de contrainte semi-statique SS créé par les explosifs. Ainsi dans cette région le massif rocheux ne fragmente que selon les joints naturels du massif, créant de gros blocs qui seront poussés dans la pile de roc fragmenté en avant du roc pleinement fragmenté dans les 6 pieds les plus proches du trou là où SS excédait SSo.

Pour cet exemple 1, le dessin 3 montre que l'espace entre les joints est disons de 4 pieds, ce qui produira des blocs de 4 pieds de dimension (ou 122 cms). Le dessin 4(a) montre la courbe de granulométrie pour la structure naturelle du massif dans la région de 6 pieds du trou jusqu'à la face, soit sur une distance de 4 pieds, pour le cas de l'exemple 1 où les blocs sont de 4 pieds par 4 pieds.

Le dessin 5 montre la courbe de granulométrie pour la pleine fragmentation imposée au roc par l'action du champ de contrainte semi-statique SS supérieure à SSo dans la région entre le trou et 6 pieds du trou, là où l'intensité SS excède la résistance SSo du massif rocheux.

On peut combiner les deux courbes de granulométrie des dessins 5 et 4(a), soit celle pour les 6 pieds là où SS excède SSo avec celle pour les 4 pieds là où SS est inférieure à SSo. Le résultat combiné est montré au dessin 6, à partir duquel on peut constater que la granulométrie du roc à envoyer au concasseur est très mauvaise. Il est même possible que le chargeur ne pourra pas manipuler les gros blocs, exigeant du sautage secondaire ou de la fragmentation au tramac.

Par contre, sur le dessin 7 on montre la courbe de granulométrie si le responsable des tirs ne s'était pas fié aux joints afin d'obtenir de la fragmentation 'gratuite', mais plutôt avait utilisé plus d'explosifs via un trou de diamètre de 6 pouces au lieu de 4.5 pouces, les autres paramètres de sautage étant les mêmes. Il est évident que dans ce cas la granulométrie est très satisfaisante avec $D_{80} = 13.92 \text{ cm}$ (environ 6").

Exemple 2 :

Le dessin 8 montre une situation de sautage identique à celle du dessin 3, mais pour laquelle dans la région de 4 pieds entre 6 pieds du trou et la face, là où SS est inférieur à SSo, les espaces entre les joints sont de 2 pieds pour le volume de roc qui n'est pas pleinement fragmenté.

Pour ce cas, la courbe de granulométrie pour la structure naturelle des joints est montrée au dessin 4(b), et le résultat de combiner cette courbe avec celle du dessin 5 pour le roc pleinement fragmenté dans la région de 6 pieds entre le trou et 6 pieds du trou, là où SS excède SSo, est montré au dessin 9.

À partir de ce dessin 9 on peut constater que la granulométrie du roc à envoyer au concasseur est encore très mauvaise. Il est de nouveau possible que le chargeur ne pourra pas manipuler les gros blocs, exigeant du sautage secondaire ou de la fragmentation au tramac.

Par contre, voir de nouveau sur le dessin 7 la courbe de granulométrie si le responsable des tirs ne s'était pas fié aux joints afin d'obtenir de la fragmentation 'gratuite', mais plutôt avait utilisé plus d'explosif via un trou de diamètre de 6 pouces, les autres paramètres du sautage étant les mêmes. Il est encore une fois évident que dans ce cas la granulométrie est très satisfaisante avec $D_{80} = 13.92 \text{ cm}$ (environ 6'').

Exemple 3 :

Le dessin 10 montre une situation de sautage identique à celle du dessin 3, mais pour laquelle dans la région de 4 pieds entre 6 pieds du trou et la face, là où SS est inférieur à SSo, les espaces entre les joints sont de 4 pieds pour la moitié du volume de roc qui n'est pas pleinement fragmenté, et de 2 pieds pour la moitié du volume de roc qui n'est pas pleinement fragmenté.

Pour ce cas, la courbe de granulométrie pour la structure naturelle des joints est montrée au dessin 4(c), et le résultat de combiner cette courbe avec celle du dessin 5 pour le roc pleinement fragmenté dans la région de 6 pieds entre le trou et 6 pieds du trou, là où SS excède SSo, est montré au dessin 11.

À partir de ce dessin 11 on peut constater que la granulométrie du roc à envoyer au concasseur est encore très mauvaise. Il est de nouveau possible que le chargeur ne pourra pas manipuler les gros blocs, exigeant du sautage secondaire ou de la fragmentation au tramac.

Par contre, toujours sur le dessin 7 on montre la courbe de granulométrie si le responsable des tirs ne s'était pas fié aux joints afin d'obtenir de la fragmentation 'gratuite', mais plutôt avait utilisé plus d'explosif via un trou de diamètre de 6 pouces, les autres paramètres du sautage étant les mêmes.

Il est encore une fois évident que dans ce cas la granulométrie est très satisfaisante avec $D_{80} = 13.92 \text{ cm}$ (environ $6''$).

IV) CONCLUSIONS:

Dans un nombre important de carrières et sites de construction, l'auteur a pu observer des piles de roc fragmenté à l'explosif qui présentaient un grand nombre de gros blocs de dimensions excédant l'entrée du concasseur, ou même celle du chargeur ou de la pelle.

Dans ces situations, les coûts de marinage et de concassage étaient très excessifs. Les résultats présentés aux figures 6, 9 et 11 expliquent la raison principale pourquoi ces piles de roc fragmenté présentaient un grand nombre de gros blocs de dimensions excédant l'entrée du concasseur, ou même celle du chargeur ou de la pelle.

Lors d'une étude effectuée pour une carrière spécifique, on ajoute les coûts du forage, ceux du sautage primaire, ceux du marinage, ceux du sautage secondaire ou du tramac, et ceux du concasseur. À l'aide du simulateur Blaspa, on évalue ainsi le coût unitaire du roc concassé pour divers méthodes de sautage, incluant des méthodes qui se fient sur la présence des joints naturels dans le massif rocheux afin d'obtenir ce que certains appellent de la 'fragmentation gratuite', et d'autres méthode qui ne se fient pas sur la présence des joints naturels dans le massif rocheux afin d'obtenir ce que certains appellent de la 'fragmentation gratuite'.

Le plus souvent, le coût unitaire du roc concassé est un minimum pour des méthodes qui ne se fient pas sur la présence des joints naturels dans le massif rocheux afin d'obtenir ce que certains appellent de la 'fragmentation gratuite'.

Comme les simulations avec Blaspa sont dans une première phase effectuées entièrement dans l'ordinateur, il n'y a aucun risque de mésaventure. Si un résultat prometteur est identifié, seulement alors le responsable du sautage peut décider d'en faire l'essai. On doit aussi tenir compte des projections et des vibrations ; ces études peuvent aussi évaluer l'effet du type d'explosifs utilisé.

Blaspa est le seul simulateur au monde qui soit entièrement basé sur les principes fondamentaux de la mécanique des roches et de la thermochimie des explosifs, et qui adresse essentiellement tout les aspects d'un sautage à ciel ouvert.

La fiabilité unique de Blaspa a été démontrée par 50 ans de tests en chantier. La disponibilité du simulateur de sautage Blaspa permet enfin que la façon de dessiner les tirs passe de l'art à la science. Blaspa a été développé au Québec.

Référence :

- 1) 'Étude de sautage à l'aide de simulations sur le modèle informatisé Blaspa via le Web', R. Favreau, P. Favreau, comptes-rendus de la 27^e Session d'Étude sur les Techniques du Sautage, Un. Laval, oct. 04.
- 2) 'Prédiction de la granulométrie du roc lors d'un tir à l'explosif, à partir des principes fondamentaux de la fragmentation', R. Favreau, P. Favreau, comptes-rendus de la 30^e Session d'Étude sur les Techniques du Sautage, Un. Laval, 22 et 23 novembre 2007.

Annexe A Paramètres utilisés dans la présente étude :

Méthode de tir :

Hauteur de la banquette H = 40' Sous-forage G = 10'
Patron BxS = 10' x 12' Collet C = 10'
Explosif Nitrate/huile de densité 0.85 gm/cc
Diamètre du trou = 4.5'', sauf = 6'' au dessin 7.

Le roc :

Module de Young Y = 500 Kbar Densité = 2.8 gm/cc
Coefficient de Poisson = 0.29
Résistance à l'onde de choc en traction To = 190 u. bl.
" au champs de contrainte semistatique SSo = 1.153 Kbar, sauf SSo = 0.97 Kbar au dessin 2.

Fig. 1 Mécanismes du sautage

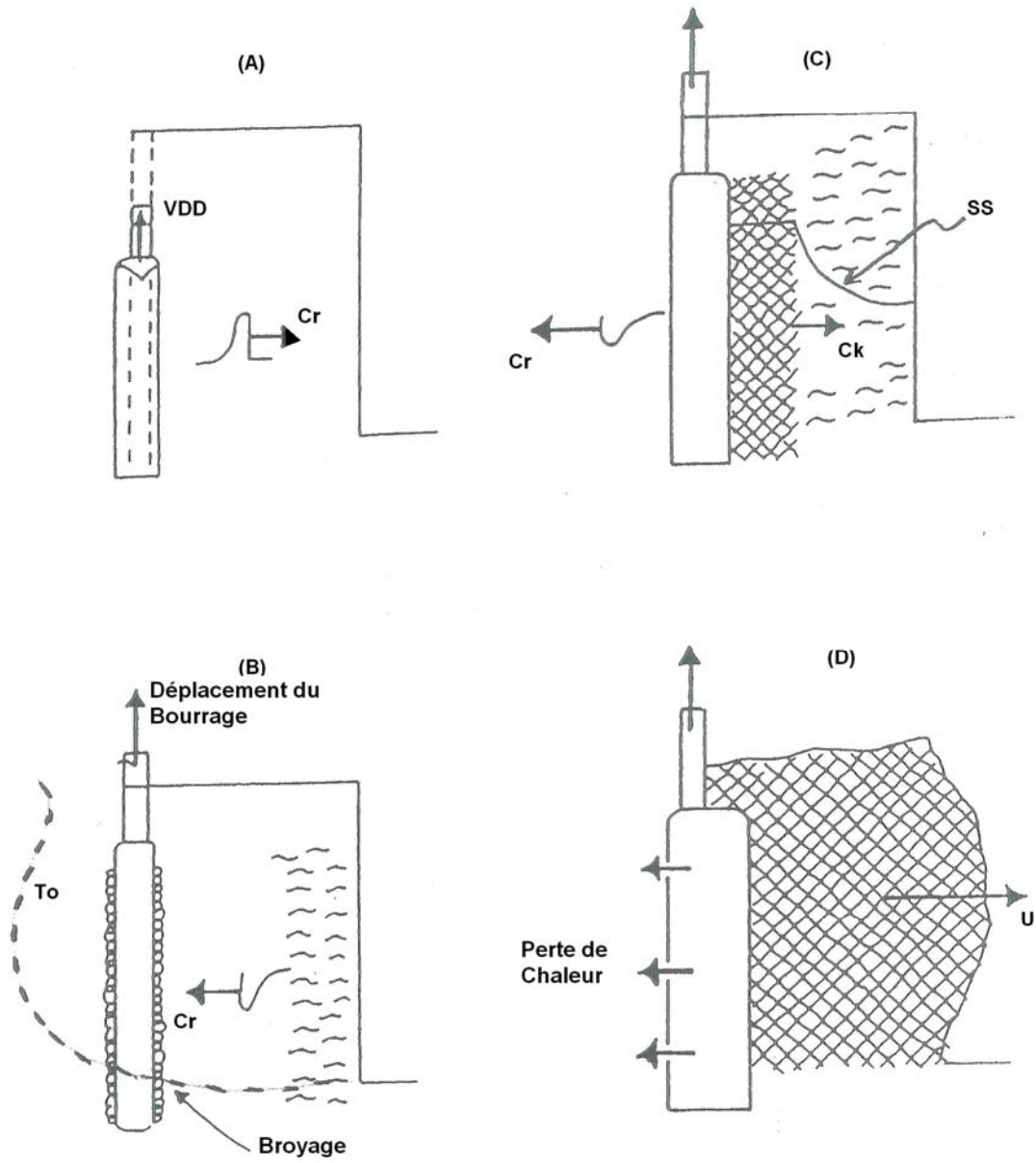
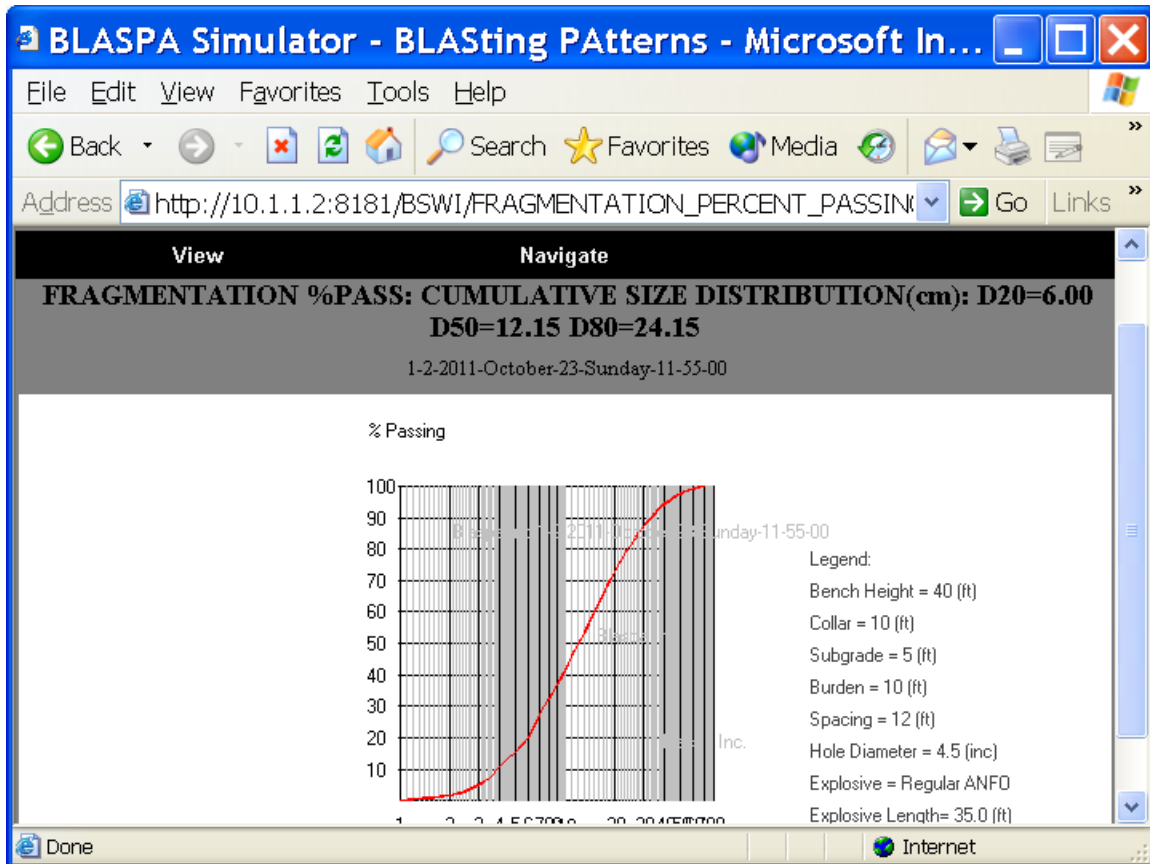


Fig. 2 Courbe de granulométrie pour la même méthode de tir que celle des courbes des dessins 6, 9, et 11, mais assumant que la valeur de SSo est inférieure à celle pour le roc des dessins 6, 9, et 11, de façon à ce qu'ici SS est supérieur à SSo partout entre le trou et la face :



Pour la situation du dessin 2, la granulométrie du roc allant au concasseur serait tout à fait satisfaisante, avec D80 = 24.15 cm (environ 10’’).

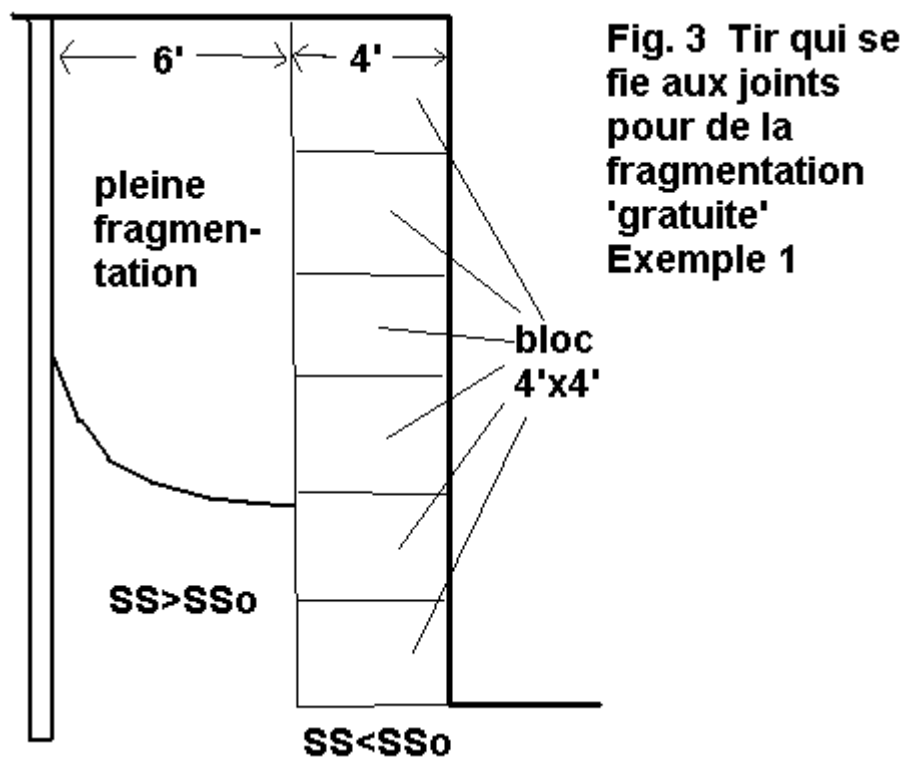


FIG. 4 Granulométrie de la structure naturelle des joints, région entre 6' du trou et la face, là ou SS est inférieur à SS_0 ; (a) Exemple 1, (b) Exemple 2, (c) Exemple 3

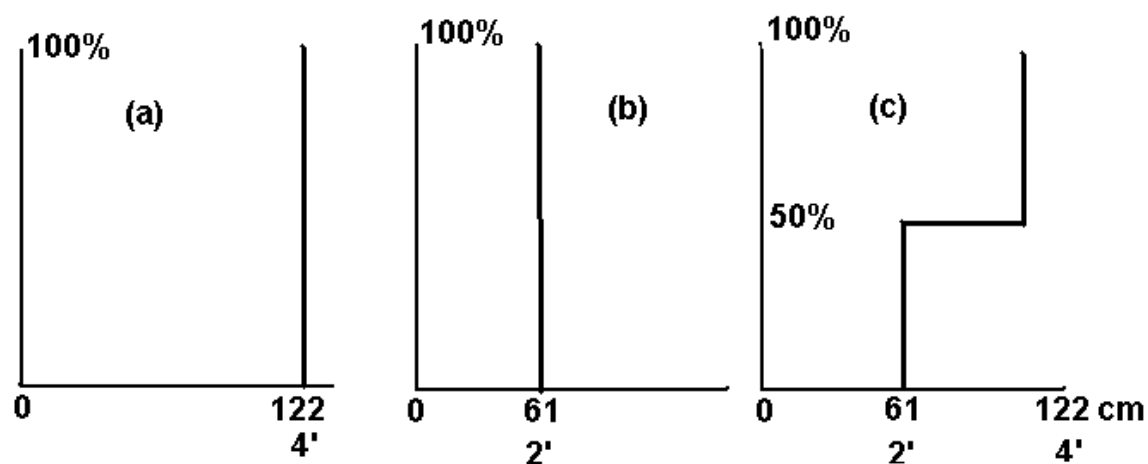
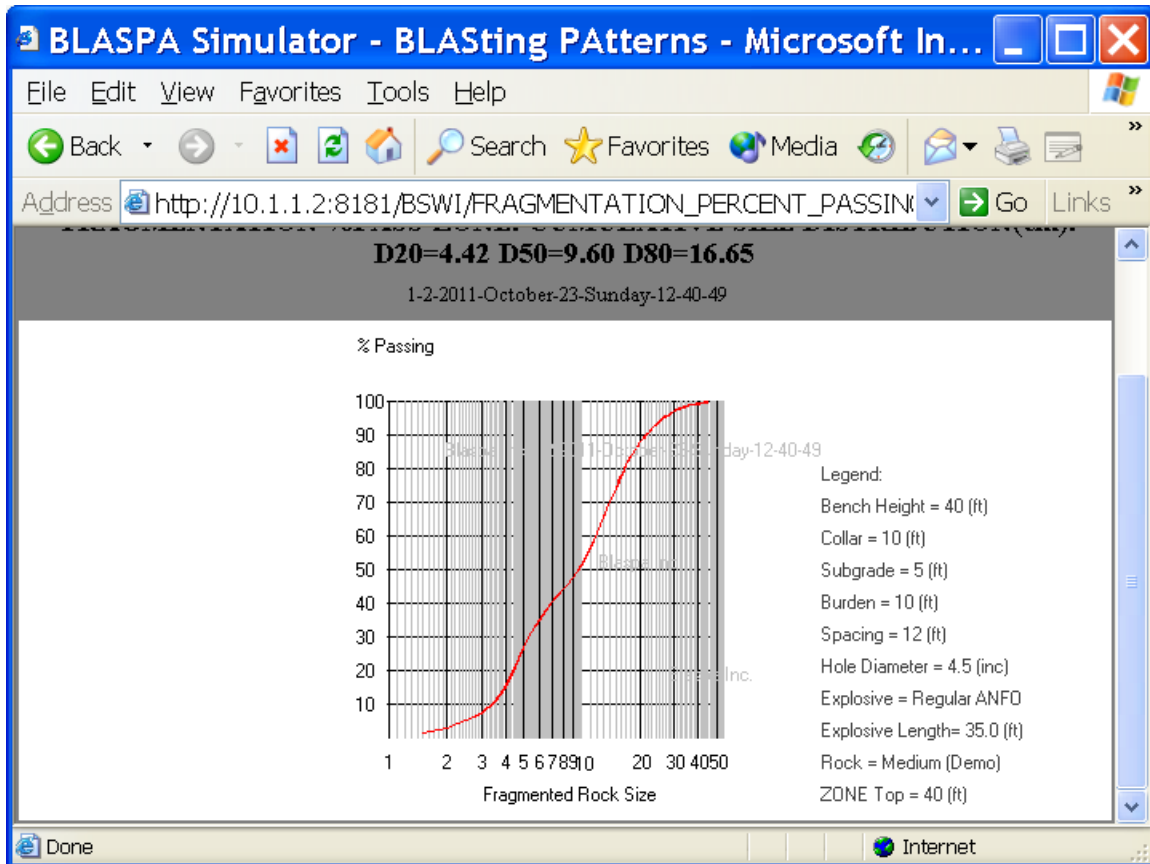


Fig. 5 Courbe de granulométrie pour la même méthode de tir et le roc de même SSo que pour les courbes des dessins 6, 9, et 11, mais uniquement pour la région entre le trou et 6' du trou, soit uniquement pour la région où SS est supérieur à SSo :



Pour la situation du dessin 5, la granulométrie du roc allant au concasseur en provenance de la région entre le trou et 6' du trou serait tout à fait satisfaisante, avec D80 = 16.65 cm (environ 7''), mais les gros blocs de 4'x4' en provenance de la région entre 6' du trou et la face seraient un problème majeur (voir le dessin 6).

Fig. 6 Granulométrie combinée des dessins 5 et 4(a), c'est à dire granulométrie du tir qui se fie sur les joints pour obtenir de la fragmentation 'gratuite' Exemple 1- gros blocs 4'x4'

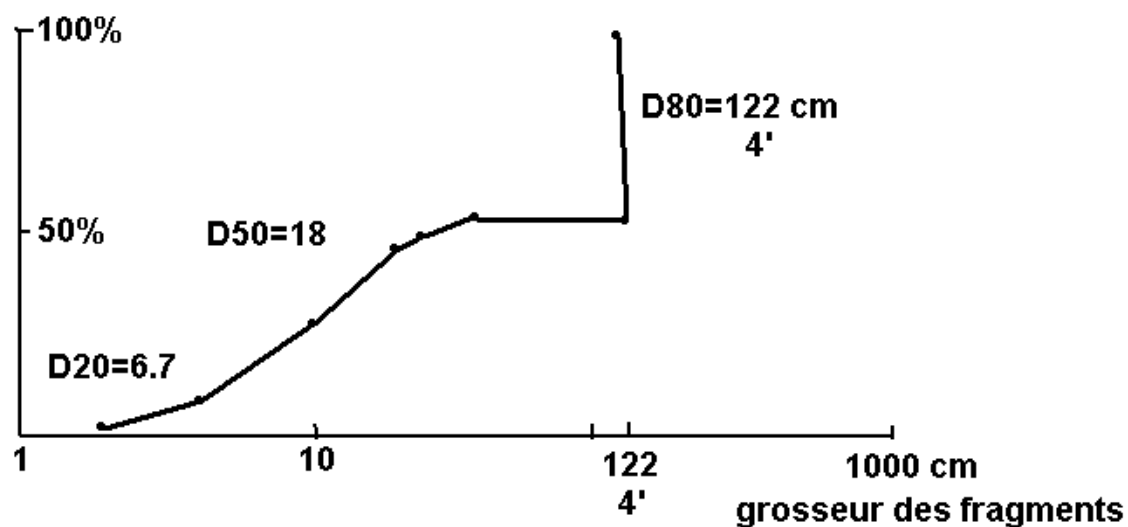
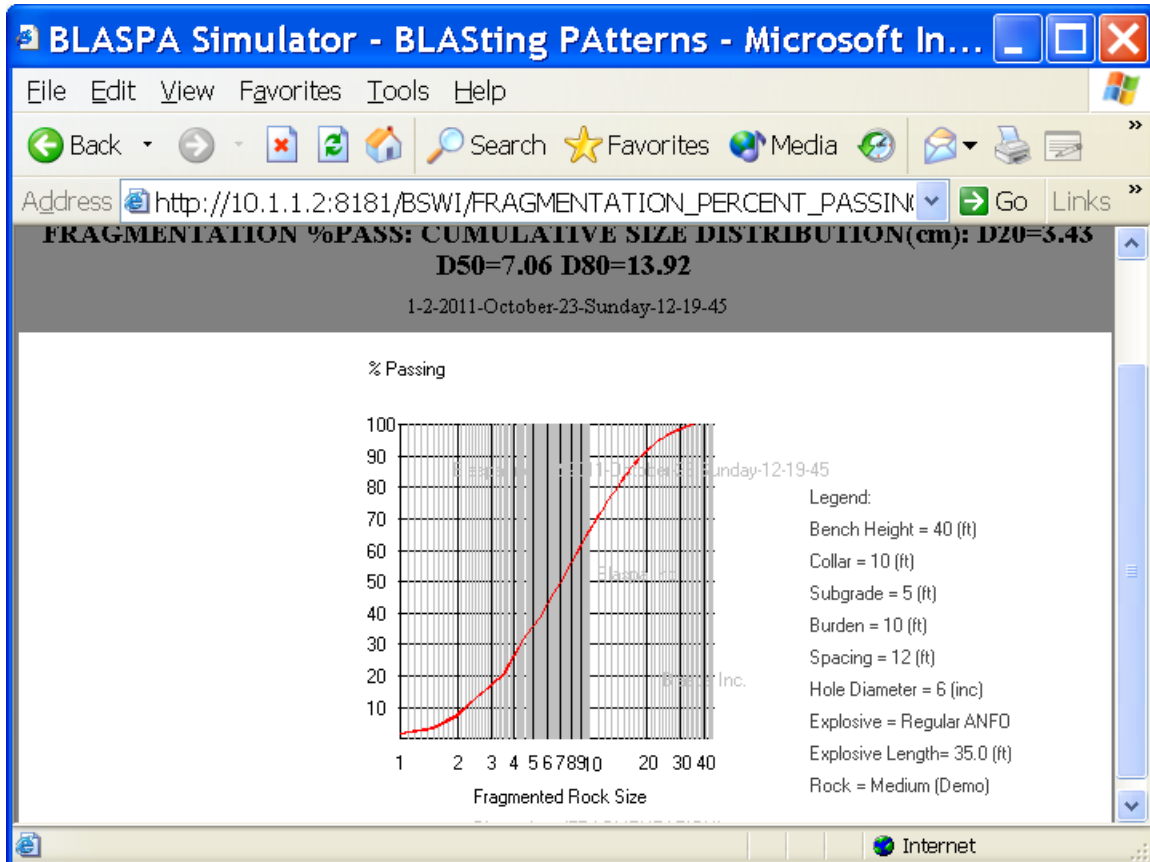


Fig. 7 Courbe de granulométrie pour la même méthode de tir et le roc de même SSo que pour les courbes des dessins 6, 9, et 11, mais si plutôt que de se fier aux joints pour obtenir de la fragmentation ‘gratuite’ le responsable du tir change le diamètre du trou de 4.5’’ à 6’’, de façon à ce que SS soit supérieur à SSo partout entre le trou et la face :



Pour la situation du dessin 7, la granulométrie du roc allant au concasseur serait tout à fait satisfaisante, avec D80 = 13.92 cm (environ 6’’).

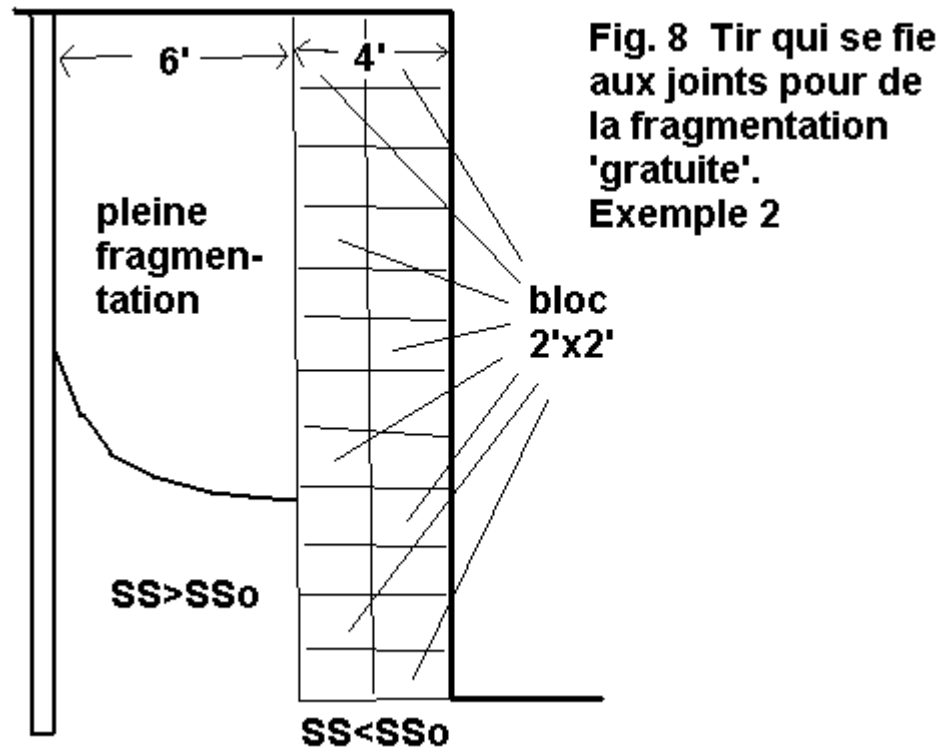
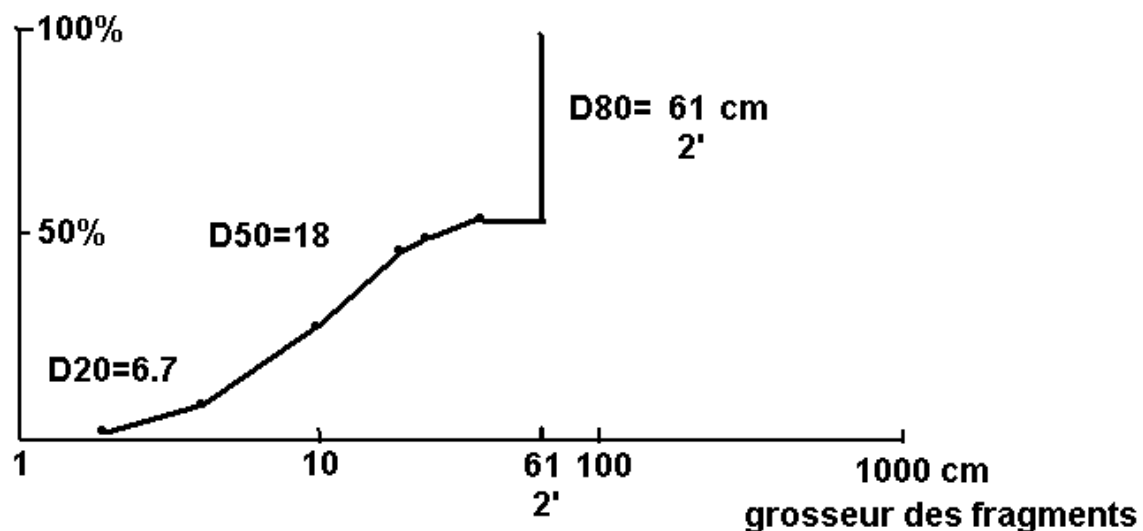


Fig. 9 Granulométrie combinée des dessins 5 et 4(b), c'est à dire granulométrie du tir qui se fie sur les joints pour obtenir de la fragmentation 'gratuite' Exemple 2 - gros blocs 2'x2'



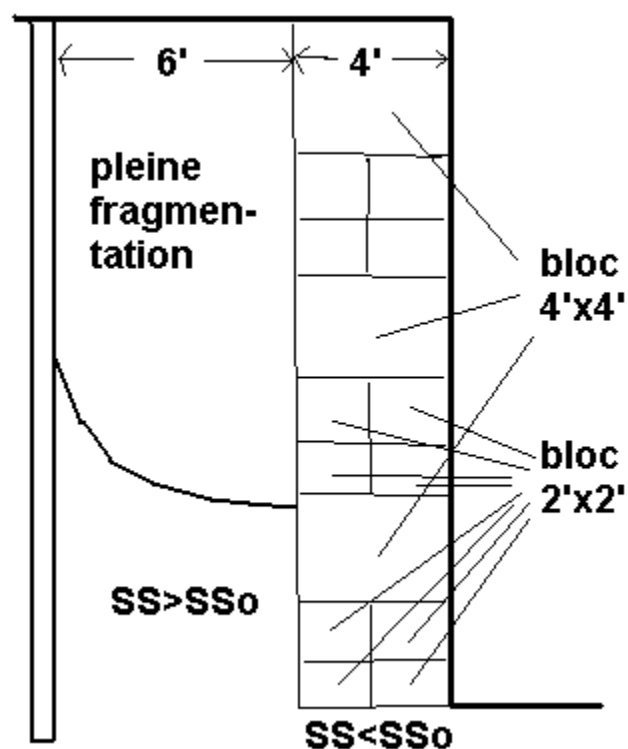


Fig. 10 Tir qui se fie aux joints pour de la fragmentation 'gratuite' Exemple 3

Fig. 11 Granulométrie combinée des dessins 5 et 4 (c), c'est à dire granulométrie du tir qui se fie sur les joints pour obtenir de la fragmentation 'gratuite' Exemple 3- gros blocs 4'x4' et 2'x2'

