

BADJI MOKHTAR Annaba university
Universite BADJI MOKHTAR Annaba
Faculté des sciences de la terre
Département des mines



جامعة باجي مختار - عنابة
كلية علوم الأرض
قسم المناجم

THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat En Mines
Option : Exploitation des Mines

ETUDE DE LA MECANIQUE DE TIR DES ROCHES PAR UTILISATION DES MODELES REDUITS DANS LES CONDITIONS ALGERRIENNES

Par

BERDOUDI SAID

Devant le jury composé de:

	Grd	Etablissement
Président :	Bounouala Mohamed	Pr Université Badji Mokhtar de Annaba
Directeur de thèse:	Hafsaoui Abdellah	Pr Université Badji Mokhtar de Annaba
Examineurs :	Boukelloul Mohamed Laid	MCA Université Badji Mokhtar de Annaba
	Chaib Rachid	MCA Université Mentouri de Constantine
	Omeiri Djamel	Pr Université 20 Aout 1955 de Skikda

REMERCIEMENTS

Ce travail de recherche préparé dans le cadre d'une thèse de doctorat en science a été réalisé au Département des Mines de l'université de Badji Mokhtar de Annaba en vue de traiter un sujet sur l'étude de la mécanique de tir des roches par utilisation des modèles réduits.

Je Tiens tout d'abord à adresser mes très sincères remerciements à monsieur **Abdellah Hafsaoui** Maître de conférences à l'université de Annaba, qui a accepté de s'intéresser à cette thèse, pour avoir dirigé ce travail et de m'avoir donné l'occasion de réaliser cette thèse dans des bonnes conditions ;

Je remercie tout naturellement monsieur **Bounouala Mohamed**, professeur à l'université de Annaba, qui ma fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

Mes remerciements vont également à monsieur **Boukelloul Mohamed laid** Maître de conférences à l'université d'Annaba qui outre la lourde tâche d'examineur et pour leur disponibilité.

J'exprime tous mes remerciement a monsieur **Chaib Rachid** Maîtres de conférences a l'université de Constantine d'avoir accepté d'examiner ce travail de thèse et accepté de faire partie de mon jury.

Mes remerciements vont aussi à monsieur **Omeiri Djamel**, Maître de conférences à l'université de 20 Aout 1955 de Skikda pour l'intérêt qu'il a porté a cet travail et avoir accepter la lourde tache d'examineur.

Egalement j'adresse mes remerciements à monsieur **Boumezbeur Abderrahmane** Maîtres de conférences à l'université de Tébessa qui a accepté de lire et d'évaluer mon travail et de participer au jury de soutenance.

Toute ma gratitude va à monsieur **Talhi Korichi** maitre de conférence a l'université de Annaba, Leurs précieux Conseils et encouragements ont permis d'amener à bien cette thèse, pour son aide efficace et amicale durant cette thèse et pour ses qualités scientifiques.

Je n'oublie pas "mes très chers frères, collègues et amis, Je ne peux pas les citer nommément et je souhaite qu'ils trouvent ici toute ma reconnaissance.

MERCI

Berdoudi Saïd

DEDICACES

A toute ma famille et particulièrement mon épouse pour leurs soutiens et leurs encouragements.

A mon père
A la mémoire de ma mère
A mes enfants Raid et Rania

A toutes personnes fideles travaillant pour le bien de l'Algérie

Berdoudi Saïd

ABSTRACT

The computer technique can be used to study the effect of the blast parameters on the fragmentation, both in bench and crater blasting.

Moreover, it is possible to design a blast so that higher peak amplitudes are generated in regions that are more difficult to break (toe or crust of the bench for example) or in regions where fragmentations is poor. The computer technique showed that the burden was the most important blast parameter regarding fragmentation. An explosive with a very high detonation velocity could give as bad fragmentation uniformity as on of a very low detonation velocity (in bench blasting), the explosive initiation point had a noticeable effect on the explosive energy distribution. It may be said, in general, that the region ahead of the direction of firing is one of relatively height peak strain amplitude while the region behind the direction of firing is one of relatively low peak strain amplitudes.

It was apparent, from the point of view of uniformity of the fragmentation in the blast product, that bottom and centre ignition gave the best result in bench blasting, but bottom ignition gave best result in crater blasting.

Despite the fact that there theoretical results are only qualitative, due to the lack of knowledge of the strength characteristics of rock under transient strain pulse; they do tend to predict blast performance and fragmentation results when a few fairly simple parameters have been determined.

Key words: Fragmentation; Demolition with explosive; Data processing model; Explosive energy.

RESUME

La technique par ordinateur peut être employée pour étudier l'effet des paramètres de tir sur la fragmentation, dans les tirs de gradins et de cratère.

Plus précisément, il est possible de concevoir un tir de telle sorte que des amplitudes maximales plus élevées soient produites dans les régions les plus difficile à fragmenter (le pied ou croûte du gradin par exemple) ou dans les régions où les fragmentations est médiocre. Concernant la fragmentation La technique par ordinateur a prouvé que la ligne de moindre résistance était le paramètre de tir le plus important.

Un explosif avec une vitesse de détonation très élevée pourrait donner une mauvaise uniformité de fragmentation identique à celle avec une vitesse de détonation très basse (dans le tir des gradins), le point d'initiation a un effet apparent sur la distribution d'énergie explosive. Il peut être dit, en général, que la région devant de la direction de tir est relativement la zone avec les plus hautes amplitudes de déformation tandis que la région derrière la direction de tir est relativement la zone avec les basses amplitudes de déformations.

Il était évident, du point de vue de l'uniformité de la fragmentation dans le résultats de tir, que l'initiation du fond et de centre a donné le meilleur résultat dans le tir des gradins, mais L'initiation du fond a donné le meilleur résultat dans tir de cratère.

Malgré le fait que ces résultats théoriques sont seulement qualitatifs, du au manque de la connaissance des caractéristiques de force de la roche sous l'impulsion de contrainte; ils tendent à prévoir des résultats d'exécution et de fragmentation de tir lorsque quelques paramètres assez simples ont été déterminés.

Mots clés : Fragmentation ; Abattage à l'explosif ; Modèle informatique ; Energie d'explosif.

ملخص

إن تقنية الإعلام الآلي يمكن استعمالها في دراسة تأثير عناصر التفجير, بشكل آخر, يمكننا إعداد مخطط التفجير بحيث يمكننا إنتاج أو تصويب طاقات التفجير في الأماكن صعبة التفجير (في أسفل أو قمة القاعدة) أو في الأماكن أين تكون نسبة التفجيت سيئة .

فيما يخص التفجيت , تقنية الإعلام الآلي اثبتت أن المسافة الفاصلة بين الشحنة و واجهة المحجرة (المسافة الادني للمقاومة) تعتبر من أهم العناصر في دراسة التفجيت في المحاجر

إن استعمال المتفجرات ذات سرعة قصوى الاندثار يمكن أن تعطينا نتائج سيئة مشابهة لتلك عند استعمال المتفجرات ذات سرعة بطيئة .

إن إطلاق شرارة التفجير لها أهمية قصوى أيضا بحيث يمكننا القول عامة بان الجهة المقابلة في اتجاه الانفجار تعتبر ذات انكسار سريع عكس الجهة الخلفية لاتجاه التفجير التي تعتبر ذات انكسار بطيء .

يبدو جليا من خلال نتائج الانفجار و أخذنا بعين الاعتبار درجة التفجيت أن إطلاق شرارة التفجير من الأسفل و الوسط أعطت نتائج جيدة في انفجار المدرجات, أما شرارة التفجير من الأسفل فأعطت نتائج حسنة في تفجير الفوهات

بغض النظر عن كون النتائج النظرية هي كمية فقط نظرا لنقص المعلومات عن خصائص الصخور, فالدراسة يمكن تطبيقها في دراسة التفجيت في المحاجر ادا توفرت لنا بعض العناصر

مفتاح: تفجيت, تهديم بالمتفجرات, برنامج الاعلام الالي, طاقة التفجير.

Sommaire

Introduction générale	2
Chapitre 1 - Etude de l'abattage des roches à l'explosif	
1.1 - Introduction	5
1.2 - La théorie du travail à l'explosif	5
1.2.1 - Types d'explosifs utilisés dans les carrières	6
1.2.2 - Travail de l'explosif	6
1.3 - Conception des plans de tir	7
1.4 - Processus technique de tir	8
1.4.1 - Type, poids et répartition de l'explosif	9
1.4.2 - Diamètre du trou	9
1.4.3 - La ligne de moindre résistance	11
1.4.4 - Espacements efficaces	13
1.4.5 - Excès de forage	14
1.4.6 - L'inclinaison du trou	14
1.4.7 - Le bourrage	15
1.4.8 - Initiation des explosifs et types d'amorçage	15
1.4.9 - Retards entre les trous successifs et la mise à feu de rangée	15
1.5 - Mécanismes de la Fragmentation	16
1.5.1 - Effet général des ondes de choc dans le massif rocheux	16
1.5.1.1 - Zone de broyage	16
1.5.1.2 - Zone de fissuration radiale	18
1.5.1.3 - Zone sismique	18
1.5.2 - Effet des ondes réfléchies	18
1.5.3 - Fragmentation finale – Mise en mouvement	19
1.5.3.1 - Effet de la présence d'une face libre	19
1.5.3.2 - Effet des gaz libérés	19
1.5.4 - Autres théories de la fragmentation	19
1.6 - Les paramètres liés aux tirs	19
1.6.1 - Données de base de la mise en œuvre d'un tir minier	19
1.6.2 - Les propriétés de la matrice rocheuse	20
1.6.2.1 - Effets des discontinuités naturelles	20
1.6.2.2 - Influence du type de roche.	20
1.6.3 - Les paramètres liés à l'énergie explosive	21
1.6.3.1 - La consommation spécifique	21
1.6.3.2 - La géométrie de tir	22
1.6.3.3 - L'amorçage.	22
1.7 - Conclusion et commentaires	24
Chapitre 2 - Processus physique de l'abattage des roches à l'explosif	
2.1 - Introduction	26
2.2 - Etude des théories de la rupture des roches	28
2.2.1 - Théorie de l'expansion du gaz	28
2.2.2 - Théorie de la réflexion de l'onde de choc	28
2.2.3 - Théorie de la parution- charge	29

2.3 - approche moderne à l'interprétation de rupture des roches dans le tir des gradins	29
2.4 - Effet de la ligne de moindre résistance sur le mécanisme de tir	32
2.4.1- Tir de gradin	32
2.4.2- Tir de cratère	34
2.4.2.1 - Zone d'énergie de déformation	34
2.4.2.2 - Zone du choc	34
2.4.2.3 - Zone de la fragmentation	35
2.4.2.4 - Zone de l'air de tir	35
2.5 - Conclusion	36

Chapitre 03 : Modèles informatiques pour la fragmentation des roches

3.1 - Introduction	38
3.2 - Simulation des tirs	38
3.3 - Classification des modèles de calculs	39
3.3.1 - Modèles algébriques	40
3.3.2 - Modèles de comportement composite	41
3.3.2.1 - Le modèle « Bedded Crack » et de code "Shale"	41
3.3.2.2 - Modèle Nag-Frag	41
3.3.3 - Modèles empiriques	42
3.3.3.1 - Modèle Kuz-Ram	42
3.3.3.2 - Modèle de LANGEFORS	44
3.3.4 - Modèles physiques	46
3.3.5 - Modèles mécaniques.	47
3.3.5.1 - Modèle Blaspas	48
3.3.5.2 - Modèle Frag	49
3.3.6 Autres modèles	49
3.4 - Conclusion	52

Chapitre 04 - Etude de la mécanique de tir des roches par utilisation de modèles réduits

4.1 - Introduction	54
4.2 - Considération générale	54
4.2.1 - Sous-systèmes de la fragmentation	54
4.2.2 - Economie de la fragmentation	54
4.3 - Elément essentiel du modèle par ordinateur	55
4.3.1 - Etude de l'onde de déformation produite par une charge concentrée	56
4.3.2 - Concepts fondamentaux de l'onde de déformation d'une charge cylindrique dans le tir des gradins	56
4.4 - Les paramètres de l'onde de déformation à partir d'une charge de colonne dans un tir de gradin on utilisant le modèle informatique	58
4.5 - Point d'initiation de l'explosif et la fragmentation dans le tir des gradins	61
4.6 - La fragmentation et la vitesse de détonation	64
4.7 - Influence de la ligne de moindre résistance sur la fragmentation	65
4.7.1 - Tir des gradins	65
4.7.2 - Tir du cratère	69
4.8 - Conclusion	71

Chapitre 5 - La gestion environnementale

5.1 - Introduction	73
5.2 - Les normes de gestion environnementale	73
5.2.1 - Les caractéristiques essentielles de la famille ISO 14000 :	74
5.2.2 - Principes et implications	74
5.3 - L'activité minière	75
5.4 - Présentation du domaine d'intervention	76
5.5 - Effets sur l'environnement et mesures de protection	76
5.5.1 - Effets potentiels des exploitations à ciel ouvert	77
5.5.2 - Limitation des effets sur l'environnement	77
5.5.2.1 - Mesures précédant l'exploitation	77
5.5.2.2 - Mesures accompagnant l'exploitation	78
5.5.2.3 - Mesures suivant la cessation des activités	79
5.6 - Interactions avec d'autres domaines d'intervention	80
5.7 - Conclusion	81
Conclusion générale	83
Annexe	86
Bibliographie	118

Liste des figures

Figure N°	Titre	Page
Figure.1.1	Propagation de l'onde de détonation	7
Figure 1.2	Diagramme de Harries et Mercer	8
Figure.1.3	Schéma du dispositif géométrique d'un tir	9
Figure.1.4	Schéma de disposition des trous	11
Figure.1.5	Plan de tir suivant une maille rectangulaire	12
Figure.1.6	Schéma illustrant la disposition d'un trou dans un gradin	12
Figure.1.7	Schéma montrant l'intervalle optimal lors du forage	13
Figure.1.8	La rupture de la roche au pied du gradin	14
Figure.1.9	Développement de la fissuration et de la fracturation,(phase 1 à 4)	17
Figure.1.10	Taille moyenne par rapport au facteur d'explosif	21
Figure.1.11	Distribution granulométrique résultant de tir des blocs en béton avec charge spécifique 0,2-1,25kg /m ³	22
Figure.1.12	Les courbes de distribution de la fragmentation	23
Figure.1.13	Effet du retard sur la fragmentation	24
Figure.2.1	Evolution des contraintes induite par le tir.	31
Figure.2.2	Effet de la ligne de moindre résistance sur la fragmentation	33
Figure.2.3	Volume du cratère par rapport à la profondeur	35
Figure.2.4	Le mécanisme d tir de cratère	36
Figure.3.1	La procédure et évaluation de la performance des tirs	39
Figure.3.2	Comparaison du profil expérimental et calculé du massif fracturé par le logiciel Shale (d'après Adams et al, 1983)	41
Figure.3.3	La fragmentation mesurée et calculée par la relation de Kuz-Ram dans le cas de calcaire fracturé (a) et du grès (b) (d'après Cunningham, 1983)	43
Figure.3.4	Données géométriques intervenant dans la méthode de Langefors.	44
Figure.3.5	Schéma du fonctionnement du logiciel Blaspa (d'après Favreau, 1983)	48
Figure.3.6	les effets attendus de tir	49
Figure.3.7	Schéma du fonctionnement du logiciel DNA-Blast (d'après T .Bernard)	50
Figure.4.1	Schéma montrant une configuration d'un trou dans un gradin	57
Figure.4.2	Graphique montrant la variation avec le temps la forme de l'onde de déformation	59
Figure.4.3	Influence de la méthode d'initiation sur la fragmentation	62

Figure.4.4	Influence de la méthode d'initiation sur la fragmentation	63
Figure.4.5	Influence de la méthode d'initiation sur la fragmentation	65
Figure.4.6	Influence de la méthode d'initiation sur la fragmentation	66
Figure.4.7	Evolution de la déformation pour une charge initiée au point EL/3	67
Figure.4.8	Effet du rapport V/C sur la distribution de la déformation sur les différents points sur la surface libre	68
Figure.4.9	Effet du rapport V/C sur la distribution de la déformation sur les différents points sur la surface libre	70
Figure.5.1	La roue de Deming	74
Figure. Af1	Le programme par ordinateur pour étudier la fragmentation dans les mines à ciel ouvert	88
Figure. Af2	Influence de la méthode d'initiation sur la fragmentation	90
Figure. Af3	Influence de la méthode d'initiation sur la fragmentation	91
Figure. Af4	Influence de la méthode d'initiation sur la fragmentation	92
Figure. Af5	Influence de la méthode d'initiation sur la fragmentation	93
Figure. Af6	Evolution de la déformation pour une charge initiée au point el/3	94
Figure. Af7	Effet du rapport V/C sur la distribution de la déformation sur les différents points sur la surface libre	95
Figure. Af8	Effet du rapport V/C sur la distribution de la déformation sur les différents points sur la surface libre.	96
Figure. Af9	Effet du rapport V/C sur la distribution de la déformation sur les différents points sur la surface libre.	97
Figure. Af10	Effet du rapport V/C sur la distribution de la déformation sur les différents points sur la surface libre.	97
Figure. Af11	Graphique montrant l'effet de la ligne de moindre résistance sur la fragmentation	98
Figure. Af12	Graphique montrant l'effet de la ligne de moindre résistance sur la fragmentation	99
Figure. Af13	Graphique montrant l'effet de la ligne de moindre résistance sur la fragmentation	100
Figure. Af14	Graphique montrant l'effet de la ligne de moindre résistance sur la fragmentation	101
Figure. Af15	Graphique montrant l'effet de la ligne de moindre résistance sur la fragmentation	102
Figure. Af16	Graphique montrant l'effet de la ligne de moindre résistance sur la fragmentation	103
Figure. Af17	Graphique montrant l'effet de la ligne de moindre résistance sur la fragmentation	104
Figure. Af18	Graphique montrant l'effet de la ligne de moindre résistance sur la fragmentation	105
Figure. Af19	Graphique montrant l'effet de la profondeur du trou sur la fragmentation	106

Figure. Af20	Graphique montrant l'effet de la profondeur du trou sur la fragmentation	107
Figure. Af21	Graphique montrant l'effet de la profondeur du trou sur la fragmentation	107
Figure. Af22	Graphique montrant l'effet de la profondeur du trou sur la fragmentation	108
Figure. Af23	Graphique montrant la déformation en fonction de la longueur de la charge dans le tir de cratère	109
Figure. Af24	Graphique montrant la déformation en fonction de la longueur de la charge dans le tir de cratère	110
Figure. Af25	Graphique montrant la déformation en fonction de la longueur de la charge dans le tir de cratère	111
Figure. Af26	Graphique montrant la déformation en fonction de la longueur de la charge dans le tir de cratère	112
Figure. Af27	Graphique montrant la déformation dans le tir des cratères	113
Figure. Af28	Graphique montrant la déformation dans le tir des cratères	114
Figure. Af29	Graphique montrant la déformation dans le tir des cratères	115
Figure. Af30	Graphique montrant la déformation dans le tir des cratères	116

Liste des tableaux		
Tableau N°	Titre	Page
Tableau 1.1	Caractéristiques des explosifs (ONEX)	6
Tableau 1.2	Cout de forage par rapport au diamètre du trou	10
Tableau 1.3	Paramètres de tir de mines	20
Tableau 4.1	Variation de l'onde de déformation avec le temps sur les différents points à la surface du gradin on utilisant l'initiation de bas	60
Tableau 4.2	Les paramètres de l'onde de déformation obtenu à partir d'une colonne de charge aux différents points sur une surface libre par application de ; H=6m, B=3m, d=100mm	63
Tableau 4.3	Les paramètres de l'onde de déformation obtenu a partir d'une colonne de charge aux différents points sur une surface libre par application de ; H=9m, B=3m, d=100mm	64
Tableau 4.4	Les paramètres de l'onde de déformation obtenu a partir d'une colonne de charge aux différents points sur une surface libre par application de ; H=12m, B=3m, d=100mm	66
Tableau 4.5	Les paramètres de l'onde de déformation obtenu a partir d'une colonne de charge aux différents points sur une surface libre par application de: H=15m, B=3m, d=100mm	67
Tableau 4.6	Les paramètres de l'onde de déformation obtenu à partir d'une colonne de charge initié au point (EL/3) a partir du bas par application de : V=C=6500m/s	70
Tableau 5.1	Modes d'exploitation des gisements affleurant et principales matières premières extraites	76
Tableau 5.2	Principaux effets sur l'environnement	77
Tableau At1	Les paramètres de l'onde de déformation obtenu a partir d'une colonne de charge aux différents points sur une surface libre en utilisant ; H=6m, B=3m, d=100mm et C>V	90
Tableau At2	Les paramètres de l'onde de déformation obtenu a partir d'une colonne de charge aux différents points sur une surface libre en utilisant ; H=9m, B=3m, d=100mm et C>V	91
Tableau At3	Les paramètres de l'onde de déformation obtenu a partir d'une colonne de charge aux différents points sur une surface libre en utilisant ; H=12m, B=3m, d=100mm et C<V	92

Tableau At4	Les paramètres de l'onde de déformation obtenu a partir d'une colonne de charge aux différents points sur une surface libre en utilisant ; $H=15m$, $B=3m$, $d=100mm$ et $C<V$	93
Tableau At5	Les paramètres de l'onde de déformation obtenue à partir d'une colonne de charge aux différents points sur une surface libre en utilisant, $h=9m$, $d=100mm$, $b=3m$ et $C=6500m/s$.	94
Tableau At6	Les paramètres de l'onde de déformation obtenue à partir d'une colonne de charge aux différents points sur une surface libre en utilisant, $h=3m$, $d=100mm$, $b=3m$ et $C>V$.	95
Tableau At7	Les paramètres de l'onde de déformation obtenue à partir d'une colonne de charge aux différents points sur une surface libre en utilisant, $h=9m$, $d=100mm$, $b=3m$ et $C<V$.	96
Tableau At8	Les paramètres de l'onde de déformation obtenu à partir d'une colonne de charge aux différents points sur une surface libre par application de; $H=3B$, $B=1m$, $d=100mm$ et $C=V=6500m/s$	98
Tableau At9	Les paramètres de l'onde de déformation obtenu a partir d'une colonne de charge aux différents points sur une surface libre par application de; $H=3B$, $B=2m$, $d=100mm$ et $C=V=6500m/s$	99
Tableau At10	Les paramètres de l'onde de déformation obtenu à partir d'une colonne de charge aux différents points sur une surface libre par application de; $H=3B$, $B=3m$, $d=100mm$ et $C=V=6500m/s$	100
Tableau At11	Les paramètres de l'onde de déformation obtenu à partir d'une colonne de charge aux différents points sur une surface libre par application de; $H=3B$, $B=4m$, $d=100mm$ et $C=V=6500m/s$	101
Tableau At12	Les paramètres de l'onde de déformation obtenu a partir d'une colonne de charge aux différents points sur une surface libre par application de; $H=3B$, $B=5m$, $d=100mm$ et $C=V=6500m/s$	102
Tableau At13	Les paramètres de l'onde de déformation obtenu a partir d'une colonne de charge aux différents points sur une surface libre par application de; $H=9m$, $B=1m$, $d=100mm$ et $C=V=6500m/s$	103
Tableau At14	Les paramètres de l'onde de déformation obtenu a partir d'une colonne de charge aux différents points sur une surface libre par application de; $H=9m$, $B=2m$, $d=100mm$ et $C=V=6500m/s$	104

Tableau At15	Les paramètres de l'onde de déformation obtenu a partir d'une colonne de charge aux différents points sur une surface libre par application de; H=9m, B=4m, d=100mm et C=V=6500m/s	105
Tableau At16	Les paramètres de l'onde de déformation obtenu a partir d'une colonne de charge aux différents points sur une surface libre par application de; H=9m, B=5m, d=100mm et C=V=6500m/s	106
Tableau At17	Les paramètres de déformation obtenu a partir d'une colonne de charge dans le tir de cratère par application de; EL=1m, T=2m et C=V=6500m/s	109
Tableau At18	Les paramètres de déformation obtenu a partir d'une colonne de charge dans le tir de cratère par application de; EL=2m, T=2m et C=V=6500m/s	110
Tableau At19	Les paramètres de déformation obtenu a partir d'une colonne de charge dans le tir de cratère par application de; EL=3m, T=2m et C=V=6500m/s	111
Tableau At20	Les paramètres de déformation obtenu a partir d'une colonne de charge dans le tir de cratère par application de; EL=4m, T=2m et C=V=6500m/s.	112
Tableau At21	Les paramètres de déformation obtenu a partir d'une colonne de charge dans le tir de cratère par application de; EL=6m, T=1m et C=V=6500m/s.	113
Tableau At22	Les paramètres de déformation obtenu a partir d'une colonne de charge dans le tir de cratère par application de; EL=6m, T=2m et C=V=6500m/s	114
Tableau At23	Les paramètres de déformation obtenu a partir d'une colonne de charge dans le tir de cratère par application de; EL=6m, T=3m et C=V=6500m/s	115
Tableau At24	Les paramètres de déformation obtenu a partir d'une colonne de charge dans le tir de cratère par application de; EL=6m, T=4m et C=V=6500m/s	116

Introduction générale

Introduction générale

Les deux dernières décennies ont connu un développement considérable de la mécanisation dans les mines, carrières et travaux publics, cela suit à l'accroissement rapide des besoins. Face à cette situation la demande en matière première et matériaux devient de plus en plus importante et l'utilisation des produits explosifs constitue l'une des solutions idoines grâce à l'extraction massive des produits et à des coûts très avantageux par rapport aux autres moyens techniques d'extraction.

L'utilisation d'explosifs à la fragmentation des roches dans l'exploitation minière est souvent désignée comme une science et un art. Dans les premières années, les chimistes s'efforçaient à développer les explosifs et de mettre au point stable et puissant des mélanges explosifs pour plusieurs variétés. Ces dernières années, le besoin de minimiser les coûts de tir et de contrôler l'effet de ces paramètres sur la qualité de la fragmentation ont fait des études appropriés. Cependant, La recherche comprend la modélisation informatique, de la préparation d'explosifs, de la photographie à haute vitesse. Bien que Les scientifiques et les ingénieurs, et avec la pratique, continuent à travailler sur l'approche idéale pour optimiser le processus de la fragmentation. La recherche systématique de tir des roches a fourni une bonne compréhension des nombreux facteurs qui influencent la fragmentation. Par conséquent, l'obtention d'un contrôle précis de ces facteurs est un défi constant.

Avec le développement des ordinateurs à grande vitesse, des efforts considérables ont été orientés pour des modèles continus, discontinus, et continu-discontinus, afin de décrire la fracturation et la fragmentation. D'autres chercheurs ont préféré appliquer une approche micro-statique au problème de la fracturation et de la fragmentation à l'explosif des solides. De nos jours, l'approche la plus appropriée n'a pas été identifiée. Actuellement, il y a une variété de modèles numériques traitant la rupture et la fragmentation mais qui sont loin d'aboutir à une prévision fiable et précise de la distribution granulométrique et ce à partir de la connaissance de la géométrie, des propriétés mécaniques et physiques.

Il semble raisonnable de dire que la fragmentation à l'explosif est le résultat d'un problème couplé impliquant l'initiation et la propagation des fissures dans un milieu initialement intact et la formation de fragments isolés. Ainsi, les aspects du continu et du discontinu avec la transition continu-discontinus, sont tous présents. Malheureusement, d'un point de vue de la

mécanique des milieux continus, il n'est pas possible de tenir compte de la formation explicite des fragments. D'autre part, la mécanique de la rupture en dynamique ne peut pas également traiter, en même temps, un grand nombre de fissures.

En se basant sur cette préoccupation, nous avons essayé de cerner le problème de la fragmentation et d'établir les principaux facteurs intervenant dans le but d'optimiser cette opération technologique.

Le présent travail se compose de cinq chapitres à savoir :

- L'étude de l'abattage des roches à l'explosif, le processus physique de l'abattage des roches à l'explosif, les modèles informatiques de la fragmentation à l'explosif dans les mines à ciel ouvert, étude de la mécanique de tir des roches par utilisation de modèles réduits et la gestion environnementale.

Le premier chapitre est consacré pour l'étude de l'abattage des roches à l'explosif et d'identifier les paramètres qui peuvent influencer l'opération de tir et indiquer la manière dont ces paramètres pris isolément affectent la fragmentation.

le processus physique de l'abattage de roches à l'explosif, ce deuxième chapitre a mis en évidence la complexité liée à l'analyse des phénomènes associés à l'explosion ainsi que les difficultés de contrôler les résultats des tirs qui en résultent. Dans le chapitre qui suit nous allons décrire quelques modèles qui essaient de traiter la fragmentation, ces modèles destinés à comprendre les phénomènes qui se produisent pendant le tir et à prévoir les résultats.

À l'avant dernier chapitre nous allons proposer un outil classé comme mécanique, l'outil repose sur une méthodologie de l'évaluation de la fragmentation à l'explosif dans les mines à ciel ouvert en utilisant un modèle mathématique, la variation des données peut permettre aux modèles de produire des résultats afin d'estimer l'uniformité de la fragmentation.

Puisque les activités minières ont produit de sévères impacts négatifs, l'attention est généralement et justement tournée vers ces impacts négatifs, et sur la façon d'y remédier, dans le dernier chapitre nous allons traiter le problème de l'impact sur l'environnement et voir les différentes techniques à prendre suivant leurs ordres chronologiques de mise en œuvre.

Chapitre 1-Paramètres de conception de tir a l'explosif

Chapitre 1- Paramètres de conception de tir a l'explosif

1.1- Introduction

Le principal objectif des tirs dans les mines est d'avoir une fragmentation optimale de la roche. Le degré de fragmentation de la roche joue un rôle très important dans le but de contrôler et de minimiser le coût global de production y compris le chargement, le transport de la matière première. Une fragmentation optimale améliore l'efficacité de broyage et des milliers de kilowatts-heures d'énergie par [1] an peuvent également être gagnées.

Les travaux de tir [2] est l'une des opérations de base de l'exploitation minière et l'industrie des carrières, un tir efficace pour une géologie donnée, le volume de la roche a abattre et les conditions de sécurité sont les résultats d'un choix correct des types d'explosifs, la quantité d'explosifs et la planification de tir.

La première étape pour la réduction de la taille dans les mines est bien les travaux de tir il est suivi par des opérations de concassage et broyage. L'efficacité de ces opérations est directement liée à la distribution en taille des tas de roche abattus. Par conséquent, une évaluation fiable de la fragmentation est un problème critique de l'exploitation [3] La production de fragments plus fine en opération de tir réduit la charge de travail de concasseurs primaires; augmentant ainsi l'efficacité du broyeur et de par conséquent réduire les coûts et augmente le taux horaire.

1.2- La théorie du travail à l'explosifs

Un explosif est un corps simple ou un mélange de corps susceptible de se décomposer en un temps très court sous l'influence de la chaleur ou d'une action mécanique particulière en produisant une grande quantité de gaz porté à haute température.

Les explosifs industriels sont en général constitués par un comburant (oxydant), un combustible (réducteur) et divers autres produits pour leur conférer des propriétés particulières et qui peuvent se décomposer selon trois modes:

1. combustion simple
2. déflagration
3. détonation

Le mode de décomposition dépend essentiellement de :

- La nature de l'explosif et sa sensibilité à l'amorçage,
- Son confinement.

Un explosif peu sensible non confiné peut se décomposer sous la forme d'une combustion simple. Si le confinement augmente, le régime de décomposition sera la déflagration ou la détonation.

En fonction de la vitesse de transformation de la matière on distingue :

- Les explosifs déflagrants : leur vitesse de décomposition est relativement lente (quelques centaines de mètres par seconde),
- Les explosifs détonants : leur décomposition est rapide (2000 à 8000 m/s) produisant ainsi une onde de choc.

Les explosifs sont classés aussi d'après leur sensibilité on trouve :

- Les explosifs primaires : très sensible et peuvent être amorcés par une flamme ou un faible choc,
- Les explosifs secondaires : relativement moins sensibles. Leur détonation ne peut être amorcée facilement que par la détonation d'un autre explosif.

1.2.1- Types d'explosifs utilisés dans les carrières

On distingue quatre types d'explosifs:

- Les dynamites:

Les dynamites contiennent de 10 à 90 % de nitroglycéroglycol (NGL), mélange de nitroglycérine et dinitroglycol, composant qui assure la qualité antigel de la dynamite.

La nitroglycérine est très sensible au choc et à la friction et sont à manipuler avec des gants pour limiter l'effet toxique de la nitroglycérine.

- Les explosifs nitrates:

Les explosifs nitrates sont à base d'ammonium 80% environ et d'un explosif pur (TNT, pentrite)

- Les émulsions:

Les émulsions sont des mélanges de deux liquides : du nitrate d'ammonium en solution aqueuse emprisonnées dans une matrice liquide à base d'huile, l'ensemble étant stabilisé par des tensioactifs.

- Les nitrates fuels (ANFO):

Les nitrates fuels sont constitués de nitrate d'ammonium 94% en grain et d'huiles minérales en général du fuel domestique 6%.

Le tableau 1.1 résume les caractéristiques des explosifs fabriqué en Algérie par l'ONEX

Désignations	Densité g/cm ³	Vitesse de Détonation m/s	Résistance à l'eau	Domaine d'utilisation
Dynamites	1,4 – 1,5	4000 – 6000	Excellent	Roches dures et humides
Nitrates	1,0 – 1,15	4000 – 6000	Médiocre	Roches de dureté moyennes peu humide
Nitrate fuels	0,9	3000 – 4000	Faible	Roches de dureté moyennes et tendres
Emulsions	1,2 – 1,5	4000 – 5000	Excellent	Roches dures et humides

1.2.2- Travail de l'explosif

Une explosion est un phénomène au cours duquel des gaz sous pression sont engendrés et libérés en un temps extrêmement court. Ce phénomène se produit lorsqu'un explosif subit une détonation. Dans ce cas, une onde de choc se propage à travers l'explosif accompagné par une réaction chimique exothermique, libérant ainsi une grande quantité de gaz à haute pression et température.

La détonation se propage dans l'explosif avec une vitesse supérieure à celle du son. Initialement l'explosif se trouve dans les conditions de température. Pression et onde de détonation volume

massique T_0 , P_0 , V_0 . A la fin de réaction, les produits de réaction sont aux conditions T_1 , V_1 . Dans la zone Z_3 (figure 1.1). Les gaz de décomposition se détendent et participent aux effets mécaniques de l'explosion.

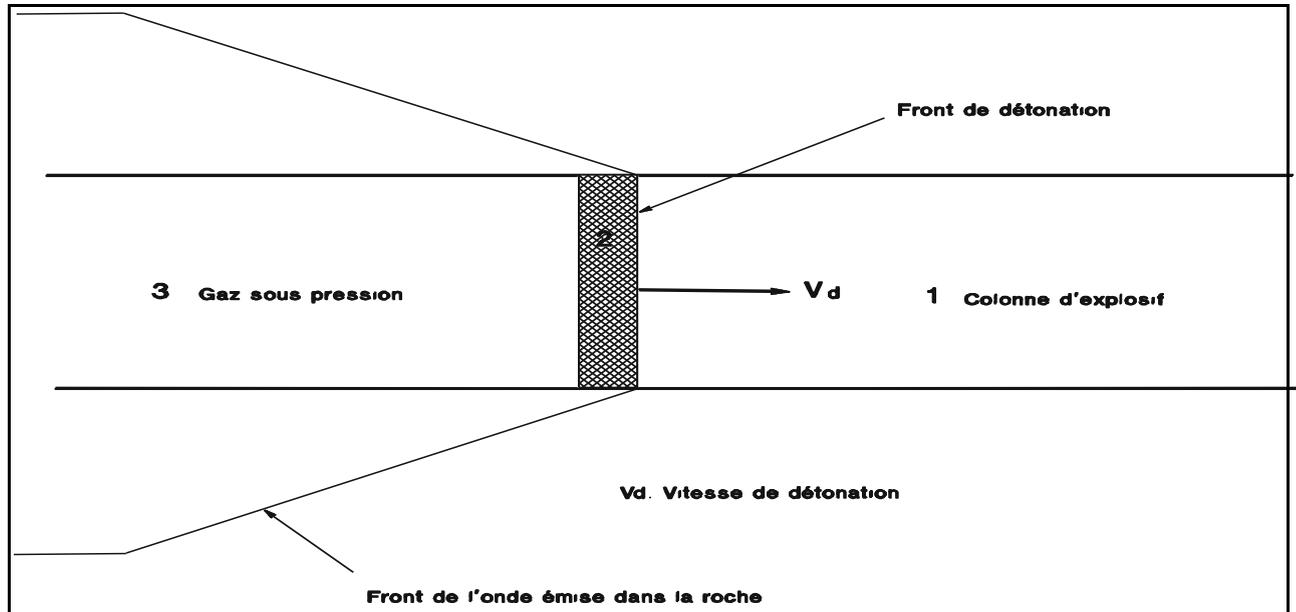


Figure 1.1- Propagation de l'onde de détonation

Zone 1: l'explosif avant réaction

Zone 2 : zone de réaction chimique

Zone 3 : zone des produits de réaction

L'énergie libérée par un explosif au cours de la détonation prend deux formes: une énergie de choc véhiculée par une onde de contrainte [4] et transmis à la roche environnante, et une énergie de gaz, qui se manifeste sous la forme d'une haute pression et de température du gaz.

1.3- Conception des plans de tir

La conception d'un plan de tir, correspond à la définition de la géométrie de foration, du chargement des mines et des délais d'initiation. Fondamentalement, elle consiste à assurer:

- Le fonctionnement normal des charges: pour leur offrir une surface libre et un volume de dégagement adaptés: il s'agit de la maîtrise [1] du fonctionnement du tir, mine par mine: à ce principe correspondent des règles dites d'efficacité. Les processus de fragmentation (propagation des ondes de chocs et des gaz) et de déplacement de la roche (gonflement du massif) doivent avoir le temps de se réaliser.
- Le fonctionnement correct des produits: en évitant les problèmes de désensibilisation de l'explosif (incapacité à s'amorcer).
- La sécurité de fonctionnement de la totalité du tir: le fonctionnement théorique des produits explosifs et de chaque charge, dans les conditions d'amorçage données, ne garantit pas le fonctionnement de la totalité du tir mis en œuvre. D'autres facteurs peuvent être à l'origine

d'anomalies ou de dysfonctionnements graves des tirs. Ces risques sont plus difficiles à appréhender et correspondent en général à des arrachements de charges, des projections, ou à la coupure du réseau d'amorçage de surface avant l'initiation de tout le tir.

1.4- Processus technique de tir

L'exploitation minière est un processus de destruction contrôlé de la masse rocheuse nous permettant l'extraction du minerai. En face des spécialistes des mines des exigences se posent, d'un côté fournir de grandes quantités de roche bien fragmentée pour le processus de traitement et de l'autre côté minimiser le coût suivant le débitage secondaire des hors gabarit obtenus. Un compromis raisonnable entre ces deux exigences incompatibles ne peut être accompli que sur la base d'une compréhension très poussée des facteurs qui contrôlent la fragmentation des roches.

Harries et Mercer [5] ont établi un diagramme indiquant les objectifs économiques à respecter lors de la fragmentation des roches (figure 1.1). Le contrôle de la granulométrie du tas de roche abattus peut être obtenu par la variation des paramètres suivants:

- 1-type, poids et répartition de l'explosif
- 2- diamètre du trou
- 3-la ligne de moindre résistance
- 4-espacement entre les trous
- 5-l'excès de forage
- 6-l'inclinaison du trou
- 7-le bourrage
- 8- la méthode d'initiation de la mise à feu de l'explosif
- 9- délais entre les trous consécutifs (microretard).

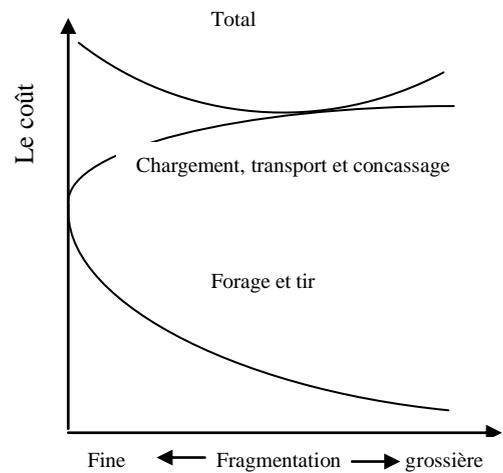


Figure 1.2-Diagramme de Harries et Mercer

Les paramètres de 2 à 9 sont définis dans la figure 1.3.

De toute façon nous devons étudier l'influence énumérer précédemment sur l'efficacité du tir et le coût des travaux suivant le débitage secondaire.

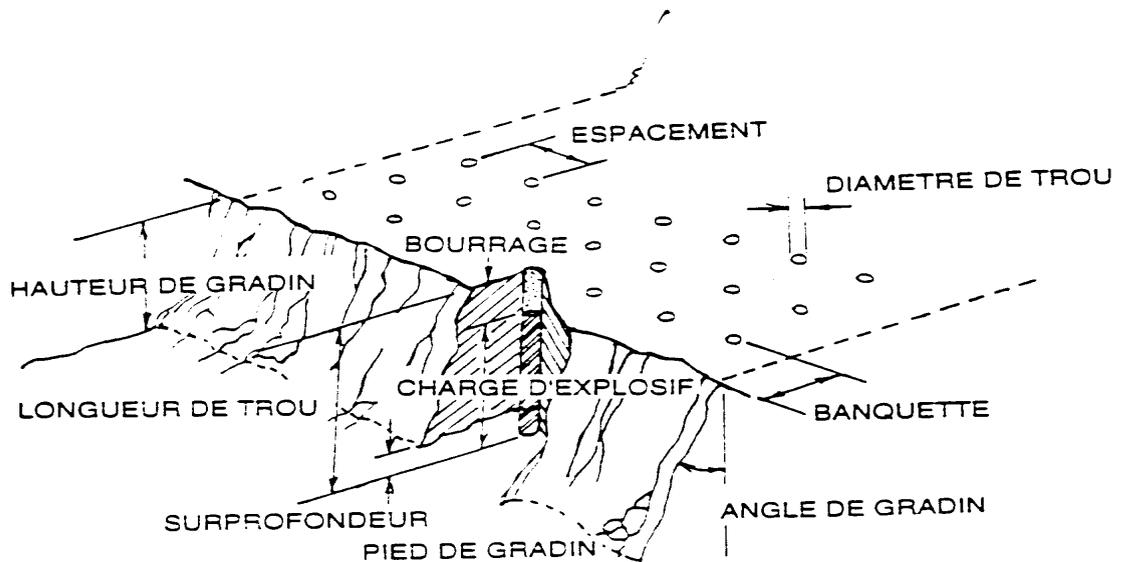


Figure 1.3- Schéma du dispositif géométrique d'un tir

1.4.1- Type, poids et répartition de l'explosif

La puissance d'un explosif est une mesure du travail fourni par un certain poids ou volume d'explosif. Cette puissance peut être exprimée par des unités absolues, ou comme proportion relatif à un explosif standard tel que gelanite ou ANFO (Nitrate de l'Ammonium / huile Combustible). la comparaison de la puissance d'explosif à celle de l'ANFO est préférable, à cause de l'usage très large de ce dernier dans l'exploitation minière a ciel ouvert.

Les caractéristiques de quelques explosifs sont indiquées dans le tableau 1.1. Les forces de poids sont utiles lorsqu'on généralise le plan de tir pour plusieurs explosifs de forces différentes. Le volume ou la force de la charge est relative a la force du poids par le poids spécifique, et ce chiffre est important lors du calcul du volume de trou de mine exigé pour contenir une énergie d'explosive donné. Évidemment un haut volume de force est avantageux dans le cas d'un trou de faible capacité qui doit contenir une charge exigée.

La sensibilité d'un explosif, est une caractéristique qui détermine la méthode suivant laquelle une charge peut détoner, le diamètre minimum de la charge et la sécurité de la mise en place de l'explosif. Les explosifs très sensibles s'explosent quand les en utilise dans des charges de plus faible diamètre, ceci dit que la sensibilité de l'explosif diminue avec l'augmentation du diamètre de la charge. Les explosifs peuvent être initié chimiquement par la provision de petit gaz qui se propage à haute vitesse a travers la charge et qui a son échauffement provoque la détonation secondaire.

Bien que l'addition d'aluminium dans le tir est devenue commune ces dernières années parce que l'aluminium libérera considérablement plus d'énergie qu'une huile du combustible. Elle est utile, lorsqu'une haute énergie est exigée pour déplacer le pied du gradin. L'usage de haute densité aluminé peut contribuer à réduire le coût de forage qui est très élevé.

1.4.2- Diamètre du trou

Les données indiquées dans le tableau 1.2, établie par Persson [6] illustre l'avantage obtenu en

augmentant le diamètre du trou. L'application des trous de diamètre de 9 à 12 pouces est commune dans l'exploitation minière à ciel ouverte, et beaucoup de mines utilisent des trous de diamètres de 15pouces, et ont opté pour un diamètre de 17 pouces.

Bien qu'il y ait un bénéfice à obtenir en augmentant le diamètre du trou, Persson suggère qu'il y a des limitations à ces augmentations.

Diamètres des trous		Volume du trou L/m	coût du trou	
Inch	mm		DA/m	DA/L
1	25,40	0,51	75	150,00
2	50,80	2,03	150	75,00
3	76,2	4,56	232,5	50,25
4	101,6	8,1	307,5	37,5
6	152	18,2	457,5	24,75
10	254	50,7	757,5	15,00
15	381	114	1140	9,75

L'expérience a montré qu'une utilisation efficace de la charge explosive est obtenue en appliquant une ligne de moindre résistance (voir la figure 1.1) approximativement 40 fois le diamètre du trou. Avec l'augmentation du diamètre du trou, la ligne de moindre résistance se rapproche des dimensions de la hauteur du gradin, et l'explosion devient moins efficace. Par conséquent, Persson suggère que le diamètre du trou devrait être limité sur la base de l'appliquant de l'expression suivante:

$$d \leq hg / 40 \quad (1.1)$$

d : Diamètre du trou, m

hg : hauteur du gradin, m

L'application de trous de grands diamètres provoque la projection des roches et contribue à la détérioration de l'atmosphère et peut aussi engendrer des fissures excessives dans le massif rocheux.

Notons que pour toute application de trou de grand diamètre nous devons mener une étude des conséquences d'un gain obtenu et les problèmes qui en découlent. Toute fois, avant d'établir un plan de tir, il est conseillé d'étudier le massif rocheux dans lequel doivent être conduit les travaux miniers et de comparé les résultats a d'autres mines qui travaillent dans des conditions analogues.

Le choix du diamètre du trou dépend aussi de certaines données à savoir:

- L'environnement: le niveau de vibration et de bruit dépend de la charge explosive, établie en fonction du diamètre et la profondeur du trou.
- La structure du massif à un effet fondamental sur la granulométrie, donc influera directement sur le choix du diamètre de trou.
- L'engin de chargement, qui nécessité un type de fragmentation et de foisonnement des roches abattues.

- La nature de l'explosif, qui peut par exemple avec l'augmentation du diamètre, avoir une vitesse de détonation plus élevée.

1.4.3- La ligne de moindre résistance

Pour comprendre l'efficacité de l'influence de la ligne de moindre résistance, il est nécessaire de considérer la séquence de rupture de la roche qui entoure le trou. La discussion suivante est basée sur l'hypothèse de McIntyre et Hagan [7].

Lorsqu'une charge dans un trou explose, une compression longitudinale de l'onde de déformation se propage dans la roche environnante. La tension tangentielle associée avec cette onde, crée un plan de la fissure radial autour du trou. Ces fissures s'étendent suivant une distance radiale approximativement égale à quatre fois le diamètre du trou dans la roche.

Lorsque les ondes de déformations tendent vers des rencontres avec une surface libre, créé par un tir ou par la détonation de la ligne de trous avant ceux en considération, une onde extensible réflétee est produite et qui va se propager en arrière dans la masse rocheuse. Cette onde de déformation extensible a tendance à ouvrir des fissures radiales autour du trou qui sont tangentiels au front de l'onde, c.-à-d parallèle ou presque parallèlement à la surface libre (front de taille). Dans un tir bien conçu avec une ligne de moindre de résistance, correctement choisie, la force extérieure de la pression de gaz de l'explosion déplacera la roche vers la surface libre, tout en la fragmentant et créant un bon tas de roche abattus (figure 1.4).

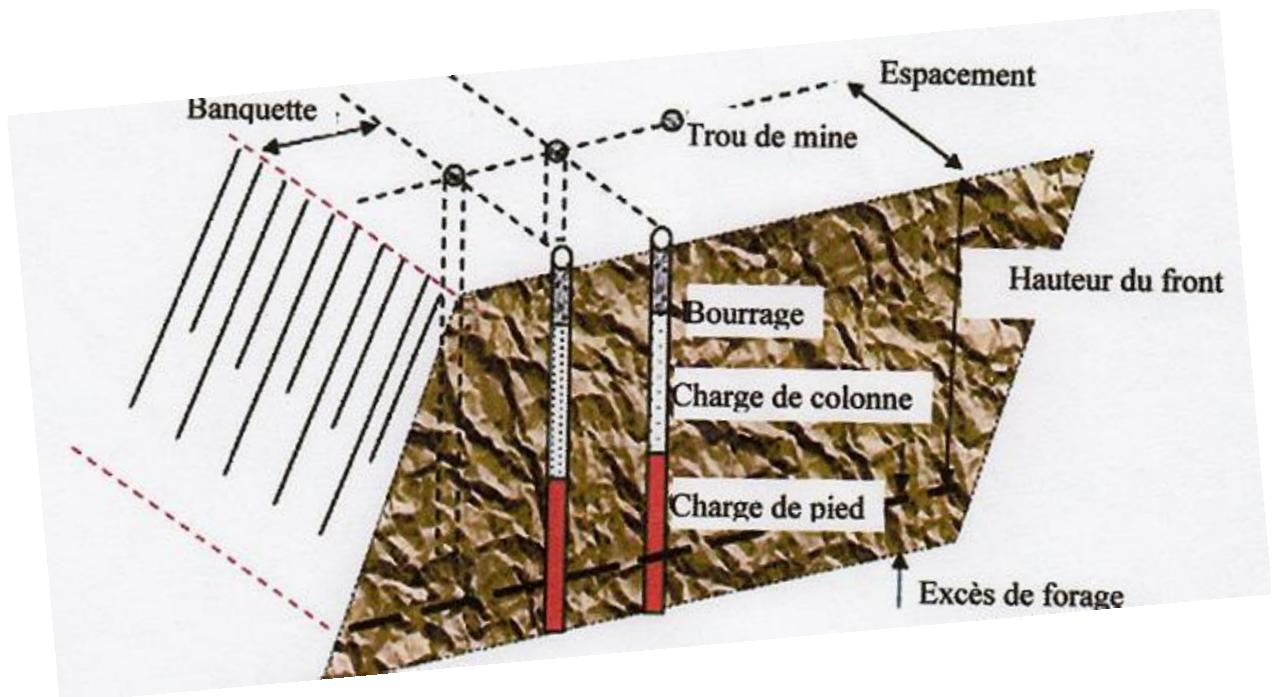


Figure 1.4- Schéma de disposition des trous

Les faibles lignes de moindre résistance permettront aux fissures radiales de s'étendre à la surface libre, ce qui engendrera une décharge des gaz de l'explosion avec une perte conséquente d'efficacité de tir, et une projection des roches dans l'air (figure 1.5).

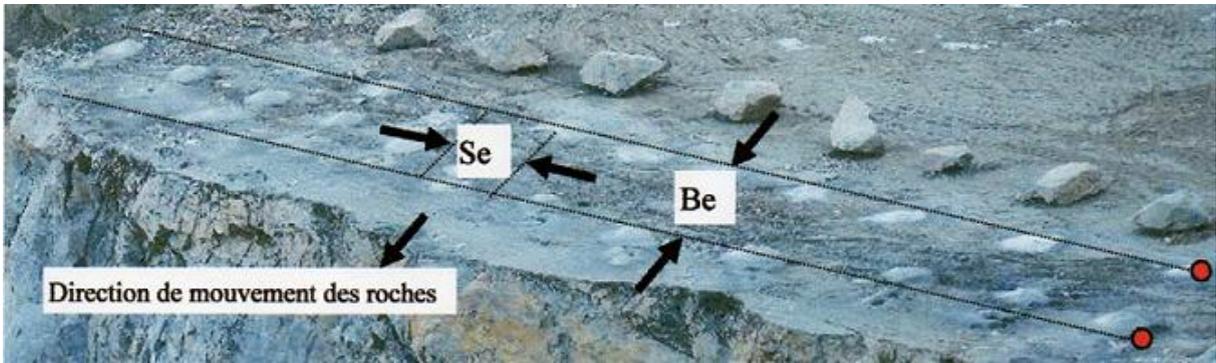
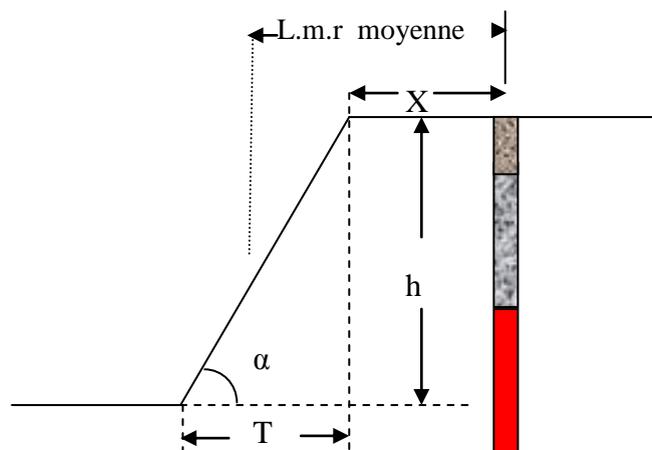


Figure 1.5- Plan de tir suivant une maille rectangulaire

Les lignes de moindre résistance assez grandes étoufferont le tir et produisent une fragmentation médiocre suivant une faible efficacité de tir.

La ligne de moindre résistance efficace B_e et l'espacement efficace S_e ne dépendent pas seulement du plan de tir mais aussi de la séquence de ce dernier. Comme illustré sur le schéma (figure 1.5), un plan de tir suivant une maille carrée donne une ligne de moindre résistance égale à l'espacement entre lignes consécutives parallèle à la surface libre. De l'autre côté, un plan de tir suivant des trous tiré en échelon résulte des lignes de moindre résistance complètement différents et espacé.

L'une des questions la plus importante dans la conception d'un tir, est le choix de la première ligne de moindre résistance. Si on utilise des trous de mines verticaux et le front du talus est incliné, la ligne de moindre résistance ne sera pas constante mais variera avec la profondeur comme illustré dans le schéma (figure 1.6). Un plan peut être établi pour cette variation en utilisant une plus haute charge d'énergie au fond suivant la première ligne de trous, c-a-d augmenter le contenu de l'aluminium pour la charge inférieure. Ou bien, le trou peut être incliné pour donner une ligne de moindre résistance plus constante. Lorsque la surface libre est irrégulière, l'utilisation de simples trous pour réduire la ligne de moindre résistance aux limites acceptables est recommandée.



Ou : L.m.r, La ligne de moindre résistance moyenne.

$$L.m.r = x + 1/2 t = x + 1/2 h \cot \alpha \quad (1.2)$$

Figure 1.6 - Schémas illustrant la disposition d'un trou dans un gradin

Puisque l'efficacité du processus de la fragmentation dépend de la création d'une surface libre, à

partir de laquelle une onde extensible peut être produite et que la ligne de moindre résistance peut déplacer, le traçage de la première ligne des trous est critique.

Une fois cette ligne réalisée et l'explosion donne son efficacité, une nouvelle surface libre sera créée pour la prochaine ligne, et ainsi de suite jusqu'à ce que la dernière ligne soit tirée.

1.4.4- Espacements efficaces

Lorsque les fissures sont en parallèle à la surface libre, suite à la réflexion de l'onde de choc, la pression de gaz entre ces fissures exerce une force vers l'extérieur ce qui produit la fragmentation de la roche et sont injectés en dehors sous forme de paillettes. Évidemment, l'atténuation des gaz pénétrés, est limitée par la dimension des fissures et le volume de gaz disponible, et une étape sera atteinte quand la force produite est assez grande pour fragmenter et déplacer la roche. Si l'effet d'un seul trou est renforcé par d'autres trous suivant un espacement efficace "Se", la force totale qui agit sur la bande de matière suivant la ligne de moindre résistance, sera équilibrée et par conséquent on obtient la fragmentation de la roche.

L'expérience pratique a montré qu'un espacement efficace de 1.25 fois la ligne de moindre résistance donne de bons résultats. Cependant, un travail par Lundborg, mentionné dans le journal par Persson [6], montre que la fragmentation améliorée peut être obtenue en augmentant l'espacement par rapport à la ligne de moindre résistance de 4, 6 ou même 8. Cette découverte a été incorporée dans le modèle "suédois" illustré dans la figure 1.8.

L'utilisateur, avant d'appliquer ce modèle, doit être prudent et tout dépend de la qualité de la roche. Les discontinuités qui traversent une ligne de trou permettent aux gaz de l'explosion de se décharger ce qui peut réduire l'efficacité du tir.

Lors de l'établissement d'un plan de tir, on doit respecter comme il est indiqué sur la figure 1.7 l'intervalle optimal.

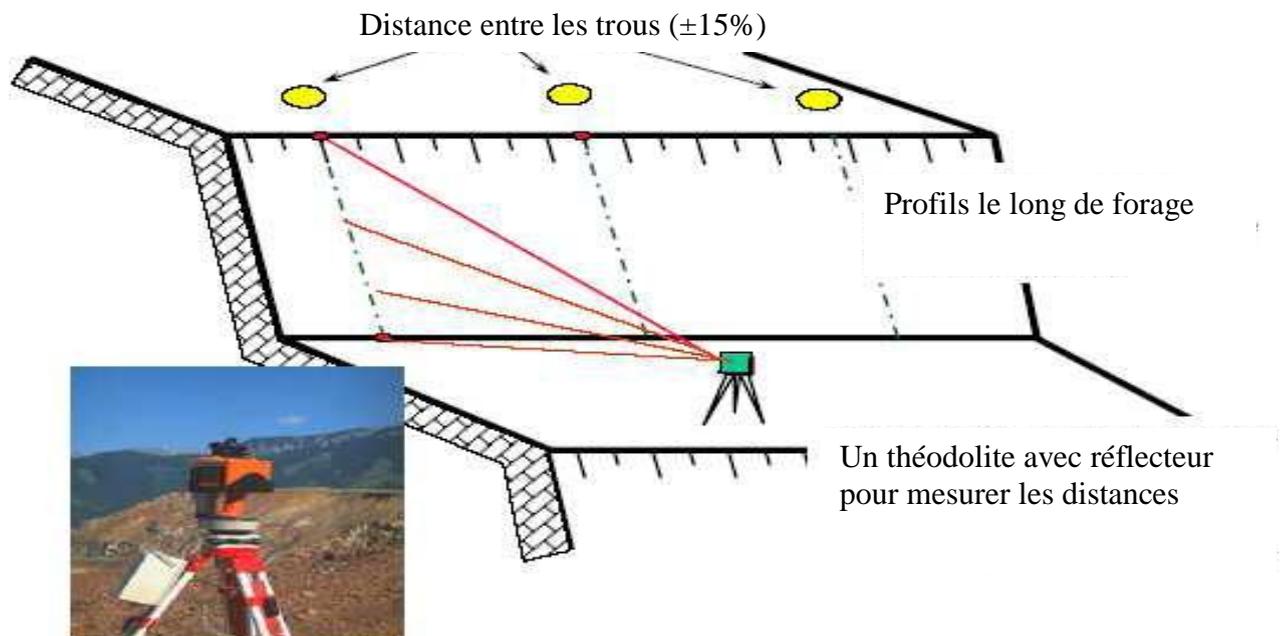


Figure 1.7- Schéma montrant l'intervalle optimal lors du forage

1.4.5- Excès de forage

L'excès de forage est nécessaire pour fragmenter la roche au pied du gradin et pour permettre aux engins de chargement de suivre le niveau exigé. Une fragmentation de qualité médiocre à ce niveau, peut conduire à des opérations très chères. La fragmentation excessive, endommage probablement la partie inférieure, et cela implique une réduction dans la stabilité du talus.

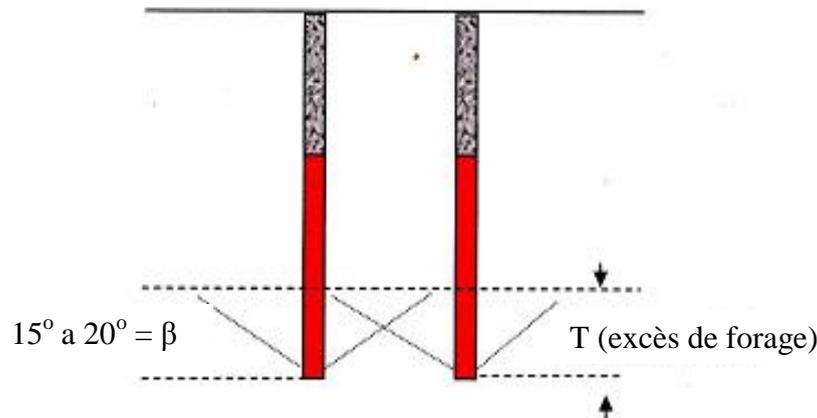


Figure 1.8- La rupture de la roche au pied du gradin

La figure 1.8, montre que la rupture de la roche à la base de la charge projeté sous forme d'un cône inversé inclinés de 15° à 20° , dépend de la force de l'explosion et la structure de la roche.

Dans un tir avec multi-ligne, l'interaction des cônes de rupture continue jusqu'à l'obtention d'une transition raisonnablement égale pour fragmenter la roche.

L'expérience a montré, qu'un excès de forage de 0,2 à 0,3 fois la distance entre les trous est adéquat pour assurer le creusement efficace à niveau du pied de gradin. C'est particulièrement important, que l'excès de forage ne devrait pas être dépassé dans la première et la dernière lignes, autrement qu'une crête instable et une condition du pied du gradin peuvent être créés dans le nouveau gradin. En fait, il y a la bonne justification pour réduire ou même éliminer l'excès de forage dans la première et la dernière ligne, si la stabilité du gradin est critique.

1.4.6- L'inclinaison du trou

La ligne de moindre résistance varie avec la profondeur si les trous sont verticaux et les fronts de tailles sont inclinés. Beaucoup d'équipements de forage peuvent être employés pour forer seulement les trous verticaux et dans un tel cas, le tir efficace de la première ligne peut être obtenu en variant la force de la charge avec la profondeur de trou. De l'autre côté, il y a une tendance croissante d'appliquer des trous inclinés, en particulier dans les travaux publics où les plus petits équipements sont employés.

Les trous inclinés sont avantageux pour la première ligne et, en forant des trous, parallèlement au front de taille, une ligne de moindre résistance constante est accomplie. Afin de maintenir une ligne de moindre résistance constante avec la profondeur pour le reste du tir, il faut que tous les trous doivent être inclinés. Suivant leurs investigations, les auteurs [8] montrent que l'application de trous forés suivant une inclinaison qui varie de 10° et 30° donne une meilleure fragmentation, et dans le même raisonnement l'auteur [9] rajoutent qu'un grand déplacement se produira suivant une réduction des fissures à l'arrière de la banquette.

1.4.7 - Le bourrage

L'utilisation de bourrage provenant des déblais de forage est une procédure généralement acceptée, pour contrôler le travail de l'explosif dans le massif rocheux. Les mêmes discussions suivant la ligne de moindre résistance, s'appliquent dans le cas de bourrage. Un faible bourrage permettra aux gaz de l'explosion de se décharger, ce qui créera des problèmes de projection dans l'air, tout en réduisant l'efficacité du tir. Tandis qu'un fort bourrage, produira une faible fragmentation de la roche au sommet de la charge.

La longueur optimum de bourrage dépend des propriétés de la roche, et peut varier entre 0,67 et 2 fois la largeur de la ligne de moindre résistance [9]. Les colonnes de bourrage, plus court que les deux tiers de la largeur de la ligne de moindre résistance amènent, à une projection de la roche, pertes de l'énergie de tir et problème de la fragmentation. Des colonnes de bourrages très longues donneront une fragmentation médiocre au sommet des charges.

Si des hors gabarits sont obtenus à partir du sommet du gradin, même si la colonne de bourrage est logique avec les problèmes de la projection des roches et la perte d'énergie, la fragmentation peut être améliorée en introduisant une petite poche de charge centralisée à l'intérieur du bourrage [9].

1.4.8 - Initiation des explosifs et types d'amorçage

Après avoir foré et chargé un trou, il est alors nécessaire de lier le modèle. Cela implique la pose du cordon le long de la rangée pour former la ligne qui est liée à chaque charge. Pour réduire les risques des ratés et assurer la détonation complète, dans le cas des grandes modèles, on applique les lignes de sécurité. Alors, au périmètre une ligne est attachée autour du modèle pour fournir un essai supplémentaire.

La mise à feu, ou la ligne de lancement sera normalement relier au milieu de la ligne principale du front. Les autres séquences du tir sont illustrées dans la figure 1.10. La séquence du tir, après l'initiation de la première ligne, est contrôlée par l'emploi des micro-retards.

La chaîne pyrotechnique de l'amorçage se compose de :

- D'un générateur thermique (mèche lente ou perle d'allumage de détonateur électrique),
- D'un explosif primaire,
- D'un explosif secondaire.

L'initiation de l'explosif primaire se fait généralement par plusieurs systèmes d'amorçage tel que: Les détonateurs électriques et non électriques (mèche et cordeau détonant). Ensuite l'explosif primaire initié la détonation de l'explosif secondaire.

On peut dire aussi qu'il y a deux types d'amorçage:

- Amorçage ponctuel (par détonateur électrique),
- Amorçage latéral (par cordeau détonant).

1.4.9 - Retards entre les trous successifs et la mise à feu de rangée

Dans des grandes mines à ciel ouvert, si la quantité totale de la roche à abattre par jour est entre

100,000 et 300.000 tonnes, l'opération technologique d'arrachement exige de 20 à 75 tonnes d'explosif. La détonation simultanée de cette quantité d'explosif, sera certainement accompagnée par un effet sismique qui va affecter la stabilité des talus. Donc pour minimiser l'ampleur et la portée de l'onde de choc, il est nécessaire d'employer les détonateurs à micro-retards.

L'emploi des détonateurs à micro-retards, nous permet de contrôler le processus de la fragmentation de la roche parce que, à la mise à feu de chaque charge un temps mort est créé ce qui va donner l'avantage à la prochaine charge explosive de travailler suivant plus d'une surface de dégagement.

Un tir typique avec une ligne de moindre résistance de 25 pieds peut être réalisé de la manière suivante:

- Rangée avant instantanée
- Rangée 2 35 millisecondes de retard
- Rangée 3 70 millisecondes de retard
- Rangée 4 105 millisecondes de retard

Pratiquement la mise à feu rangée par rangée est le modèle le plus satisfaisant. Les modèles de retard peuvent devenir tout à fait complexes, ce qui nécessite une vérification soignée. Pendant que l'obstruction se produit avec des tirs plus profonds et que des cratères verticaux peuvent être formés au-dessus des rangées arrière qui n'ont pas suffisamment d'espace libre pour se déplacer latéralement. Le nombre de rangée ne devrait pas excéder 4 à 6.

L'importance du tir à une surface libre a déjà été accentuée, et c'est également important d'organiser un plan de tir afin, que des surfaces libres convenables soient créées pour le prochain tir. Lorsque les surfaces libres ne sont pas disponibles, c-à-d la surface change la direction, il se peut qu'il y aura danger provenant d'un tir étouffé, et dans ce cas, pour travailler dans telle situation il est nécessaire d'utiliser des plans avec microretard.

L'application de schéma de tir avec microretard, est l'une des solutions les plus fiables contre les dégâts des tirs excessifs, et l'instabilité des gradins dans les mines à ciels ouverts.

1.5 - Mécanismes de la fragmentation

La détonation de la charge transmet au massif des contraintes pouvant engendrer des déformations transitoires ou bien irréversibles.

1.5.1 - Effet général des ondes de choc dans le massif rocheux

La détonation d'une charge s'accompagne de déformations dans le massif selon trois zones distinctes:

- La zone de broyage
- La zone de fissuration radiale
- La zone sismique.

1.5.1.1 - Zone de broyage

Les contraintes de compression subies à proximité de la paroi du trou dans les premiers temps de la propagation généralement excèdent la résistance à la compression de la roche. Tout se passe comme si cette zone était soumise à un régime hydrodynamique (figure 1.9 phase I).

La décroissance des contraintes est toutefois très rapide de sorte que de 3 à 5rc (rayon de la charge, elles reviennent en deçà de la résistance à la compression de la roche.

L'épaisseur de la zone de broyage dépend essentiellement de la pression maximale à la paroi du trou et des propriétés dynamique de la roche. Les roches cristallines à porosité faible offrent une résistance plus importante au broyage que les roches tendres et /ou poreuses [10]. La pression à la paroi du trou dépend de la densité de l'explosif. Par conséquent, l'épaisseur de la zone broyée peut être modifiée en variant la densité du chargement.

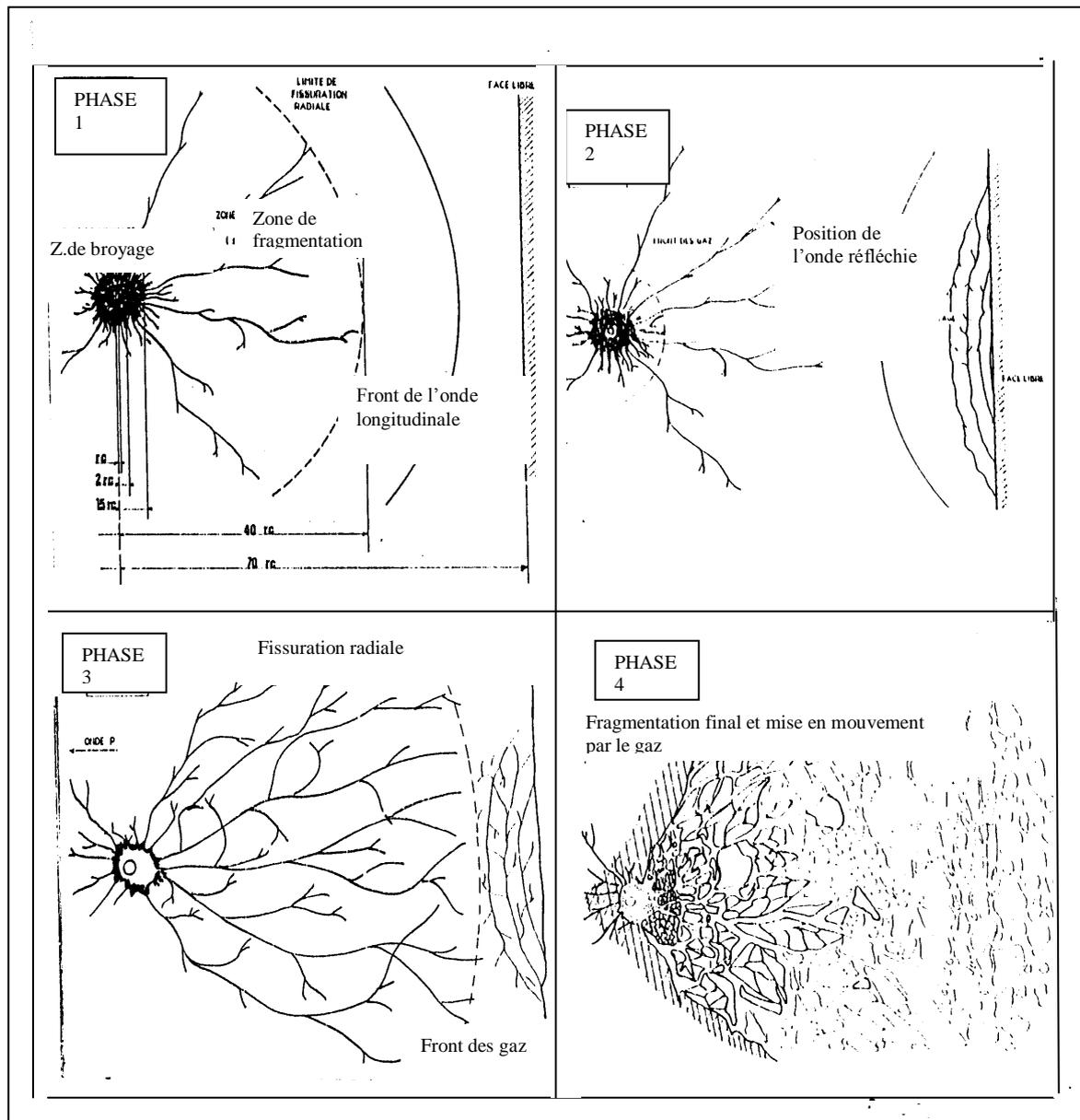


Figure 1.9- Développement de la fissuration et de la fracturation, (phase 1 à 4)

1.5.1.2 - Zone de fissuration radiale

Dans cette zone (figure 1.9 phase 2), la roche subit, en plus de la contrainte de compression, une contrainte tangentielle en traction ; Des fissures radiales se développent autour de la cavité jusqu'à ce que la contrainte tangentielle devienne inférieure à la résistance dynamique en traction de la roche. Ceci peut couvrir des distances comprises entre 20 et 50rc.

Toutefois, le mécanisme de la propagation de ces fissures n'est pas aussi clair. [11], d'après des essais au laboratoire des tirs (sur modèle physique) et en utilisant la méthode photographique, a conclu que ces fissures sont initiées et propagées à partir des fractures préexistantes dans le massif rocheux. Cela peut indiquer que les contraintes résiduelles jouent un rôle important dans la propagation de ces fissures.

1.5.1.3 - Zone sismique

Dans cette zone, aucune fissuration marquante n'apparaît et le massif rocheux suit un modèle classique de comportement élastique.

1.5.2 - Effet des ondes réfléchies

Dans le cas précédent, nous avons supposé le massif infini. En fait, les tirs sont généralement réalisés près d'une face libre qui contient une discontinuité importante.

En effet, dès qu'elle rencontre une discontinuité, l'onde de contrainte émise se scinde en une onde transmise et une onde réfléchie.

La répartition entre l'énergie transmise et l'énergie réfléchie dépend du rapport des impédances des matériaux d'une part et d'autre part de la discontinuité.

Dans le cas de l'interface roche/ air pris dans cet ordre, la réflexion est presque totale. L'onde de compression (longitudinal) se réfléchit en une onde de traction et elle peut conduire à des contraintes excédant la résistance à la traction de la roche. Cela se produit, lorsque la distance entre la source et la discontinuité est faible. Une fissuration parallèle au plan d'onde apparaît alors. Ce phénomène est appelé écaillage (phénomène illustré par le test de la barre d'**hopkinson**, figure 1.9 phase 2 et 3).

La présence de nombreuses discontinuités dans le massif (micro fissures) induit deux effets sur l'onde qui se propage:

- Affaiblissement du maximum de contraintes,
- Diminution des fréquences associées aux ondes de contraintes (phénomènes vibratoires).

Les ondes réfléchies jouent deux rôles:

- Modification de l'orientation des fissures radiales,
- Initiation de nouvelles fissures. Ainsi une nouvelle fissuration perpendiculaire à l'écaillage apparaît au voisinage de la surface libre.

1.5.3 - Fragmentation finale et mise en mouvement

Si l'onde émise et l'onde réfléchi sur la surface libre, ont pu pré fissuré ou, affaiblis suffisamment le massif entre cette surface libre et le diamètre du trou, les gaz emprisonnés va pouvoir poursuivre leur propagation et leur action. Ils s'infiltreront dans les fissures, complétant éventuellement la fissuration et mettent les blocs formés en mouvement.

1.5.3.1 - Effet de la présence d'une face libre

Lorsque l'onde de choc rencontre une discontinuité, elle se scinde en une onde transmise et une onde réfléchi. La répartition entre l'énergie transmise et l'énergie réfléchi dépend du rapport des impédances des matériaux de part et d'autre de la discontinuité. Dans le cas de l'interface roche/air, la réflexion est presque total [12]. L'onde de compression se réfléchit alors en une onde de traction qui est responsable de la formation d'une fissuration parallèle au plan d'onde; Ce phénomène bien connu est appelé écaillage (figure 1.9 phase 2 et 3).

1.5.3.2 - Effet des gaz libérés

La fissuration générée par l'onde émise et l'onde réfléchi permet aux gaz libérés de poursuivre leur propagation et d'affaiblir davantage le massif; Ils filtrent dans les fissures, prolongeant éventuellement la fissuration et mettent en mouvement les blocs obtenus (figure 1.9 phase 4).

Jaeger et Cook (1979) prétendent que les gaz libérés [13] sont le facteur principal de la fragmentation. La génération de la fissuration radiale ne peut pas être le résultat de l'onde de choc émise, selon eux, car la vitesse de la propagation des ondes est bien plus élevée que la vitesse de la propagation de ces fissures. C'est alors la pression quasi-statique créés par les gaz libérés qui engendre des contraintes compressives radiales et des tractions tangentielles, lesquelles génèrent ces fissures. Elles sont par la suite prolongées par les gaz sous pression responsables de la fragmentation finale.

1.5.4 - Autres théories de la fragmentation

- Fragmentation due au cisaillement et à la collision des blocs pendant la projection,
- Rupture flexurale,
- Théorie de la comminution.

1.6 - Les paramètres liés aux tirs

1.6.1- Données de base de la mise en œuvre d'un tir minier

La discussion ci-dessus donne une idée de la complexité liée à l'exécution d'un tir dans les massifs rocheux. Toutefois, nous pouvons classer les variables et les paramètres qui interviennent selon que ces paramètres sont contrôlables ou non comme indiqués dans le tableau 1.3.

Tableau 1.3 : Paramètres de tir de mines	
Contrôlables	Incontrôlables ou difficilement contrôlables
<p>paramètres géométriques</p> <p>Diamètre du trou longueur de foration surprofondeur de foration inclinaison du trou longueur de bourrage matériel de bourrage hauteur de talus géométrie de maille rapport espacement/banquette (rapport de maille) configuration globale de la géométrie du tir direction de tir nombre de faces libres taille de volée</p>	<p>Paramètres du massif en place</p> <p>géologie résistance et propriétés de matériaux discontinuité préexistantes dans le massif</p>
<p>Paramètres liés à l'énergie explosive</p> <p>type d'explosif utilisé énergie (choc, gaz) configuration de chargement méthode de chargement type d'amorçage séquence d'initiation</p>	<p>paramètre hydrologique</p> <p>eau (quelquefois maîtrisable)</p>
	<p>Autres</p> <p>temps</p>

1.6.2 - Les propriétés de la matrice rocheuse

1.6.2.1 - Effets des discontinuités naturelles

Il est étonnant que ce paramètre soit si rarement explicitement indiqué dans les études sur le tir à l'explosif. Sur le terrain, les praticiens choisissent, s'ils le peuvent, de travailler avec ou contre le pendage suivant les résultats escomptés, Batifoulier [14] cette absence de données quantifiées (sur le terrain) ne doit pas conduire à sous estimer ce paramètre car l'on sait montrer d'un point de vue théorique et sur des modèles réduits son influence réelle. Les ondes de chocs se comportant à l'égard des discontinuités peu ou prou comme des rayons lumineux en optique, les phénomènes de réflexion, entre autres, sont bien montrés par l'expérience de la barre d'Hopkinson. Sur le terrain les preuves de fracturation par réflexion (inversion des ondes de compression en ondes de traction) sont hélas beaucoup plus difficiles à observer.

Comme en optique, il est donc important de [15] connaître la direction et le pendage des joints, la fréquence des joints mais aussi la nature des remplissages pour évaluer ce qui sera transmis, réfléchis par les différentes discontinuités géologiques (diaclasses, stratification, ...).

1.6.2.2 - Influence du type de roche

Dans le modèle de Kuznestov [16], la nature de la roche est traduite par un facteur que l'on peut faire varier de 0,7 à 1,3.

$$D_{50} = A (V / Q)^{0,8} * Q^{0,167} \quad (1.3)$$

- D₅₀ - Diamètre correspondant à 50% de passant.
- A - Variant de 7 à 13 suivant la roche.
- Q - La charge en équivalent TNT (en kg).
- V - Volume par trou (en m³)

C'est un peu court à mon avis pour caractériser la nature des roches (ou la traduire en équation). Kristiansen [17] quantifie par ces travaux l'influence du type de roche sur la fragmentation à charge spécifique constante. Dans son article, Reichholf [18], passe en revue différents paramètres mécaniques, (résistance à la compression, module de Young ...) et indique s'ils ont une influence ou non sur la fragmentation des roches. La notion de « caractéristique intrinsèque » de la roche reliant la surface nouvelle créée à l'énergie de fragmentation a été développée dans les travaux de Steiner entre autres, Ortiz [19] l'utilise dans son travail de thèse concernant la fragmentation à l'explosif d'un béton. Cette « caractéristique intrinsèque » d'une roche [20] doit être retenue pour l'élaboration d'un modèle énergétique de fragmentation. Elle traduit, en quelque sorte, la cohésion du matériau et rend parfaitement compte des similitudes de comportement d'un matériau à différentes échelles. Dans nos deux cas d'études, la nature de la roche sera considérée comme constante. Les zones des carrières où la nature géologique des roches est notoirement distincte, seront « distinguées » dans l'étude statistique.

1.6.3 - Les paramètres liés à l'énergie explosive

1.6.3.1 - La consommation spécifique.

C'est l'outil principal pour caractériser un tir en Kg/m³ ou Kg/tonnes.

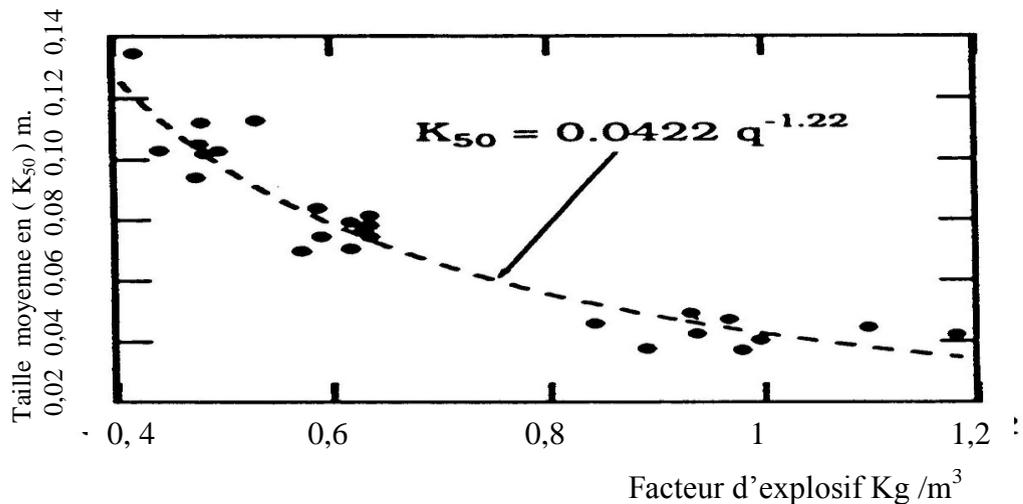


Figure 1.10 - Taille moyenne par rapport au facteur d'explosif

Cet indicateur suffit à Kuznestov [16], et à d'autres, Stagg [21], pour estimer le D₅₀ d'un tir (figure 1.10). Il est évident pour tous qu'en augmentant la charge spécifique on diminue le D₅₀.

Bien sûr, la nature de l'explosif est également à prendre en compte et c'est pourquoi on travaille assez souvent en équivalent TNT où maintenant plus « rigoureusement » en utilisant des énergies en MJ/tonne. On distingue également énergie de choc et énergie de gaz, énergie en pied de charge, énergie en colonne.

On considère par ce paramètre de charge spécifique une répartition moyenne et homogène de la charge dans le volume à abattre. On peut voir l'importance de cet index par exemple dans les travaux de Kritiansen [22], figure 1.11 où il montre l'évolution de la fragmentation en fonction de la charge spécifique pour des cubes de béton.

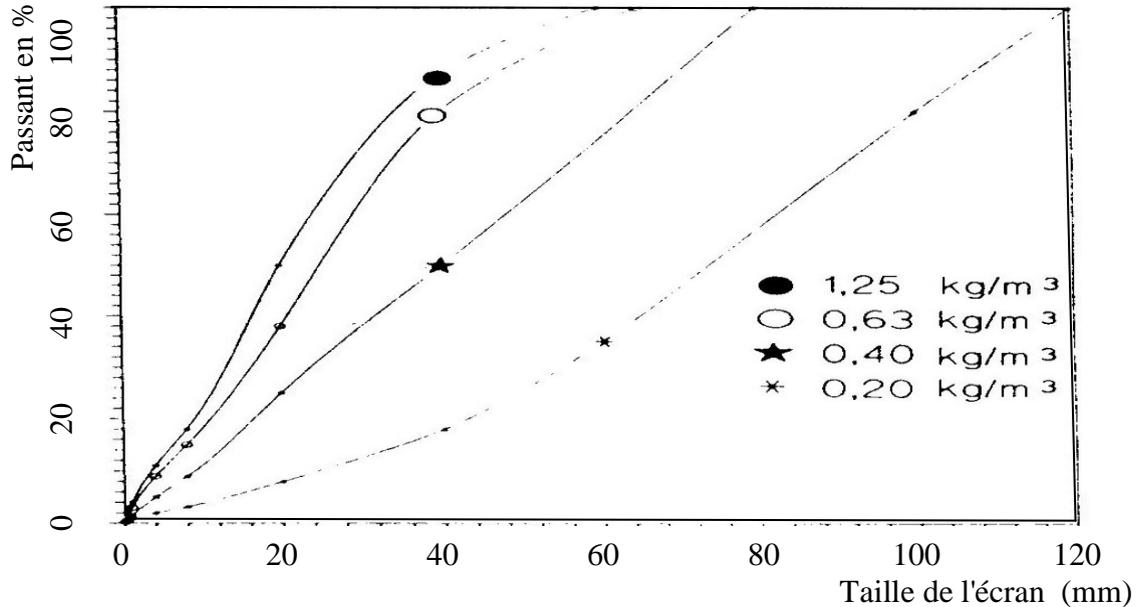


Figure 1.11 - Distribution granulométrique résultant de tir des blocs en béton avec charge spécifique 0,2 à 1,25 kg /m³

1.6.3.2 - La géométrie de tir

La banquette, l'espacement et l'inclinaison des trous, la hauteur du front sont des paramètres que l'on sent évidemment liés mais qui sont difficiles à intégrer dans un indicateur unique. Les études sur la géométrie du tir sont réalisées le plus souvent paramètre par paramètre.

Dans son article sur les tirs à haut rendement de bloc, Cappello [23], propose une maille dissymétrique avec des charges découplées. Cette méthode donnant de bons résultats, on peut penser que la symétrie de la maille a une influence sur le mode de rupture. Pour la hauteur du front, le rapport entre hauteur du bourrage et hauteur du front indique approximativement la proportion de bloc de bourrage non fragmenté lors du tir à l'explosif.

L'inclinaison du tir semble être principalement un outil de stabilité des fronts plutôt que de fragmentation. Il n'y a pas à ma connaissance d'index synthétique permettant de « résumer » la géométrie d'un tir.

1.6.3.3 - L'amorçage

Dans les fiches de tir, la séquence d'amorçage et la position de l'amorçage ne sont pas souvent indiquées, comme si on faisait à peu près toujours la même chose sur une carrière. Cela a pourtant de l'importance comme le montre l'apport de l'amorçage fond de trou dans les

carrières, Thum [24].

L'amorçage est le plus souvent fond de trou, mais on voit encore de l'amorçage latéral par cordon détonant notamment lorsque les trous sont très longs. On dit en général que lors d'un amorçage fond de trou, l'efficacité du confinement de la charge explosive est nettement améliorée.

Pour les micro-retards entre trous, on utilise en général un numéro par trou en sachant bien que l'espacement des trous est aussi à prendre en compte. Des calculs numériques permettent de montrer l'interaction des différentes ondes, Rossmanith [25], par contre les études sur le terrain sont encore peu nombreuses quant à la démonstration d'une efficacité dans la fragmentation des roches, Katsabanis [26] et Grant [27], figures 1.12 et 1.13 au niveau de la maîtrise des vibrations les résultats sont plus probants, Bernard [28].

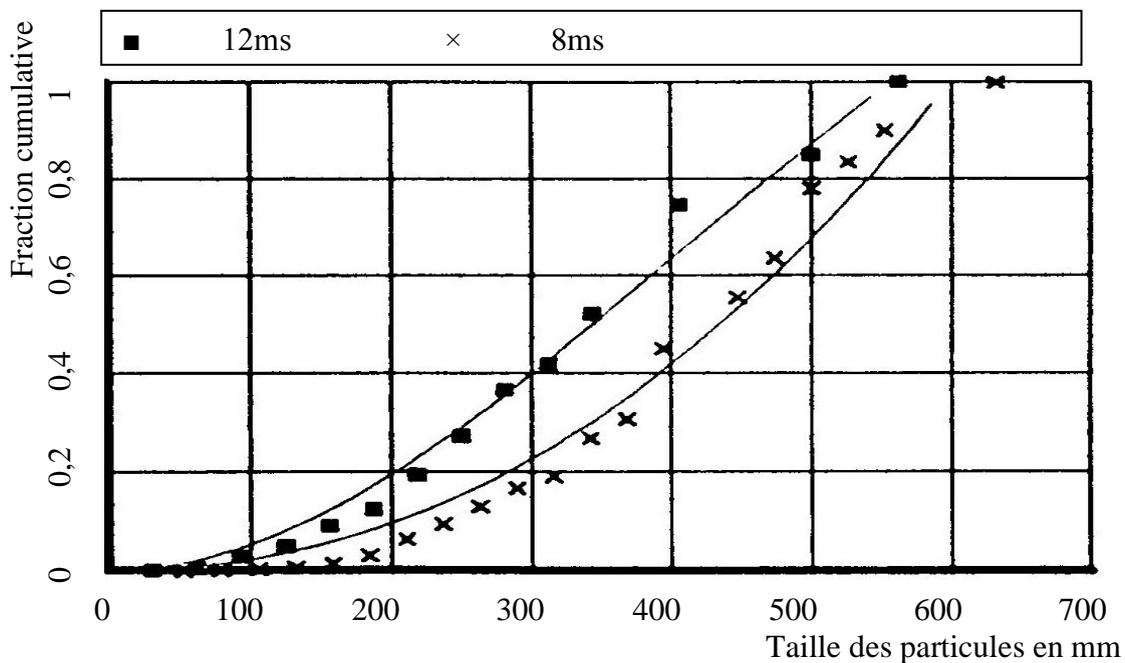


Figure 1.12 - Les courbes de distribution de la fragmentation

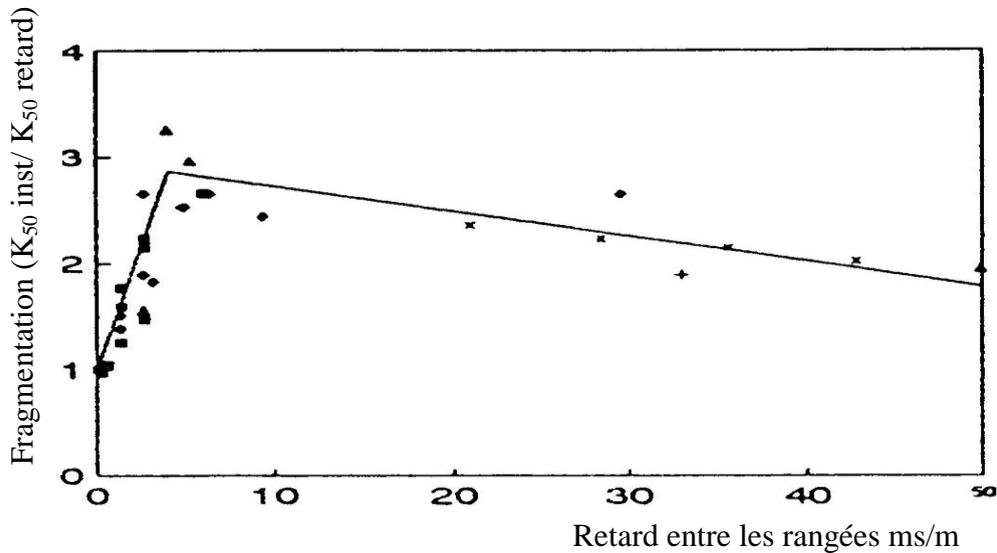


Figure 1.13 - Effet du retard sur la fragmentation

1.7 - Conclusion

Les connaissances actuelles suivant la fragmentation à l'explosif des massifs est assez limitées. Cependant, un exploitant ne dispose que de règles de l'art existantes et au mieux de quelques modèles disponibles, mais dont la validation à l'échelle industrielle reste le plus souvent à démontrer.

En face des spécialistes des mines des exigences se posent, d'un cote fournir de grandes quantités de roche bien fragmentée pour le processus de traitement et de l'autre cote minimiser le coût. Un compromis raisonnable entre ces deux exigences incompatibles ne peut être accompli que sur la base d'une compréhension très poussée des facteurs qui contrôlent la fragmentation des roches.

Le processus de la fragmentation des roches à l'explosif est difficile à expliquer par des analyses mécaniques. Une méthode de conception et de calcul par ordinateur du problème semble être la seule à fournir une réponse.

Chapitre 2 - Processus physique de l'abattage des roches à l'explosif

Chapitre 2- Etude du processus physique de l'abattage des roches à l'explosif

2.1- Introduction

Bien que la fragmentation des roches durant les travaux de tir a reçu une attention considérable dans les dernières décennies [30, 31, 32, 35], le problème est resté mal compris en raison de la complexité associée aux travaux de tir. Pour prédire la performance du travail d'un explosif, il est nécessaire de prendre en considération l'interaction entre roches et explosif. Cela exige de la connaissance des comportements des roches quand elles sont soumises aux effets externes transitoires. L'homogénéité est l'un des facteurs les plus importants qui affectent la rupture progressive, généralement considéré comme un élément de distribution des fissures préexistantes dans la roche.

Grâce à la mécanique des roches, au cours des 10-15 années de la fin de siècle, il a été établi une base théorique de l'évaluation de l'effet du tir à l'explosif sur les roches. Lors de la mise à feu d'une charge explosive, deux points de vue sont avancés quant à l'utilisation de l'énergie libérée. D'un côté les ondes de chocs sont en grande partie ignorées, et la fragmentation est réalisée principalement par une grande pression des gaz (Longfors et Kihlstrom, 1963; et du Presson et al 1970) [45,51]. Pour appuyer ce point de vue, une argumentation des effets, a montré que l'onde de déformation agit une très faible partie de l'énergie explosive totale [60].

De l'autre côté, Duval et Atchison [38] sont parmi ceux qui ont suggéré que cette rupture de la roche, se produit par onde de déformation réfléchie d'une surface libre. Un exemple souvent cité, indique que la formation de cratères est obtenue sans la présence de la totalité des gaz de l'explosion dans la zone du cratère.

Malgré les nombreuses études effectuées par beaucoup de chercheurs, le phénomène de formation d'une croûte n'a jamais donné une explication complète au phénomène de la fragmentation des roches.

Sang Ho Cho et Katsuhiko Kaneko ont montré qu'un taux plus élevé de pression augmente le nombre de fissures radiales et conduit à une libération de déformation intense autour des fissures. La libération de la déformation [39] causée par les fissures adjacentes interfère avec l'extension de fissure et permet d'avoir la propagation des courtes fissures. Avec un taux de déformations réduites, le nombre de fissures et l'arrêt de la fissuration causée par la pression libérée à fissures adjacentes sont réduites aussi conduisant à arrêter l'extension des fissures.

Les analyses dynamiques du processus de rupture sont étendues pour examiner l'influence de l'onde de déformation sur le processus de rupture dynamique dans un modèle à surface libre. Ces processus de rupture révèlent que les augmentations de nombre de fissure est proportionnelle à l'augmentation du temps de montée, et que, lorsque le temps de montée est assez long, l'extension de la fissure dépend, principalement, du temps de montée et de la valeur maximale de la pression appliquée. Dans tous les cas l'arrêt de fissure se produit après que l'onde de contrainte atteigne un niveau maximum.

Jusqu'à présent, le phénomène de l'effet de l'action des gaz sur la rupture des roches est inconnu. Porter (1971) [40] a suggéré que les fissures observées seulement sous la pression ont été formées suivant les trajectoires des contraintes principales.

Plusieurs chercheurs, ont montré l'importance de l'effet de l'onde de choc et la pression des gaz sur les résultats de la fragmentation des roches. Étant donné l'orientation du cratère, saluja [64] a montré que les faibles explosifs nous permettent d'obtenir des angles plus proche de 90°, et avec les explosifs a forts caractéristiques, les angles formés sont beaucoup plus important. D'après lui, avec l'emploi des faibles explosifs, se sont seulement les gaz qui participent au travail et les angles obtenu, sont proches de 90°. Tan disque, avec l'emploi des explosifs a haute caractéristiques, les angles formés sont supérieur a 90°, il a été établir que cette rupture de roche se produit sous l'action combinée de l'onde de choc et le gaz.

Field et ladegaard–Pederson [42] ont montré qu'après l'initiation, les fissures radiales suivant la séquence du tir sont formées tôt par l'onde de choc à la périphérie du trou. La réflexion des ondes de chocs déterminent l'étendus des fractures et la direction de leur propagation. Il a été établie, qu'avec les charges longitudinales, les plus grands angles de ruptures qui approchent les 180° devraient être observés. Il est nécessaire de prendre en considération les effets de fracture associée avec les propriétés de la roche et des forces externes pour contrôler la fracturation des roches à l'aide pression de tir.

Comme la roche est un matériau non homogène, la fracturation peut être traitée comme un processus stochastique. Cela provoque un taux de déformation dépend du processus de la fracturation et affecte la résistance dynamique [32]. A un taux de déformation plus faible, seules quelques grandes microfissures se forment sous le champ de contrainte de traction appliquée; croître comme contrainte continue, et éventuellement causer une mauvaise fragmentation. À des taux de déformation plus élevés, un grand nombre de microfissures sont générées dans le cadre du champ de contrainte de traction appliquée sans aucune défaillance. Cela conduit aux hautes forces de rupture ou de contraintes par rapport à ceux obtenu à un taux inférieur de tension [29,32].

La dépendance taux de déformation et la fractures de la roche soumis a une pression de tir peut être trouvé dans plusieurs études [33,34]. Si la vitesse de pression de déplacement est très rapide, un concassage de la roche à proximité du trou de forage se passe bien; si la vitesse de déplacement est très lente, les fractures produire une seule fracture hydraulique similaire à celle provoquée par la pression statique.

Récemment, l'effet de l'onde de pression des tirs sur le processus de rupture a été étudié en utilisant des modèles numériques basés sur des éléments distincts [35]. En bon accord avec les observations et les prévisions théoriques

Une autre étude scientifique utile, a montré que la pression des gaz influe d'une manière plus importante et considérable sur la fragmentation des roches; (kutter, 1967). Il a été établi, que seulement la pré-climatisation, c-a-d la pré-fissuration et l'élargissement efficace du trou par l'onde émise et la réduction de la ligne de moindre résistance formant une croûte qui permettent une pleine utilisation des gaz en expansion, lors de la fragmentation des roches. Lors de la présence d'une surface libre, les fractures radiales qui pointent vers la surface sont favorables dans la génération et l'extension des fissures.

En 1975, une investigation a été effectuée sans utiliser la technique photo élastique [43]. Les plans de la fracture ont été montrés suivant deux modèles, l'un sous l'effet des gaz et l'action de l'onde de choc, et l'autre modèle sous l'action de l'onde de choc seulement. Pour le modèle avec la charge discontinue, la proportion maximale du rayon des fissures au diamètre du trou était 7. Tan disque qu'avec la charge continue cette proportion était au moins 37. Cela indique l'importance de l'action de gaz sur le plan des fissures, quand ils sont associés avec l'action de l'onde de déformation. Cependant, lors de la préparation du model physique de tir, on a découvert qu'il y a encore des intervalles, et beaucoup de contradictions dans les théories et l'interprétation des données. Pour comprendre les modèles de rupture de la roche, ces intervalles doivent être étudiés pour devenir possible, et les contradictions soient résolues.

A part les études théoriques et expérimentales, il existe aussi d'autres théories qui peuvent simuler le tir, on distingue les théories suivantes:

- 1- Théorie de l'expansion du gaz,
- 2- Théorie de la réflexion de l'onde de choc.

En analysant les investigations avancées, nous constatons que chaque chercheur a renforcé sa théorie par des expériences établie sous certaines conditions. En plus de ces efforts, et pour donner une meilleure compréhension du problème de la rupture des roches, on projette de présenter un travail théorique supplémentaire en se basant sur l'établissement des modèles mathématiques reflétant l'action des gaz et celle de l'onde de choc.

2.2 - Etude des théories de la rupture des roches

Les théories suivantes, ont été développées pour expliquer l'effet relatif aux deux sources d'énergie potentielle d'un explosif.

2.2.1 - Théorie de l'expansion du gaz

L'onde de choc est considéré comme responsable pour la plupart, ou pour la totalité, de la génération des nouvelles fissures. L'énergie restante est contenue [44] dans les gaz à haute pression. Lors de l'expansion, ces gaz produisent l'extension des anciens et de nouvelles fissures et, éventuellement, le déplacement du volé à abattre. Le préjudice global de la roche entourant le trou de forage implique à la fois de ces effets.

Suivant cette théorie, on suppose qu'initialement des petites fissures sont formées autour de l'explosif, à cause de l'onde de choc, mais que les fractures sont tout simplement causée par l'expansion des gaz dans ces fissures, tout en développant des fissures qui croissent jusqu'à ce qu'ils arrivent à la surface libre [36,45].

2.2.2 - Théorie de la réflexion de l'onde de choc

La surface libre et les joints ouverts jouent un rôle majeur dans le processus de rupture de la roche. Une surface libre située a une distance [44] optimale du trou de mine permettre à l'énergie des explosifs de effectuer la plus grande quantité de travail sur la masse rocheuse. L'explosion sera plus efficace si la plate forme a tirer a plus d'une faces libres. Cela est provenu d'expérience faite dans le verre et perspex par kolscky [46], et a été proposé pour le tir des roches en premier par hino [47], et par la suite élaboré par beaucoup de chercheurs [18, 23, 56, 62, 65]. L'hypothèse, est que l'onde de choc qui émane de l'explosif fragmente

toute la roche, en premier par l'onde de la compression résultant de l'explosion de l'explosif, et par la suite par l'onde extensible réflétée dans la roche à partir d'une surface libre. Aussi N G Nair [52] à montrer que lorsque l'onde de contrainte de compression frappe une face libre ou une discontinuité ouverte dans la roche; une onde de contrainte de traction est réfléchiée vers le trou de mine. L'énergie de choc ne doit pas être confondue avec la fragmentation. La fragmentation se produit également lors des étapes ultérieures.

On distingue aussi la théorie de la parution-charge, située entre la théorie des gaz et la théorie de l'onde de choc.

2.2.3 - Théorie de la parution-charge

C'est une théorie d'énergie de fragmentation de la roche. Suivant cette théorie on suppose qu'initialement il y a en plus de transfert de l'énergie de l'onde de choc, transfert temporaire de l'énergie du tir à la roche, par la puissante compression de la roche qui entoure le trou. Alors, lorsque la pression dans les trous baisse, l'énergie est soudainement répartie suivant la roche à fragmenter dans la direction du trou, en créant des contraintes à la tension qui fracturent la roche [53].

Cependant, la signification respective de la pression du gaz et la théorie de l'onde de choc de rupture de la roche, sous l'effet d'un explosif, n'ont pas été résolus. Ce serait instructif, si c'était possible de séparer la courte action du temps de l'onde de choc réfléchiée, et les longs effets du temps relativement associé à la pression des gaz.

Pour étudier l'effet de la séparation sur la rupture des roches on a développé un programme informatique.

2.3 - Approche moderne à l'interprétation de rupture des roches dans le tir des gradins

L'énergie de l'explosif est répartie dans toutes les directions, mais seulement une portion d'énergie totale qui est dirigée vers une surface libre également, peut accomplir la rupture utile.

Le processus de la rupture peut être divisé en trois étapes:

a - Suivant la détonation de l'explosif, la haute pression fissure la roche dans la région adjacente du trou. L'onde de choc extravertie (compression) augmente la résistance à la contrainte tangentielle qui crée les fractures radiales [54] qui apparaissent en dehors de la région du trou, figure 2.1, stade 1.

b - Lorsque l'onde de choc arrive à une surface libre; elle reflétera comme une onde de tension. Et cette onde de tension se rétracte en arrière dans la roche, l'étape est atteinte lorsque la somme de l'effet de l'onde à la compression de la propagation et l'onde réfléchiée cède une onde extensible nette. Lorsque la roche devient moins résistante à la tension et à la compression, ceci développe une situation favorable pour crée l'effet arrière à la surface, figure 2.1, stade 2.

c - Dans la dernière étape, la rupture de la roche prend place lentement. Sous l'influence de la haute pression des gaz de l'explosion, les premières fissures radiales fondamentales dû à

l'effet combiné de la résistance à la tension induite par compression radiale, en calant de l'air pneumatique et à cause de la résistance à la tension réflétee sont rapidement agrandies. Lorsque la masse au front du trou de tir cède et avance, la grande contrainte à la compression accentue dans la roche s'évacue. L'effet de décharger est d'induire de hautes résistances à la tension dans la masse qui complète le processus de la rupture figure 2.1, stade 3. En plus de la rupture de la roche, le déplacement des roches fragmenté est accompli par les produits des gaz.

De l'interprétation précédente de la rupture des roches, on peut dire que le mécanisme du tir des roches réel, se trouve probablement quelque part entre les trois théories extrêmes, onde de choc, expansion de gaz et la théorie d'énergie.

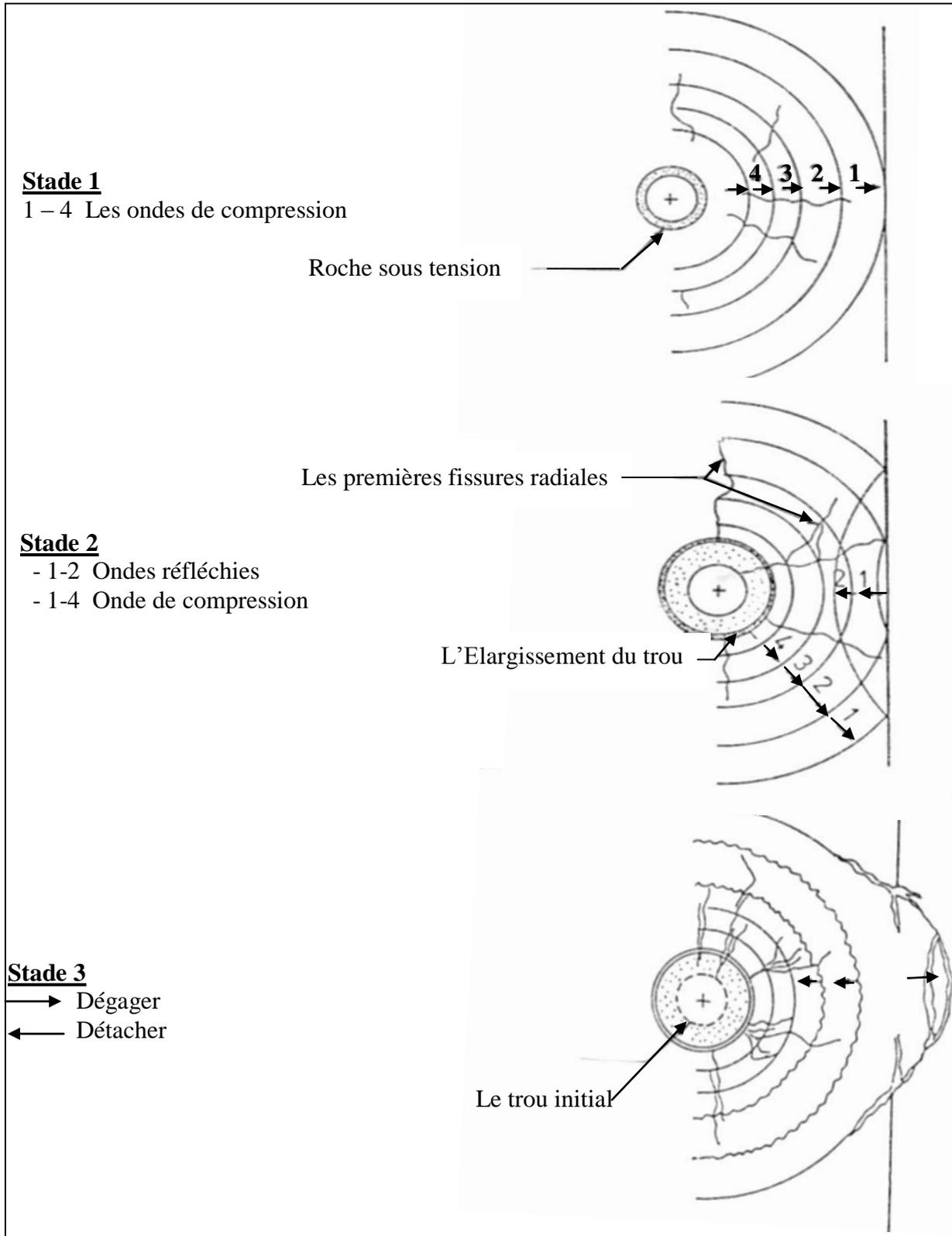


Figure 2.1 - Evolution des contraintes induite par le tir.

2.4 - Effet de la ligne de moindre résistance sur le mécanisme de tir

L'auteur croit que l'onde de déformation et le gaz dégagé peuvent jouer un grand rôle dans la rupture des roches, qui dépend de la ligne de moindre résistance (tir de gradin) ou la profondeur de la charge (tir du cratère).

2.4.1 - Tir de gradin

Pour clarifier l'effet de la ligne de moindre résistance sur les rôles respectifs de l'onde de choc et la pression de gaz dans la rupture des roches, trois cas seront considérer pour juger le rôle de chacun:

- A- la ligne de moindre résistance sera prise suivant une valeur supérieure à l'optimum;
- B - la ligne de moindre résistance sera prise suivant une valeur inférieure à l'optimum;
- C - la ligne de moindre résistance sera prise suivant la même valeur que l'optimum;

La figure 2.2A montre, que lorsque l'amplitude de l'onde de déformation atteint la surface libre, elle tombe au-dessous pour produire l'élargissement de l'onde de la fragmentation; après, la zone nécessite progressivement beaucoup de contrainte afin que la fragmentation dans la zone de soulagement des contraintes devienne beaucoup moins étendue. Ce type de tirs produits une fragmentation médiocre.

Dans la condition du cas (B) c'est le contraire, l'onde des contraintes à la surface libre est considérablement plus haute. Cela résulte de la parution d'une plus grande onde qui fracture et projette la roche à grande vitesse. La fragmentation de la zone de soulagement devient excessive à cause d'une parution soudaine de plus haute pression.

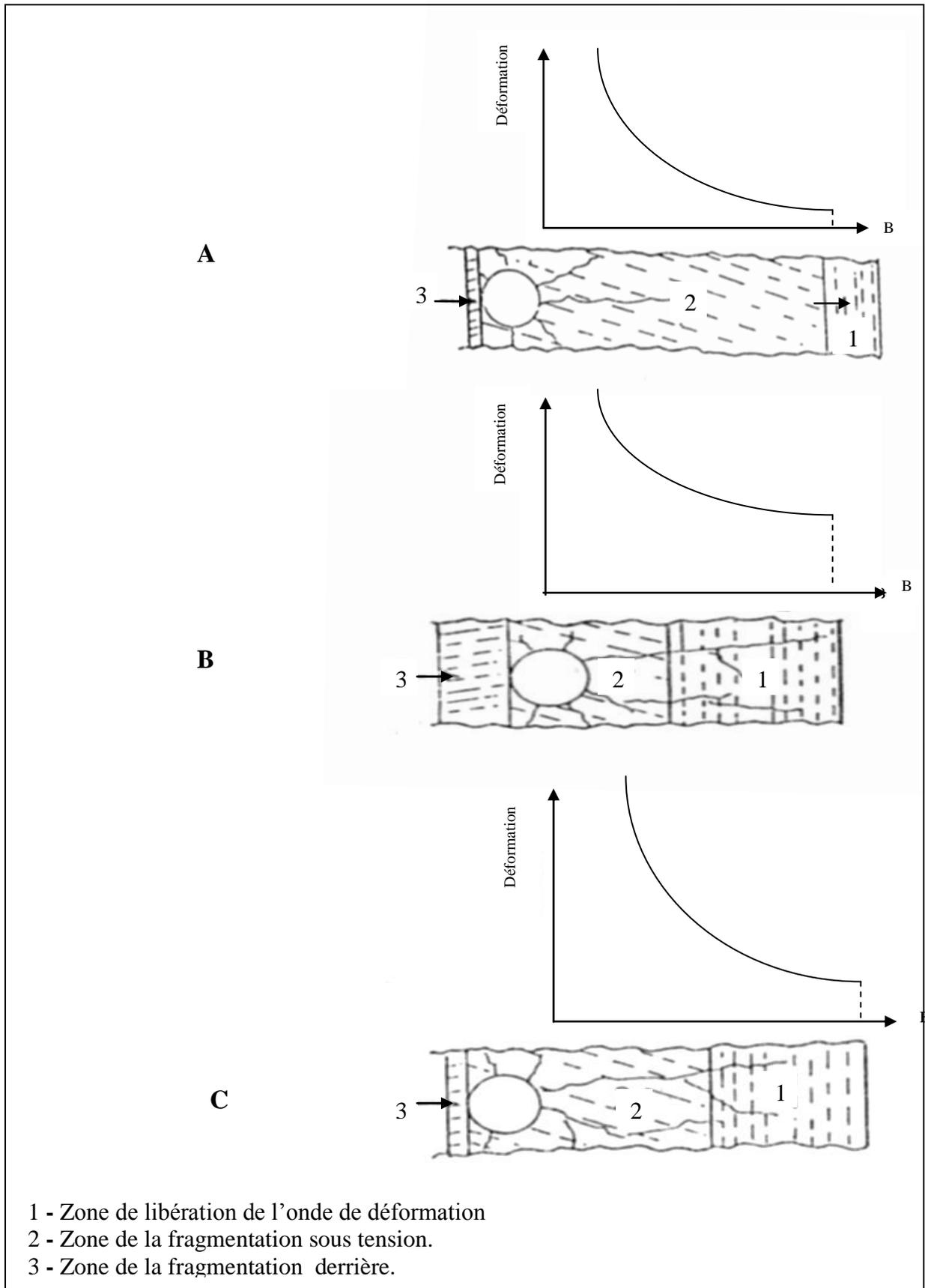


Figure 2.2 - Effet de la ligne de moindre résistance sur la fragmentation

Dans le cas (C), l'onde de déformation à la surface libre suit l'arrivée d'une onde qui se déplace en arrière avec l'amplitude modérée. Dans ce cas, l'énergie de l'onde de déformation et l'énergie du gaz qui sont produit par l'explosion ont un rôle important dans la rupture des roches.

2.4.2 - Tir de cratère

Pour une charge concentrée enterrée en dessous d'une surface libre, Livingstone a défini quatre zones du tir de trous qui dépendent de la ligne de moindre résistance ou distance de la charge par rapport a la surface libre, Gregory, Atchison , Greenland , Livingston , Bauer, Saluja, [55, 56, 57, 58, 59, 41], ce sont:

- la zone d'énergie de déformation,
- la zone d'énergie du choc,
- la zone de la fragmentation,
- la zone du tir.

Comme la ligne de moindre résistance est diminuée d'infinité, suivant une charge de poids constant, les zones se produisent dans l'ordre précité.

2.4.2.1: Zone d'énergie de déformation

Dans cette zone aucun cratère ne se produit. L'énergie de l'explosion est complètement absorbée par la structure moléculaire de la roche. La profondeur où la surface de rupture juste devient évidente est appelée la profondeur critique et ce point indique la limite supérieure de la zone d'énergie de déformation. Livingstone décrit un rapport entre la profondeur critique et le poids de la charge, dans la forme:

$$N = E_S (Q_E)^{1/3} \quad (2.1)$$

Où N: profondeur critique,

Q_e : poids de charge explosive,

E_S : facteur d'énergie de déformation (constant pour une combinaison particulière de type de l'explosif et le type de roche).

2.4.2.2: Zone de choc

Avec une baisse supplémentaire en profondeur, l'effet arrière se produit à la surface due à la réflexion d'onde de choc. Comme la ligne de moindre résistance est réduite, l'amplitude de l'onde est reflétée avec les augmentations de la surface libre. Cela a augmenté des résultats de l'effet arrière dans un grand volume du cratère. Finalement, la ligne de moindre résistance résultant entre la charge et la surface libre définitif, après que l'effet arrière soit complet, sera assez petite pour permettre des fissurations dues aux effets de la pression de gaz causé par la décomposition complète de la matière. C'est le point d'utilisation maximale d'énergie explosive qui correspond à la profondeur optimum définie par Livingstone dans l'équation ci-dessous:

$$D = \Delta_0 E_S (Q_E)^{1/3} \quad (2.2)$$

Où: D : profondeur optimale du trou, m

Δ_0 : proportion de la profondeur optimale ($\Delta_0 = D/N$).

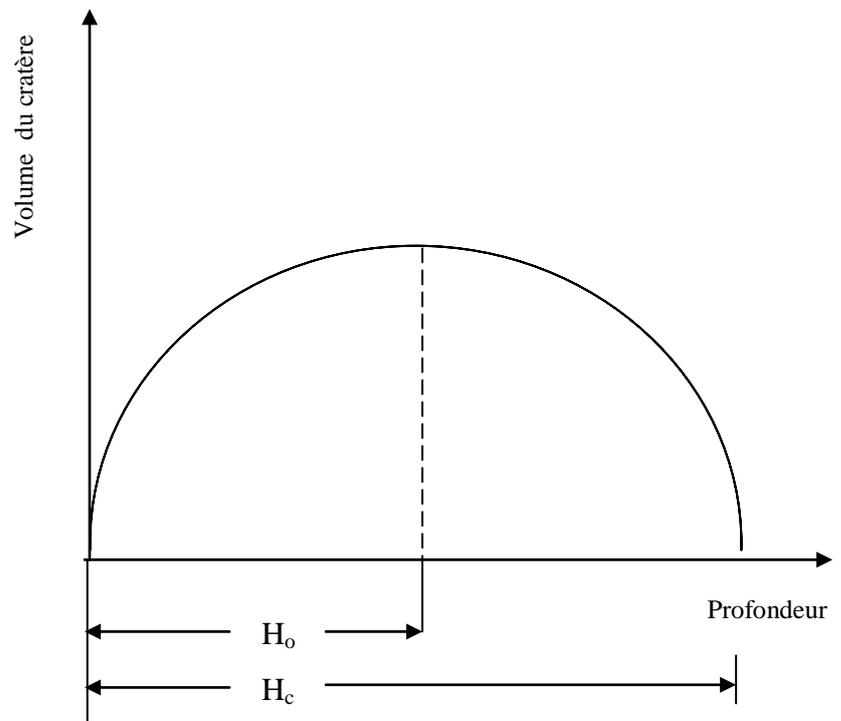
2.4.2.3 - Zone de la fragmentation

Avec une baisse en profondeur, en dessous de la profondeur optimum, une combinaison d'énergie du choc et l'énergie et l'expansion de gaz cause la rupture de la roche. La limite supérieure de cette zone se produit lorsque la quantité d'énergie transférée à l'atmosphère dépasse celle transféré à la roche.

2.4.2.4 - Zone de l'air de tir

Quand la charge explosive est placée d'une manière adjacente à la surface libre, une cassure a travers la surface se produit et le reste d'énergie de l'explosion seront déchargés dans l'atmosphère. L'effet de poids de la charge et la profondeur d'enterrement avec le volume du cratère est illustrée dans les figures 2.3 et 2.4.

On peut donc déduire que seulement la ligne de moindre résistance optimum du tir est la ligne de moindre résistance suivant laquelle l'énergie de l'onde de déformation et l'énergie du gaz exécutent leurs rôles avec une maximale efficacité. Il paraît aussi, raisonnable que quand on essaie d'améliorer la fragmentation, en augmentant ensemble le rôle de l'action du gaz et l'onde de déformation, cela doit être effectué conjointement avec la ligne de moindre résistance optimum.



H_0 : la ligne de moindre résistance optimale.

H_c : la profondeur critique.

Figure 2.3 - Volume du cratère par rapport à la profondeur

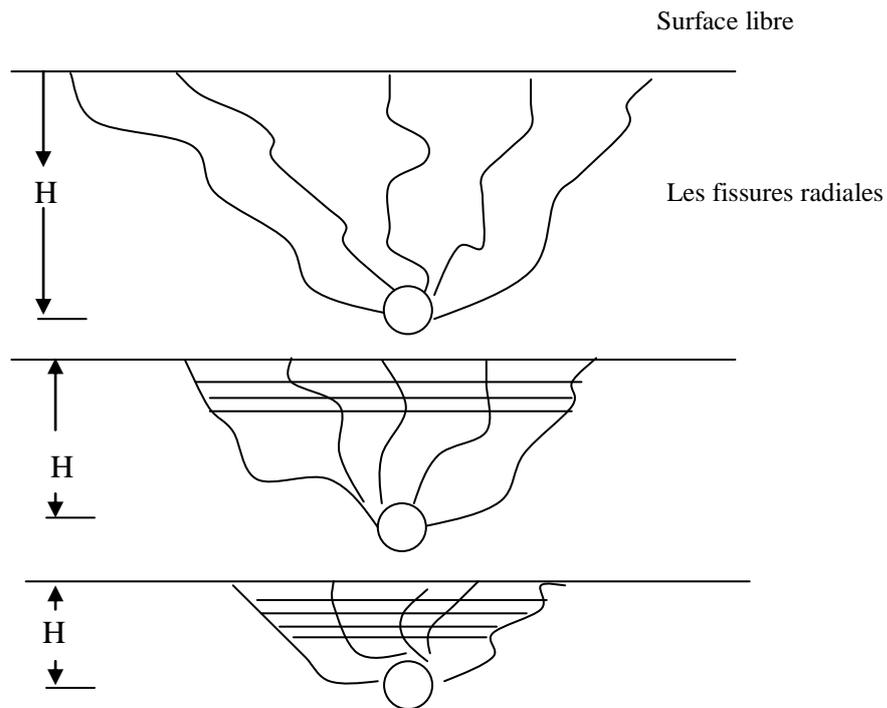


Figure 2.4 - Le mécanisme de tir de cratère

2.5 - Conclusion

De l'analyse et du commentaire des différents points étudiés dans ce chapitre, nous pouvons déduire ce qui suit:

-Plusieurs théories ont été établies suivant le tir des roches à l'explosif. Ceux-ci peuvent être divisés comme ce qui suit :

- expansion du gaz
- théorie de l'onde de choc
- théorie d'énergie

- Les contradictions qui existent entre les différentes théories de la rupture des roches sont dues aux différents mécanismes qui sont appliqués dans différentes conditions.

- Le mécanisme de la rupture des roches est probablement quelque part entre les trois théories.

- Tout essai de séparation de l'effet de l'action du gaz et l'action de l'onde de choc, lors de la rupture des roches, est irréaliste.

- Toute amélioration dans la fragmentation, par augmentation du rôle combiné de l'action du gaz et l'onde de déformation, sera accomplie lors d'une ligne de moindre résistance optimum.

- L'onde de déformation réflétée est critique dans le cas d'une ligne de moindre résistance optimum.

Chapitre 3 -Modèles informatiques pour la fragmentation des roches

Chapitre 3 - Modèles informatiques pour la fragmentation des roches

3.1 - Introduction

Depuis quelques années, une assistance informatique à la conception des tirs à été mise au point, s'appuyant sur les outils de la sismologie, des codes de calculs permettent de modéliser l'efficacité des processus complexes intervenant dans les tirs de mines et de simuler leur impact sismique dans l'environnement. Il est ainsi possible d'optimiser l'influence des interactions entre les divers paramètres de tirs sur les résultats recherchés.

Il existe des domaines où la prévision du déroulement d'un phénomène est trop complexe pour être abordé selon des schémas de calculs classiques. Ils peuvent être aussi impossibles à reproduire en laboratoire ou à simuler sur un chantier test pour des questions de coûts ou de risques. Reste alors le modèle mathématique, qui, utilisé avec toute la puissance des ordinateurs modernes permet de faire de nombreuses simulations en variant les paramètres d'entrée de façon à trouver la solution optimale (performance, sécurité, coût).

3.2 - Simulation des tirs

La Simulation de tirs de gradin [61] à ciel ouvert continue de présenter un défi important pour l'industrie minière. Plusieurs modèles ont été développés qui permettent d'avoir une visualisation du mouvement de la masse rocheuse à la suite de l'explosion d'une mine type à ciel ouvert, [62, 63, 64, 65]. En général, ces modèles ne sont pas largement disponibles et dans certains cas, leur distribution est limitée pour des raisons concurrentielles. Depuis 1993, le département de génie minier à l'école des mines Mackay a étudié l'utilisation de "Off the shelf" logiciel de modélisation numérique pour la modélisation des tirs des gradins. Les travaux antérieurs [66] démontrent la possibilité de mesurer et prédire la qualité des mouvements dans un tir de gradin étudié par plusieurs chercheurs, [67,68].

L'élément sphérique, programme informatique DMC_Blast, développé par Preece en 1989, a été modifié à quelques reprises. Une nouvelle version de ce programme [69] effectue flux de gaz couplés et les simulations de mouvement des roches dans un environnement de tir à gradin. Plusieurs différentes équations sont incluses pour la modélisation du comportement des explosifs.

Les étapes de base en génie explosifs sont de concevoir, mettre en œuvre et observer les résultats d'une explosion. Cette étude [70] a mis au point une technologie logicielle qui a amélioré le processus d'ingénierie explosif à chaque étape pour offrir une approche structurée pour l'optimisation de la fragmentation des tirs. En utilisant un ensemble intégré d'outils informatique, Cette étude a établi une approche de premier passage pour caractériser la masse rocheuse et pour identifier les paramètres spécifiques de la zone de tir.

Récemment, une approche a été développée pour générer [71] des modèles précis pour prédire la fragmentation due au dynamitage. Leur approche s'appuie sur des données de forage de surveillance et de fournir des informations in situ tout au long de la masse rocheuse à tirer, ce qui a été déterminé à être supérieur aux méthodes traditionnelles de collecte de données tels que les carottes au diamant ou d'échantillonnage sur le terrain.

En général, les étapes de base dans le choix des paramètres d'un bon tir qui assurent la fragmentation de roche désirés pour créer un modèle informatique sont représentés sur la figure 3.1.

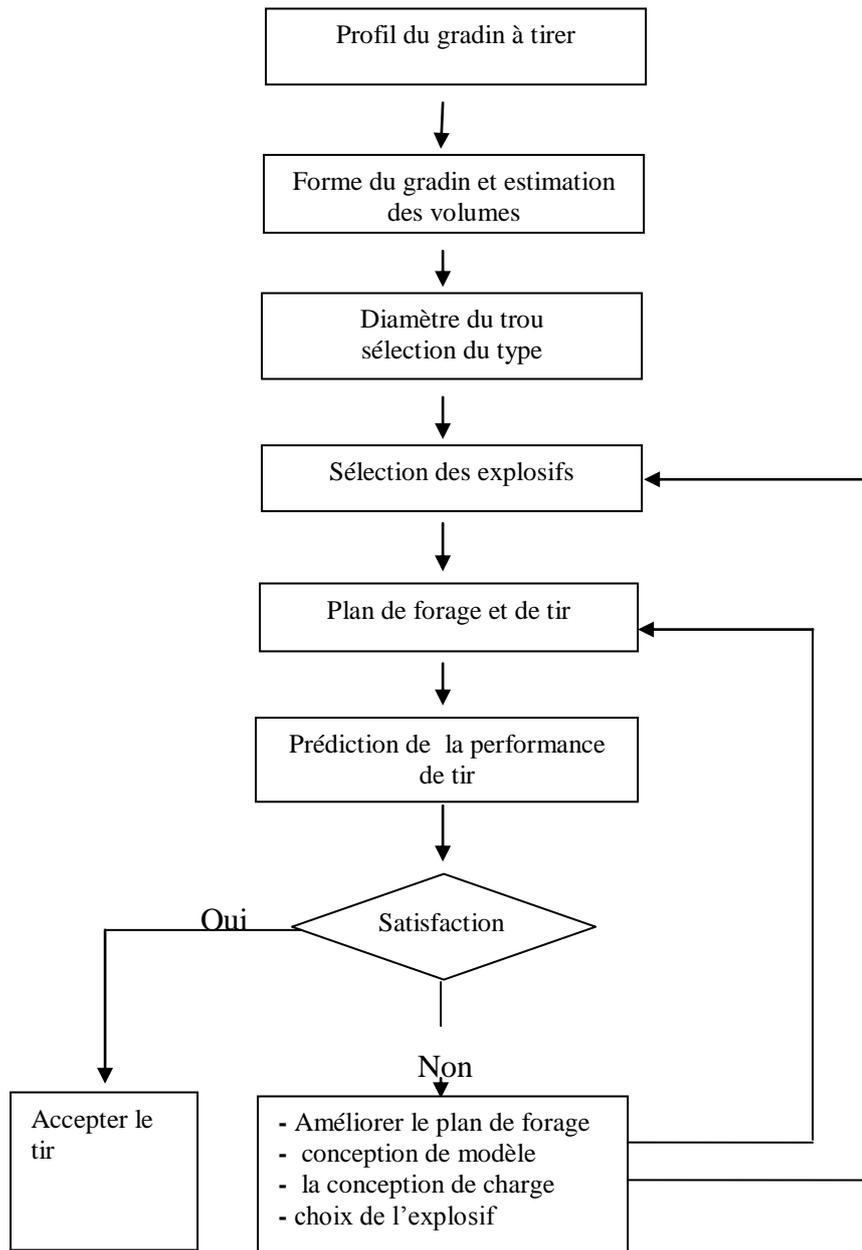


Figure 3.1 - Procédure et évaluation de la performance des tirs

3.3 - Classification des modèles de calcules

Les modèles de calcul selon [72] hadjadj Aoul Elias, peuvent être classés suivant plusieurs types à savoir :

- Modèles algébriques,
- Modèles de comportement composite,
- modèles empiriques,
- modèles physique,
- modèles mécaniques.

3.3.1 - Modèles algébriques

Ces modèles reposent sur des lois physico-chimiques fondamentales pour décrire ce qui se passe pendant un tir. Les résultats du tir sont ainsi calculés par un ensemble d'équations.

Dolgov (1983) a proposé une relation [73] exprimant l'énergie totale générée par un explosif. Celle-ci peut être divisée en énergie produisant les déformations élastiques et plastiques E_v et l'énergie pour créer de nouvelles surfaces E_s :

$$E = E_v + E_s \quad (3.1)$$

Toutefois, E_s est négligée dans le calcul. E_v dépend d'une propriété intrinsèque de résistance de la roche. La formule tient compte de la fracturation initiale présente dans le massif en calculant l'énergie théorique nécessaire pour fragmenter un massif sain et homogène de façon à arriver à l'état de fracturation initial.

Persson (1983) a essayé de calculer l'énergie nécessaire [74] pour fragmenter une roche en utilisant les principes fondamentaux des mécanismes de la fracturation. Les calculs ont donné des quantités nécessaires d'explosif environ 1000 fois inférieures à celles utilisées dans la pratique. Ces résultats sont plutôt surprenants et posent des questions fondamentales sur le mécanisme couramment accepté dans la fragmentation du massif; L'auteur pense que les contraintes compressives pourraient jouer un rôle plus important dans la fragmentation de roches que celui généralement admis. Cela peut aussi suggérer la faible efficacité générale des tirs.

Rossmann et Knasmillner (1983) ont développé des équations de l'interaction des ondes de contrainte dans les limites des couches. Ils ont fait des essais d'étude dynamique par photoélasticité sur des matériaux en couches; Des trous circulaires ou carrés y ont été faits pour simuler des tunnels. Ils ont montré que la séparation des couches se produit du fait des réflexions obliques des ondes; Ces essais ont démontré l'importance des joints et des plans de stratification dans l'interaction onde-structure et dans le processus de fragmentation.

Isakov et Sher (1983) ont appliqué une simplification en 2D pour étudier la contrainte produite sur un milieu infini par une pression ponctuelle générée dans un cercle. Ceci simule un long cylindre d'explosif. Ils ont ensuite développé des équations pour calculer la propagation des deux fissures diamétralement disposées autour du cercle. Les essais ont été faits sur des plaques de plexiglas. Un résultat intéressant est qu'à partir d'une certaine limite, l'augmentation de la charge d'explosif n'améliore pas d'une manière significative la fragmentation.

Grady et Kipp (1979,1980) ont calculé le taux de croissance d'un ensemble statistique de fractures en fonction de l'état de contrainte et la relaxation de contrainte qui résulte de la propagation des fractures. Les équations simultanées ont été employées pour estimer l'état de contrainte et l'endommagement, D . Ce dernier est défini comme la proportion de volume de matériau fracturé et modifie les constantes d'élasticité par un facteur $(1-D)$. Cette théorie est utilisée dans beaucoup de modèles de comportement composite.

3.3.2 - Modèles de comportement composite

Ces modèles, qui ont vu une norme essor ces dernières années en parallèle avec l'évolution rapide des ordinateurs, modélisent la génération de fissures dans le massif rocheux sous les contraintes dynamiques. La méthodologie commune de ces modèles est l'emploi de la méthode des éléments finis ou de la méthode des différences finies pour analyser l'état de contrainte lors de la formation des fissures et l'influence de ces fissures sur l'état de contrainte. Ils diffèrent dans la manière dont l'état de contrainte est modélisé et dans le calcul de la formation de fissures.

3.3.2.1 - Le modèle « Bedded Crack » et de code « Shale»

Margolin et Adams [75] ont développé un modèle composite de comportement qui s'appelle « Bedded Crack Model» (BCM) pour la simulation numérique de la propagation des ondes de contrainte, de la fracturation et de la fragmentation dans les roches; le modèle est fondé sur la théorie de Griffith sur la propagation de fissures. Une taille critique des fissures est calculée en fonction de leur orientation et du champ de contrainte existant. Les fissures dépassent cette taille s'agrandissent pour un pas d'itération. Ces fissures modifient ensuite le comportement global de la roche qui lui est décrit par le module effectif. L'évolution de la distribution statistique des fissures dans le massif est estimée pour chaque pas itératif du calcul.

Ce modèle composite de comportement a été utilisé dans le programme «Shale» pour simuler le tir en cratère dans des roches argileuses pétrolifères. Toutefois, les résultats sont assez loin de ceux obtenus expérimentalement, comme montré dans la figure 3.2.

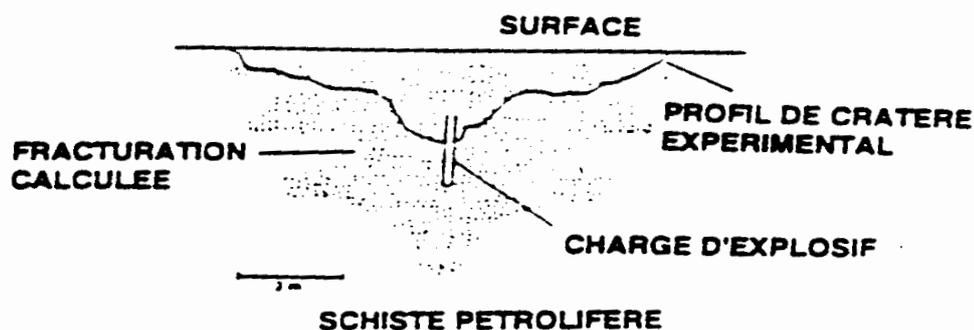


Figure.3.2 - Comparaison du profil expérimental et calculé du massif fracturé par le logiciel Shale (d'après Adams et al, 1983)

3.3.2.2 - Modèle Nag-Frag

Un autre modèle, appelé Nag-Frag et développé par McHugh (1983), fait croître les fissures autour de centres jusqu'à ce que celles-ci interceptent d'autres fissures ou bien les contraintes extérieures appliquées disparaissent. L'accroissement des fissures est modulé par un seuil de contrainte, une fonction-seuil d'accroissement et un paramètre de sensibilité à la fracturation

propre à la roche. L'auteur a fait validations du modèle et a trouvé des résultats qui s'accordent avec les données expérimentales. Toutefois, une roche homogène, en l'occurrence du tuf volcanique, a été utilisée pendant l'expérimentation.

3.3.3 - Modèles empiriques

Ces modèles sont souvent fondés sur le résultat d'études menées au laboratoire ou sur le terrain. Il s'agit d'établir les relations entre les résultats et les paramètres du tir à partir de ces observations sans pour autant cerner les mécanismes fondamentaux concernés.

3.3.3.1 - Modèle Kuz-Ram

Le modèle empirique Kuz-Ram est actuellement très utilisé dans le domaine de l'évaluation des résultats des tirs miniers. Le modèle repose sur la loi de Kuznetsov pour calculer la taille équivalente à 50% de passant de fragments rocheux. Cette loi s'écrit:

$$x = A \left(\frac{V_o}{Q} \right)^{0.8} Q^{1/6} \quad (3.2)$$

Ou:

A - est le coefficient de la roche (7 pour les roches moyennement dures, 10 pour les roches dures très fracturées, et 13 pour les roches dures peu fracturées),

V - est le volume spécifique en m³ de rocher abattu par trou, égal à la banquette x espacement x la hauteur de gradin,

Q - est la masse en Kg d'équivalent de TNT de l'énergie fournie par la charge en explosif d'un trou.

Si Q_e est la masse en Kg d'explosif par trou et E la puissance relative de l'explosif. L'ANFO étant égal à 100 et le TNT à 115, on a Q_e x E = Q x 115 et Q = Q_e E / 115. L'équation 2.2 donne

$$x = A \left(\frac{V_o}{Q_e} \right)^{0.8} Q_e^{1/6} \left(\frac{E}{115} \right)^{1/6} \left(\frac{E}{115} \right)^{-0.8} \quad (3.3)$$

Ou:

$$x = A \left(\frac{V_o}{Q_e} \right)^{0.8} Q_e^{1/6} \left(\frac{E}{115} \right)^{-19/30} \quad (3.4)$$

Vo/Q_e est l'inverse de l'énergie spécifique, E_s en Kg/m³. L'équation peut s'écrire donc :

$$x = A (E_s)^{0.8} Q_e^{1/6} \left(\frac{E}{115} \right)^{-19/30} \quad (3.5)$$

D'un autre côté de Rosin-Ramler décrit la distribution granulométrique de taille de blocs. Elle s'écrit

$$y = 1 - e^{-\left(\frac{x}{x_c} \right)^n} \quad (3.6)$$

Avec

y = le pourcentage de passants à la taille x

x_c = taille caractéristique égale à la taille à 63.2% de passants
 n = indice de forme.

Pour $x = x_c$, (taille moyenne des blocs), on a $y = 0,50$, et donc:

$$x_c = \frac{x}{(0.693)^{1/n}} \quad (3.7)$$

Il faut alors calculer n pour pouvoir décrire complètement la distribution. [76], en utilisant le logiciel de simulation de **Lowds** pour estimer la distribution de taille de blocs dans le tas abattu (voir plus bas), a obtenu expérimentalement des valeurs de n pour différents paramètres géométriques du tir. Il a ensuite fait une régression sur les points pour obtenir un modèle permettant de calculer n . Ce modèle, dans sa forme la plus récente (1987), est:

$$n = \left(2.2 - \frac{14^d}{B}\right) \left[\left(\left(1 + \frac{S}{B}\right) / 2 \right)^{\frac{1}{2}} \right] \left(1 - \frac{W}{B}\right) \left(\frac{\text{abs}(BCL - CCL)}{L + 0.1} \right)^{0.1} \frac{L}{H} \quad (3.8)$$

Ou:

B: banquette, en m

D: diamètre du trou, en mm

S: espacement, en m

W: déviation du trou, e m

BCL: longueur de la charge du fond, en m

CCL: longueur de la charge de colonne, en m

L: longueur total de la charge, en m

H: hauteur de gradin, en m

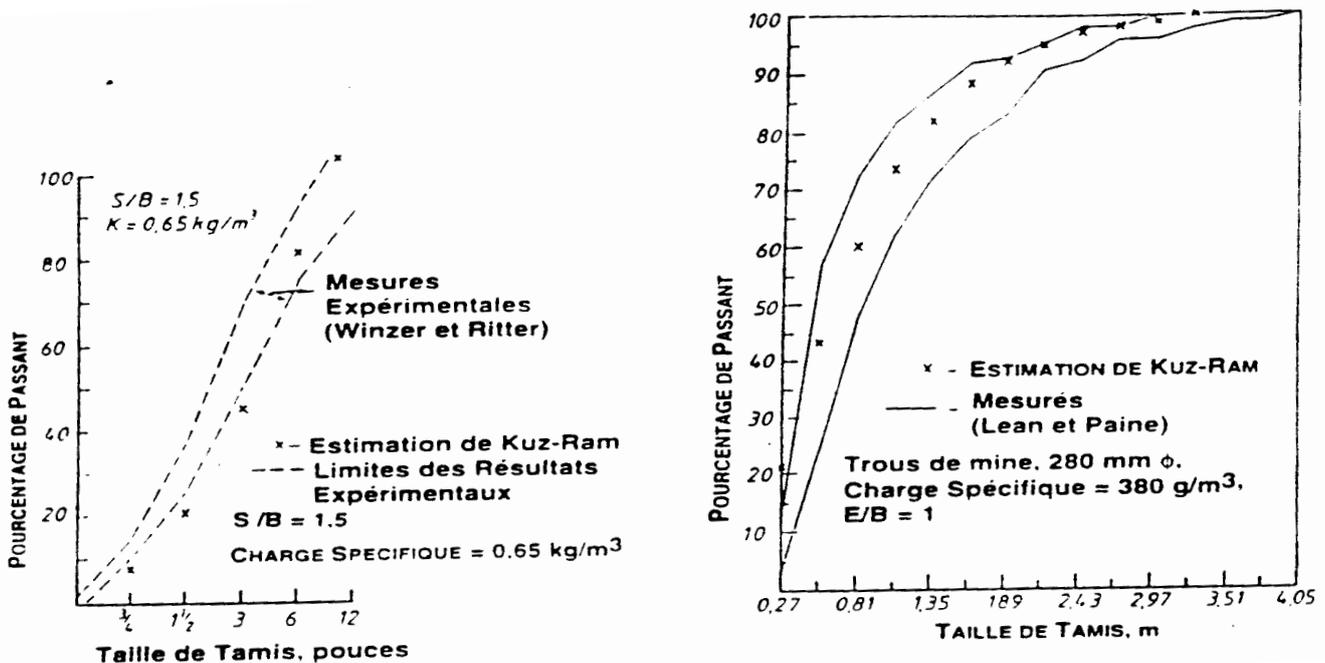


Figure.3.3 - La fragmentation mesurée et calculée par la relation de Kuz-Ram dans le cas de calcaire fracturé (a) et du grès (b) (d'après Cunningham, 1983)

Il a ensuite validé le modèle sur les résultats des tirs expérimentaux en évaluant la distribution de taille des fragments par l'étude de photos des tas abattus. Comme montré dans la Figure 3.2, les résultats s'accordent assez bien aux données expérimentales.

3.3.3.2 - Modèle de Langefors

Langefors a bâti sa méthode après de nombreuses observations sur le terrain à savoir :

- Les trous sont surforés sur une longueur de $0,3V$, V étant la banquette au sens abattage, c'est à dire l'épaisseur de la tranche abattue entre la première ligne de trous et le front, ou entre deux lignes de trous;
- La charge de pied s'étend sur une longueur de $1,3V$;
- La hauteur de bourrage est égale à la banquette V ;
- La charge de colonne occupe la place restante dans le trou.

Les notions sont celles du schéma ci-dessous:

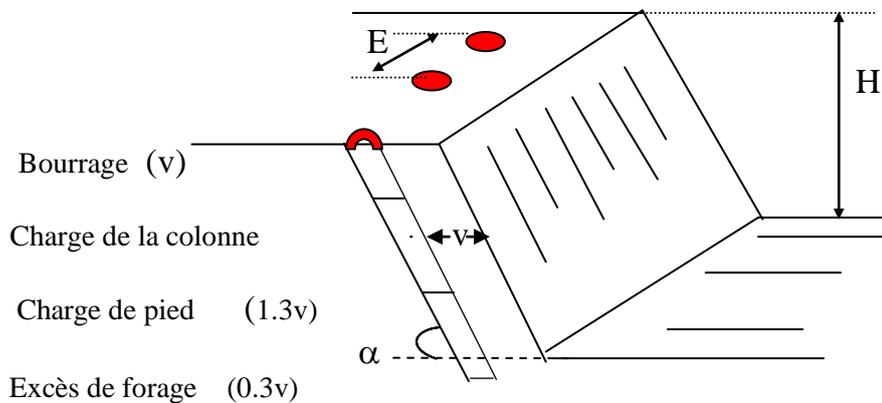


Figure 3.4 - Données géométriques intervenant dans la méthode de Langefors.

- H: hauteur du gradin, m
- E: espacement entre les trous, m
- V: banquette (tranche à abattre), m
- α : Inclinaison du trou

Langefors raisonne alors ainsi:

-La charge linéaire de pied : $L_p = \rho \pi \varphi^2 / 4$,

Ou encore :

$$L_p = \rho (\varphi / 36)^2, \text{ lorsque } \varphi \text{ est exprimée en mm, } \rho \text{ en tonnes/m}^3 \text{ et } L_p \text{ en kg/m.}$$

-La charge linéaire minimale pour briser la roche, lorsque la banquette est V , est donnée par la relation empirique:

$$L_p = 0.88(f / Sp)(E / V)[(0.07 / V) + R + 0.004.V]V^2 \quad (3.9)$$

f: facteur de contrainte dépendant de l'inclinaison du trou
Sp: coefficient de puissance pratique de la charge de pied « strength »
E: espacement des trous, m
V: banquette, m
R: résistance au tirage (rock constant)

La quantité entre crochets est voisine de $C = R + 0.04$ pour les valeurs de V usuelles quelques mètres).

Langefors égale ensuite les relations précédentes pour obtenir la banquette maximale possible:

$$V_{\max} = (\varphi/33.8) \cdot \sqrt{[\rho \cdot Sp / (f \cdot C \cdot E / V)]} \quad (3.10)$$

Il ne reste qu'à déterminer la charge linéaire de colonne, ou charge médiane, que Langefors fixe à 1/ 2.7 fois celle de pied:

$$L_c = (L_p / 2.7) \cdot (1 / f \cdot (Sp / Sc)) \quad (3.11)$$

Le facteur de contrainte n'intervient pas pour la charge de colonne.

Les quantités d'explosif en pied et en colonne sont obtenues en faisant le produit des charges linéaires L_p et L_c par les longueurs chargées, celles-ci étant de figure 2. 3:

- $1.3V$ pour la charge de pied;
- $H/\cos(\alpha) \cdot 2V$ pour la charge de colonne.

Ces formules peuvent être assorties de quelques commentaires suivant les points suivants:

A/Suivant les caractéristiques de la roche

Langefors résume toutes ces caractéristiques à l'application d'un seul paramètre R la résistance au tirage, sur la valeur de 0.2 à 1, et que sa valeur la plus courante est de 0,4 il est donc dommage que Langefors n'ait pas été plus explicite sur les valeurs que pouvait prendre le paramètre R.

R représente en quelques sorte la difficulté que l'on a à abattre une roche, plus R est grand, est plus il faudra resserrer la maille, la surface de la maille varie en fonction $\sqrt{1/R}$.

B/Géométrie du tir

Le rapport E/V appelé rapport de maille apparaît dans les formules, ce rapport s'est avéré important au niveau des résultats du tir en particulier on améliore la fragmentation en augmentant sa valeur. Pour Langefors, les résultats sont optimaux lorsque E/V se situe entre 1,2 et 1,5 ces valeurs sont d'ailleurs celles généralement pratiquées.

Le facteur de contrainte (f) traduit la difficulté qu'a le pied de se dégager, en fonction de l'inclinaison des trous. Ainsi, $f = 1$ pour $\alpha = 0^\circ$, $0,9$ pour $\alpha = 20^\circ$ et $0,85$ pour $\alpha = 30^\circ$.

C/Ajustement des paramètres du tir

La banquette varie selon une fonction linéaire du diamètre du trou, et selon la racine carrée du rapport, ces tendances correspondant assez bien aux résultats observés sur le terrain. En pratique, compte tenu des explosifs et des roches rencontrées en France, l'expression suivante donne une fourchette : $V = (30 \div 45) \cdot \varphi$.

Il est possible d'appliquer un certain nombre de corrections sur la valeur de V_{max} afin de tenir compte de la précision de forage, du foisonnement des matériaux lorsqu'un tir comprend plus de deux rangées de trous, de la fragmentation recherchée.

D/Selon le forage

Les trous n'étant pas rigoureusement parallèles et pouvant être mal positionnés, Langefors applique une correction à la banquette maximum: $V = V_{max} - 0.05H$

E /Selon le foisonnement (ou de « swelling»)

Dans le cas d'un tir en plusieurs rangées, les premières rangées empêchent les suivantes de sortir. La solution consiste à incliner les trous et à réduire la maille:

$V = V_{max} \cdot (1 - 0.03H)$ pour une inclinaison de 26° , de façon à augmenter la charge spécifique d'explosif.

F / Selon la fragmentation des roches

La fragmentation est essentiellement réalisée par la charge de colonne. Langefors reste assez discret sur cette question, citant quelques chiffres mais sans donner de règle générale.

Nous citerons simplement ici une formule proposée par Holmerg:

$$\text{Log}(T) = 0.29 \text{Log}[V^2 \sqrt{1.25/(E/V)}] - 1.18 \text{Log}(q/R) - 0.82, \text{ m} \quad (3.12)$$

Q : consommation d'explosif, kg/m^3

T : taille des blocs maximale, m

Les corrections proposées par Langefors visent à augmenter la charge spécifique au m^3 abattu. Cette augmentation est obtenue par une réduction de la maille, sans augmentation de la quantité d'explosif par trou.

3.3.4 - Modèles physiques

Zheng et al (1987) ont fait des tests sur les modèles en béton pour déterminer la banquette optimale dans le cas de la détonation d'un trou [77]. Par la suite, ils ont fait varier la banquette et l'espacement entre deux trous pour établir l'effet de l'espacement sur la fragmentation. Ils ont établi une relation linéaire entre le volume de fragments rocheux et la banquette. Ceci

montre selon eux qu'on peut réduire la banquette en augmentant convenablement l'espacement entre les trous.

Bergmann (1983) a étudié les résultats des tirs expérimentaux menés sur des blocs de granite, calcaire et grès de 15 tonnes. Il en a tiré une relation empirique comme mesure de l'efficacité d'un explosif [78] et les conclusions suivantes:

-La vitesse de détonation est importante jusqu'à un certain point pour obtenir une meilleur fragmentation. En effet, celle-ci est obtenue lorsque la vitesse de détonation est plus faible que la vitesse sismique du massif. Lorsque cette dernière est dépassée, aucune amélioration n'en résulte.

-Les explosifs de densité plus élevée donnent une meilleure fragmentation à condition qu'il n'en résulte pas un travail d'expansion moindre ou une vitesse de détonation plus faible.

-Un bon couplage explosif-paroi du trou donne une meilleure fragmentation.

Rustan et al ont fait deux séries de tests au laboratoire sur des modèles faits d'un mélange de matériaux d'une part (de la magnétite et du béton dans des proportions différentes) et de blocs à échelle réduite de matériaux naturels d'autre part (gabbro, quartzite, granite et magnétite). Ceci pour déduire l'influence sur la fragmentation des paramètres tels que la banquette, l'espacement, la charge spécifique et les caractéristiques géométriques du matériau. Les résultats importants [79] de cette étude peuvent être résumés ainsi:

-La taille de banquette demeurant constante, la taille des blocs est inversement proportionnelle à la charge spécifique. Généralement, elle augmente avec la banquette.

-La densité du matériau semble avoir un effet sur la taille des blocs : les matériaux plus denses donnent une fragmentation plus grossière.

-La taille des blocs est plus grande pour les matériaux ayant plus de cohésion.

Les auteurs ont aussi étudié les relations existant entre les propriétés physiques des matériaux et leur comportement pendant les tirs. Ils ont pu tirer les conclusions suivantes:

- 1-La banquette critique dépend de l'impédance du matériau,
- 2-La banquette critique dépend aussi de la résistance à la traction du matériau,
- 3-Enfin, l'impédance du matériau influence aussi la fragmentation résultante.

Toutefois, il faut signaler que ces études ont été menées sur des matériaux sains.

3.3.5 - Modèles mécaniques

Ces modèles analysent les phénomènes associés à un tir à plusieurs composantes. Chaque composante peut être étudiée séparément et est décrite par un mécanisme. Les résultats du tir sont ensuite estimés par le biais d'un schéma global qui relie ces diverses composantes.

3.3.5.1 - Modèle Blasp

Favreau (1983) a mis au point un logiciel appelé Blasp qui considère l'énergie de gaz comme étant le facteur principal responsable de la fragmentation. Immédiatement [80] après la détonation de la charge, l'expansion des gaz transmet une onde de choc de contrainte traversant le massif à une vitesse C_R égale à 4600 m/s (Figure 3.4). Cette onde ne cause pourtant pas un endommagement important étant une contrainte de compression. Une fois réfléchi sur la face libre, elle se transforme en une contrainte de traction et traverse de nouveau le massif engendrant des fissures primaires (l'action de brisance). L'expansion des gaz accélère l'ébranlement du massif – une surface délimitée sous l'action de l'expansion des gaz et devant laquelle le massif n'est affecté que par les fissures primaires. Cette limite se déplace à la vitesse de 1200 m/s près du trou et à 300 m/s près de la face libre. La roche fracturée éclate alors avec une vitesse de déplacement de 4 à 30 m/s. La fragmentation finale est ainsi le résultat de l'action combinée de la brisance, l'expansion des gaz et la comminution pendant le déplacement du front. Il faut noter toutefois que le modèle ne tient pas compte de l'état initial de la fracturation du massif.

Récemment, Favreau (1993) a décrit certains des aspects du module gradin utilisées dans le modèle et les résultats obtenus. Ce modèle peut être appliqué uniquement à la description du mouvement des particules lors d'une explosion.

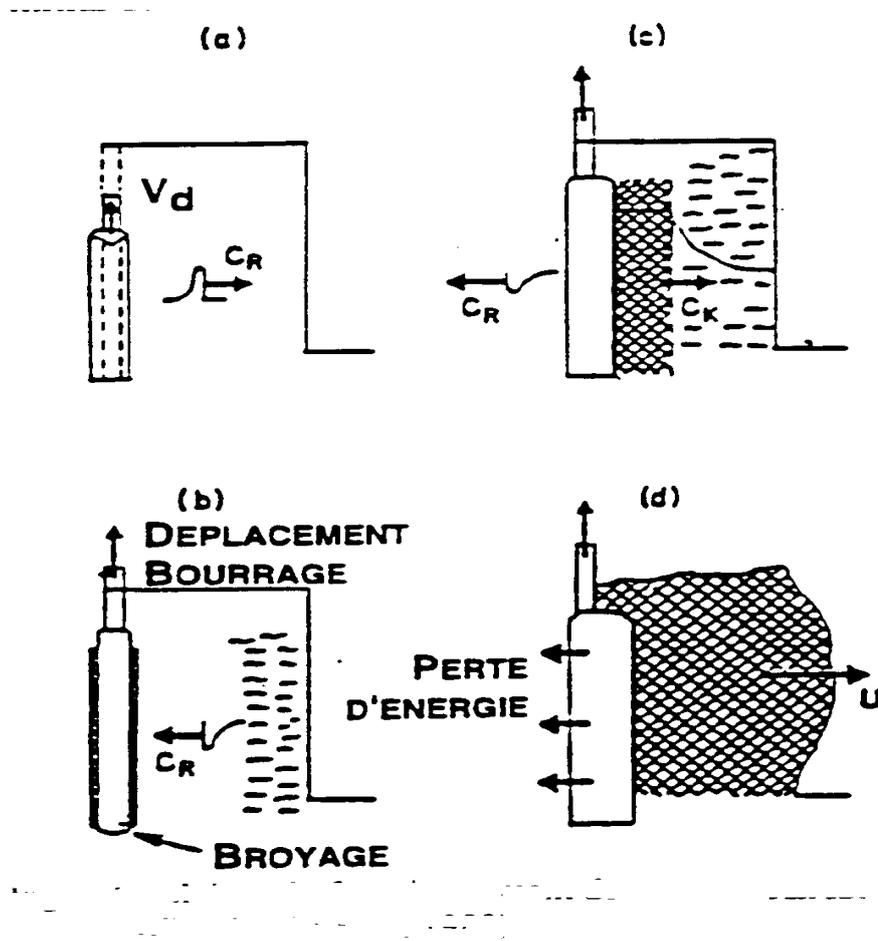


Figure.3.5 - Schéma du fonctionnement du logiciel Blasp (d'après Favreau, 1983)

3.3.5.2 - Modèle Frag

Lowds (1983) [81] a développé le programme Frag principalement pour estimer la distribution de taille des blocs. Il n'utilise pas un modèle de comportement composite pour simuler la roche pendant le tir. Le programme emploie des critères géométriques simples pour tracer les fissures se propageant à partir d'une série de trous de tir. La taille d'un bloc est ensuite estimée sur la base de ces « fissures » tracées. Les résultats de plusieurs simulations par la méthode de Monté Carlo sont ajustés à la loi de Rosin-Ramler pour obtenir une distribution de taille de blocs.

3.3.6 - Autres modèles

- Le modèle Dna-Blast

Basé sur des principes physique des modèles mathématiques et illimite les mécanismes interne afin d'en produire les effets. Le mécanisme global de la détonation est dissocié en mécanisme élémentaires (genèse).

Le Logiciel utilise comme données d'entrée:

- Propriétés de la roche,
- Caractéristiques d'explosif,
- Diamètre du trou de chargement,
- Plan de forage,
- La séquence de tir.

Et nous donne en sortie les effets attendus de tir, comme la distribution de la fragmentation, le taux de vibrations et la distance de Fly rock.

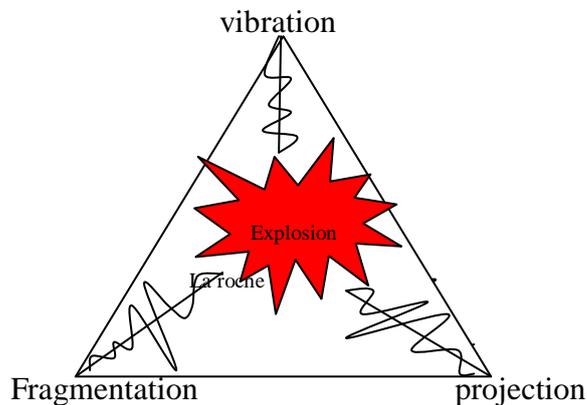


Figure 3.6- les effets attendus de tir

En considérant que chaque charge émet la même [82] signature sismique, alors l'onde résultante en un point donnée s'écrit (figure 3.7):

$$SG(t) = \sum_{n=1}^n a_i s(t - \Delta t_i) \quad (3.13)$$

Ou :

S(t): représente la signature sismique d'une charge.

Δt_i : représente le décalage de temps entre charge.

a_i : représente la variation d'amplitude d'onde d'une charge en fonction de la distance.

n: c'est le nombre de trous.

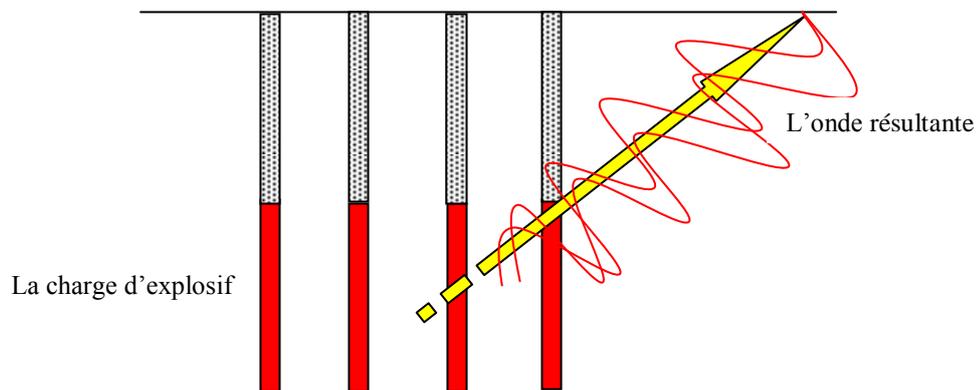


Figure.3.7- Schéma du fonctionnement du logiciel Dna-Blast (d'après T Bernard)

- Il est possible de modéliser un phénomène complexe en le scindant en mécanisme élémentaire.
- le modèle Dna –Blast permet de simuler les effets d'un tir de mine avec des écarts $\leq 25\%$.
- la capacité de modélisation des effets d'une explosion permet par essais d'optimiser le processus d'emploi des explosifs.

- Da Gama (1983) a proposé une méthode de prédiction de la taille des blocs résultants d'un tir. En partant de la loi de comminution de Bond (1952), l'auteur [83] a déduit une relation générale du type:

$$P_s = aW^b \left(\frac{S}{B} \right)^c \quad (3.14)$$

Ou :

Ps: Pourcentage passant de taille S.

W: Energie totale de la charge par unité de poids de rochers abattu.

B: Banquette.

a, b, c: Paramètres empiriques dépendants du type d'explosif utilisé, des propriétés mécanique de la roche et de la maille de foration.

Cette relation a été utilisée sur les données provenant des 7 tirs différents. L'auteur a obtenu l'équation de régression suivante:

$$P_s = 1,451W^{0.114} S^{0.484} B^{-0.121} F^{-0.163}_{50} \quad (3.15)$$

Avec un coefficient de corrélation de 0.82 sur les 7 cas testés.

- Le modèle proposé par Zou (1987), contrairement au modèle développé par Favreau, donne plus d'importance aux ondes de contraintes pour fragmenter le massif. L'expansion des gaz ne fait alors [84] que foisonner le massif déjà fragmenté par les ondes de contraintes. L'auteur a utilisé les équations de contrainte dans le cas des charges sphériques et les relations d'atténuation établies par Ito et Sassa (1966) pour calculer les contraintes en un point quelconque du matériau. La distribution de taille de la roche fragmentée est proportionnelle à la distribution d'énergie dans le massif. Le modèle tient compte de la distribution in-situ de la roche à l'état initial. La fragmentation finale est déterminée comme étant la somme des probabilités de la distribution de taille des blocs naturels et de la distribution de taille des blocs fragmentés d'un massif homogène, isotrope et élastique soumis à n tir.

- Harries (1983) a modélisé des colonnes de charge d'explosifs comme une série de charges sphériques. Chaque charge sphérique envoie une pression transitoire selon la théorie développée par Favreau. Les résultats de calcul sont en accord avec les valeurs expérimentales mesurées sur plusieurs roches. Le modèle d'atténuation [85] adopté est appelé à Q constant qui postule que la perte d'une partie de l'énergie pour chaque oscillation varie selon le facteur de qualité Q de la roche.

- Kleine (1988) a développé un modèle basé sur la capacité du massif à absorber l'énergie d'un cycle de pulsation sinusoïdale. Ce paramètre intrinsèque donné est appelé paramètre d'atténuation de l'énergie sismique et est mesuré sur le terrain par un dispositif spécial. La charge d'explosif est modélisée comme une colonne de segments [86] discrets amorcés d'une façon séquentielle. Chaque segment devient ainsi une source de vibrations atténuées au passage dans le massif en utilisant le paramètre décrit plus haut. Par conséquent, la distribution de l'énergie en un point quelconque du massif peut être calculée. Une fonction caractéristique de la fragmentation du massif est utilisée pour estimer la distribution de taille résultante. La fonction est déterminée par l'énergie totale fournie par le tir et la distribution in-situ des tailles de blocs. Cette dernière est évaluée en tenant compte de discontinuités présentées dans le massif.

Le modèle a été appliqué à deux mines souterraines mais a donné des résultats dispersés au niveau de la distribution de taille des blocs des tas abattus. L'auteur a toutefois remarqué que les différences sont tolérables et raisonnables compte tenu des incertitudes au niveau des données de la fracturation et de la mesure des blocs des tas abattus.

- Ghosk (1990) a proposé un modèle multi-fractures d'un tir en gradin en utilisant la méthode des éléments finis pour étudier la propagation des fissures en association avec les théories de la fragmentation. Le modèle étudie aussi l'effet des discontinuités présentes dans le massif et utilise la distribution de Schumann pour comparer la distribution de taille des blocs du massif et du tas abattu. L'auteur insiste sur le caractère fractal de la distribution de discontinuités dans le massif et de la propagation des fractures pendant les tirs. Ceci évidemment conduit à considérer la distribution des tailles des blocs in-situ et du tas abattu comme ayant aussi un caractère fractal. Son utilisation facilite ainsi l'estimation de la taille des blocs in-situ et dans les tas abattus.

3.4 - Conclusion

De nombreux chercheurs ont étudié et établie des programme et logiciels de calcul dont le but de la modélisation et d'avoir une bonne granulométrie de la roche abattus. La compréhension de la fragmentation peut être améliorée dans un proche avenir et concevoir une technique de tir pour fournir les résultats visés.

Il existe beaucoup de modèles pour simuler les tirs. Ils ne cessent d'augmenter en nombre et en complexité. La raison d'être de ces modèles est à la fois technique et économique. Ils permettent, avant un tir, de simuler les résultats. Cela permet de trouver les paramètres du tir susceptibles d'optimiser les résultats.

Dans certaines conditions géologiques favorables L'optimisation des tirs doit être réalisée en parallèle a un suivi de toutes les phénomènes physiques et mécaniques au cours des tirs et a ce stade il faut prévoir l'effet de la taille de trous de mine, la sélection des explosifs, et de nombreux autres paramètres sur la distribution de la fragmentation qui en résulte.

D'une manière générale ces modèles sont basés sur des analyses de plusieurs facteurs et qui essaient d'expliquer les résultats réellement obtenu par un certain nombre de paramètres judicieusement choisis. Ceci est surtout vrai dans le cas des modèles empiriques, qui sont principalement fondés sur l'observation directe des tirs ou sur des essais au laboratoire ou par une série d'essais d'explosion à grande échelle. Toutefois, ces méthodes présentent l'inconvénient d'être difficilement généralisables.

Le prochain chapitre décrit cette méthodologie. Par la suite, nous présenterons les données obtenus en appliquant le modèle mathématique base sur la théorie de Plewman et Starfield.

Chapitre 4 - Etude de la mécanique de tir des roches par utilisation de modèles réduits

Chapitre 4 - Etude d'un model par ordinateur de la fragmentation des roches dans les mines a ciel ouvert

4.1 - Introduction

Lors de l'emploi des matières explosives pour la fragmentation des roches, l'objet principal est d'atteindre un résultat reflétant l'influence positive sur la suite des opérations technologiques (chargement, transport et concassage), et réduire par conséquent le coût combiné de ces opérations.

Dans une étude d'optimisation, où le plan de tir et le type des explosifs sont les seuls variables, les opérations technologiques du chargement, transport et du concassage dépendent énormément de la fragmentation obtenue après le tir. D'où, il est nécessaire de procéder à la variation des paramètres variables jusqu'à l'obtention d'un résultat optimum. Un modèle par ordinateur du tir, basé sur la considération théorique a été développé. De ceci, c'est possible d'établir des tendances, et commencer à prédire le résultat, séparément, pour chaque paramètre du tir, et exprimer par des nombres réels le degré de changement pour tous les paramètres.

Ces calculs sont basés sur les propriétés fondamentales roches-explosives, et à ce stade le modèle par ordinateur peut examiner sélectivement la plupart des variables d'un tir; le type de la roche, les explosifs et leur distribution, hauteur du gradin, la ligne de moindre résistance, diamètre du trou et la méthode d'initiation. La variation des données peut permettre au modèle par ordinateur de produire des résultats a fin d'estimer les résultats et l'uniformité de la fragmentation suivant le tir.

La base des données théoriques du modèle de tir par ordinateur a été basée sur l'hypothèse de Plewman et Starfield, qui ont considéré des pulsations croissantes de contrainte de charges individuelles concentrées, et ont supposé que ceux-ci composent la charge cylindrique. La technique de la simulation, fournit non seulement un outil puissant qui accélère les études expérimentales, mais aussi une excellente capacité pour prédire un tir et déterminer les problèmes de la fragmentation.

4.2 - Considération générale

4.2.1 - Sous-systèmes de la fragmentation

Le débitage secondaire et le chargement sont deux stades où le concassage est particulièrement cher [87,88]. Un tir optimum, permet de réduire le coût de forage et de minimiser le débitage secondaire tout en accélérant les opérations de chargement.

4.2.2 - Economie de la fragmentation

Il peut être établi qu'un critère de consommation minimum d'explosif, mènera à un degré optimum de fragmentation suivant un haut coût des opérations. C'est évident que la fragmentation optimum pour une seule charge d'explosif n'indique pas l'optimum pour le système global. La valeur optimum, pour ce système, doit être préétablie d'après l'analyse du système pour chaque cas particulier [3]. Par conséquent, le problème du tir est réduit au seul processus d'obtention d'une distribution de blocs a dimension plus ou moins ne dépassent pas une certaine dimension des fragments, qui résultent du tir de la roche [90,91].

Économiquement, la fragmentation de la roche est complexe et il faut prendre en considération les coûts du forage, chargement, transport, concassage et broyage.

Une approche fondamentale est installée pour calculer le coût C. L'équation de base est:

$$C = C_f + C_t + C_{ch} + C_{tr} + C_{stock} + C_{conc} \quad (4.1)$$

Où : f. (forage), t (tir), ch. (chargement), tr (transport), stock (stockage), et conc (concassage).

Dans une étude d'optimisation où le plan de tir et le type explosif sont les seules variables, les derniers quatre termes dépendent seulement de la fragmentation «F» obtenu après le tir. Par conséquent, ils peuvent être représentés par une seule fonction «f3 (F)». Le coût de forage (par tonne ou par mètre cube de roche) dépend du plan de forage, c-a-d de la dimension du trou (d), la ligne de moindre résistance (B), l'espacement (E) et la profondeur du trou (H) donc:

$$C_f = f_1 (d, B, E, H) \quad (4.2)$$

Le coût du tir dépend principalement du poids "Q" et du prix "P" de l'explosif donc:

$$C_t = F_2 (Q, P) \quad (4.3)$$

Alors:

$$C = f_1 (d, B, E, H) + f_2 (Q, P) + f_3 (F) \quad (4.4)$$

C'est extrêmement utile d'avoir un programme par ordinateur, qui prédit le type de l'explosif le plus convenable à être utilisé et aussi pour déterminer un plan de tir donnant la fragmentation optimum «F».

4.3 - Élément essentiel du modèle par ordinateur

Bien que, les ondes de déformation produite par charge cylindrique, soient d'un intérêt considérable dans la prospection géophysique et le tir des roches, seulement quelques solutions mathématiques explicites pour les problèmes de la source cylindriques ont été dérivées de la théorie de l'onde élastique.

Selberg et Heelan [92,93], présenté par la suite des solutions pour l'onde de compression et les ondes tendre produite par une charge de longueur limitée. Les deux solutions ont supposé que la pression explosive le long de la longueur entière de la charge, correspond en effet à un explosif avec une haute vitesse de détonation. Généralement dans tout les cas de figure, la vitesse de détonation de l'explosif est plus ou moins égale à la vitesse de dilatation de l'onde dans la roche.

U.S. bureau des mines, les groupes de recherche sud africaines dans l'exploitation minière et la branche des mines canadienne, ont développé des techniques mathématiques pour simuler la pulsation de contrainte d'une charge cylindrique tout en supposant, que les pulsations de contrainte individuelles de charges concentrées croissantes créés la charge cylindrique.

Les calculs de pulsations ont montré, la bonne concordance avec les pulsations le long de charges cylindriques [94,95]. Les dimensions de l'onde de déformation ont donc été utilisées, non pas pour l'organisation des paramètres de tir une fois qu'un [96,97] explosif est sélectionné, mais pour comparer ces derniers (les explosifs) [107]. La ligne de moindre résistance optimum, par exemple, est encore déterminée par expérience (expérience de la bague du cageot) [97]. Il a été établi, que l'onde de déformation réflétee critique définit la profondeur de la charge optimum, et puisque c'est la profondeur optimum qui est importante du point de vue pratique, l'application de la théorie de l'onde de déformation fournira une méthode appropriée pour déterminer les effets des paramètres du tir relatifs au degré de la fragmentation.

4.3.1 - Etude de l'onde de déformation produite par une charge concentrée

La complexité de solutions élastiques et visco-élastiques, pour les équations de l'onde, et l'incapacité de ces solutions est expliquée par les indications des phénomènes observés. Pour le moment, une approche empirique décrit l'onde de déformation produite par une charge concentrée.

Le bureau U.S de mines [96, 98, 99] a montré que la variation de compression radiale maximum avec distance à partir d'une charge est:

$$P_s = K (a/r)^n \quad (4.5)$$

Où:

P_s - Contrainte à la compression maximum.

K - Constante selon les propriétés roche- explosif (amplitude de l'onde à $r = a$).

a - Diamètre du trou.

r - Distance de charge.

n - Le coefficient d'atténuation de l'onde dans la roche.

La déformation radiale, à n'importe quel moment après la détonation, est donnée par la formule suivante:

$$S(r, t) = K (a/r)^n f(t - (r-a/c)) \quad (4.6)$$

Où:

c : La vitesse de dilatation dans la roche.

$f(t - (r-a/c))$: La forme de l'onde, $f(t) = 0$ pour $t < 0$ et a une valeur maximale d'unité.

4.3.2 - Concepts fondamentaux de l'onde de déformation d'une charge cylindrique dans le tir des gradins

La position de tout point sur une surface libre parallèle à un trou de mine, peut être spécifiée par les paramètres du tir, B (ligne de moindre résistance) et l'angle (α) du point d'initiation de la charge, mesuré comme dans la figure 4.1. Si la charge entière est divisée en (N) segments chacun de longueur Δx et chaque segment est considéré pour avoir son centre à distance, nous aurons:

$$X_i = (i - 1/2) \Delta x \quad (4.7)$$

Alors à partir du point d'initiation, la longueur du rayon de ce segment jusqu'à la surface libre, peut être exprimé en terme des paramètres du gradin.

$$R_i^2 = (B+A)^2 + (X - X_i)^2 \quad (4.8)$$

Comme il est indiqué dans le programme informatique en annexe, ce terme change suivant le point d'initiation.

L'onde de détonation de l'explosif prend un certain temps pour arriver au i^{eme} segment, est égale à « x_i/v » où « v » est la vitesse de la détonation de l'explosif. L'onde de déformation créé atteint la surface libre en un temps égale a « R_i/C », où « C » est la vitesse de dilatation dans la roche. Donc le temps total est:

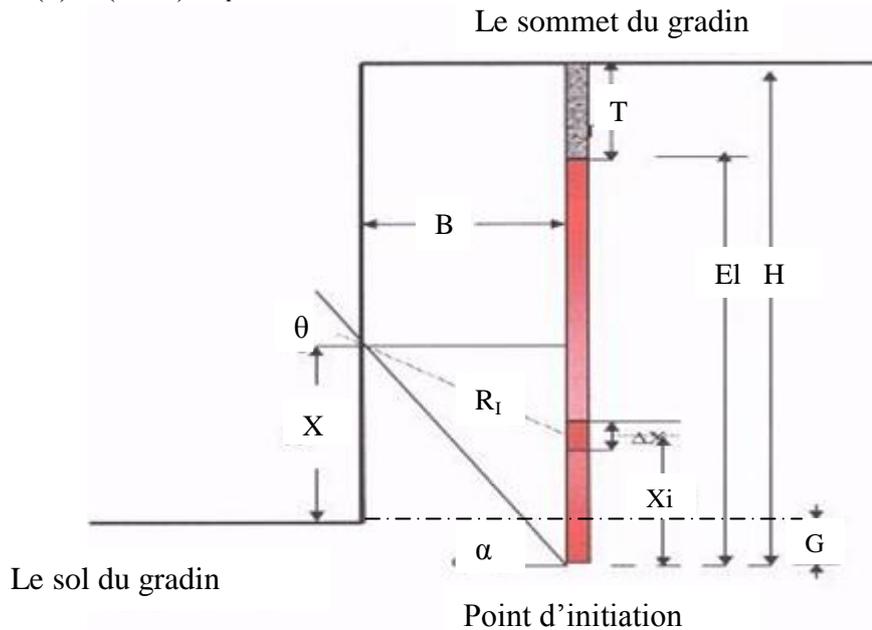
$$T_i = (x_i / v + R_i / C) \quad (4.9)$$

Si nous supposons que la charge commence à un temps $t=0$, la déformation $E(t)$ dû à l' i^{eme} segment; a n'importe quelle moment « t » sera une fonction de $(t - t_i)$. Donc la déformation perpendiculaire totale au point particulier sur la surface libre, a n'importe quelle moment « t » après l'initiation, dû à une colonne de N charge concentré, est approximativement donné par:

$$E(t, r) = \sum_{i=1}^{i=n} K (a/r)^n f(t - t_i) \cos^2 \theta \quad (4.10)$$

Où:

$$\cos(\theta) = (B + a) / R_i$$



- B : ligne de moindre résistance
- El : longueur d'explosif
- G : excès de forage
- T : longueur de bourrage
- H : profondeur du trou

Figure 4.1 - Schéma montrant une configuration d'un trou dans un gradin

Il a été suggéré [98] qu'une bonne approximation pour la forme de l'onde élémentaire $f(t-t_i)$ est celle d'une onde d'amortissement:

$$\begin{aligned} f(t) &= 0 && \text{pour } t < 0 \\ f(t) &= m e^{-\beta t} \sin \omega t && \text{pour } 0 \leq t \leq 3/2 \omega \\ f(t) &= -m e^{-\beta t} && \text{pour } t > 3/2 \omega \end{aligned}$$

Où β et ω constantes et «m» est choisi tel que la valeur maximum de $f(t)$ est égale à l'unité. Les équations de (4.7) à (4.10) nécessitent un programme informatique pour synthétiser l'onde de la déformation nette juste avant sa réflexion suivant plusieurs points de la surface libre du gradin.

Voir en annexe l'organigramme du modèle par ordinateur pour simuler une charge dans le tir de gradin et le tir du cratère.

4.4 - Les paramètres de l'onde de déformation à partir d'une charge de colonne dans un tir de gradin on utilisant le modèle informatique

La solution donnée en équation (4.10) peut être démontrée suivant deux voies; l'atténuation peut être centrée en une position particulière sur une surface libre, et alternativement la variation de déformation avec le temps est montrée pour une ligne de moindre résistance spécifique.

L'atténuation est fixée à un instant particulier et le mouvement de la déformation avec emplacement est montré à différentes lignes de moindres résistances.

Les ondes élémentaires seraient considérées dans la recherche comme onde amorties avec une fréquence $\omega=0.018/\text{ms}$, le coefficient d'amortissement $\beta=0.018/\text{ms}$, et le coefficient d'atténuation $n=1.4$. Ces valeurs donnent une forme d'onde d'atténuation conforme avec celle mesurée par Starfield [98].

De plus, les valeurs sur l'axe de déformation seront prises dans n'importe quelle présentation graphique, à partir d'une échelle purement arbitraire avec une amplitude de déformation de l'atténuation de l'onde élémentaire qui est de 1.0/mètre de longueur de charge. Cet échelle avec la considération que la roche sera fragmenter a une amplitude de déformation représente par 0.2 sur l'échelle de déformation (déformation de cassure 0.2) sera utiliser a travers le chapitre. Pour la pulsation de l'onde envoyée vers les différents point a la surface libre d'un tir de gradin, les données ont étaient obtenus on utilisant le modèle géométrique suivant : la ligne de moindre résistance $B=3$, profondeur du trou $=3 B$, longueur de bourrage $T=0.7 B$, excès de forage $G=0.3 B$, et le diamètre du trou $d =100\text{mm}$.

La vitesse de dilatation de l'onde dans la roche (C) est égale a la vitesse de détonation de l'explosif c.a.d $V=C =6500 \text{ m/s}$. Ce ci, peut être décrit par la détonation de la gélatine à haute pression dans un granite.

Les paramètres géométriques du gradin étaient fixés selon les recommandations de Puglies [101].

L'interprétation graphique des données obtenues à partir de cette étude, pour la forme de l'onde émanant à partir de l'explosion, en utilisant une initiation de bas, indiquées dans le tableau 4.1 est présentée graphiquement sur la figure 4.2.

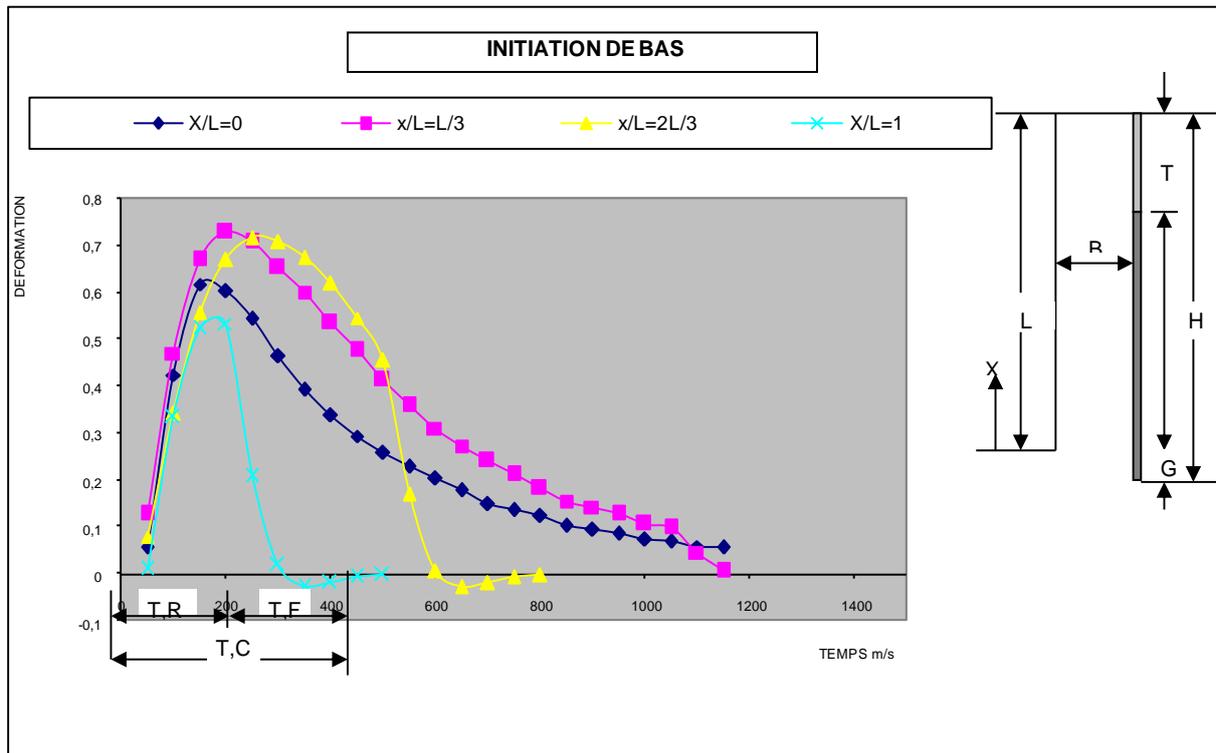


Figure 4.2 - Graphique montrant la variation avec le temps la forme de l'onde de déformation

Le tableau 4.1 donne la variation de l'onde de déformation avec le temps sur les différents points à la surface du gradin on utilisant l'initiation de bas.

Tableau 4.1- Variation de l'onde de déformation avec le temps sur les différents points a la surface du gradin on utilisant l'initiation de bas.								
Ecart de temps, $\mu.s$	X / L =0		X / L = 1 / 3		X / L =2 / 3		X / L = 1	
	contrainte	R.T	Contrainte	R.T	contrainte	R.T	contrainte	R.T
50	0.0000556	150	0.000126	200	0.0000798	250	0.00001113	200
100	0.0004237		0.000469		0.00034		0.0003324	
150	0.0006160		0.000669		0.000554		0.0005222	
200	0.00060166		0.000728		0.000670		0.000532	
250	0.0005436		0.000706		0.000716		0.000208	
300	0.0004625		0.000652		0.000707		0.0000173	
350	0.0003926		0.000600		0.000674		-0.0000267	
400	0.0003368		0.000535		0.000619		-0.0000184	
450	0.0002929		0.000476		0.000545		-0.000008	
500	0.0002580		0.000412		0.000455		-0.000003	
550	0.0002290		0.000357		0.000169			
600	0.0002029		0.0003103		0.0000062			
650	0.0001768		0.0002725		-0.0000287			
700	0.000148		0.0002405		-0.000019			
750	0.0001356		0.0002116		-0.0000082			
800	0.000122		0.000183		-0.0000033			
850	0.0001024		0.000154					
900	0.0000948		0.000142					
950	0.0000849		0.000126					
1000	0.0000729		0.000105					
1050	0.0000686		0.0000958					
1100	0.0000582		0.0000458					
1150	0.0000552		0.0000059					

En analysant la figure 4.2, on constate qu'il y a une différence de la forme et l'amplitude maximum marquée dans les ondes entre les différents points a la surface libre du gradin. Aussi de la figure, nous pouvons définir des limites pour les paramètres de l'onde de déformation, déformation maximum; temps de la montée; le temps de déclin et la durée de la compression. A partir des paramètres de l'onde de déformation, quelque idée concernant la manière de la rupture de la roche peut être définie. Toutes fois, dans un bloc la somme de compression de l'incident et la pulsation extensible reflétée, a une valeur qui dépasse la force de la roche au point désigné [102,103].

En général, les règles suivantes s'appliquent, pour une pulsation avec un front très tranchant durant le temps de la montée «RT». Le front de la pulsation est gardé dans le bloc, et plusieurs fragments consécutifs peuvent être formés. Si le temps de la montée RT marque sa fin mais moins que le temps de déviation «TF», un seul bloc se formera au point de résistance à la contrainte maximale; immédiatement ensuite, la tension adjacente à la surface de la fracture peut être suffisante pour causer une série de fragments très minces. Lorsque «RT» est plus grand que «TF», seul se forment des blocs relativement épais [21,18]. Les vitesses avec lesquelles les fragments fermés volent, dépendent des magnitudes de la contrainte de l'incident. Leurs valeurs s'étendent dans la zone donnée par $2\delta_i C/E$ à $2T_0 C/E$. où δ_i est la valeur de la contrainte de l'incident à la résistance de la roche, «E» la valeur du module de Young pour la roche.

Il a été montré, que les paramètres les plus importants de l'onde de déformation, dans la fragmentation des roches sous l'action d'un explosif, sont l'amplitude maximale de l'onde de déformation et le temps de la montée. Donc, ils seront pris avec d'autres facteurs comme outil de mesure pour étudier les effets relatifs à la géométrie du tir, sur l'uniformité de la fragmentation dans le tir des gradins et le tir des cratères.

4.5 - Point d'initiation de l'explosif et la fragmentation dans le tir des gradins

Le modèle géométrique illustré ; dans les figures 4.1, a été utilisé pour étudier l'effet de la variation du point de l'initiation de l'explosif sur la fragmentation par utilisation du modèle informatique.

Quatre différentes méthodes d'initiation, ont été utilisées pour examiner les effets de direction de la détonation sur l'évènement de l'onde de déformation, suivant différentes positions sur la surface libre du gradin. Suivant la méthode (1), la charge de colonne a été allumée au sommet et la détonation de la charge c'est effectuée vers le bas. Suivant la méthode (2), la charge de la colonne a été allumée au fond et la charge c'est brûlé de bas vers le haut. Suivant la méthode (3), la charge a été allumée à partir du centre avec le sommet à moitié brûlant de bas en haut, et l'inférieur à moitié brûlant vers le bas. Suivant la dernière méthode (4), la charge a été allumée simultanément aux deux fins des extrémités.

L'amplitude maximum de l'onde de déformation (P.S) aux différentes positions sur la surface du gradin, et le temps de la montée (R.T) ont été calculés, par le modèle mathématique, en utilisant les quatre méthodes d'initiations.

Les tableaux 4.2, At2, At3 et At4 nous montrent les résultats pour les différentes profondeurs de trou H, c.a.d les différentes longueurs de la charge de la colonne, EL, avec B, T et G ont été gardées comme constantes.

Les données de l'onde de déformation, ont été présentées graphiquement sur la figure 4.3, Af3, Af4 et Af5. Pour Permettre une comparaison complète et exacte, la déformation maximum (P.S) est montrée comme une fonction de la position le long de la surface verticale. Sur les figures la proportion X/L représente la distance de la proportion du sol du gradin et de la hauteur de ce dernier.

Il paraît que dans tous les cas de figures, la déformation maximale a lieu quand $X/L = 1/3$ et $2/3$ de la hauteur du gradin, et les amplitudes maximum des ondes de déformation paraissent être bas, en particulier au pied du gradin et la croûte du gradin. De ceci, et dans tous les cas, nous attendrions une fragmentation pauvre à la croûte et au pied du gradin. Les résultats pour les deux cas montrent que les positions haute, et deux fin d'initiation indiquent de très basses valeurs pour l'onde de déformation maximum dans le quart supérieur du gradin, mais les initiations du fond et du centre donnent de hautes ondes de déformations, respectivement, dans la même partie du gradin.

Au pied du gradin, l'initiation du bas donne des ondes de déformations inférieures que les autres méthodes. Pour une valeur de $X/L = 1/3$ pour les deux fin initiations il paraît une très haute amplitude maximum de l'onde de déformation.

En général il est possible de montrée que la région avant de la direction de tir, est relativement une zone de haute amplitude maximum, pendant que la région arrière de la direction de tir, est

relativement une zone de basses amplitudes maximum. Donc, l'auteur attendait que le centre et les deux fins d'initiations, donnent la plus haute amplitude maximum dans les deux quarts supérieur et inférieur du gradin. Mais malheureusement, les deux fins d'initiations ont donné le résultat opposé, comparé avec celle obtenu par Darly [105], par suite d'une étude par la technique photo-élastique.

Des figures 4.3, Af3, Af4 et Af5, l'auteur suggère que les déformations maximales d'une longue charge pourraient être améliorées, le long de toute la hauteur du gradin, en faisant exploser la charge au près de son centre.

Il est apparent, du point de vue d'uniformité de la fragmentation suivant les résultats du tir, qu'une des deux méthodes d'initiation, fond ou centre, pourrait donner la meilleure uniformité de la fragmentation. De ces résultats, l'auteur pensait qu'un point d'initiation, entre le centre et le fond d'une charge de la colonne, devrait donner une uniformité de fragmentation mieux que toute autre méthode d'initiations.

Donc le point 1/3 de la longueur de la charge, mesuré à partir du fond, a été sélectionné comme le point d'initiation. Le modèle mathématique par ordinateur a été modifié et le modèle géométrique utilisé est montré sur la figure 4.4. Les résultats pour les amplitudes maxima sont illustrés dans le tableau 4.3. La méthode d'initiation pour le fond, centre et le 1/3 EL est montrée graphiquement sur la figure 4.4. Cette figure, indique que la méthode d'initiation du bas est encore meilleure dans le tir des gradins et donne la meilleure uniformité de la fragmentation, quand il y a une charge explosive suffisante pour la rupture. Mais lorsque la fragmentation n'est pas importante, l'auteur suggère que la méthode des deux fins d'initiation, est une bonne méthode pour amorcer une charge dans un tir du gradin.

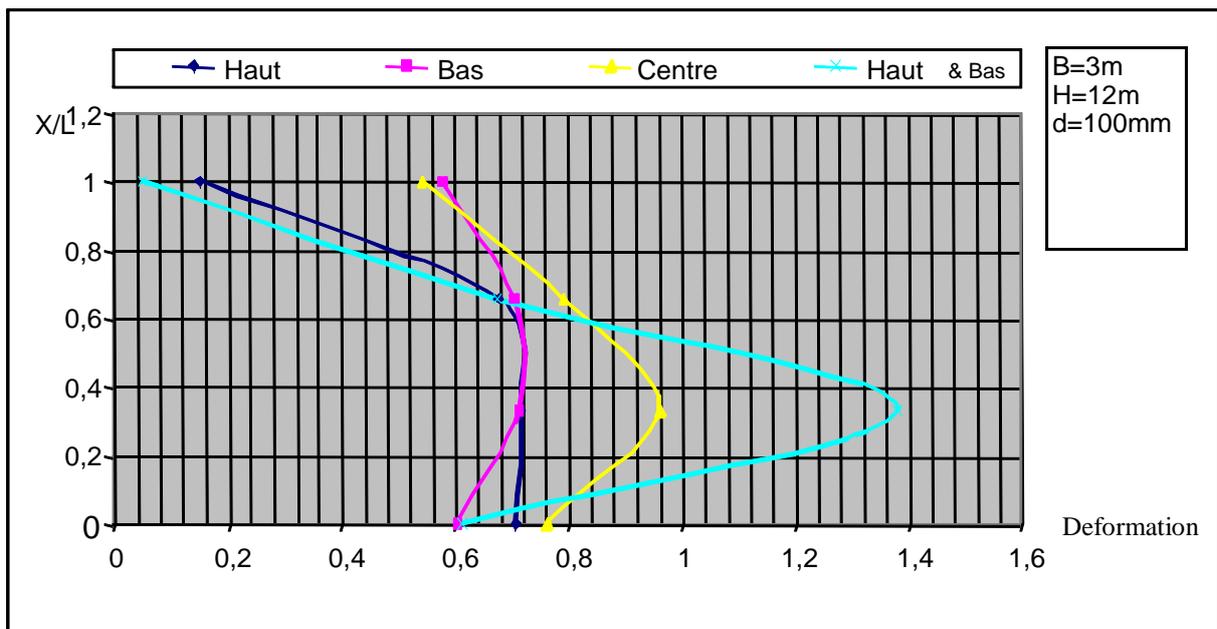


Figure 4.3 - Influence de la méthode d'initiation sur la fragmentation

Nous allons présenter dans le tableau 4.2, Les paramètres de l'onde de déformation obtenus a partir d'une colonne de charge aux différents points sur une surface libre en utilisant; $h=12m$, $b= 3m$ et $d=100mm$.

Tableau 4.2 - Les paramètres de l'onde de déformation obtenus a partir d'une colonne de charge aux différents points sur une surface libre en utilisant ; $h = 12m$, $b = 3m$ et $d = 100mm$.								
X / L	Initiation de haut		Initiation de bas		Initiation du centre		Initiation de haut&bas	
	PS	RT	PS	RT	PS	RT	PS	RT
0.0	0.0007099	300	0.0006059	200	0.0007659	200	0.0006145	150
1/3	0.0007195	250	0.0007160	250	0.0009644	150	0.0013828	300
2/3	0.0006809	150	0.0007077	250	0.0007948	200	0.0006772	200
1	0.0001526	150	0.0005808	250	0.0005445	200	0.0000518	200

La figure 4.4 montre l'évolution de la déformation pour une charge initiée au point EL/3.

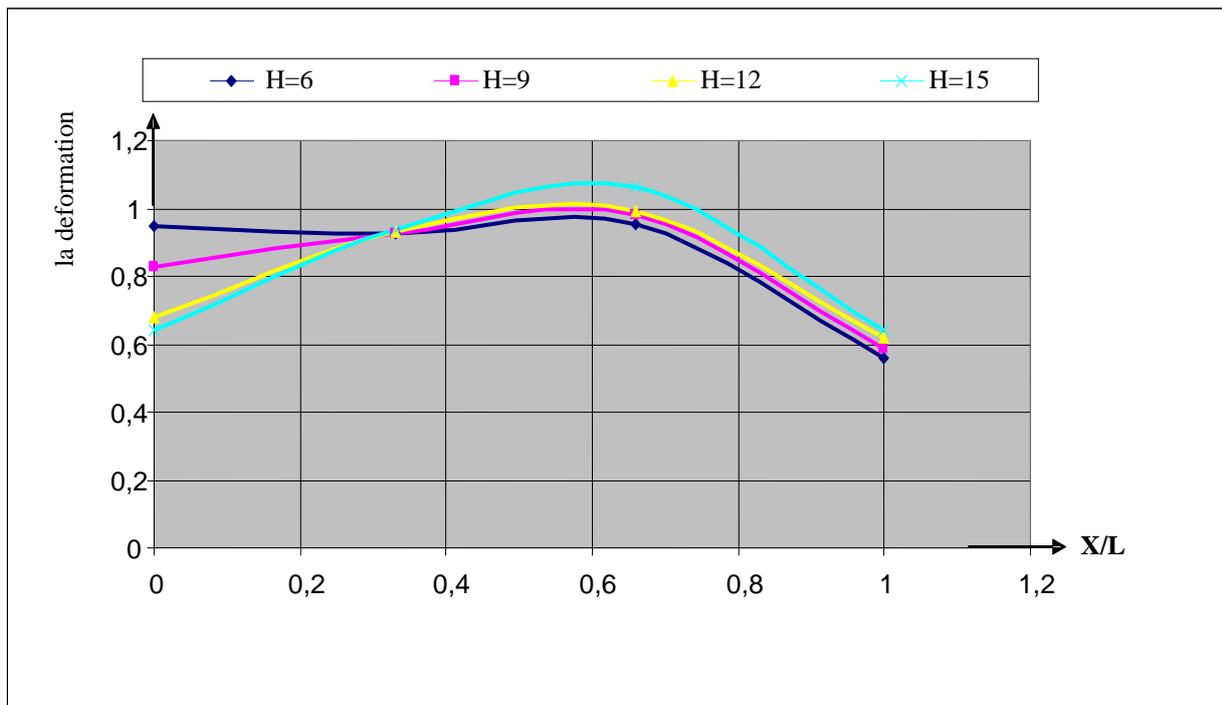


Figure 4.4 - Evolution de la déformation pour une charge initiée au point EL/3.

Le tableau 4.3, indique les paramètres de l'onde de déformation a partir d'une colonne de charge initiée au point (el / 3) a partir du bas par application de: $V= C = 6500 \text{ m/s}$

Tableau 4.3 - Les paramètres de l'onde de déformation a partir d'une colonne de charge initiée au point (e/3) a partir du bas par application de: $V = C = 6500$ m/s

X / L	La profondeur du trou H ; m							
	6.0		9.0		12.0		15.0	
	PS	R.T	PS	R.T	PS	R.T	PS	R.T
0.0	0.0009464	150	0.0008258	150	0.0006809	350	0.000639	450
1/3	0.0009282	150	0.0009280	150	0.00092996	150	0.0009356	150
2/3	0.000954	100	0.0009828	100	0.000992	100	0.0010639	150
1	0.0005575	100	0.0005862	100	0.0006219	50	0.0006414	100

4.6 - La fragmentation et la vitesse de détonation

C'est bien connu, que le rapport de la vitesse de l'onde de déformation a la compression dans la roche «C» et la vitesse d'un explosif «V» à la proportion de longueur/diamètre de l'explosif (EL/D), et l'emplacement de détonateur détermine la forme de l'onde composée au front développé par toutes les contraintes aux compressions individuelles induites dans la roche à chaque point le long de la colonne d'explosif. La forme de l'onde composée, contrôle les angles de l'incident de l'onde de déformation à la surface libre du gradin, ce qui va donc affecter le degré de la fragmentation. Donc, la forme de l'onde à tout point, sur la surface libre, est une fonction de la vitesse de détonation de l'explosif «V».

Un model géométrique, basé sous l'effet de «V» sur la fragmentation a été pris pour étudier les raisons qu'un explosif donnerait une uniformité de fragmentation mieux qu'un autre pour une roche donné ($c = 6500$ m/sec), voir les figures Af7, 4.5, Af9 et Af10. Les vitesses de détonation utilisées étaient 3800 m/s, 6500 m/s et 8200 m/s.

Le «PS» et les «RT» ont été disposés dans les tableaux At2, At6 et At7 et montré graphiquement sur la figure Af7, 4.5, Af9 et Af10 pour le sommet, le fond, centre et les deux fins d'initiations).

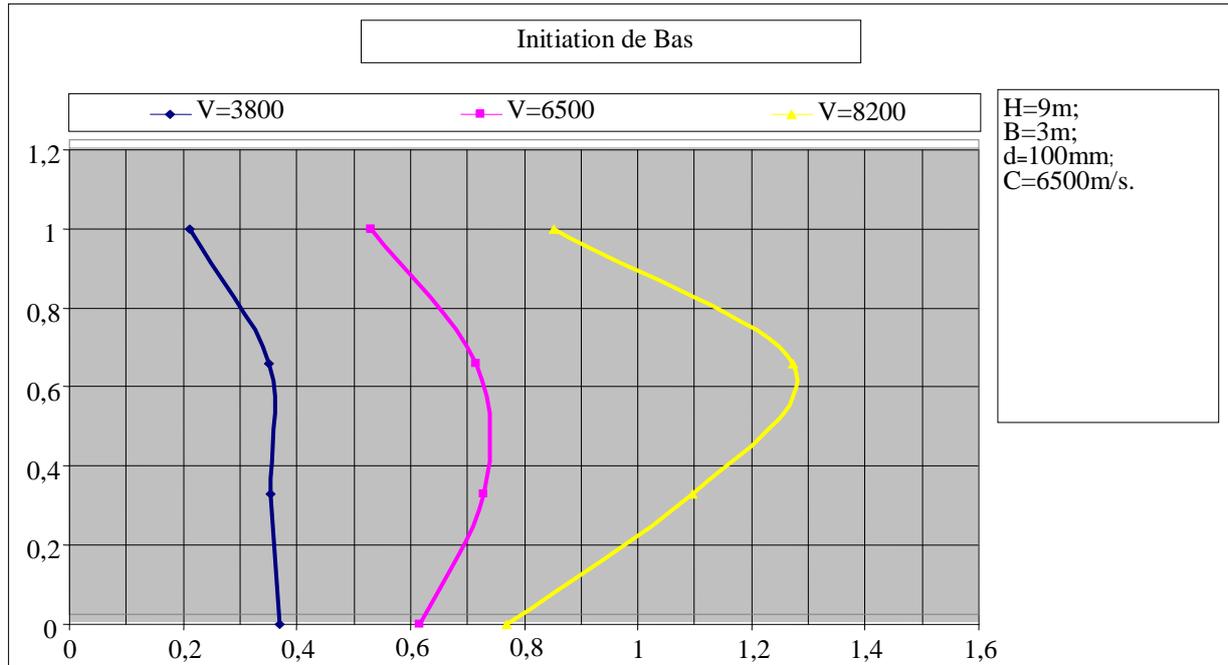


Figure 4.5 - Effet du rapport v/c sur la distribution de la déformation sur les différents points sur la surface libre

En analysant les graphes, on peut déduire que dans tous les cas d'initiations:

- a- L'amplitude maximum de la déformation augmente proportionnellement avec V/C à tous les points sur la surface libre.
- b- Dans l'initiation du sommet, et à $X/L = 0$ il y a une augmentation considérable de l'amplitude maximum avec V ($8200 \text{ m/s} > 6500 \text{ m/s}$).
- c- Au sommet, le fond et les deux fins méthodes d'initiation donnent la meilleure uniformité de la fragmentation avec $V/C \leq 1$, pendant que la méthode d'initiation du centre donne la meilleure uniformité de la fragmentation avec $V/C \geq 1$.

Il est clair à partir des figures, que si l'amplitude maximum d'une onde est indicative de ses caractéristiques de brisement pour un ensemble donné de conditions, alors il y a une vitesse optimum de détonation associée avec chaque point sur la surface. Mais en générale la description commune de vitesse de détonation doit s'arrêter, pour permettre à une meilleure compréhension de la fragmentation des roches.

4.7 - Influence de la ligne de moindre résistance sur la fragmentation

4.7.1 - Tir des gradins

L'effet de la ligne de moindre résistance d'un gradin sur la fragmentation, a été étudié par l'utilisation du modèle mathématique proposé. Deux modèles géométriques ont été pris; le premier ayant les paramètres géométriques $B=1-5 \text{ m}$, $H=3B$ et $T=0.7B$ et le deuxième $B=1-5\text{m}$, $H=9.0\text{m}$ et $T=2.1\text{m}$. Les résultats obtenus ont été illustres dans les tableaux At2,

At8, 4.4, At10 a At13 ,4.5, At15 et At16 et montré graphiquement sur les figures Af11, 4.6, Af13aAf15, 4.7, Af17et Af18.

Pour étudier l'effet de la longueur du trou sur la fragmentation, par l'emploi du modèle géométrique, Les valeurs calculées sont données dans les tableaux 4.2, At2, At3 etAt4 et présenté graphiquement dans la figure Af19,4.8,Af21 et Af22.

Le diamètre du trou et la proportion de V/C utilisé, dans cette section, sont respectivement 100mm et 1. La méthode d'initiation est indiquée dans les figures.

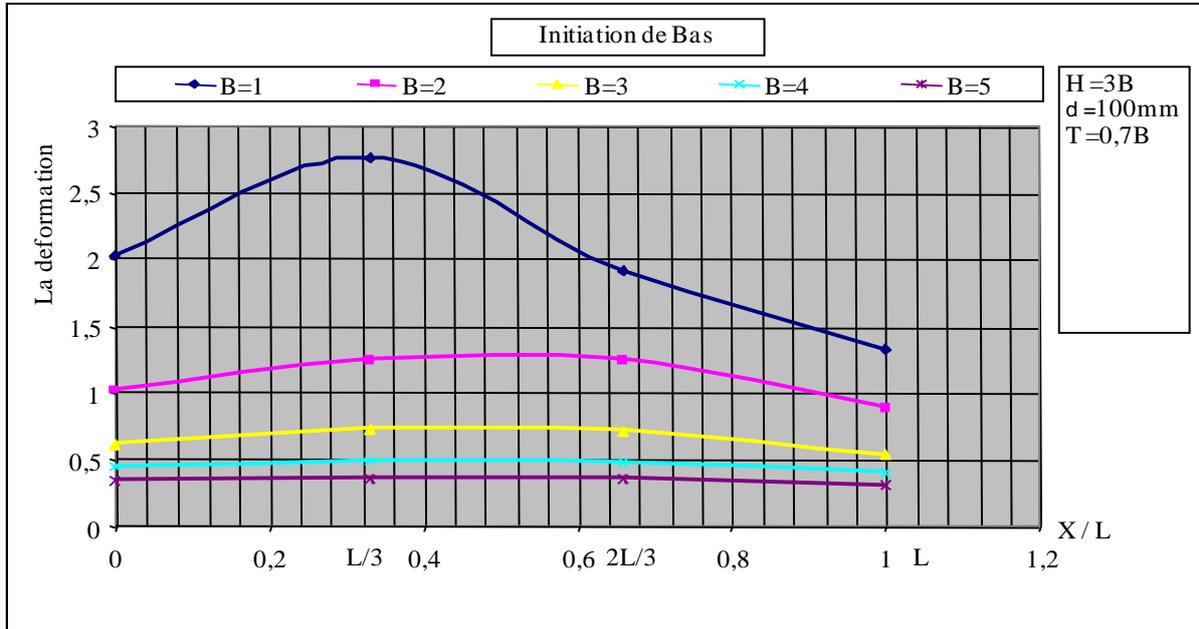


Figure 4.6 - Effet der la ligne de moindre résistance sur la fragmentation

Tableau 4.4 - Les paramètres de l'onde de déformation obtenus a partir d'une colonne de charge aux différents points sur une surface libre en utilisant; B= 2m, d =100mm H=3B et C=V =6500 m/s.

X / L	Initiation de haut		Initiation de bas		Initiation du centre		Initiation de haut&bas	
	PS	RT	PS	RT	PS	RT	PS	RT
0.0	0.0012306	250	0.001019	150	0.0014106	150	0.0010153	150
1/3	0.0012303	150	0.0012461	200	0.0015313	150	0.0024355	200
2/3	0.0009396	150	0.0012475	200	0.0013596	150	0.0009425	150
1	0.0002523	150	0.0008776	150	0.000843	150	0.0001762	200

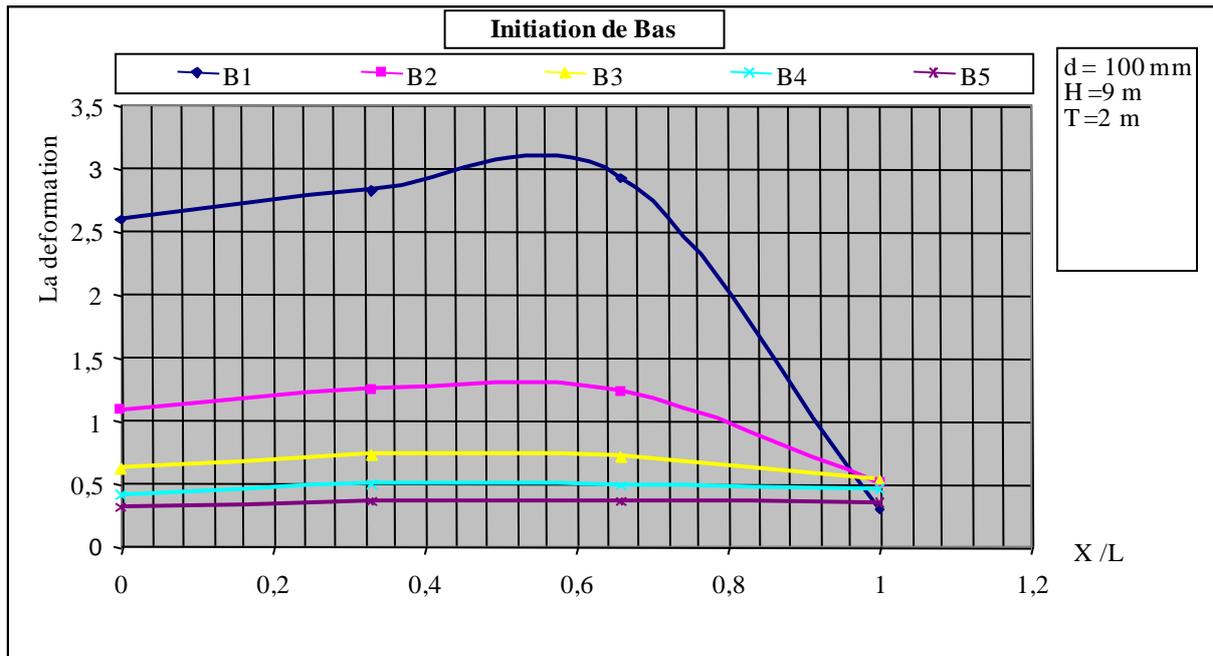


Figure 4.7 - Effet de la ligne de moindre résistance sur la fragmentation

Tableau 4.5 - Les paramètres de l'onde de déformation obtenus a partir d'une colonne de charge aux différents points sur une surface libre en utilisant; B= 2m, d =100mm H=9 et C = V = 6500 m/s.

X / L	Initiation de haut		Initiation de bas		Initiation du centre		Initiation de haut&bas	
	PS	RT	PS	RT	PS	RT	PS	RT
0.0	0.0012284	250	0.0010815	150	0.0013340	200	0.0010747	150
1/3	0.0012251	250	0.0012351	200	0.0015339	150	0.0024609	50
2/3	0.0010251	150	0.0012306	250	0.0013200	200	0.0010168	150
1	0.0001335	150	0.0004997	150	0.0005699	100	0.0000563	200

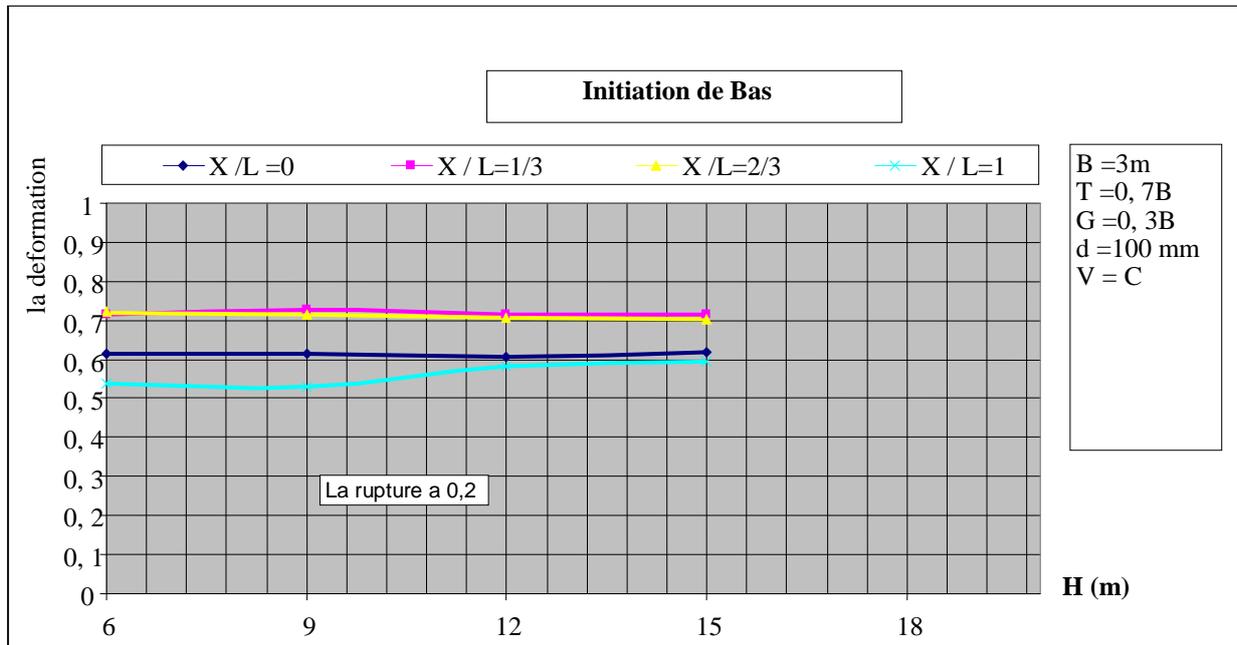


Figure 4.8 - Effet de la profondeur du trou sur la fragmentation

Dans toutes les figures l'amplitude maximum de l'onde de déformation est montrée pour les différentes méthodes d'initiations, en fonction de la position le long de la surface verticale au temps de la montée.

L'étude effectuée, l'analyse des données et les figures nous permis de déduire ce qui suit:

a- En utilisant les proportions $H/B=\text{constante}$ (3m) et $T/B=\text{constante}$ (0.7B) suivant une variation de la ligne de moindre résistance de 1 à 5 m, alors l'amplitude maximum de l'onde de déformation, diminue avec l'accroissement de la ligne de moindre résistance le long de la surface, mais l'uniformité de la fragmentation augmente jusqu'à ce quelle atteinte la valeur de la déformation de rupture (0.2).

b- La ligne de moindre résistance optimum, dépend des méthodes d'initiation. Pour une meilleure uniformité de la fragmentation dans la dimension définie Nous avons établi des tirs avec des initiations de sommet, le fond, le centre et les deux fins respectivement pour des lignes de moindre résistance 2; 5,5 et 1 voir figures Af11, 4.6, Af13 et Af14.

c- Avec la diminution de la ligne de moindre résistance le degré de la fragmentation augmente, mais on a constaté que l'uniformité de la fragmentation s'abîme (instable).

d- En variant les proportions H/B et T/B avec le changement dans les valeurs de la ligne de moindre résistance de 1 à 5m, on a constaté qu'il y a une valeur de la ligne de moindre résistance (ou zone) provoquant la rupture de la surface entière. Cette valeur est 1-4, 1-5, 1-5, et 5 respectivement pour le sommet, le fond, centre et les deux fins d'initiation (la tension de déformation = 0.2).

e- En analysant les figures Af19, 4.8, Af21 et Af22 on constate qu'il est possible de concevoir un tir, afin de produire de plus hautes amplitudes maximum dans les régions qui sont plus difficile à fragmenter (pied du gradin ou la croûte), ou dans les régions où la fragmentation est médiocre.

En comparant les résultats obtenus avec ceux de ASH [106] examiné dans la pratique et H/B résolu = 1.5 à 4 et $T/B = 0.5$ à 1. Nous pouvons déduire que les résultats obtenus par ordinateur coïncident avec ceux établis par les sus nommés chercheurs; Alors nous recommandons leur application pour résoudre les problèmes de la fragmentation dans l'industrie minière.

4.7.2 - Tir du cratère

Si une charge explose successivement à de plus grandes profondeur par rapport a une surface libre, la dimension du cratère produit a la surface, mesuré par rapport a la profondeur, rayon ou volume, augmente vers un point maximum et puis décroisse brusquement jusqu'a zéro. La distance de la charge, pour une dimension maximale du carter, est aussi calculée par les distances optimums, et la distance suivant laquelle la rupture de la surface cesse est appelée la distance critique.

Parmi les renseignements nécessaires pour le plan de tir, on distingue habituellement la distance de la charge optimum, ou une distance optimum proche, selon le degré de fragmentation ou volume.

Parce que les renseignements sur la valeur de la distance optimum son très importants dans la mesure du possible, les cratères tester devrait être concentré autour de cette distance.

Donc, un modèle mathématique par ordinateur peut être appliqué pour donner quelques idées à propos de la distance optimum, son emplacement, et aussi le problème de la fragmentation.

Pour appliquer le modèle mathématique par ordinateur suivant la technique du cratère, deux modèles géométriques ont été étudiés à savoir:

a-Sous une profondeur définie de la surface (2m), la longueur de la charge varie d'une manière croissante de 1 à 4 m.

b-une longueur de la charge limitée (6m) a été proposée, et la distance à partir de la surface au sommet de la charge «T» variée 1 a 4m.

Du bord de trou de 100mm de diamètre, l'amplitude maximum de l'onde de déformation et le temps de monté chronomètre ont été calculés à différentes distances, E varie de 1 a 5 m le long de la surface. Les premiers résultats du modèle sont illustrés dans les tableaux At17, 4.6, At19 et At20 et les deuxièmes résultats du modèle sont illustrés dans les tableaux At21 à At24.

Tableau 4.6 - Les paramètres de déformation obtenu à partir d'un colonne de charge dans le tir de cratère en utilisant: EL= 2.0 m, T = 2.0m et V= C.

E (m)	Initiation de haut		Initiation de bas		Initiation du centre		Initiation de haut&bas	
	PS	RT	PS	RT	PS	RT	PS	RT
1	0.0003303	200	0.001586	100	0.0010797	100	0.0007706	200
2	0.0001861	200	0.0009615	100	0.0005723	50	0.0005899	350
3	0.0001094	300	0.0004589	100	0.0003086	100	0.00034	300
4	0.0000679	500	0.0002194	100	0.0001779	100	0.0002282	300
5	0.0000453	500	0.0001249	150	0.0001041	150	0.0001385	250

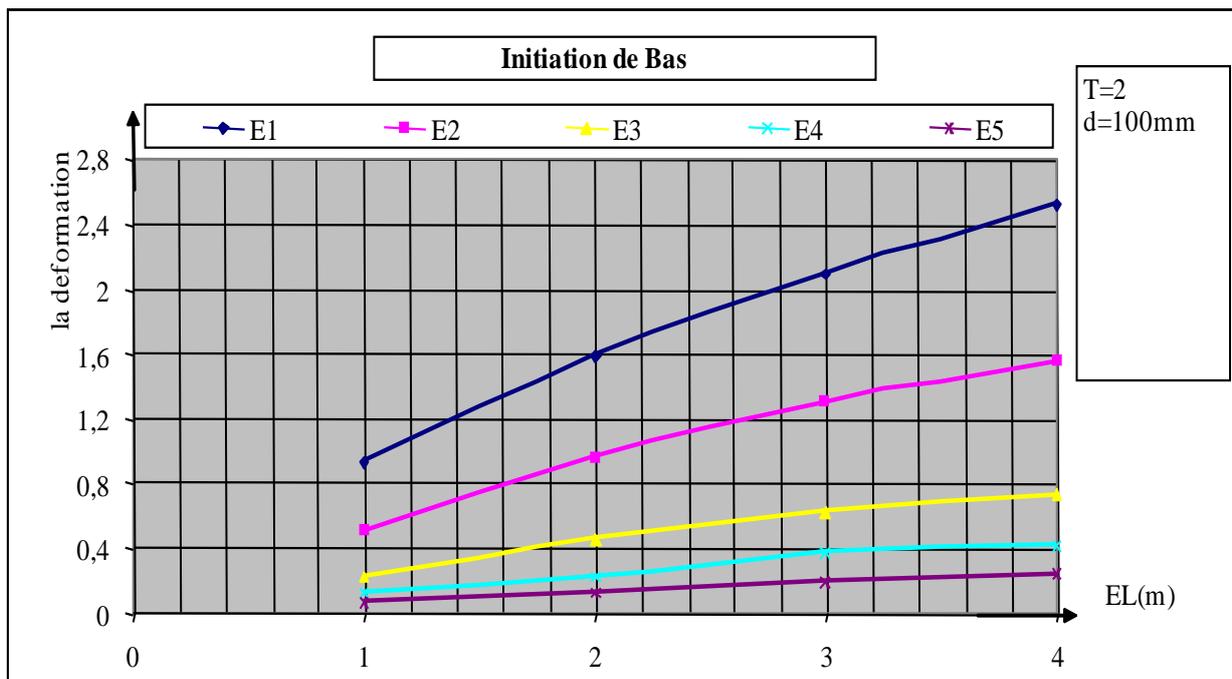


Figure 4.9 - La déformation en fonction de la longueur de la charge dans le tir de cratère

Les figures Af23, 4.9, Af25 et Af26 montrent la relation entre l'amplitude maximum et la longueur de la charge (EL) pour différent E, et les figures Af27 à Af30 montrent les ondes de déformation maximum par rapport a la profondeur des charges, «T» par l'utilisation de différentes méthodes d'initiation.

L'interprétation graphique des résultats obtenus, nous permet de déduire ce qui suit:

a-Avec un certain volume de la charge, l'amplitude maximum de l'onde de déformation baisse proportionnellement avec E. En d'autres termes, avec l'augmentation du volume de la charge, le rayon du cratère pourrait être augmenté, si l'amplitude maximum de la déformation est > a la déformation de rupture

b-Si on suppose que la déformation de rupture soit égale à 0.2, on constate à partir des figures Af23 à Af30, que l'initiation du fond est la meilleure méthode dans le tir du cratère.

c-A partir des résultats du deuxième modèle, l'amplitude maximum de la déformation, à une certaine profondeur (T) baisse avec les augmentations dans (E), tandis qu'à une distance particulière (E), le même effet se passera avec l'accroissement de T.

d-L'uniformité de la fragmentation augmente avec la profondeur jusqu'à ce qu'elle atteigne une valeur optimale puis s'abîme.

4.8 - Conclusion

Ce chapitre a énoncé en détail la méthodologie mise au point permettant l'évaluation qualitative de la fragmentation à l'explosif suivant la méthode d'initiation, la vitesse de détonation de l'explosif, la ligne de moindre résistance, la profondeur du trou et dans les tirs des cratères.

Pour comprendre les phénomènes qui se produisent pendant le tir, Il est très important de pouvoir identifier les paramètres qui peuvent influencer l'opération de la fragmentation et de voir l'interaction de ces paramètres sur les résultats de tir.

Concernant la méthode d'initiation et suivant les résultats obtenus il est clair qu'un point d'initiation entre le centre et le fond de la charge donne une meilleure uniformité de la fragmentation.

Les caractéristiques de l'explosif a un effet direct sur la fragmentation et à ce stade nous avons décelé que le taux de déformation augmente proportionnellement avec la vitesse de l'onde de déformation dans la roche.

Les résultats obtenus pour la ligne de moindre résistance nous a permis de déceler que la ligne de moindre résistance optimum dépend de plusieurs facteurs tel que la méthode d'initiation, la profondeur du trou et même l'excès de forage.

Nous avons pu voir deux modèles pour le tir des cratères nous avons constaté que la méthode d'initiation du fond est toujours meilleure est que l'uniformité de la fragmentation est proportionnelle avec la profondeur jusqu'à ce qu'elle atteigne une valeur optimale puis s'abîme, il est vrai que les règles de l'art existent, mais il est souvent nécessaire de tenir compte de toutes les paramètres d'une façon globale.

Dans le chapitre qui suit, nous allons voir l'impact de l'exploitation minière sur l'environnement et les mesures de protection.

Chapitre 5 - Gestion environnementale dans les mines à ciel ouvert

Chapitre 5 - Gestion environnementale dans les mines à ciel ouvert

5.1 - Introduction

L'activité minière comme toute activité humaine a un impact sur l'environnement, sachant que réduire à zéro cet impact est parfaitement utopique. Il s'agit de concilier la nécessité d'une production minière et le désir légitime de maintenir un environnement correct et la réduction des effets indésirables à un niveau tolérable.

L'exploitation des mines à ciel ouvert et des carrières peut être une source potentielle de richesse dans les pays en développement, par contre elle a des effets très visibles sur l'environnement. La dégradation du site, la destruction de la végétation et la disparition de la faune indigène sont les signes les plus marquants. Les mines à ciel ouvert sont en outre une source fréquente de contamination des eaux de ruissellement et des eaux souterraines

En raison de la vigilance accrue des mouvements écologiques partout dans le monde, les sociétés minières ne peuvent plus se livrer à l'exploitation sauvage de gisements et quitter subrepticement le site en fin d'exploitation. Dans la plupart des pays développés, des lois et des règlements ont été adoptés à cet effet, et les organisations internationales encouragent les pays où ces instruments n'existent pas encore à en faire autant. En vertu des dispositions en vigueur, tout projet minier doit comporter un volet de gestion de l'environnement. Il est notamment exigé que l'exploitation minière soit précédée d'études d'impact sur le milieu, qu'un programme de réhabilitation progressive du site minier prévoyant la remise en état du terrain, le reboisement, le rétablissement de la végétation et la réintroduction de la faune indigène, etc soit établi et qu'un programme de contrôle à long terme soit instauré concurremment (programme des nations unies pour l'environnement (PNUE), 1992; organisation des nations unies (ONU) et the german foundation for international development, 1992; Environmental Protection Agency (Australia), 1996; international council on metals and the environment (ICME), 1996). Il importe évidemment que ces dispositions ne restent pas lettre morte et ne soient pas qu'une simple déclaration d'intention annexée au dossier soumis pour l'obtention du permis d'exploitation.

5.2 - Les normes de gestion environnementale :

Partout dans le monde, l'impact environnemental devient un enjeu de plus en plus important ; plusieurs sources encouragent une réduction de cet impact, notamment les gouvernements, associations professionnelles, chaînes d'approvisionnement et partenaires financiers.

Les systèmes de gestion de l'environnement (SGE) fournissent une structure pour une gestion efficace de la responsabilité environnementale. D'après Tibor [108] La série ISO 14000 de normes de management environnemental deviendra probablement un passeport mondial pour faire des affaires pour des milliers d'entreprises

La famille ISO 14000 traite du Management environnemental. Ce terme recouvre ce que l'organisme est fait pour :

- Réduire au minimum les effets dommageables de ses activités sur l'environnement, et
- Améliorer en permanence sa performance environnementale

5.2.1 - Les caractéristiques essentielles de la famille ISO 14000

La famille ISO 14000 traite de divers aspects du management environnemental. Les deux toutes premières normes, ISO 14001:2004 et ISO 14004:2004, traitent des systèmes de management environnemental (SME). ISO 14001:2004 définit les exigences relatives à un SME et ISO 14004:2004 donne des lignes directrices générales pour un SME.

Les autres normes et lignes directrices de cette famille traitent d'aspects environnementaux spécifiques, notamment : l'étiquetage, l'évaluation de la performance, l'analyse du cycle de vie, la communication et l'audit.

Un SME répondant aux exigences d'ISO 14001:2004 est un outil de management qui permet à un organisme de toute taille et de tout type :

- d'identifier et de maîtriser l'impact environnemental de ses activités, produits ou services, et
- d'améliorer en permanence sa performance environnementale, et
- de mettre en œuvre une approche systématique pour définir des objectifs et cibles environnementaux, les atteindre et démontrer qu'ils ont été atteints.

5.2.2 - Principes et implications

La norme ISO 14001 repose sur le principe d'amélioration continue de la performance environnementale par la maîtrise des impacts liés à l'activité de l'entreprise. Celle-ci prend un double engagement de progrès continu et de respect de la conformité réglementaire.

La présente Norme internationale spécifie les exigences relatives à un système de management environnemental permettant à un organisme de développer et de mettre en œuvre une politique et des objectifs, qui prennent en compte les exigences légales et les autres exigences auxquelles l'organisme a souscrit et les informations relatives aux aspects environnementaux significatifs

La roue de Deming est le principe de base sur lequel reposent toutes les exigences de la norme ISO 14001. Cette dernière est d'ailleurs architecturée selon la spirale d'amélioration continue.

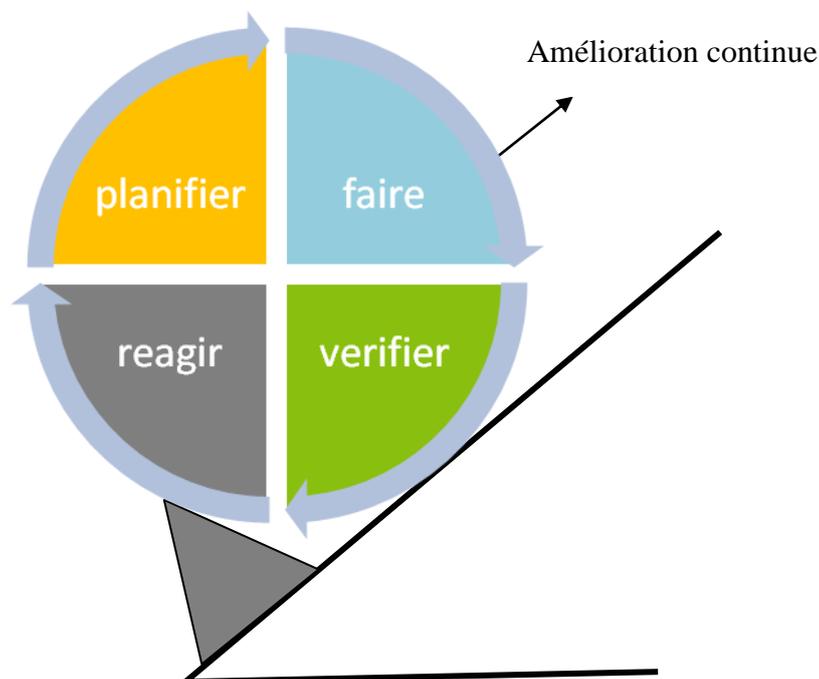


Figure 5.1- La roue de Deming

Selon BARON [109] Le principe de la norme ISO 14001 se divise en quatre parties à savoir :

- Prévoir,
- Faire,
- Prouver et contrôler,
- Corriger et réagir.

Elle implique l'entreprise dans un engagement de réduction des nuisances, d'amélioration continue et fournit en annexe un guide pour son application. Elle introduit des exigences de communication interne et externe aux parties intéressées, de prévention des situations d'urgence et de capacité à réagir face à celles-ci.

La présente Norme internationale est applicable à tout organisme qui souhaite :

- établir, mettre en œuvre, tenir à jour et améliorer un système de management environnemental,
- s'assurer de sa conformité avec sa politique environnementale établie,
- démontrer sa conformité à la présente Norme internationale

Toutes les exigences de la présente Norme internationale sont destinées à être intégrées dans n'importe quel système de management environnemental. Le degré d'application dépend de divers facteurs, tels que la politique environnementale de l'organisme, la nature de ses activités, produits et services, et sa localisation et les conditions dans lesquelles il fonctionne.

5.3 - L'activité minière

Un tir d'explosif génère comme un tremblement de terre, selon Bertil [110] les ondes sismiques se propageant sous la surface du sol. Les trois principaux types d'ondes sont les ondes longitudinales, transversales et les ondes de surface.

Bien que les activités soient en général limitées dans le temps (environ 20 à 50 ans), les interventions peuvent provoquer des dégradations irréversibles. D'après Eschborn [111] Les dégâts directs les plus sévères concernent la surface du sol et le bilan des eaux souterraines et superficielles.

L'extraction de minéraux à ciel ouvert s'accompagne en outre d'une pollution atmosphérique, de nuisances sonores, de l'altération des sols, de la faune et de la flore, ainsi que de problèmes sociaux dus à des conflits d'intérêts, des transferts de domicile, etc. Dans tous les cas, les conséquences dépendent toutefois des étendues touchées, du site et du climat. Par ailleurs, les aspects juridiques et les possibilités de contrôle jouent un rôle décisif pour l'ampleur des dégâts et pour leur limitation, notamment par remise en culture ou restauration du site. Quoi qu'il en soit, la remise en culture des surfaces impliquées revient toujours à substituer un nouvel écosystème à celui rencontré initialement.

Le succès des actions réparatrices reste souvent aléatoire, en particulier sur les sites pour lesquels on manque d'expérience. La limitation des dégâts passe par une planification, une préparation et une exécution rigoureuse du projet. Elle a pour condition préalable impérative l'analyse complète de la situation exacte, à partir de laquelle s'établira le programme devant tenir compte des modifications induites par l'exploitation dans la région et des effets sur l'environnement. On inclura dans les mesures accompagnatrices non seulement les indemnités requises, mais également le déplacement des groupes de population habitant sur le site et l'élaboration d'un plan de restauration.

Ces mesures seront complétées par la formation et la sensibilisation des agents des organismes et institutions impliquées et autres personnes concernées, afin que le projet soit conduit dans le souci de la protection de l'environnement.

La nécessité de minimiser les coûts ne doit pas pousser les promoteurs et responsables d'un projet à négliger les dépenses pour la protection de l'environnement. Les responsables devraient veiller dès l'instruction et l'approbation d'un projet à ce que celui-ci intègre des mesures appropriées de préservation de l'environnement et de réaménagement du site et qu'il prévoie une gestion optimale des ressources. De plus, on s'assurera que les fonctions de contrôle et de réglementation requises ont bien été mises en place.

5.4 - Présentation du domaine d'intervention

Le secteur des exploitations à ciel ouvert englobe toutes les formes d'extraction de matières premières minérales à partir de gisements affleurant. Le gisement est mis à nu par enlèvement des roches de recouvrement ou morts-terrains (déblais) pour permettre la récupération du minerai. Selon les propriétés physiques du matériau brut et les contraintes imposées par la nature du site, il existe différentes méthodes d'exploitation de mines à ciel ouvert:

L'extraction à sec de substances tendres (tableau 5.1) ou dures. Si les matériaux sont trop durs pour pouvoir être excavés directement, ceux-ci doivent d'abord être abattus. Ils sont ensuite chargés mécaniquement et transportés vers les ateliers de préparation mécanique

Tableau 5.1 - Modes d'exploitation des gisements affleurant et principales matières premières extraites			
Gisements de matériaux consolidés (extraction à sec)		Gisements de matériaux non consolidés (extraction à sec)	
Matériaux de construction, Diamants, Pierres précieuses, Feldspath, Gypse, Calcaire/ MP du ciment	Minerais métalliques (cuivre, fer, argent, étain) Schistes bitumineux Charbon Minerais uranifères	Lignite, Diamant, Or Kaolin, Phosphates Sable, gravier	Minerais lourds (ilménite, rutile, minéraux rares riches en terres, zircon), Argile, Cassitérite

Les sites des activités minières sont imposés par la nature. Les exploitations nouvelles ou les extensions d'exploitations en place entrent donc souvent en concurrence avec d'autres possibilités offertes par les sites concernés ou obligent à mettre en place les infrastructures nécessaires à l'activité minière. En ce qui concerne les différentes activités, il est difficile de séparer l'extraction et la préparation des matières premières, puisque ces opérations s'enchaînent et sont généralement implantées sur le même site.

5.5 - Effets sur l'environnement et mesures de protection

L'impact écologique des activités à ciel ouvert peut fortement varier selon la forme d'exploitation. Dans ce chapitre, les effets produits sur l'environnement et les mesures préventives à prendre seront donc examinés.

5.5.1 - Effets potentiels des exploitations à ciel ouvert

Les effets de l'exploitation à ciel ouvert de matières premières sont tous caractérisés par le fait qu'ils sont toujours liés au site et aux zones mises à contribution, notamment en ce qui concerne le climat et le contexte social et infrastructurel.

Le tableau 5.2 représente les principaux effets sur l'environnement.

lieux	évènements
Site/ paysage	Surfaces dévastées; altération de la morphologie; risques de chutes de pierres sur les gradins; destructions de biens culturels.
Air	Bruit; ébranlements dus aux tirs à l'explosif; dégagements de poussières par le trafic, les tirs à l'explosif, le vent; effluents gazeux suite à l'ignition spontanée de terrils, gaz nocifs, vibrations.
Eaux de surface	Modification du bilan en éléments nutritifs (évent. eutrophisation), pollution par des eaux usées contaminées; pollution due au renforcement de l'érosion.
Nappes souterraine.	Abaissement du niveau; altération de la qualité des eaux.
Sols	Décapage sur le lieu d'extraction: dévalorisation, assèchement, affaissements, risque d'envasement après remontée du niveau de la nappe phréatique, érosion.
Flore	Destruction de la flore sur le lieu d'extraction ; destruction partielle/ modification sur le périmètre environnant en raison de la variation du niveau de la nappe phréatique.
Faune	Emigration.
Population	Conflits d'intérêts ; effets de colonisation, destruction d'aires de villégiature, de stations climatiques etc.
Bâtiments	Dégâts dus aux remontées d'eau (rétablissement du niveau de la nappe phréatique).
Autres	Modification éventuelle du micro-climat.

5.5.2 - Limitation des effets sur l'environnement

Dans ce qui suit nous allons présenter divers moyens techniques permettant de limiter les effets sur l'environnement, en les regroupant dans l'ordre chronologique de leur mise en œuvre. On distinguera donc les mesures intervenant avant le début des activités minières, durant l'exploitation et finalement celles suivant la clôture des activités. Bien entendu, la limitation de l'impact écologique ne va pas sans bases institutionnelles ni sans l'existence d'une réglementation appropriée, dont l'application devra être contrôlée.

5.5.2.1 - Mesures précédant l'exploitation

A ce stade du projet, il est essentiel d'examiner la situation du moment afin de pouvoir apprécier à leur juste mesure les effets produits par la suite d'après les changements constatés. Cet examen consistera en un inventaire des monuments historiques et biens culturels, des sols, des eaux superficielles et souterraines (quantité et qualité), de la flore et la faune, des exploitations agricoles, etc.

Avant de commencer à exploiter des gisements, on répertoriera la flore et la faune et on étudiera les courants, etc.

Dans le cadre de la planification, on pourra déjà obtenir une réduction sensible des effets sur l'environnement en établissant par exemple un calendrier des travaux autorisant d'une part l'archivage et la conservation des éventuelles découvertes archéologiques ou l'abattage de bois d'œuvre dans la zone d'extraction, tout en écourtant le plus possible la période durant laquelle la mine restera ouverte. Dans l'intérêt des groupes de personnes concernés directement (personnes à déplacer) ou indirectement (pêcheurs par ex.) et pour prévenir des tensions sociales, on veillera à consulter ces personnes lors des travaux de planification. La participation des groupes de population concernés et des autorités régionales est particulièrement importante pour la mise au point et la réalisation des transferts de domicile, les indemnités et la réinstallation éventuelle des personnes déplacées après fermeture de la mine.

Avant que la mine soit mise en exploitation, on entreprendra déjà de former et de sensibiliser les décideurs et autres participants au projet aux thèmes de la santé et de l'environnement.

5.5.2.2 - Mesures accompagnant l'exploitation

Afin de réduire l'emprise globale de l'exploitation, on aura recours au rejet direct du stérile, c'est-à-dire que les déblais serviront directement à remblayer les vides résultant de l'extraction du minerai.

Pour éviter les nuisances sonores, les différents appareils utilisés devront être dotés de dispositifs d'amortissement du bruit. Les unités entières peuvent être encoffrées ou dotées d'échappements spéciaux en guise de protection acoustique. Pour le personnel, on aura recours à des protections auditives individuelles telles que casques, bouchons d'oreilles, etc. Finalement, on peut encore obtenir une réduction des nuisances sonores en limitant les travaux bruyants à certains moments de la journée, par ex. en ne pratiquant les tirs à l'explosif qu'une fois par jour. En outre, la propagation des ondes sonores peut être réduite par ex. en aménageant des écrans acoustiques autour des sources de bruit.

Dans le cas de l'abattage à l'explosif de matériaux consistants, il est possible de limiter les émissions de bruit et de poussières en réduisant les quantités d'explosif par optimisation de la maille de foration et du bourrage, ce qui réduit également l'intensité des vibrations et les effets de pulvérisation du matériau.

Pour éviter les émissions de poussière en général, on prendra des mesures ponctuelles telles que l'arrosage des voies de transport, le lavage des véhicules et autres moyens de transport (camions par exemple.), l'arrosage des terrils, la plantation de verdure sur les terrils et toutes les surfaces dénudées ainsi que l'utilisation de liants pour poussières. On pourra en outre capoter les différents appareils, notamment les installations de broyage et les bandes transporteuses. Les machines de forage devront être dotées de dispositifs de neutralisation des poussières par voie sèche ou humide. Arbres et haies constituent également un moyen de rabattre les poussières et de parer à la déflation.

Lorsque les fronts d'abattage sont instables, les pentes des bords de fosse devront être calculées de manière à écarter tout risque de glissement de terrain ou d'éboulement. Quant aux

écosystèmes avoisinants, des mesures spéciales telles l'interdiction d'accès, la délimitation par des clôtures et le barrage des voies d'accès pourront contribuer à leur protection.

Les groupes de personnes concernées par les activités minières finalement feront eux aussi l'objet de mesures visant à minimiser les répercussions sur leur cadre de vie et sur leurs conditions de travail. On nommera notamment des préposés à l'environnement, des responsables de la sécurité et on chargera des médecins du suivi médical du personnel travaillant dans la mine. Les effets de l'exploitation sur l'environnement ne se limitant pas au périmètre de la mine, les personnes vivant au voisinage devraient également bénéficier de services médicaux appropriés.

Toutes les activités minières et toutes les mesures visant à réduire l'impact de ces activités sur l'environnement doivent s'accompagner du contrôle permanent des principaux paramètres en jeu. On mesurera donc notamment les effluents gazeux, les niveaux sonores, les vibrations, les charges polluantes dans l'eau, les émissions de poussières, la stabilité des talus, les affaissements et le niveau de la nappe phréatique.

5.5.2.3 - Mesures suivant la cessation des activités

Dès qu'un quartier d'exploitation est épuisé et que le vide créé a été comblé par les déblais d'un autre chantier d'abattage, il faudra lancer les premières mesures de réhabilitation. Les exploitations à ciel ouvert étant souvent très étendues, ces actions correctrices se font parallèlement à la progression des chantiers d'abattage. Les mesures de réhabilitation consistent à réintégrer les surfaces exploitées dans l'environnement de façon à leur redonner l'aspect d'un paysage naturel.

Les terrils, les bords de la fosse, les verses extérieures et les surfaces désaffectées doivent immédiatement être plantées d'espèces végétales locales. Ceci permet de limiter et même d'éviter entièrement les effets de l'érosion notamment en climat tropical humide et la déflation en climat aride. Dans les zones particulièrement menacées par l'érosion, on aura recours à des méthodes anti-érosives spéciales comme les drainages et les travaux de consolidation.

Finalement, on s'efforcera d'obtenir la remise en culture des surfaces correspondant aux portions du gisement épuisées afin de pouvoir les réutiliser à des fins agricoles, mais on pourra également envisager une autre valorisation du site après son réaménagement. Si l'on prévoit une utilisation agricole, les sols devront être nivelés, compactés et recouverts de couches de terre et d'humus en vue de les faire reverdir et de pouvoir les exploiter par la suite.

Avec la remise en culture, on ne parvient toutefois qu'à limiter les dégâts écologiques. D'une part ces travaux s'étalent sur de longues périodes, d'autre part leur succès reste souvent aléatoire. Pour la remise en culture de stations situées dans des régions tropicales notamment, les connaissances dont on dispose demandent encore à être sérieusement approfondies, par exemple en ce qui concerne l'ordre de plantation et la sélection d'espèces adaptées au site.

Le succès de l'entreprise suppose également qu'on parvienne à rétablir le caractère naturel du sol, c'est-à-dire pour les facteurs physiques par exemple une perméabilité, une granulométrie et une structure donnée et pour les facteurs chimiques par exemple un certain pH, un certain équilibre biologique et l'absence de polluants, afin que ce sol puisse à nouveau remplir ses diverses fonctions de réservoir d'eau, cadre de vie pour la faune et la flore et substrat pour la production agricole.

5:6- Interactions avec d'autres domaines d'intervention

Dans les régions faiblement peuplées ou peu développées, les industries extractives marquent presque toujours l'avènement d'une nouvelle infrastructure. Les projets miniers sont souvent contraints d'assumer la majeure partie des frais liés aux travaux de construction. Les ouvrages à réaliser vont des routes et chemins de fer pour l'accès au gisement et des moyens de transport pour les minéraux extraits jusqu'aux cités où loger les ouvriers et leurs familles, avec toutes les installations qui s'y rattachent (approvisionnement, assainissement, etc). La nouvelle infrastructure peut amener un phénomène de colonisation de plus grande ampleur et le développement économique de la région.

Dans la plus part des exploitations minières, on s'efforce souvent d'implanter les ateliers de première transformation du produit brut sur les lieux mêmes de l'extraction. Pour l'évacuation des résidus, on peut prévoir des décharges au sein de la mine aux emplacements où l'abattage est achevé.

Les surfaces mises à contribution [112] pour l'exploitation d'un gisement sont souvent à l'origine de conflits d'intérêts. Si dans les pays à faible densité démographique, le problème des surfaces occupées se pose moins fréquemment, les activités minières peuvent néanmoins faire surgir des difficultés d'ordre juridique. Souvent, la propriété foncière ou les autres droits sur une parcelle de terrain ne sont pas souvent documentés et la délimitation des terrains ne s'appuie par sur des travaux de cartographie précis. La situation s'aggrave encore lorsque les groupes de population concernés n'ont pas de lobby ou qu'en raison de leur mode de vie ou de leur statut social, ils ne disposent que de moyens très limités pour préserver leur cadre de vie traditionnel. L'existence de ces personnes est alors véritablement menacée. Dans un tel contexte, les objectifs du développement régional devront inclure des éléments écologiques et ethniques en plus des aspects économiques.

D'une façon générale, on tiendra compte également des domaines d'intervention suivants, qui sont tous traités séparément dans un dossier spécifique et qui présentent d'importants recouvrements avec le secteur minier des exploitations à ciel ouvert:

- Planification de la localisation des activités industrielles et commerciales,
- Aménagement et gestion des ressources en eau,
- Transports routiers,
- Reconnaissance, prospection et exploration des ressources géologiques,
- Exploitations souterraines,
- Préparation et transport des minerais.

5.7 - Conclusion

De l'analyse et la discussion des différents points étudiés dans ce chapitre, nous pouvons déduire ce qui suit:

-La prise en compte de la composante environnementale doit être intégrée dès le stade de définition du projet et a toutes les phases de l'exploitation et 'jusqu'a la fermeture de la mine et même après celle-ci.

-L'abattage à l'explosif en carrière, nécessaire à la production de granulats, doit permettre d'atteindre les objectifs de production tout en garantissant la protection de l'environnement immédiat de la carrière. Les vibrations ainsi que le bruit généré par les tirs constituent un point particulièrement sensible pour les populations avoisinantes.

-Les principes fondamentaux de protection de l'environnement devraient être acceptés et mis en pratique par les exploitants, auxquels il incombe de les faire connaître à l'ensemble du personnel.

-La bonne maîtrise des phénomènes de tir par l'exploitant est donc cruciale pour assurer à la fois la production et le respect de la réglementation. Ceci passe par une bonne compréhension des phénomènes et par l'identification des principaux paramètres qui contrôlent à la fois la fragmentation et les vibrations.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les procédures pour la conception et l'implémentation du plan de tir doivent être définies, documentées, suivies et auditionnées pour assurer la qualité désirée. Cependant, Le choix des explosifs s'effectue à partir des caractéristiques mécaniques des roches et des propriétés des explosifs industriels. La définition de la géométrie des charges s'appuie sur les règles de base de la détonique et prend en compte les objectifs techniques à réaliser. Ainsi, les séquences de mises à feu sont choisies en fonction du mode d'amorçage et des contraintes d'environnement.

Le dépouillement de l'ensemble des résultats nous a permis d'effectuer une analyse globale et nous a permis de déceler que l'information sur les caractéristiques de la masse rocheuse et l'explosif est essentielle pour l'efficacité des tirs et l'amélioration de la fragmentation.

Sur la base de ce qui a été étudié précédemment, nous pouvons déduire ce qui suit:

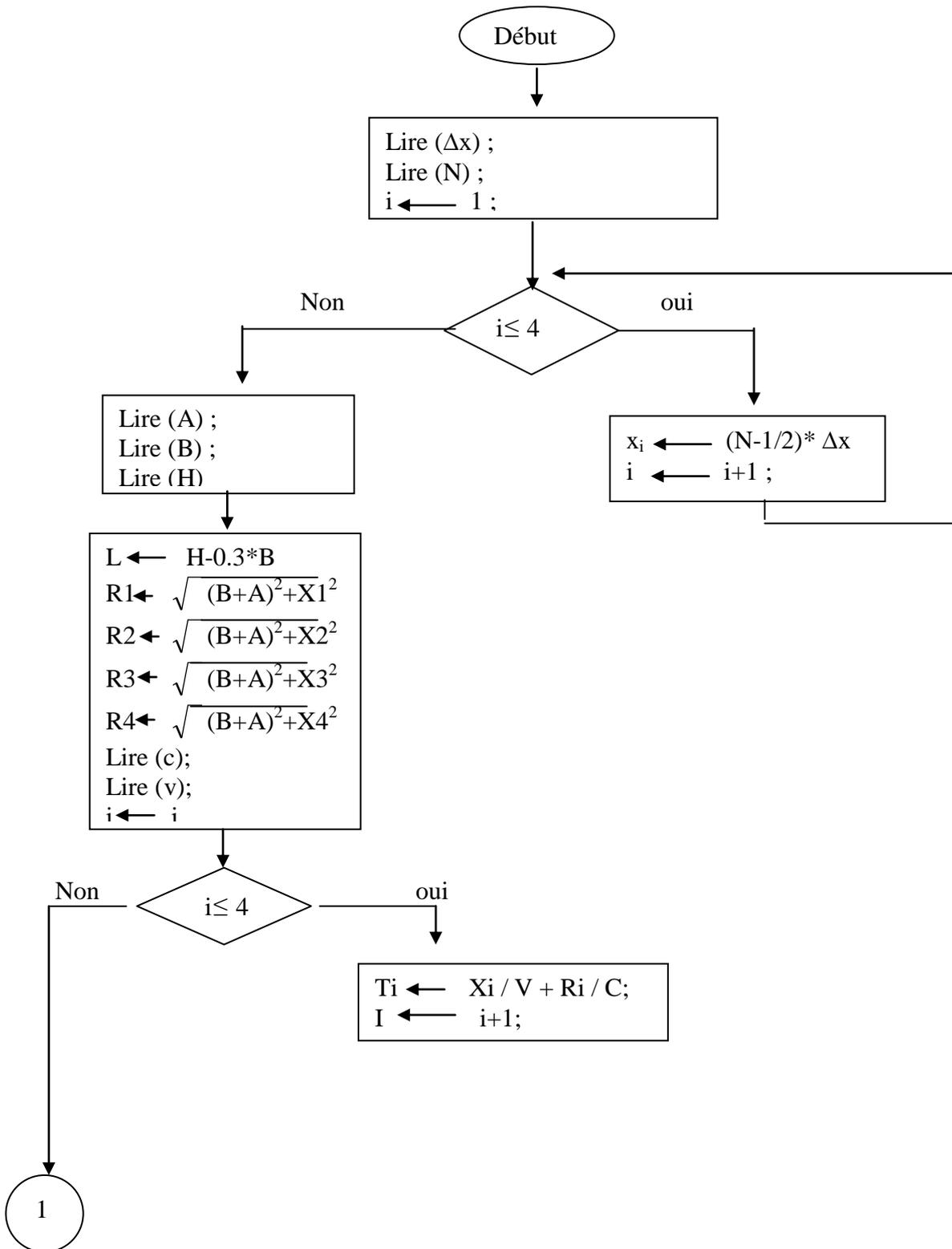
- les plus importants paramètres de l'onde de déformation sont l'amplitude maximum, temps de la montée, et le temps manqué.
- C'est apparent qu'il y a une différence marquée, dans la forme et l'amplitude maximum de déformation, entre les différents points à la surface libre du gradin. Donc, le problème d'uniformité de la fragmentation peut être posé.
- Le degré de la fragmentation et la distribution, dans tout le tas de roche, est en fonction de la méthode d'initiation de l'explosif et les paramètres de la roche, ainsi que les paramètres du tir.
- La différence dans les résultats de la déformation entre les méthodes d'initiation, peut être expliquée par l'usage de l'équation pour l'évaluation de l'influence du temps sur la détonation de la charge.
- C'est possible de concevoir un tir, afin que les plus hautes amplitudes maximum soient produites dans les régions qui sont plus difficiles à casser (pied ou croûte du gradin par exemple), ou dans les régions où la fragmentation est médiocre.
- Des techniques peuvent être développées pour l'utilisation optimum d'un trou de la foreuse dans l'économie des opérations du tir dans son ensemble. Ces techniques peuvent être évaluées non seulement expérimentalement, mais aussi théoriquement par ordinateur.

- En dépit du fait que cette exposition théorique est seulement qualitative (suite au manque de connaissance des caractéristiques de la roche sous tension), il y a une tendance à prédire lorsque quelques simples paramètres ont été déterminés la performance de la charge linéaire pour plusieurs situations.
- La prise en compte de la composante environnementale doit être intégrée dès le stade de définition du projet et à toutes les phases de l'exploitation et jusqu'à la fermeture de la mine et même après celle-ci.

ANNEXE

Annexe

- Le programme par ordinateur pour étudier la fragmentation dans les mines a ciel ouvert
- les résultats obtenus pour chaque paramètre de tir avec les représentations graphiques qui correspondent.



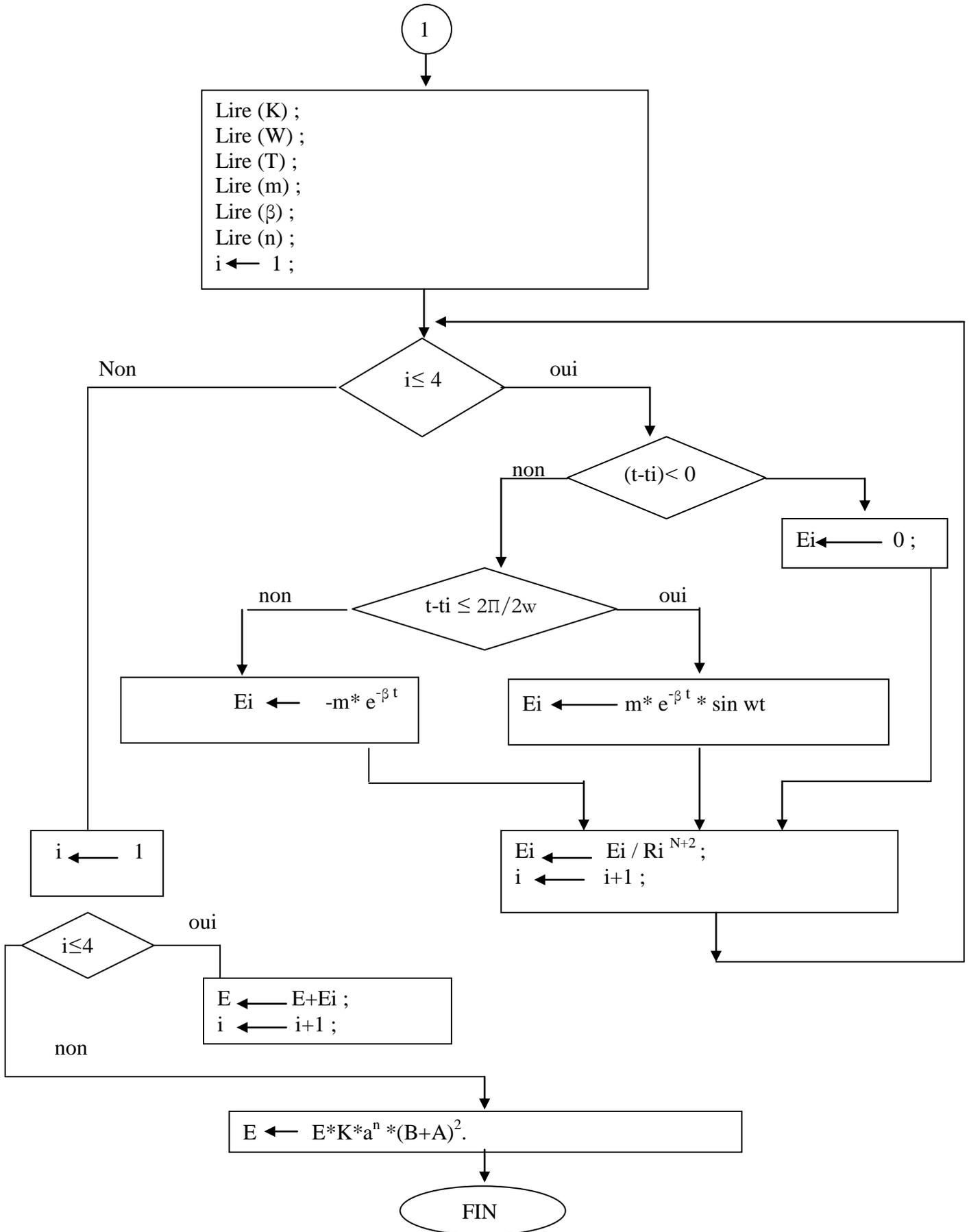


Figure Af1: Le programme par ordinateur pour étudier la fragmentation dans les mines a ciel ouvert

Les différentes variables

- H - La profondeur du trou; m
B - La ligne de moindre résistance; m
A - Diamètre du trou; mm
G - L'excès de forage; m
ST - La longueur de bourrage; m
El - La longueur de la charge; m
X - La hauteur d'un point sur une surface libre; m
TC- L'écart de temps; s
Ei - L'amplitude de l'onde de déformation
 Δx - La longueur du segment de la charge; m
Xi - La longueur de la charge; m
Ri - La longueur radiale à partir du centre de la charge au point sur la surface libre du gradin.
C et V- La vitesse longitudinal dans la roche et l'explosif respectivement.
 β et w - Constantes.
ti - Le temps courant de l'initiation et l'arrive de l'onde de déformation en un point sur la surface libre.
Tc - Temps total a partir de l'initiation.
RT: La différence de temps entre tc et ti.

N.B: Le programme est applicable pour les tirs des gradins et cratères, et avant d'utiliser le programme, il faut savoir les paramètres géométriques du champ minier, la vitesse de détonation dans la roche et l'explosif respectivement.

1: Influence de la méthode d'initiation sur la fragmentation

Tableau At1 : Les paramètres de l'onde de déformation obtenus a partir d'une colonne de charge aux différents points sur une surface libre en utilisant; H=6m, B= 3m et d =100mm.

X / L	Initiation de haut		Initiation de bas		Initiation du centre		Initiation de haut&bas	
	PS	RT	PS	RT	PS	RT	PS	RT
0.0	0.0007203	200	0.0006133	150	0.0009207	200	0.00108	150
1/3	0.0006712	150	0.0007152	200	0.0008535	150	0.0012574	250
2/3	0.0004118	150	0.0007224	200	0.0008526	200	0.0006340	450
1	0.0001558	150	0.0005377	150	0.0004896	150	0.0002117	200

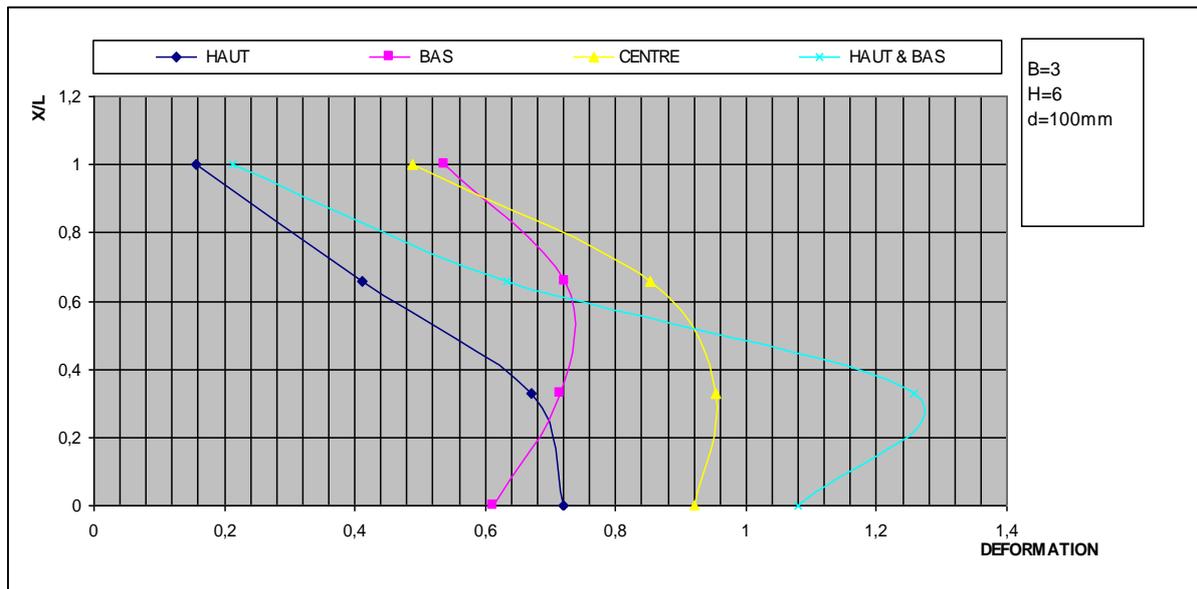


Figure Af2: Influence de la méthode d'initiation sur la fragmentation

Tableau At2: Les paramètres de l'onde de déformation obtenus à partir d'une colonne de charge aux différents points sur une surface libre en utilisant; $h=9\text{m}$, $b=3\text{m}$ et $d=100\text{mm}$.

X / L	Initiation de haut		Initiation de bas		Initiation du centre		Initiation de haut&bas	
	PS	RT	PS	RT	PS	RT	PS	RT
0.0	0.0007152	250	0.0006160	150	0.0008389	150	0.0006121	200
1/3	0.0007280	200	0.0007278	200	0.0009681	150	0.0014403	250
2/3	0.0005854	150	0.0007157	250	0.0008249	200	0.0005829	150
1	0.0001599	150	0.0005318	200	0.0006053	150	0.0000994	200

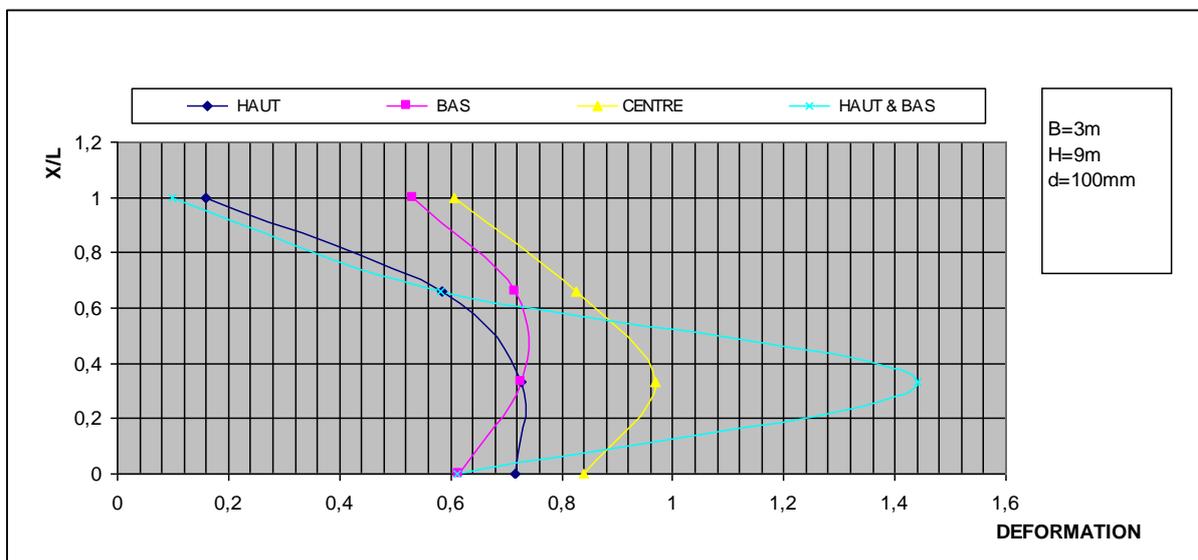


Figure Af3: Influence de la méthode d'initiation sur la fragmentation

Tableau At3: Les paramètres de l'onde de déformation obtenus a partir d'une colonne de charge aux différents points sur une surface libre en utilisant; $h=12m$, $b= 3m$ et $d =100mm$.

X / L	Initiation de haut		Initiation de bas		Initiation du centre		Initiation de haut&bas	
	PS	RT	PS	RT	PS	RT	PS	RT
0.0	0.0007099	300	0.0006059	200	0.0007659	200	0.0006145	150
1/3	0.0007195	250	0.0007160	250	0.0009644	150	0.0013828	300
2/3	0.0006809	150	0.0007077	250	0.0007948	200	0.0006772	200
1	0.0001526	150	0.0005808	250	0.0005445	200	0.0000518	200

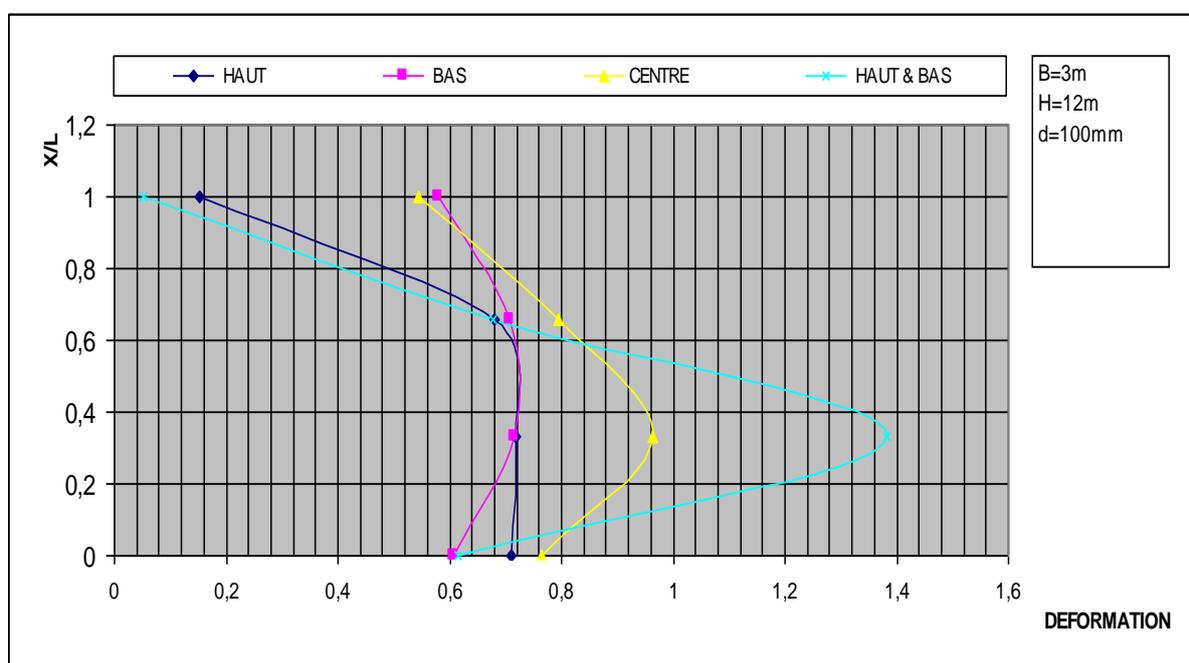


Figure Af4: Influence de la méthode d'initiation sur la fragmentation

Tableau At4: Les paramètres de l'onde de déformation obtenus a partir d'une colonne de charge aux différents points sur une surface libre en utilisant; $h=15m$, $b= 3m$ et $d =100mm$.

X / L	Initiation de haut		Initiation de bas		Initiation du centre		Initiation de haut&bas	
	PS	RT	PS	RT	PS	RT	PS	RT
0.0	0.0007207	350	0.0006201	150	0.0007309	250	0.0006115	200
1/3	0.0007179	250	0.0007150	250	0.0009282	150	0.0012032	450
2/3	0.0007271	200	0.0007040	250	0.0007736	250	0.0007179	200
1	0.0001500	150	0.0005963	250	0.0005833	200	0.0000292	450

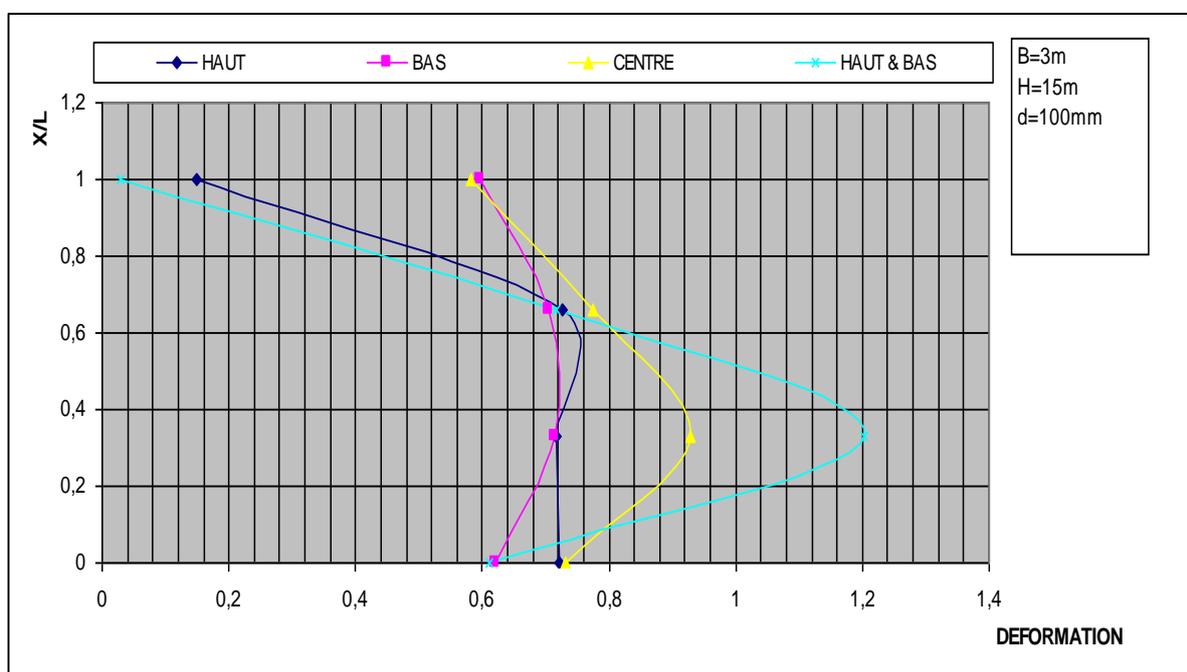


Figure Af5: Influence de la méthode d'initiation sur la fragmentation

-La déformation pour une charge initiée au point $e/3$

Tableau At5: Les paramètres de l'onde de déformation obtenus à partir d'une colonne de charge aux différents points sur une surface libre en utilisant; $h=9m$; $d=100mm$; $b=3m$ et $c=6500m/s$.

X / L	Initiation de haut		Initiation de bas		Initiation du centre		Initiation de haut&bas	
	PS	RT	PS	RT	PS	RT	PS	RT
0.0	0.0007152	250	0.0006160	150	0.0008389	150	0.0006121	200
1/3	0.0007280	200	0.0007278	200	0.0009681	150	0.0014403	250
2/3	0.0005854	150	0.0007157	250	0.0008249	200	0.0005829	150
1	0.0001599	150	0.0005318	200	0.0006053	150	0.0000994	200

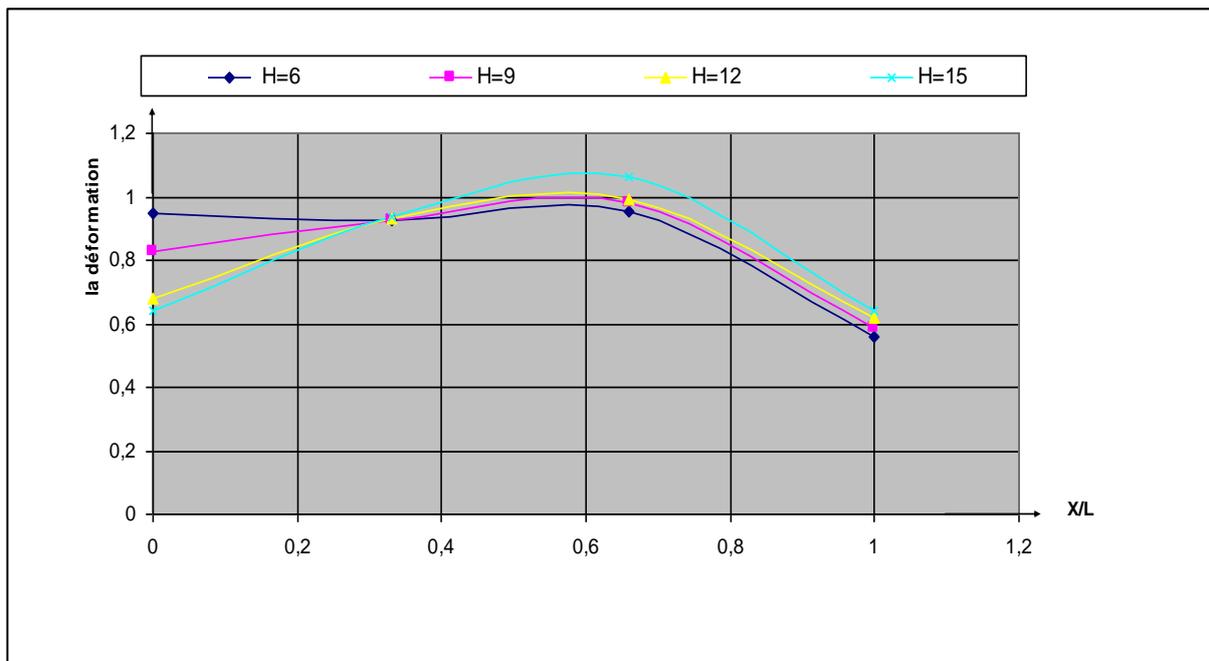


Figure Af6: Evolution de la déformation pour une charge initiée au point $e/3$

2 : Effet de la vitesse de détonation sur la fragmentation

Tableau At6: Les paramètres de l'onde de déformation obtenu a partir d'une colonne de charge aux différents points sur une surface libre en utilisant; H=9m; d=100mm; B=3m et C>V.

X / L	Initiation de haut		Initiation de bas		Initiation du centre		Initiation de haut&bas	
	PS	RT	PS	RT	PS	RT	PS	RT
0.0	0.0003572	950	0.0003689	200	0.0004054	400	0.0003641	200
1/3	0.0003585	600	0.0003525	700	0.0006301	150	0.0006977	750
2/3	0.0003573	200	0.0003412	1050	0.0003941	500	0.0003524	200
1	0.0001119	150	0.0002108	900	0.0002288	500	0.0000584	200

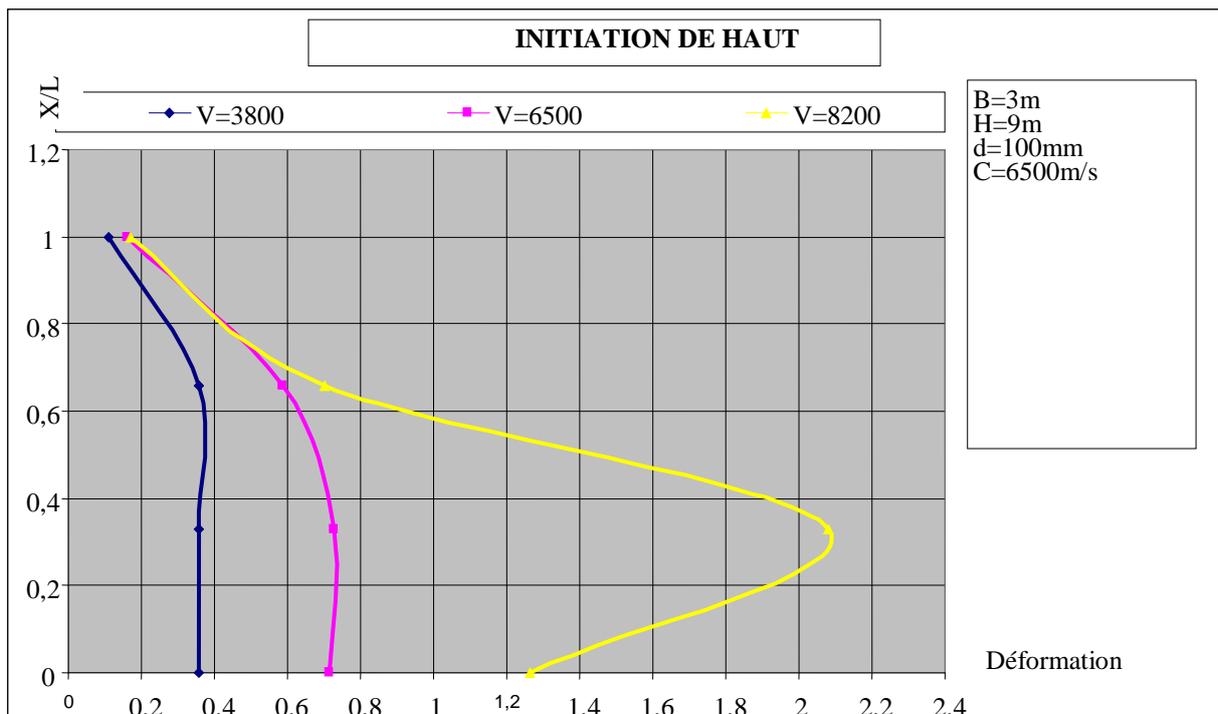


Figure Af7: Effet du rapport v/c sur la distribution de la déformation sur les différents points sur la surface libre

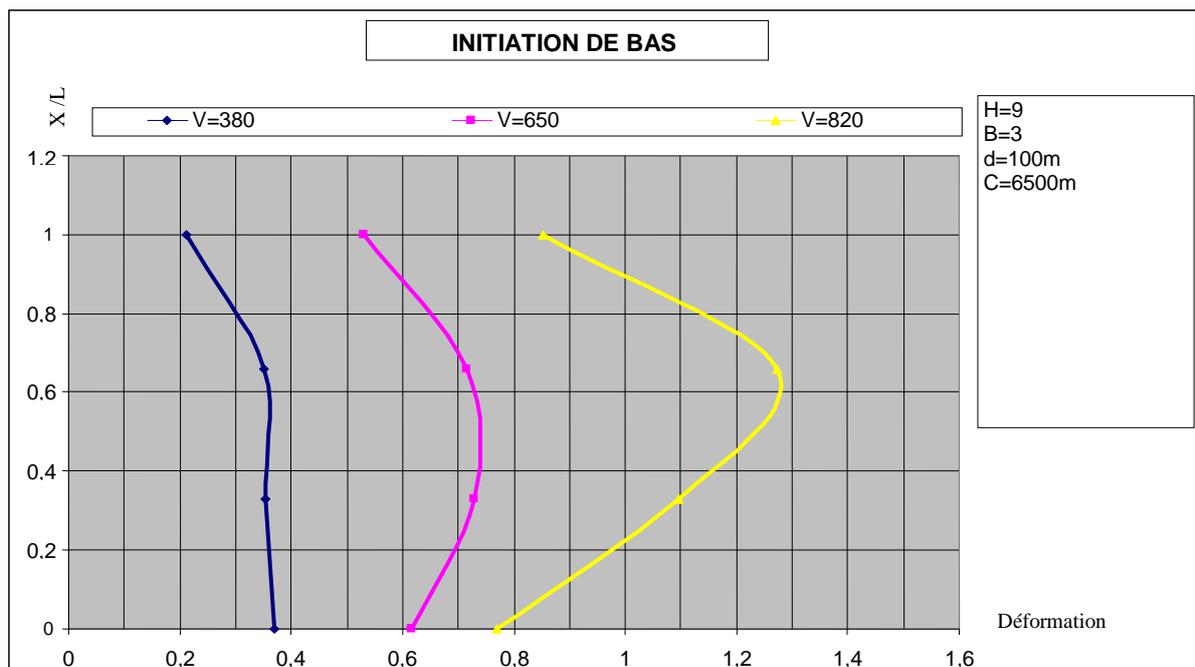


Figure Af8: Effet du rapport v/c sur la distribution de la déformation sur les différents points sur la surface libre

Tableau At7: Les paramètres de l'onde de déformation obtenus à partir d'une colonne de charge aux différents points sur une surface libre en utilisant; $H=9\text{m}$; $d=100\text{mm}$; $B=3\text{m}$ et $C < V$.

X / L	Initiation de haut		Initiation de bas		Initiation du centre		Initiation de haut&bas	
	PS	RT	PS	RT	PS	RT	PS	RT
0.0	0.001262	100	0.0007689	150	0.0011275	150	0.00076980	600
1/3	0.0020817	150	0.0010954	150	0.0011295	150	0.0020982	150
2/3	0.0007008	250	0.0012732	150	0.0011525	150	0.0007080	150
1	0.000171	150	0.0008511	100	0.0007875	50	0.0001255	200

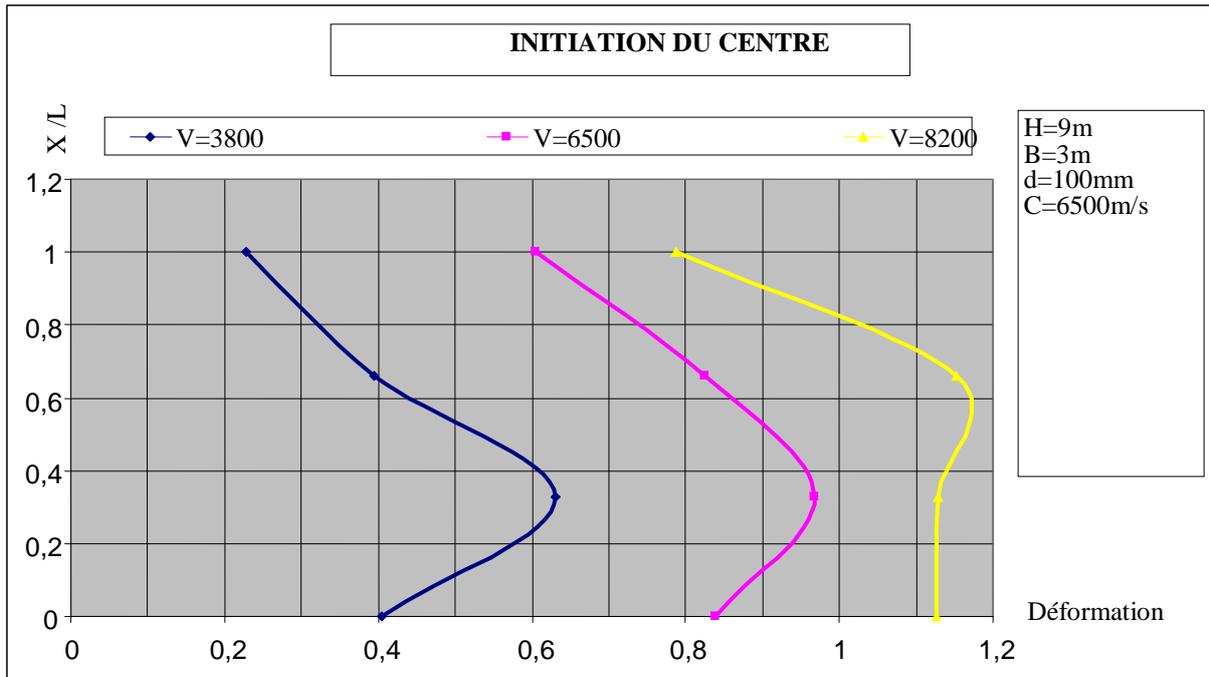


Figure Af9: Effet du rapport v/c sur la distribution de la déformation sur les différents points sur la surface libre

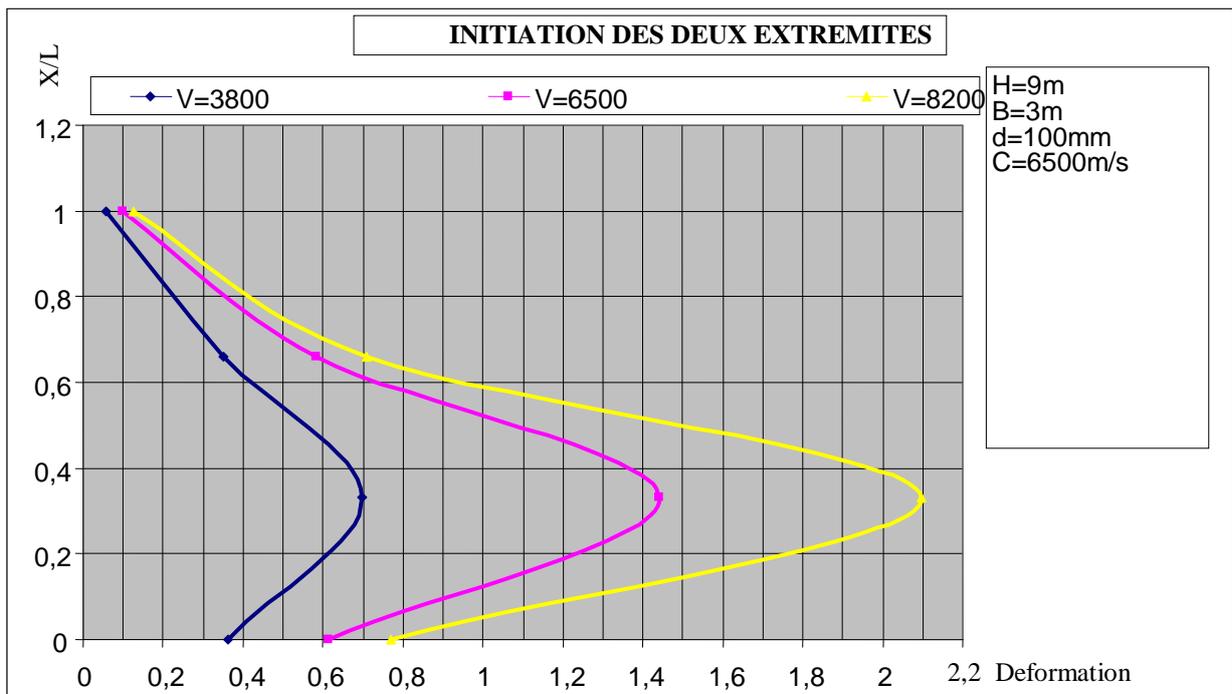


Figure Af10: Effet du rapport v/c sur la distribution de la déformation sur les différents points sur la surface libre

3 : Effet de la ligne de moindre résistance sur la fragmentation

TableauAt8: Les paramètres de l'onde de déformation obtenus a partir d'une colonne de charge aux différents points sur une surface libre en utilisant; $b=1\text{m}$, $d=100\text{mm}$ $h=3b$ et $C=V=6500\text{ m/s}$.

X / L	Initiation de haut		Initiation de bas		Initiation du centre		Initiation de haut&bas	
	PS	RT	PS	RT	PS	RT	RT	RT
0.0	0.0028405	200	0.0020282	100	0.0029856	100	0.0020276	100
1/3	0.0027893	150	0.0027574	150	0.0031765	100	0.0050908	150
2/3	0.0019154	100	0.001908	150	0.0028742	150	0.0019143	100
1	0.0005484	150	0.0013277	100	0.0012703	100	0.0004794	200

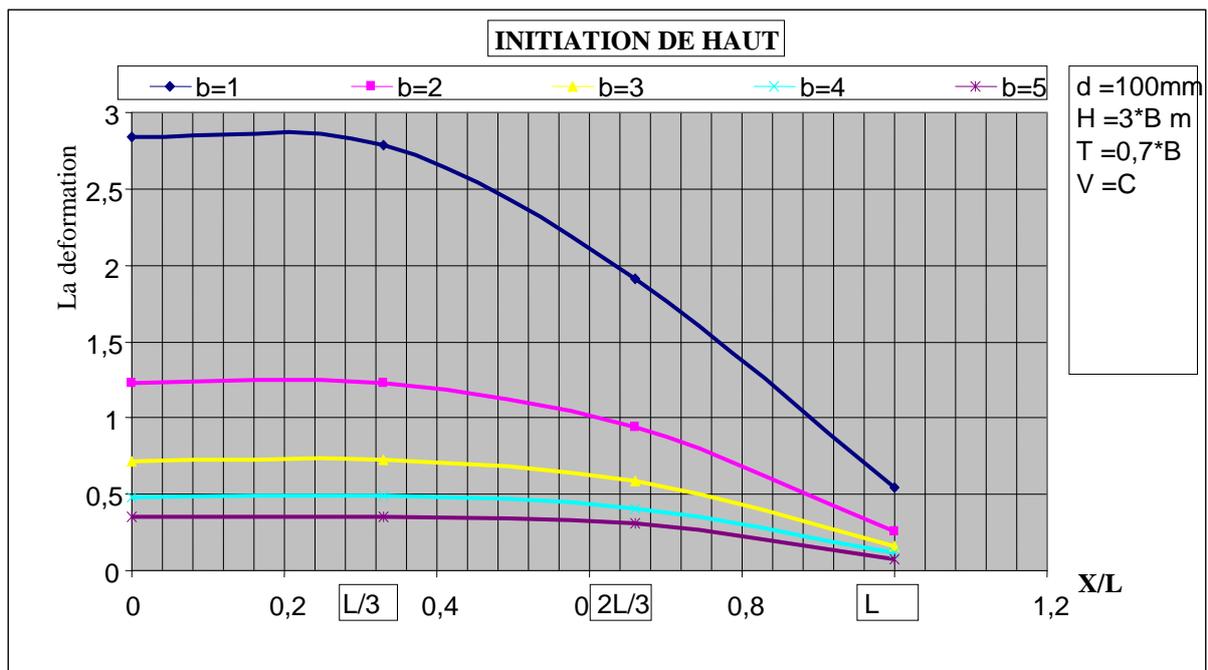


Figure Af11: Effet de la ligne de moindre résistance sur la fragmentation

Tableau At9: Les paramètres de l'onde de déformation obtenus a partir d'une colonne de charge aux différents points sur une surface libre en utilisant; $b= 2m, d =100mm, h=3b$ et $C=V =6500 m/s$.

X / L	Initiation de haut		Initiation de bas		Initiation du centre		Initiation de haut&bas	
	PS	RT	PS	RT	PS	RT	PS	RT
0.0	0.0012306	250	0.001019	150	0.0014106	150	0.0010153	150
1/3	0.0012303	150	0.0012461	200	0.0015313	150	0.0024355	200
2/3	0.0009396	150	0.0012475	200	0.0013596	150	0.0009425	150
1	0.0002523	150	0.0008776	150	0.000843	150	0.0001762	200

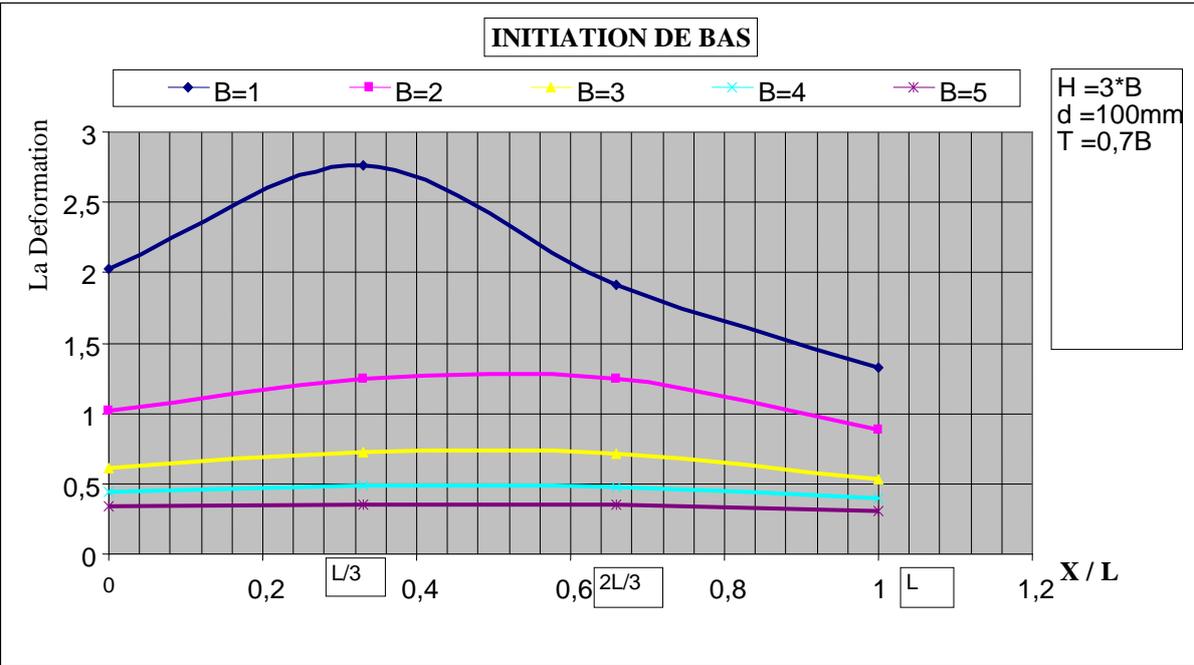


Figure Af12: Effet der la ligne de moindre résistance sur la fragmentation

Tableau At11- Les paramètres de l'onde de déformation obtenus a partir d'une colonne de charge aux différents points sur une surface libre en utilisant; $b=4m$, $d=100mm$ $h=3b$ et $c=v=6500$ m/s.

X / L	Initiation de haut		Initiation de bas		Initiation du centre		Initiation de haut&bas	
	PS	RT	PS	RT	PS	RT	PS	RT
0.0	0.0004790	350	0.0004414	150	0.0005687	200	0.00043623	150
1/3	0.0004891	200	0.0004832	250	0.0006838	150	0.0009663	300
2/3	0.0004034	150	0.0004801	250	0.0005537	250	0.0004007	150
1	0.0001139	150	0.0004016	250	0.0004284	200	0.0000656	200

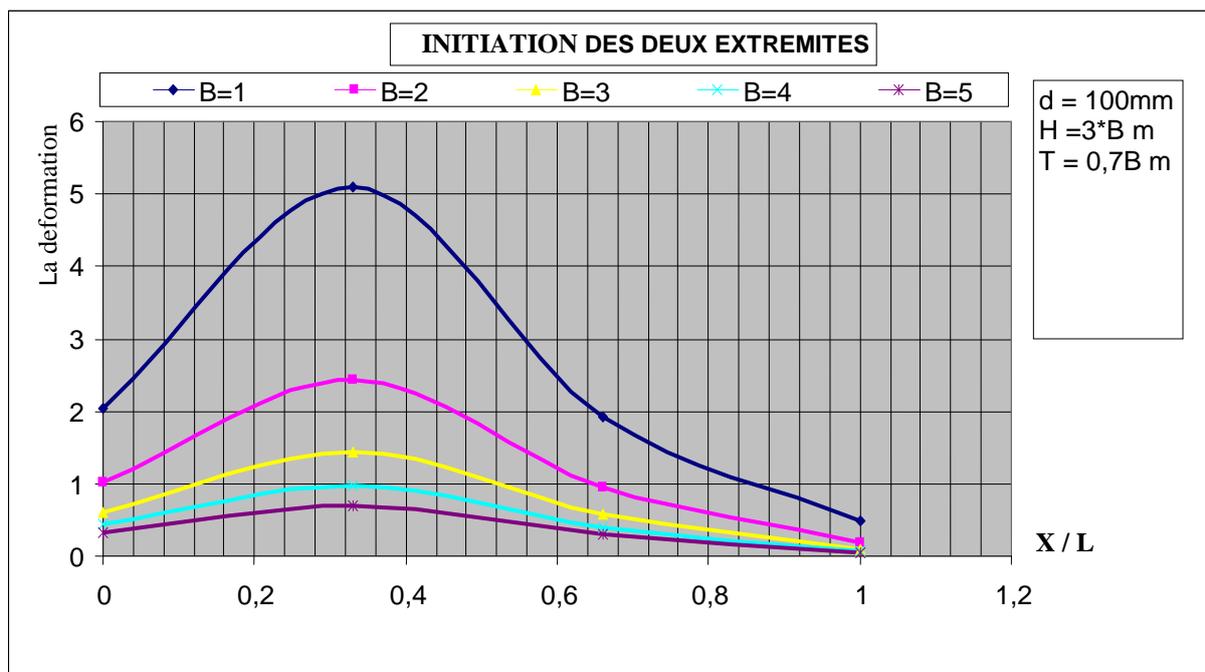


Figure Af14: effet de la ligne de moindre résistance sur la fragmentation

Tableau At12: Les paramètres de l'onde de déformation obtenus a partir d'une colonne de charge aux différents points sur une surface libre en utilisant; $b=5\text{m}$, $d=100\text{mm}$ $h=3b$ et $c=v=6500\text{ m/s}$.

X / L	Initiation de haut		Initiation de bas		Initiation du centre		Initiation de haut&bas	
	PS	RT	PS	RT	PS	RT	PS	RT
0.0	0.00035167	400	0.0003345	150	0.0004222	200	0.0003300	150
1/3	0.0003567	300	0.0003538	250	0.0005099	150	0.0007054	350
2/3	0.0003122	200	0.0003515	400	0.0004078	200	0.0003077	200
1	0.0000762	150	0.0003084	300	0.0003178	200	0.0000481	200

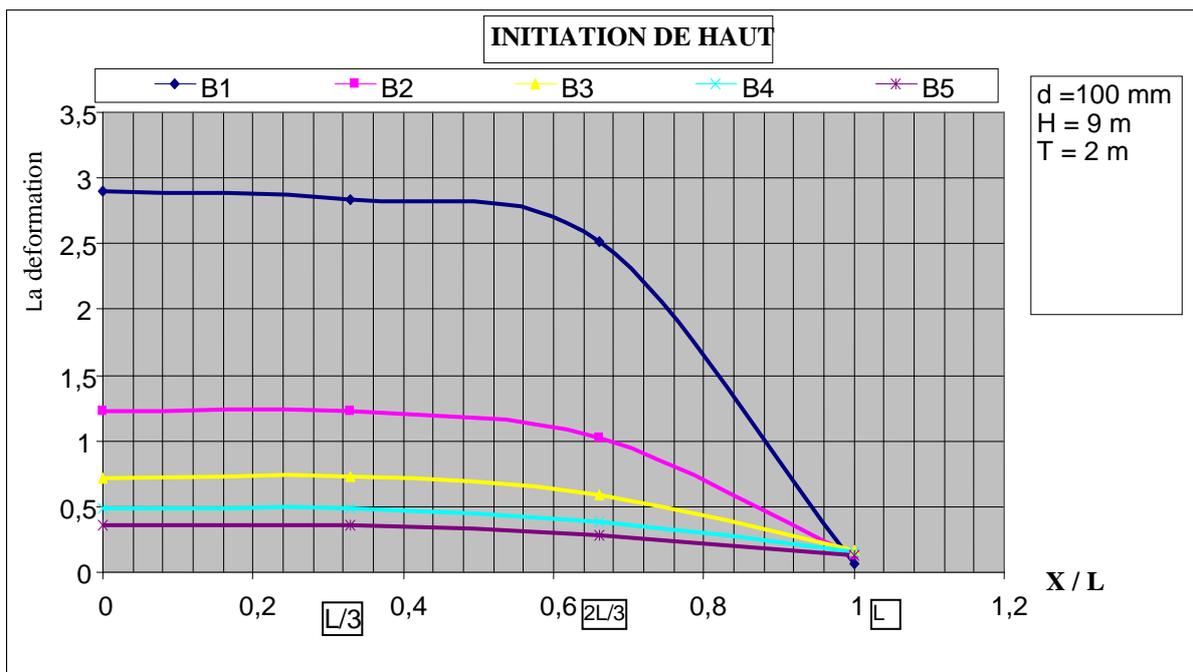


Figure Af15: Effet de la ligne de moindre résistance sur la fragmentation

Tableau At13: Les paramètres de l'onde de déformation obtenus a partir d'une colonne de charge aux différents points sur une surface libre en utilisant; $b=1\text{ m}$, $d=100\text{ mm}$ $h=9$ et $c=v=6500\text{ m/s}$.

X / L	Initiation de haut		Initiation de bas		Initiation du centre		Initiation de haut&bas	
	PS	RT	PS	RT	PS	RT	PS	RT
0.0	0.0029059	200	0.00025973	150	0.0029268	150	0.0026020	150
1/3	0.0028368	200	0.0028247	150	0.0028969	150	0.0054039	200
2/3	0.0025162	150	0.0029249	200	0.0029347	150	0.0024956	150
1	0.0000630	100	0.00028900	100	0.0002282	50	0.0000173	200

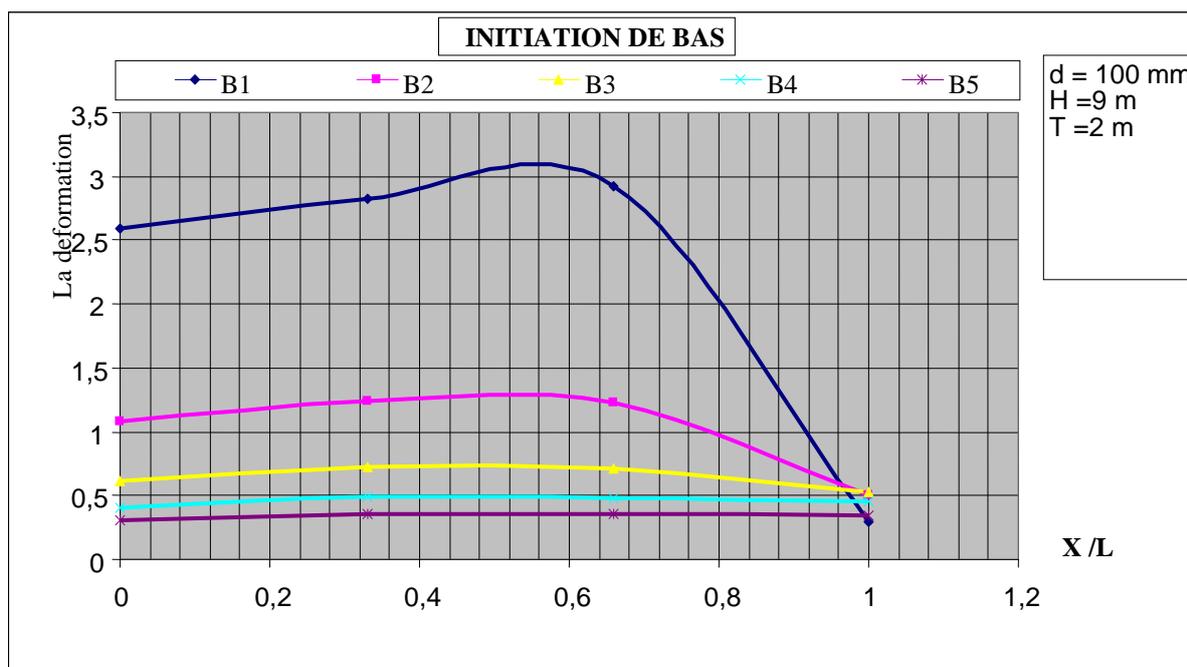


Figure Af16: Effet de la ligne de moindre résistance sur la fragmentation

Tableau At14: Les paramètres de l'onde de déformation obtenus a partir d'une colonne de charge aux différents points sur une surface libre en utilisant; $b=2\text{m}$, $d=100\text{mm}$ $h=9$ et $c=v=6500\text{ m/s}$.

X / L	Initiation de haut		Initiation de bas		Initiation du centre		Initiation de haut&bas	
	PS	RT	PS	RT	PS	RT	PS	RT
0.0	0.0012284	250	0.0010815	150	0.0013340	200	0.0010747	150
1/3	0.0012251	250	0.0012351	200	0.0015339	150	0.0024609	250
2/3	0.0010251	150	0.0012306	250	0.0013200	200	0.0010168	150
1	0.0001335	150	0.0004997	150	0.0005699	100	0.0000563	200

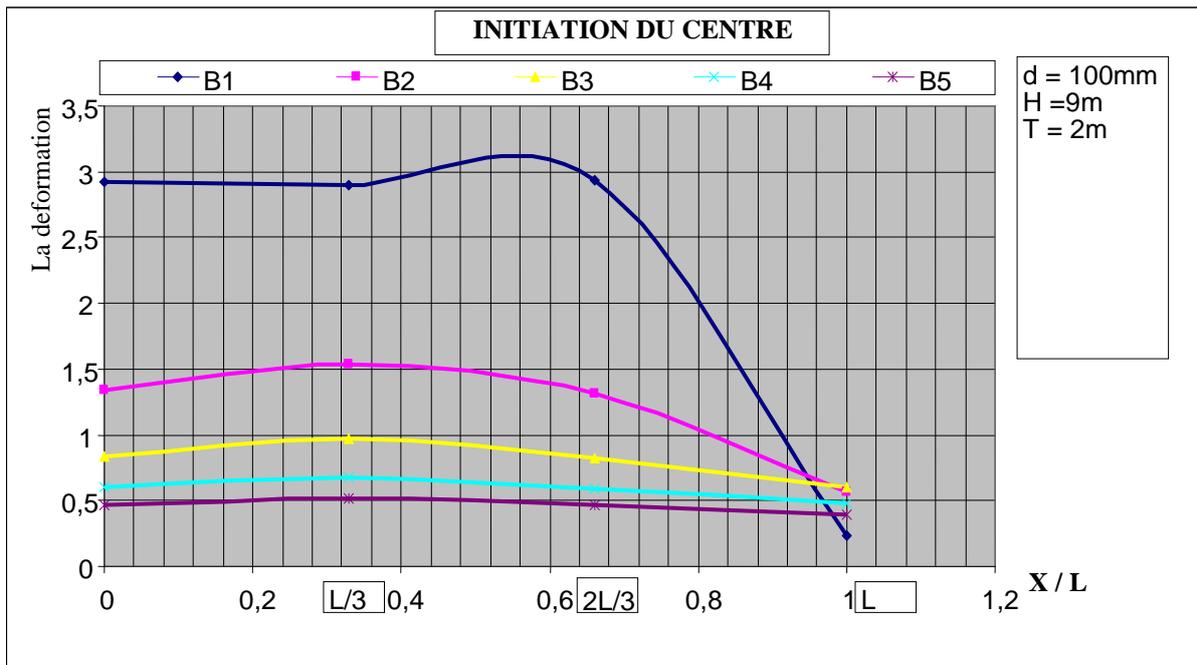


Figure Af17: effet de la ligne de moindre résistance sur la fragmentation

Tableau At15: Les paramètres de l'onde de déformation obtenus a partir d'une colonne de charge aux différents points sur une surface libre en utilisant; $b=4\text{m}$, $d=100\text{mm}$ $h=9$ et $c=v=6500\text{ m/s}$.

X / L	Initiation de haut		Initiation de bas		Initiation du centre		Initiation de haut&bas	
	PS	RT	PS	RT	PS	RT	PS	RT
0.0	0.00048100	250	0.0004092	200	0.0006068	200	0.0005845	750
1/3	0.0004910	200	0.0004947	200	0.0006807	150	0.0009797	250
2/3	0.0003860	150	0.0004807	300	0.0005935	150	0.000529	800
1	0.0001530	150	0.0004556	250	0.0004766	150	0.00012900	250

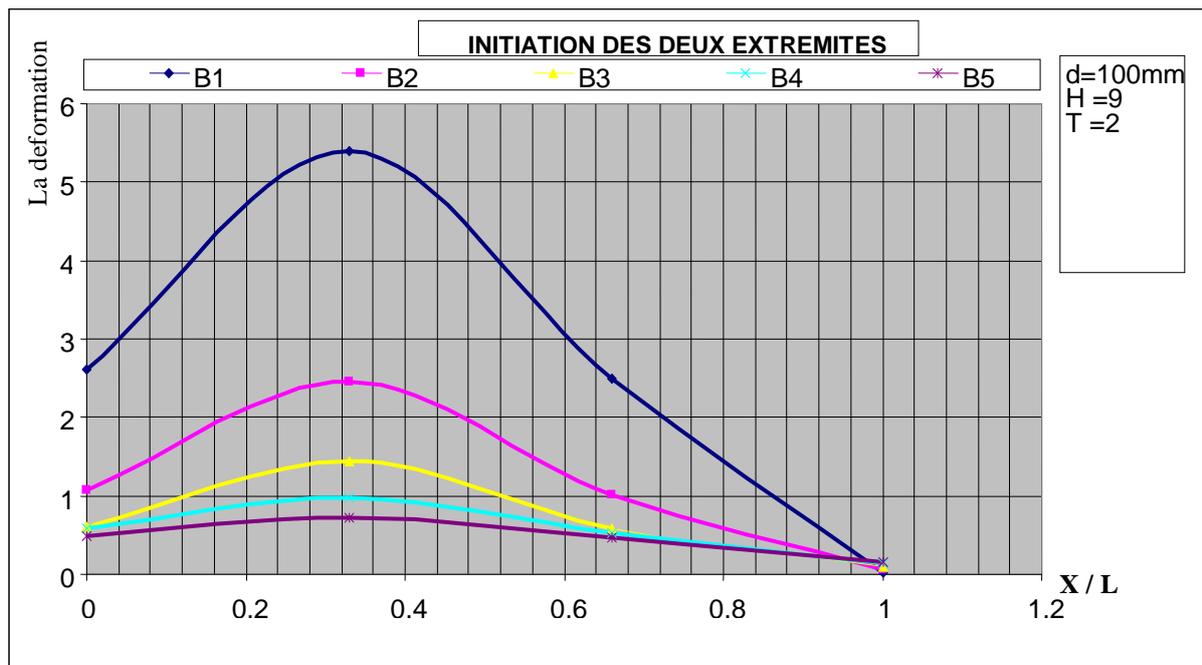


Figure Af18: Effet de la ligne de moindre résistance sur la fragmentation

Tableau At16: Les paramètres de l'onde de déformation obtenus a partir d'une colonne de charge aux différents points sur une surface libre en utilisant; $b=5\text{m}$, $d=100\text{mm}$ $h=9$ et $c=v=6500\text{ m/s}$.

X / L	Initiation de haut		Initiation de bas		Initiation du centre		Initiation de haut&bas	
	PS	RT	PS	RT	PS	RT	PS	RT
0.0	0.0003520	250	0.0003033	200	0.0004671	150	0.0004868	750
1/3	0.0003618	200	0.0003613	150	0.000512	150	0.0007211	200
2/3	0.0002872	200	0.0003535	300	0.0004626	200	0.0004675	750
1	0.0001335	150	0.0003468	350	0.0003915	250	0.0001523	200

4. Effet de la profondeur du trou sur la fragmentation

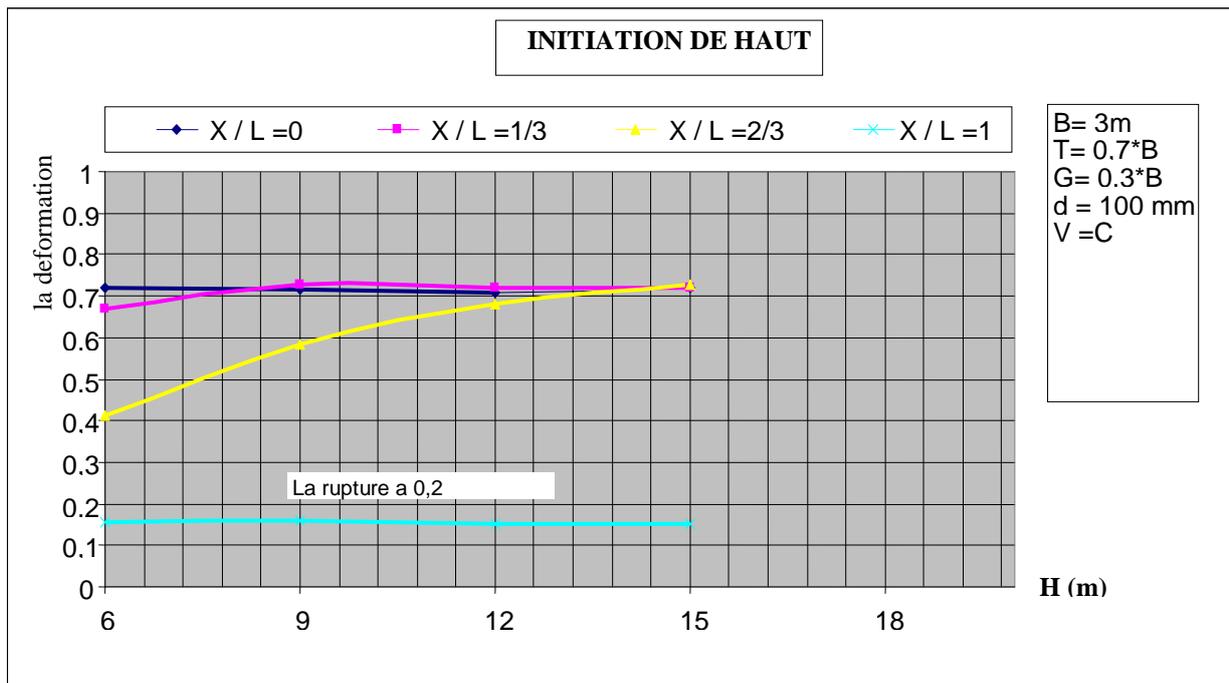


Figure Af19: Effet de la profondeur du trou sur la fragmentation

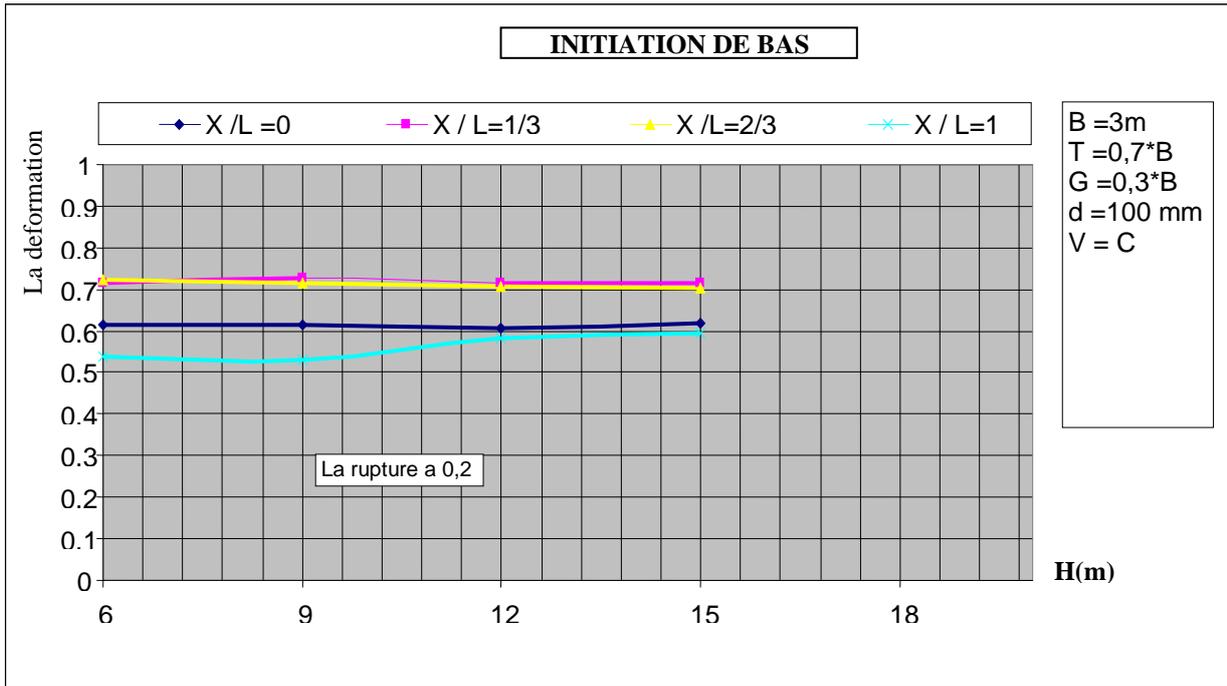


Figure Af20: Effet de la profondeur du trou sur la fragmentation

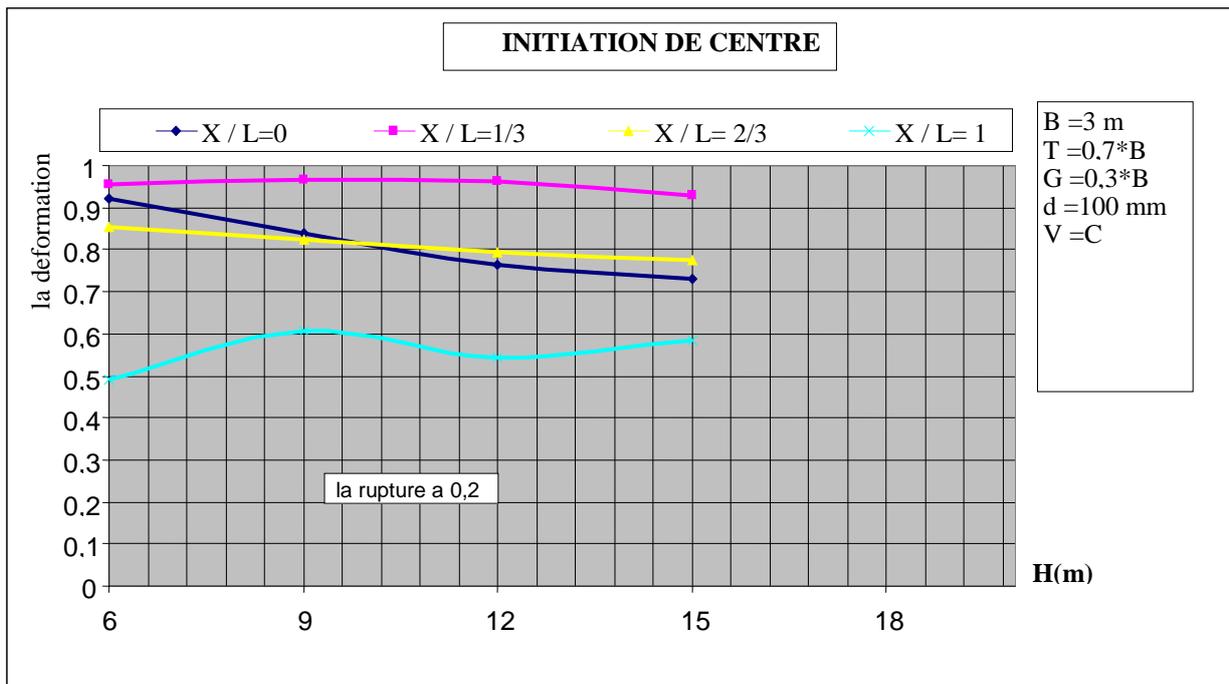


Figure Af21: Effet de la profondeur du trou sur la fragmentation

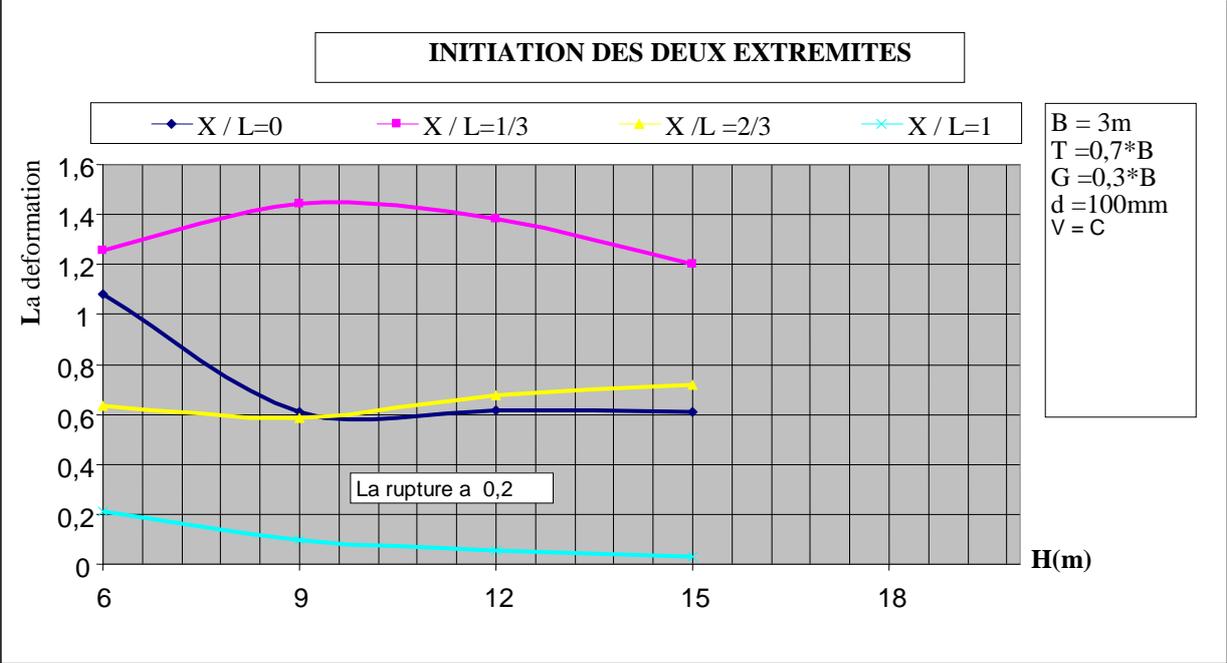


Figure Af22: Effet de la profondeur du trou sur la fragmentation

5- Tir des cratères

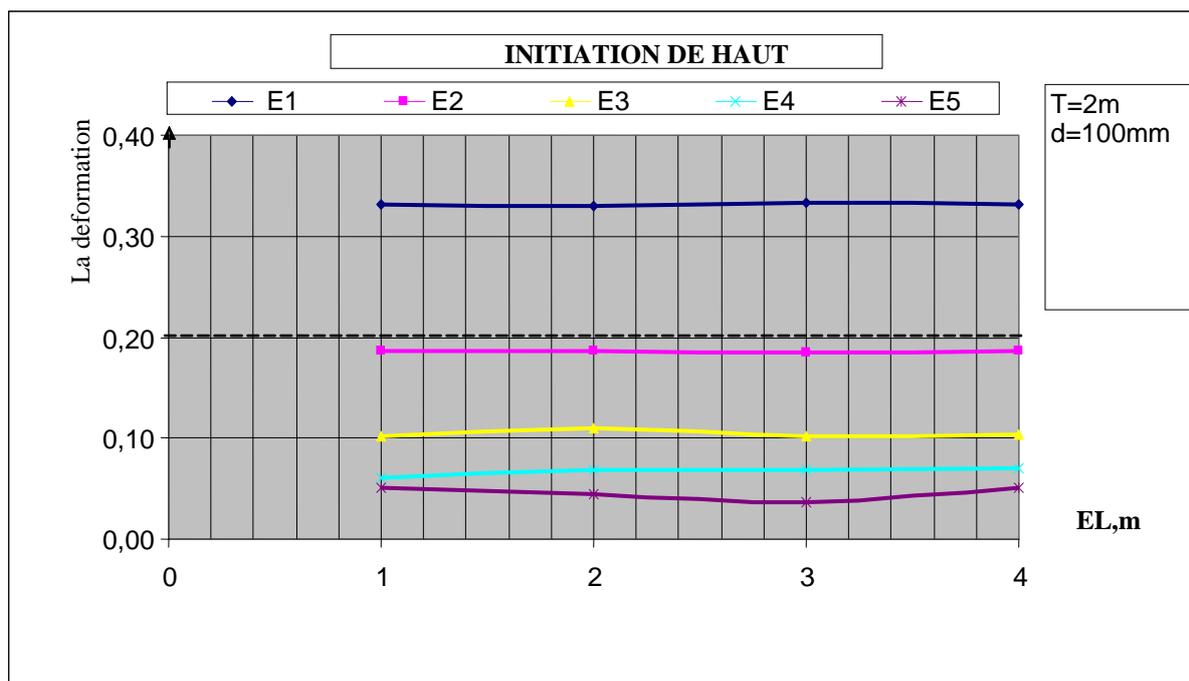


Figure Af23 : La déformation en fonction de la longueur de la charge dans le tir de cratère

Tableau At17 : Les paramètres de déformation obtenu a partir d'une colonne de charge dans le tir de cratère en utilisant: el=1.0 m, t=2.0m et v=c.

E(m)	Initiation de haut		Initiation de bas		Initiation du centre		Initiation de haut&bas	
	PS	RT	PS	RT	PS	RT	PS	RT
1	0.0003309	200	0.0009291	100	0.0006431	50	0.0006277	200
2	0.00018625	200	0.0005039	50	0.0003678	100	0.0004196	200
3	0.00010276	250	0.0002184	100	0.0001689	100	0.0002293	150
4	0.000598	250	0.0001294	100	0.0001020	100	0.0001047	200
5	0.0000371	250	0.0000666	150	0.0000594	100	0.0000714	150

Tableau At18 : Les paramètres de déformation obtenu à partir d'une colonne de charge dans le tir de cratère en utilisant: $el = 2.0 \text{ m}$, $t=2.0\text{m}$ et $v = c$.

E(m)	Initiation de haut		Initiation de bas		Initiation du centre		Initiation de haut&bas	
	PS	RT	PS	RT	PS	RT	PS	RT
1	0.0003303	200	0.001586	100	0.0010797	100	0.0007706	200
2	0.0001861	200	0.0009615	100	0.0005723	50	0.0005899	350
3	0.0001094	300	0.0004589	100	0.0003086	100	0.00034	300
4	0.0000679	500	0.0002194	100	0.0001779	100	0.0002282	300
5	0.0000453	500	0.0001249	150	0.0001041	150	0.0001385	250

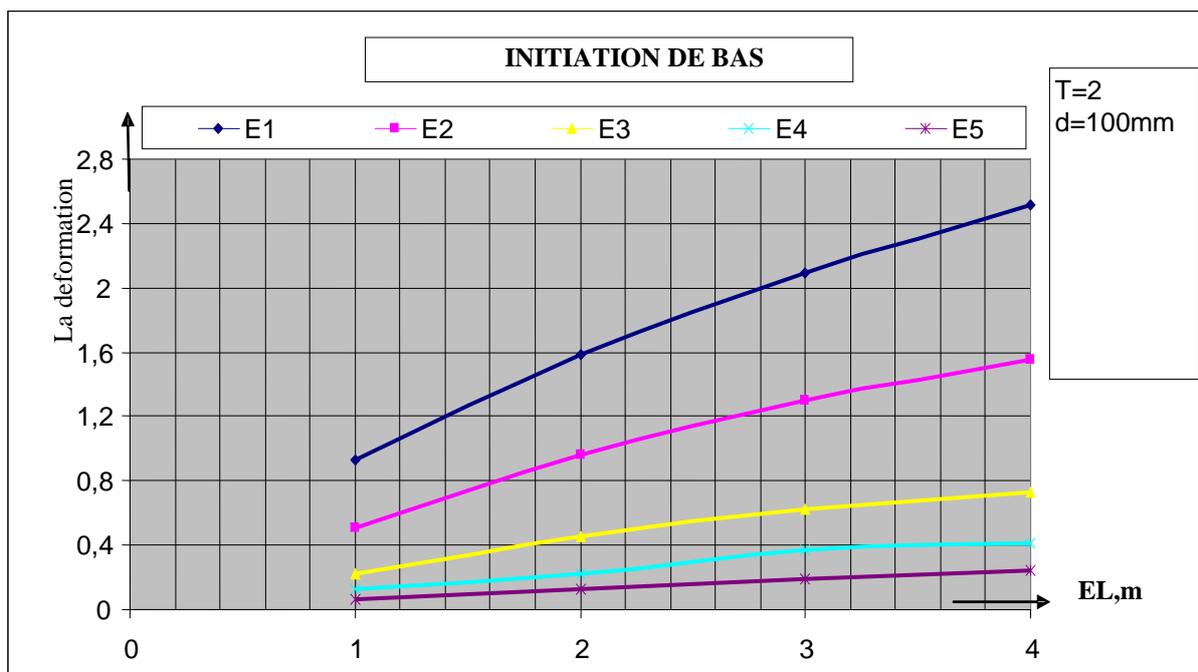


Figure Af24 : La déformation en fonction de la longueur de la charge dans le tir de cratère

Tableau At19 : Les paramètres de déformation obtenu à partir d'une colonne de charge dans le tir de cratère en utilisant; $el=3.0$ m, $t=2.0$ m et $v=c$.

E(m)	Initiation de haut		Initiation de bas		Initiation du centre		Initiation de haut&bas	
	PS	RT	PS	RT	PS	RT	PS	RT
1	0.00033269	200	0.0020962	100	0.0014735	50	0.0008375	500
2	0.0001851	200	0.001299	100	0.0008348	100	0.0006752	500
3	0.0001026	200	0.0006271	150	0.0004542	100	0.0005287	400
4	0.0000691	700	0.0003746	150	0.0002292	100	0.000353	400
5	0.0000502	750	0.0001867	150	0.000140	150	0.0001879	400

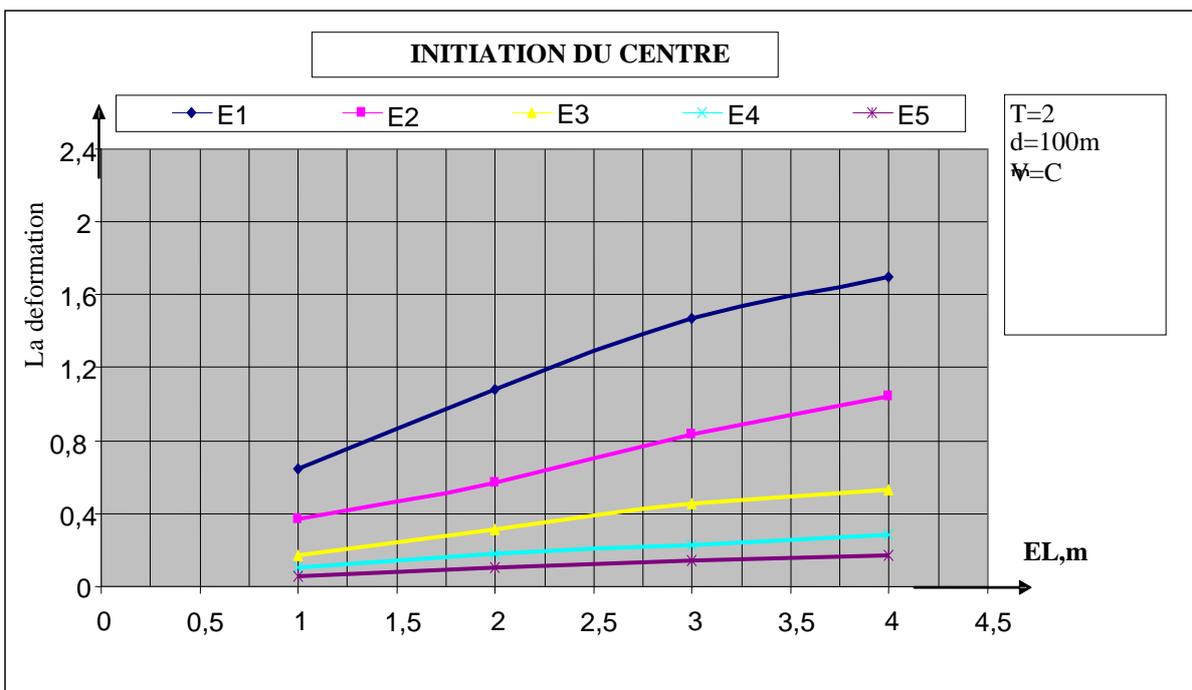


Figure Af25 : La déformation en fonction de la longueur de la charge dans le tir de cratère

Tableau At20: Les paramètres de déformation obtenu a partir d'une colonne de charge dans le tir de cratère en utilisant; $el=4.0$ m, $t=2.0$ m et $v=c$.

E(m)	Initiation de haut		Initiation de bas		Initiation du centre		Initiation de haut&bas	
	PS	RT	PS	RT	PS	RT	PS	RT
1	0.000332	200	0.002518	100	0.0016997	100	0.000908	700
2	0.000186	200	0.001549	100	0.0010445	100	0.000736	600
3	0.000103	400	0.000734	150	0.0005349	100	0.0006421	550
4	0.0000695	750	0.0004144	100	0.0002832	150	0.000421	550
5	0.0000509	850	0.0002465	100	0.0001717	150	0.0002872	500

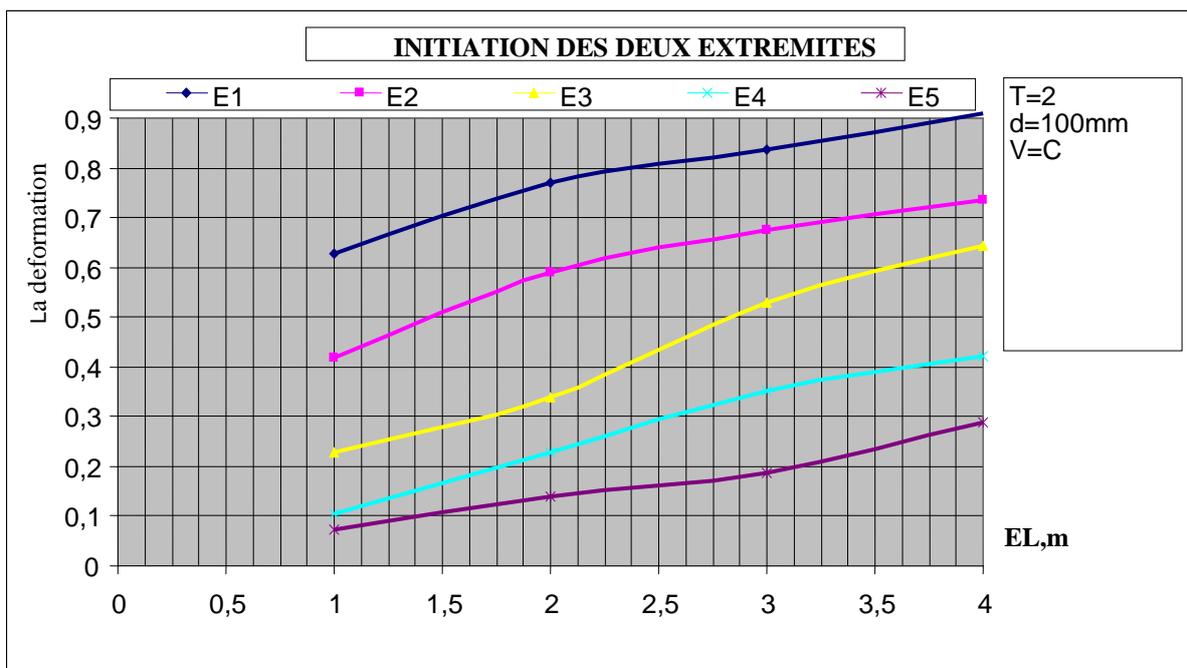


Figure Af26: La déformation en fonction de la longueur de la charge dans le tir de cratère

Tableau At21: Les paramètres de la déformation à partir d'une colonne de charge dans le tir de cratère en utilisant ; $el=6m$, $t=1m$ et $c=v=6500m/s$.

E(m)	Initiation de haut		Initiation de bas		Initiation du centre		Initiation de haut&bas	
	PS	RT	PS	RT	PS	RT	PS	RT
1	0.000465	150	0.004071	100	0.003024	100	0.001242	450
2	0.000181	400	0.0017398	100	0.0011283	150	0.0009634	900
3	0.0001031	750	0.000855	100	0.000353	100	0.0008444	800
4	0.00006936	950	0.0005058	150	0.0002843	150	0.0005277	750
5	0.0000512	1000	0.000301	150	0.0001717	150	0.0003453	600

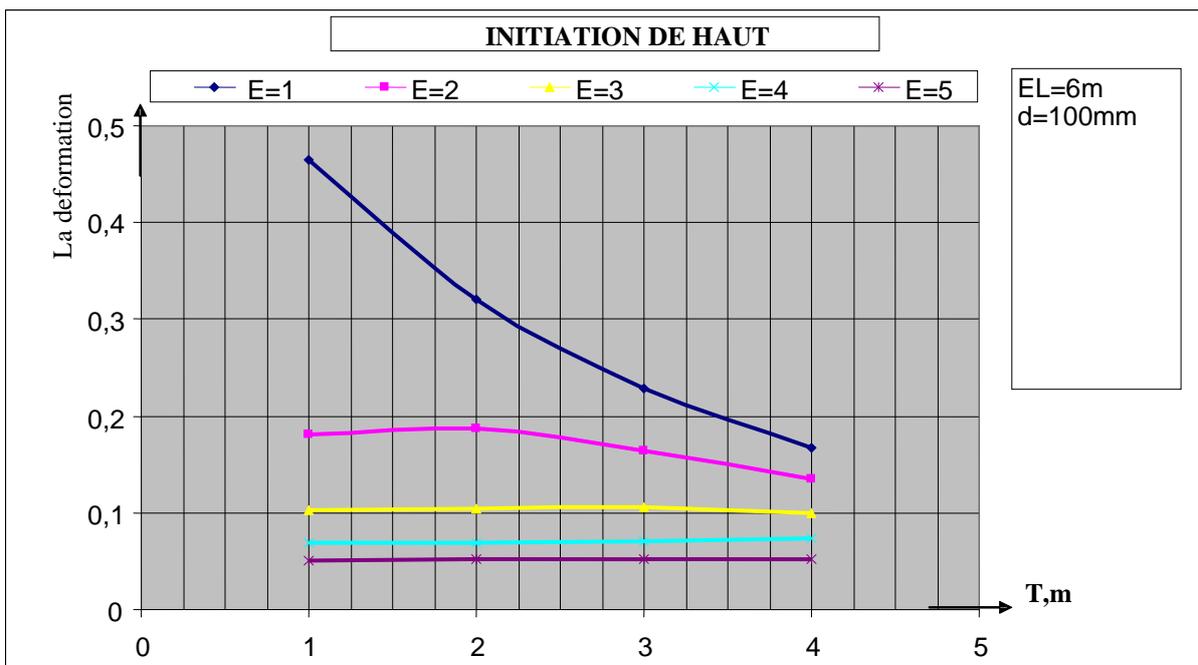


Figure Af27: La déformation dans le tir des cratères

Tableau At22: Les paramètres de la déformation a partir d'une colonne de charge dans le tir de cratère en utilisant; $e_l=6m$, $t=2m$ et $c=v=6500m/s$.

E(m)	Initiation de haut		Initiation de bas		Initiation du centre		Initiation de haut&bas	
	PS	RT	PS	RT	PS	RT	PS	RT
1	0.0003204	150	0.003188	100	0.002183	100	0.00100	1000
2	0.0001873	200	0.0018973	100	0.001378	150	0.0009013	900
3	0.0001042	250	0.000986	100	0.000707	150	0.000683	850
4	0.00006978	600	0.0005643	150	0.000389	150	0.0005857	800
5	0.00005148	850	0.0003604	150	0.0002349	150	0.00041	750

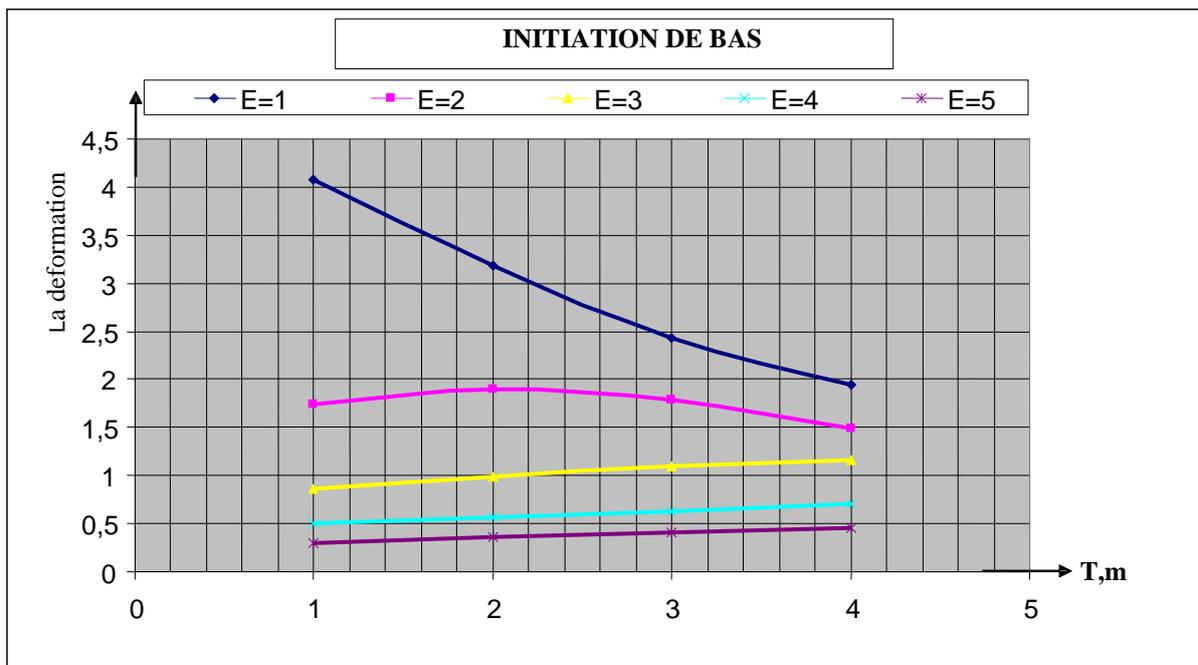


Figure Af28: La déformation dans le tir des cratères

Tableau At23: Les paramètres de la déformation à partir d'une colonne de charge dans le tir de cratère en utilisant; $e_l=6m$, $t=3m$ et $c=v=6500m/s$.

E(m)	Initiation de haut		Initiation de bas		Initiation du centre		Initiation de haut&bas	
	PS	RT	PS	RT	PS	RT	PS	RT
1	0.0002279	150	0.0024365	100	0.001578	100	0.0008359	1000
2	0.0001644	200	0.001794	100	0.0012182	100	0.0007966	900
3	0.0001053	150	0.0010921	100	0.000738	100	0.0006622	850
4	0.0000704	350	0.0006281	100	0.0004675	100	0.000535	850
5	0.0000515	650	0.000415	150	0.0002907	150	0.000384	750

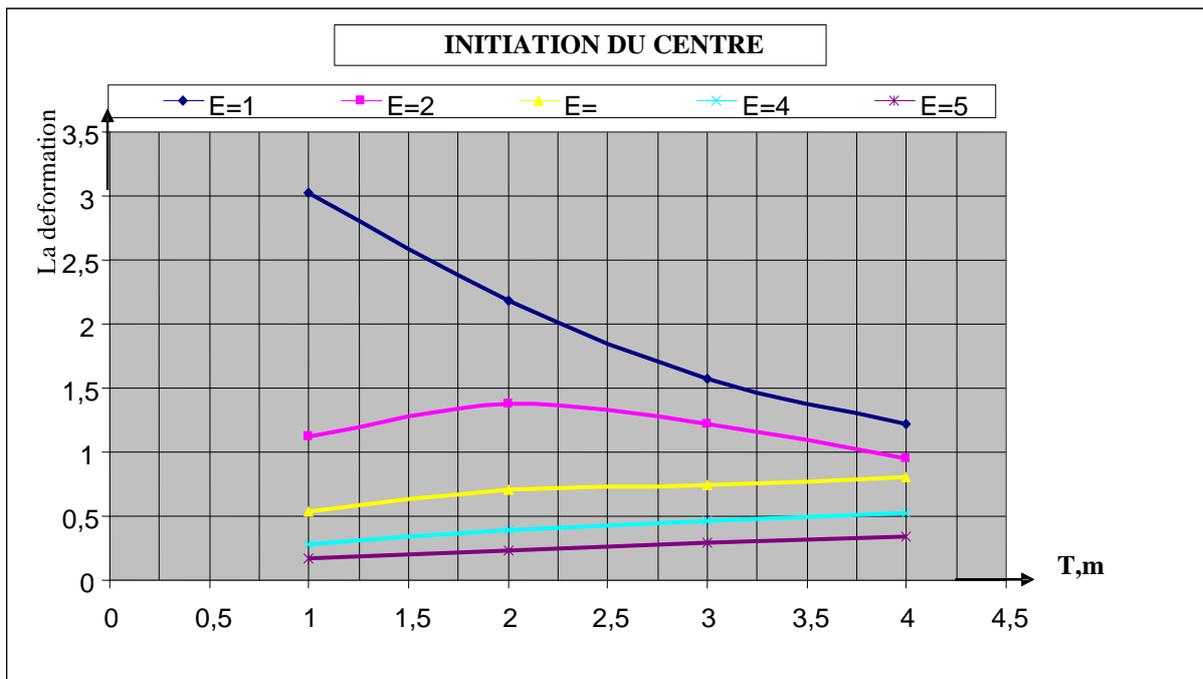


Figure Af29: La déformation dans le tir des cratères

Tableau At24: Les paramètres de la déformation à partir d'une colonne de charge dans le tir de cratère en utilisant; $e_l=6m$, $t=4m$ et $c=v=6500m/s$.

E(m)	Initiation de haut		Initiation de bas		Initiation du centre		Initiation de haut&bas	
	PS	RT	PS	RT	PS	RT	PS	RT
1	0.0001668	150	0.001946	100	0.00121388	100	0.000718	1000
2	0.0001353	200	0.001482	100	0.000952	100	0.000694	950
3	0.000100	150	0.001153	100	0.000808	100	0.000631	900
4	0.0000735	200	0.000709	100	0.000521	150	0.000462	850
5	0.00005153	450	0.000451	150	0.0003468	150	0.00043	850

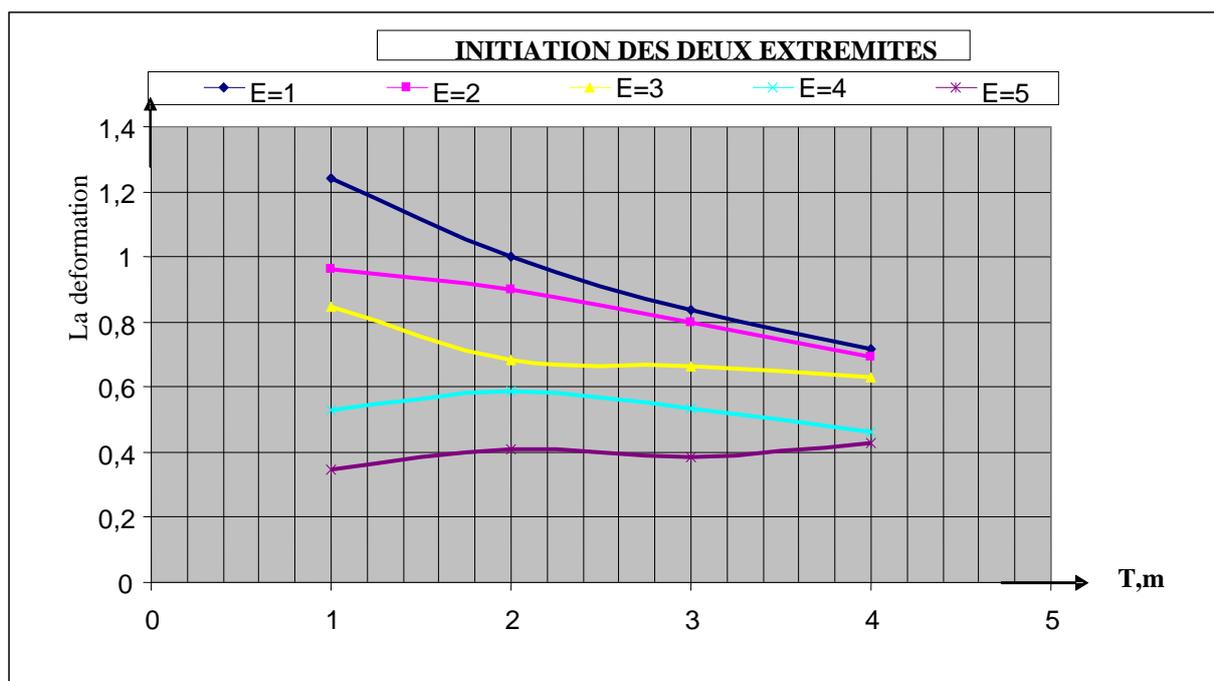


Figure Af30: La déformation dans le tir des cratères

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] **F.I. Siddiqui, S.M. Ali Shah and M. Y. Behan**, Measurement of Size Distribution of Blasted Rock Using Digital Image Processing JKAU: Eng. Sci., Vol. 20 No. 2, pp: 81-93 .2009
- [2] **Q zeng,P Navidi,J Zarka**, Fragmentation by blasting,mohanty 1996
- [3] **Alain Blanchier et Anne Charline**, sauvage technique de l'ingénieur utilisation des explosifs dans le génie civil p C5420-13
- [4] **Blanchier A .thiard B et Wber P**, Theorie du Travail une explosif l'. (Théorie de dynamitage). Mines & Carrières, V.73, p.18, 5pp, 3refs. Octobre 1991.
- [5] **Harries. G and Mercer. J.K**, the science of blasting and its use to minimise costs. Proc. Australian inst. Min. Metal. Annual conf. Adelaide, part B, 1975 pages 387-399.
- [6] **Persson, P.A**, Bench drilling – an important first step in the rock fragmentation process. Atlas copco. Bench drilling symposium. Stockholm, 1975.
- [7] **MC intyre, J.S and Hagan. T.N**, the design of overburden blasts to promote high wall stability at a large strip mine. Proc. 11th Canadian rock mechanics symposium. Vancouver, October 1976, in press.
- [8] **Antill, J.M. Modern**, blasting techniques for construction engineering. Australian civil engineering and construction. November 1964, page 17.
- [9] **Hagan, T.N**, Blasting physics – what the operator can use in 1975. Proc. Australian inst. Min. Metal annual conf. Adelaide. Part B, 1975 pages 369-386.
- [10] **Hagan, T.N**, 1979, The control of fines through improved blast design. Proceedings of the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, September 1979, Austria, pp: 9-20.
- [11] **Fourney et al**, Fragmentation by Blasting, the First International symposium on Rock Fragmentation August 22-26 (1983)
- [12] **Blanchier et al**, Théorie du travail a l'explosif,ind, Minérale et carrier-les technique mai –juin,1988,pp 17-21..
- [13] **Jaeger, J.C. and Cook, N.G.W**, Fundamental of rock mechanics. Chapter 2,13 and 18, Chapman & Hall ltd. , London, 1975.
- [14] **Batifoulier, novembre1971**, Constatations pratiques sur les effets de l'explosif en fonction du matériau rencontré. Revue de l'Industrie Minérale«Mines et Carrières».
- [15] **Denis Nourry**, utilisation de réseaux de neurones pour examiner la fragmentation des roches a l'explosif et établir son influence sur la rentabilité de l'exploitation dans les carrières. 2002.

- [16] **Kuznetsov, 2001**, The mean diameter of the fragments formed by blasting rock, Soviet Mining Science. Vol 9, n°2, pp 144-148.
- [17] **Kristiansen, Kure, Vestre, Bergqvist., 1990**, An investigation of heave and fragmentation related to explosive properties. Fragblast 90. Proceedings of the 2nd International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Australian Institute of Mining and Metallurgy : Brisbane, pp 83-90.
- [18] **Reichholf, Moser, 2000**, The influence of rock and rock mass parameters on the blasting result in terms of fragmentation. Proceedings of the 1st World Conference on Explosives and Blasting Technique, Balkema : Munich, pp 171-178
- [19] **Ortiz. 2000**, Mise au point d'une loi de comportement et de fragmentation dynamiques du béton soumis à une énergie explosive. Mémoire de thèse de l'ENSMP.
- [20] **Rascheeff, 1973**, Etude de la fragmentation des roches au moyen d'explosifs. Explosifs, n°3, pp 3-15.
- [21] **Stagg, Rholl, Otterness, Smith, 1990**, Influence of shot design parameters on fragmentation. Fragblast 90. Proceedings of the 2nd International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Australian Institute of Mining and Metallurgy : Brisbane, pp 311-317.
- [22] **Kristiansen, Kure, Vestre, Bergqvist, 1990**, An investigation of heave and fragmentation related to explosive properties. Fragblast 90. Proceedings of the 2nd International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Australian Institute of Mining and Metallurgy : Brisbane, pp 83-90.
- [23] **Cappello, avril 1994**, Analyse tectonique et minage appliqués à la production d'enrochement. Revue de l'Industrie Minérale « Mines et Carrières », pp 47-50.
- [24] **Thum, 2000**, Blasting techniques and explosives in the german quarry industry. Proceedings of the 1st World Conference on Explosives and Blasting Technique, Balkema : Munich, pp 109-116.
- [25] **Rossmannith, 2000**, The influence of delay timing on optimal fragmentation in electronic blasting. Proceedings of the 1st World Conference on Explosives and Blasting Technique, Balkema : Munich, pp 141-147.
- [26] **Katsabanis, Liu, 1996**, Delay requirements for fragmentation optimization. Proceedings of the Workshop on Measurement of Blast Fragmentation, Balkema : Montréal, pp 241-246.
- [27] **Grant, 1990**, Initiation Systems - What does the future hold? Fragblast 90. Proceedings of the 2nd International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Australian Institute of Mining and Metallurgy: Brisbane, pp 369-372.

- [28] **Bernard**, Les vibrations dues aux tirs de mines: Méthode générale pour prévoir les niveaux et calculer les plans de tir. *Revue de l'Industrie Minérale « Mines et Carrières»*. pp 51-56. avril 1994.
- [29] **Grady DE, Kipp ME**, Dynamic fracture and fragmentation. *Fracture Mechanics of Rock* (Atkinson B.K., Ed.), Academic Press, London, 1987; p.429-475.
- [30] **Fourney WL**, Mechanisms of rock fragmentation by blasting. In: Hudson JA, editor. *Comprehensive rock engineering, principles, practice and projects*. Oxford: Pergamon Press; 1993. p. 39–69.
- [31] **Sato K, Hashida T, Takahashi H, Takahashi T**, Relationship between fractal dimension of multiple microcracks and fracture energy in rock. *Geotherm Sci Tech* 1999;6:1–23.
- [32] **Cho SH, Ogata Y, Kaneko K**, Strain rate dependency of the dynamic tensile strength of rock. *Int J Rock Mech Min Sci* 2003;40:763–77.
- [33] **Schmidt RA, Boade RR, Bass RC**, A new perspective on well shooting—the behavior of contained explosion and deflagrations, *Proceedings of the 54th Annual Conference SPE of AIME, Las Vegas, Nevada, September, 1979*.
- [34] **Warpinski NR, Schmidt RA, Cooper PM, Walling HC, Northrop DA**, High energy gas fracs: multiple fracturing in a well bore, *Proceedings of the 20th US Symposium on rock mechanics, Austin, TX, 1979*. p. 143–52.
- [35] **Donze FV, Bouchez J, Magnier SA**, Modeling fractures in rock blasting. *Int J Rock Mech Min Sci* 1997;34:1153–63.
- [36] **Longefors, U.L.F. and Kihlstrom B.A**, *The modern technique of rock blasting*. John Wiley & sons, Inc., New York, 1963.
- [37] **Persson, P.A., Lundborg, N. and Johansson, C.H**, The basic mechanisms in rock blasting. *Proc of the 2nd cong. Of the Int. Soc. For Rock Mech.*, 3, pp. 19-33, 1970.
- [38] **Duvall, W. I. and Atchison, T.C**, Rock breakage by explosive. *Bu. Min . Rept. Invest.*, 5356, 1957.
- [39] **Sang Ho Cho* and Katsuhiko Kaneko**, Influence of the applied pressure waveform on the dynamic fracture processes in rock *International Journal of the JCRM* vol.1 (2005) pp.25-28
- [40] **Porter, D.D. and Fairhurst, C**, A study of crack propagation produced by the sustain borehole pressure in blasting. In *dynamic rock mechanics, 12th Symp. On rock mech.*, Univ.of Missouri-Rolla, November 1970. Published by the society of mining engineers of AIME, 1971.
- [41] **Saluja, S.S**, Mechanism of rock failure under the action of explosives. *Proc. Of the 9 th Rock Mech . Symp.*, Colorado Sch. Min., AIEM, New York , 1968.

- [42] **Field, J.E. and Ladegaard, P.L.**, The importance of the reflected stress wave in rock blasting. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.*, 8 (3), pp. 213-226, 1971.
- [43] **Dally, J.W., Forney, W.L. and Holloway, D.C.**, Influence of containment of the borehole pressures on explosive induced. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 12, pp. 5-12, 1975.
- [44] **William Hustrulid , Jeffrey Johnson** , A gas pressure-based drift round blast design methodology ; NIOSH Spokane Research Laboratory, USA 2007
- [45] **Fogelson, D.E. , Duvall, W.I . and Atchison, T.C.**, Strain energy in explosion – Generated strain pulses. U.S. bureau of mines, R.I. 5514, 1958.
- [46] **Christie, D.G. and Kolsky, H.**, The fracture in glass and plastics by the passage of stress waves. *J. Soc. Glass tech.*, 36, pp. 65-73, 1952.
- [47] **Hino, K.**, fragmentation of rock through blasting. *J. Ind. Exp. Soc.*, Japan, March, 1956.
- [48] **Kutter, H.K. and Fairhurst, C.**, The Roles of stress wave and gas pressure in presplitting. Chapter 14, pp.265-284 in status of practical rock mechanics (Grosvenor and Paulding, Editors), AIME, New York, 1968.
- [49] **Cnirk, P.F. and Fairhurst**, The mechanics of explosive cavity formation and energy dissipation in a solid earth –I. In VII Symp. Rock Mech. The Pennsylvania state univ., Vol. 2, 1965.
- [50] **Persson, P.A., Lundborg, N. and Johansson, C.H.**, The basic mechanisms in rock blasting. Proc of the 2nd cong. Of the Int. Soc. For Rock Mech., 3, pp. 19-33, 1970.
- [51] **Dally, J.W., Forney, W.L. and Holloway, D.C.**, Influence of containment of the borehole pressures on explosive induced. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 12, pp. 5-12, 1975.
- [52] **N G Nair**, Mining Engineer from Copper Mines in India ,*Explosives and Blasting in Mines***2009**
- [53] **Lang, L.C. and Favreau, R.F.**, A modern approach to open pit design and analysis C.I.M. Bulletin, vol. 65, No. 722, pp. 37-45, 1972.
- [54] **Selberg, H.L.**, Transient compression waves, spherical and cylindrical cavities. *Ark, Phys.*, 5, 97, 1952.
- [55] **Gregory, C.E.**, Explosives for north American engineers. *Trans. Tech. Pub.*, 1973.
- [56] **Atchison, T.C.**, Fragmentation principles. *Ibid*, pp. 355-372.
- [57] **Greenland, B.J. and Knowles, J.D.**, Rock breakage. In *Min. Mag.*, Vol. 120, No. 2, Feb., 1969.

- [58] **Livingston, C.W.** 1956, Fundamental of rock failure. Quar. Colorado Shi. Min., Vol. 51, 131,
- [59] **Bauer, A,** 1961, Application of the Livingston theory. Quar. Colorado Sch. Min., Vol. 56, No. 1, Jan.
- [60] **Pifer, D.A,** Detonation pressure as a rock-breakage parameter. The trend in eng ., Oct, 1967.
- [61] **I.R. Firth D.L. Taylor,** 2001, Bench Blast Modeling Using Numerical Simulation and Mine Planning Software Mackay School of Mines, University of Nevada, Reno. U.S.A.
- [62] **Chung, S. McGill, M. Preece, DS.** (1994), Computer Cast Blast Modeling. Proceedings of the 20th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique. Society of Explosives Engineers, Austin, Texas. Preprint.10 pages.
- [63] **Minchinton, A. Lynch, PM.** (1996), Fragmentation and Heave Modeling using a Coupled Discrete Element GasFlow Code. Proceedings of the 5th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. Mohanty, B (Ed) Montreal, Quebec, Canada. 71-80.
- [64] **Scott, A. (Ed) Cocker, A. Djordjevic, N. Higgins, M. La Rosa, D. Sarma, KS. Wedmair, R.** (1996), Open Pit Blast Design-Analysis and Optimization. Julius Kruttschnitt Mineral Research Center, University of Queensland. 338 pages.
- [65] **Jorgenson, GK. Chung, SH.** (1987), Blast Simulation Surface and Underground with the SABREX model. CIMBulletin, Vol. 80, No. 904, August, 37-41.
- [66] **Gilbride, LJ.** (1995), Blast Induced Rock Movement Modeling for Bench Blasting in Nevada Open Pit Mines. Master of Science Thesis. Mackay School of Mines, University of Nevada, Reno. 285 pages.
- [67] **Zhang, SZ.** (1994), Rock Movement due to Blasting and its Impact on Ore Grade Control in Nevada Open Pit Gold Mines. Master of Science Thesis. Mackay School of Mines, University of Nevada, Reno. 155 pages.
- [68] **Harris, GW.** (1997), Measurement of Blast Induced Rock Movement in Surface Mines Using Magnetic Geophysics. Master of Science Thesis. Mackay School of Mines, University of Nevada, Reno. 251 pages.
- [69] **Preece, DS, Tidman, JP, Chung, SH,** 1997, élargi Dynamitage Capacités de modélisation de DMC_BLAST, notamment pour la projection "Buffer, Actes, 13ème symposium annuel sur les explosifs Projection et de recherche , ISEE, USA, , pp.125-134.
- [70] **Higgins, M., V. Seppala, J. Kemeny, T. BoBo, K. Girdner.** 1999, "Integrated software tools and methodology for optimization of blast fragmentation", Proceedings of the International Society of Explosive Engineers Annual Meeting, Nashville, TN.

- [71] **Kemeny, J., Mofya, E., Kaunda, R., Perry, G., Morin, B.**, 2001, Improvements in blast fragmentation models using digital image processing”, Proceedings of the 38th Rock Mechanics Symposium, Washington, D.C
- [72] **hadjadj Aoul Elias** ; 1999, prédiction et analyse de la fragmentation des roches dans les conditions algériennes. Thèse doctorat université d'Annaba
- [73] **dolgov,K.A** 1983, regulation of the process of hard rocks fragmentation by blasting, vol 1, holmberg,R et rustan,A, eds ;lulea, Suede,pp 43-47
- [74] **Persson,P**, 1983, Energy in rock fragmentation. Trans, first international symposium of rock fragmentation by blasting, vol 2,holmberg,R et rustan, A,eds lulea Suede, pp 777-788
- [75] **Adams,T,F R B, Margolin,L C et Nicolas,B,D** 1983, simulation of rock blasting with the SHALE code, trans. First international symposium of rock fragmentation by blasting, vol 1 ,holemberg, R et Rustan,eds lulea Suede, pp 361-373.
- [76] **Cunnigham ; C.** 1983, The KUZ- RAM model for prédiction of fragmentation from blasting.Trans, first international symposium of rock fragmentation by blasting,Vol 2 ;holmberg ;R et Rustan,A eds lulea,suede,pp 439-453
- [77] **Zheng,R ;bailing,M.et schicai,G**, 1987, the study of the influence of both burden and hole spacing upon fragmentation by blasting. Trans, second international symposium of rock fragmentation by blasting. Fournery W et Dick, R,eds Bethel, CT,USA,pp 530-541.
- [78] **Bergmaan, O**, 1983, Effect of explosive properties, rock type and delay on fragmentation in large model blasts. Trans, First international symposium of rock fragmentation by blasting, Vol 1,holemberg,R et Rustan,A,eds,lulea, Suede,pp 71-78
- [79] **Rustan,A ; Vutukuru,V,S et Torbjorn,N** ; 1983, The influence from specific charge geometric scale and physical properties of homogeneous rock on fragmentation. Trans,First international symposium of rock fragmentation by blasting,Vol 1,holemberg R et Rustan A, eds lulea,suede,pp 115-142.
- [80] **Favreau .R.F** 1983, rock displacement velocity during a bench blast ;proceeding in the first int symp on rock fragmentation by blasting. Lulea sweden, pp 753,776 .
- [81] **Lowds,C,M** 1983, Computer modeling of fragmentation from an array of shotholes, Trans, first international symposium of rock fragmentation by blasting.Vol 2,holemberg,R et Rustan,A lulea,suede ,pp 455-468.
- [82] **T Bernard**, simulation des effets d'une charge explosif au sein d'une matrice rocheuse

- [83] **Da Gama, D1983**, Use of comminution theory to predict fragmentation of jointed rock masse subjected to blasting, Trans. First international symposium of rock fragmentation by blasting, Vol 2, holemberg.R et Rustan.A, esd lulea ;suede .pp : 565-579
- [84] **Zou,D** 1990, Experimental study of computer simulation of bench blasting in production scale, Third symposium of fragmentation,Brisbane August.26-31.
- [85] **Harries ,G** 1990, Development of a dynamic blasting simulation, Rustan A 1990, Burden, spacing and borehole diameter at rock blasting. Third symp on fragmentation ; Brisbane,
- [86] **Klein,T,H.**1988, A mathematical model of rock breakage by blasting Phd thesis juilius kryttschnitt mineral research center (JKMRC) Dept of mining and metellurgical engineering, University of queensland ,p 446
- [87] **Mackenzie A**, Cost of Explosives – Do You Evaluate It Properly? Mining Cong. J. Vol. 54, May (1966), pp. 32-41.
- [88] **Edgar j.** and **Peelder E.P**, Mining and milling on inter-related fragmentation systems. Trans. SME/ AIME, Vol. 252, No. 1, (1972), pp. 46-49.
- [89] **Roland Ortiz**, (2000), Mise au point d'une loi de comportement et de fragmentation dynamique du béton soumis à une énergie explosive.
- [90] **Kochanowsky B. J.**, Developments in blasting techniques in opencast mining and quarrying. Symp. Mining. Quarrying and alluvial mining, (1964).
- [91] **Cumminghan V.V. B**, Rock fragmentation related to blast design. Institute of Quarrying, South Africa, (1982).
- [92] **Selberg H.l**, Transient compression waves, spherical and cylindrical cavities. Ark, Phys., 5, 97, (1952).
- [93] **Heelan P. A**, Radiation from a cylindrical source of finite length. Geophysics 18, (1953), pp. 685-696.
- [94] **Starfield A. M.** and **Puglies J.M**, Compression waves generated in rock by cylindrical explosive charges: A comparison between a computer model and field measurements. Int. J. Rock Mech. Min. Scie., vol. 5, (1968), pp. 65-77.
- [95] **Plewman R. P.** and **Starfield A. M**, The effects of finite velocities of detonation and propagation on the strain pulses induced in rock by linear charges. J. S. Afr. Inst. Min. Metall., 66, (1965), pp. 77-96.
- [96] **Atchison T. C.** and **Puglies J. M**, Comparative studies of explosives in granite. II Series of Thesis, U. S. Bureau of Mines, R.I. 6434, (1964).
- [97] **Ivanetic. J**, Crater tests a basis for the planning of mass blasting with deep blast holes. J. S. Afr. Min. Metall. Inst., No. 2, (1967), pp. 115-142.

- [98] **Starfield A. M.**, Strain wave theory in rock blasting. In Failure and Breakage of Rocks. (op, cit), (1967), chapter 23, pp. 538-548.
- [99] **Mohanty B.** and **Chung S.**, Developments in blasting physics. The current research focus. Jour. Mines, Metals and Fuels, 5, (1986).
- [100] **Harries G.**, The modelling of long cylindrical charges of explosive. First international symp. on rock fragmentation by blasting, Lulea, August (1983), pp. 419-431.
- [101] **Pugliese J. M.**, Design Blast Patterns Using Empirical Formulas. U. S. Bu. Min. I. C. 8550, (1972).
- [102] **Tidman P.**, Modeling the blast, downline, Imperial Chemical Industries Explosives International, (1985).
- [103] **Hino K.**, Fragmentation of Rock Through Blasting. J. Ind. Exp. Soc., (1956), Japan.
- [104] **Simba K. R. Y., Holloway D. C.** and **Fourney W. L.**, Pre-splitting and stress waves. A dynamic photo elastic evaluation. Proc. 23 rd. U. S. Symp. Rock Mechanics, (1982).
- [105] **Reinhardt H. W.** and **Darly J. W.**, Dynamic photo elastic investigation of stress wave interaction with a bench face. Tra. Min. Eng. Soc., AIME, (1971), Vol, 25, pp. 35-42.
- [106] **Ash R. L.**, The Mechanics of Rock Breakage. Parts I-IV. Pit and Quarry v. 56, No. 2 August, pp98-100, 112; No. 3 September, pp. 118-123; No. 4 October, pp. 126-131; No. 5 November (1963), pp. 109-111, 114-118.
- [107] **Atchison, T. C . and Puglies, J . M.**, Comparative studies of explosives in granite. II series of tesis, U.S. bureau of mines, R. I. 6434, 1964.
- [108] **Tibor, T. and I. Feldman.** 1996. ISO 14000: A Guide to the New Environmental Management Standards. Irwin Professional Publishing.
- [109] **V.BARON,** AFNOR, Pratiquer le management de l'environnement, AFNOR (Association Française de Normalisation) Publié le 18/06/2005
- [110] **Bertil D, Rasolomanana ,** Evaluation de dégâts dus aux tirs de carrière journal des sciences de la terre , Volume 2, septembre 1998, ISSN 2074-4587 pp:6 - 7
- [111] **Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, Eschborn** 1995, Manuel sur l'environnement-Documentation pour l'étude et l'évaluation des effets sur l'environnement, Ministère fédéral allemand de la Coopération économique et du Développement
- [112] **Bayerischen Braunkohlen, Industrie AG** in Schwandorf, revue "Braunkohle", 1980, revue 9, p. 273 - 277.

