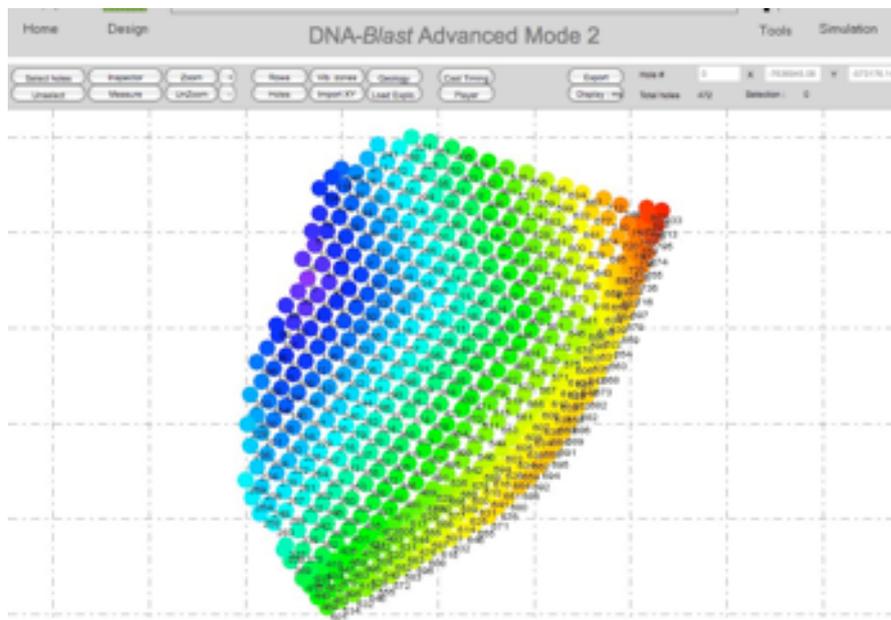




# Modélisation des sautages pour des gains en millions de dollars (une nouvelle approche de la simulation numérique)



par Thierry BERNARD (Docteur Ingénieur)

THIS DOCUMENT IS PROVIDED "AS IS," AND COPYRIGHT HOLDERS MAKE NO REPRESENTATIONS OR WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, NON-INFRINGEMENT, OR TITLE; THAT THE CONTENTS OF THE DOCUMENT ARE SUITABLE FOR ANY PURPOSE; NOR THAT THE IMPLEMENTATION OF SUCH CONTENTS WILL NOT INFRINGE ANY THIRD PARTY PATENTS, COPYRIGHTS, TRADEMARKS OR OTHER RIGHTS. COPYRIGHT HOLDERS WILL NOT BE LIABLE FOR ANY DIRECT, INDIRECT, SPECIAL OR CONSEQUENTIAL DAMAGES ARISING OUT OF ANY USE OF THE DOCUMENT OR THE PERFORMANCE OR IMPLEMENTATION OF THE CONTENTS THEREOF.

DNA-Blast is a TBT software – [www.tbtech.fr](http://www.tbtech.fr)  
Copyright ©2008 DNA-Blast. All Rights Reserved. [www.dna-blast.com](http://www.dna-blast.com)

## I. Résumé :

Prédire le résultat d'un tir de mines. Qui n'a pas rêvé de disposer d'un outil permettant de réaliser cette prédiction. L'utilisation d'explosif produit des effets souvent jugés « imprédictibles ». Cela est certainement dû au caractère impulsif d'une détonation et au effets dévastateurs qu'elle produit lorsqu'elle est incontrôlée, en cas d'accident de manipulation, de production ou d'utilisation à des fins malveillantes, par exemple. Qu'en est il en revanche dans un environnement contrôlé tels que peuvent l'être les sites miniers ou carrières, lors d'une utilisation à des fins industrielles ?

Les effets d'une explosion peuvent aujourd'hui être démystifiés et mis en équation par la science. C'est ce que propose le modèle DNA-Blast mis au point après 15 années d'expérience d'utilisation des explosifs pour l'abattage des roches dans les mines et carrières. Pour bien comprendre l'efficacité de ce modèle, il est d'abord utile de décrire sa structure. De nombreux scientifiques, mineurs, ou professeurs ont contribué à apporter une réponse à la modélisation des effets d'une explosion. On trouve d'ailleurs dans la littérature de nombreuses équations ou approches permettant de décrire ce phénomène. Si ces approches ont été, et sont encore utiles pour la profession (par exemple le modèle de Kuzram pour la fragmentation ou loi de Chapot pour les vibrations), on peut leur reprocher soit de ne pas prendre en compte tout les paramètres impliqués dans le tir de mine, soit de modéliser le phénomène dans une configuration trop restreinte pour être opérationnelle. Ainsi par exemple, la séquence d'initiation n'intervient pratiquement dans aucun modèle, alors que l'usage de détonateurs électroniques est aujourd'hui largement répandu et permet une quasi infinité de combinaisons.

Le modèle DNA-Blast, présenté ici, n'essaie pas d'apporter une réponse à la modélisation des effets d'une explosion par une équation universelle et « pure », une sorte de graal conceptuel, mais plutôt par une approche très pragmatique. Le mécanisme décrivant les effets d'une explosion est un mécanisme complexe qui se décompose en un certain nombre de mécanismes élémentaires, chaque mécanisme étant lié aux autres par des liaisons. Il est ainsi possible de décrire le mécanisme global est modélisant chaque mécanisme élémentaire (appelé gène) et les liaisons entre eux.

Le modèle, validé par des mesures de terrain concernant la fragmentation ou les vibrations, selon les cas, permet une nouvelle approche de la conception des plans de tirs, en particulier grâce à sa capacité de « reverse engineering » résumée par l'expression « de l'Objectif à la conception » (Objectif to Design) qui permet de déterminer les paramètres du plan de tir pour atteindre un objectif donné.

# SOMMAIRE

<b>I. RESUME :</b> .....	<b>2</b>
<b>II. LE MODELE DNA-BLAST :</b> .....	<b>5</b>
<b>A. COMMENT MODELISER, PREDIRE L'ETAT SISMIQUE AUTOUR D'UN TIR DE MINE.</b> .....	<b>7</b>
1. BREVE ANALYSE CRITIQUE DE LA METHODE DE LA CHARGE UNITAIRE .....	7
2. BREVE ANALYSE CRITIQUE DE LA METHODE TEMPORELLE.....	7
3. L'APPROCHE VIBRATIONS DU MODELE DNA-BLAST.....	8
<b>B. MODELISATION DE LA FRAGMENTATION</b> .....	<b>11</b>
1. DOIT-ON POUR AUTANT ABANDONNER CE PRINCIPE POUR MODELISER LA FRAGMENTATION D'UN TIR DE MINE? .....	11
2. COMMENT PASSER DE <i>If</i> A LA DISTRIBUTION BLOCOMETRIQUE D'UN TROU? .....	12
3. QUELQUES REMARQUES CONCERNANT LE MODELE .....	13
<b>III. VALIDATION DU MODELE :</b> .....	<b>15</b>
<b>A. CAS A : MODELISATION DE LA FRAGMENTATION.</b> .....	<b>15</b>
<b>B. CAS A : MODELISATION DES VIBRATIONS.</b> .....	<b>16</b>
<b>IV. QUELS NOUVEAUX USAGES ET APPLICATIONS POUR LE MODELE DNA-BLAST ?</b> .....	<b>18</b>
<b>A. COMPARER DES PRODUITS</b> .....	<b>18</b>
<b>B. PREDIRE LES NIVEAUX DE VIBRATION</b> .....	<b>18</b>
<b>C. OPTIMISER LE NIVEAUX DE VIBRATION</b> .....	<b>20</b>
<b>D. OPTIMISER LA FRAGMENTATION</b> .....	<b>23</b>
<b>V. BIBLIOGRAPHY</b> .....	<b>27</b>
<b>VI. ANNEXE : EXEMPLES DE RESULTATS</b> .....	<b>29</b>

## TALE DES ILLUSTRATIONS

<i>Figure 1 : Schéma du mécanisme de fragmentation .....</i>	<i>5</i>
<i>Figure 2 : Schéma de l'interaction des gènes.....</i>	<i>6</i>
<i>Figure 3 : Architecture du modèle DNA-Blast.....</i>	<i>6</i>
<i>Figure 4: Schéma de la méthode « temporelle » ou de la signature sismique élémentaire.....</i>	<i>8</i>
<i>Figure 5: exemple de facteurs d'amplification pour une fréquence dominante de 10 Hz.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 6: exemple de facteurs d'amplification pour une fréquence dominante de 40 Hz.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 7 : tirs impliqués dans l'étude de cas .....</i>	<i>15</i>
<i>Figure 8: comparaison simulation/mesure de la fragmentation.....</i>	<i>16</i>
<i>Figure 9 : Plan de carrière avec position des sautages et des sismographes.....</i>	<i>16</i>
<i>Figure 10 : mesures de vibrations comparatives.....</i>	<i>16</i>
<i>Figure 11 : carte d'iso-vibrations pour le Sautage #1.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 12 : carte d'iso-vibrations pour le Sautage #2.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 13 : comparatif vibrations simulées et mesurées.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 14: comparaison d'un tir avec détonateurs non-électriques et électroniques.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure 15: Carte d'amplification de vibrations pour 30hz et 90Hz, ouverture à gauche.....</i>	<i>19</i>
<i>Figure 16: Carte d'amplification de vibrations pour 30hz et 90Hz, ouverture au centre, temps courts.....</i>	<i>19</i>
<i>Figure 17 : vue en plan de la carrière de Burkville .....</i>	<i>20</i>
<i>Figure 18: I-Blast - module d'optimisation par signature sismique.....</i>	<i>21</i>
<i>Figure 19: Simulation de la carte d'iso vibration avec ouverture à droite.....</i>	<i>21</i>
<i>Figure 20: Simulation de la carte d'iso vibration avec ouverture à gauche.....</i>	<i>22</i>
<i>Figure 21: resultats comparatifs des tirs.....</i>	<i>22</i>
<i>Figure 22: schéma d'interférences constructives simulé par I-Blast.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure 23: comparaison de séquences d'amorçage pour la fragmentation.....</i>	<i>24</i>
<i>Figure 24: I-Blast simulation de fragmentation comparée entre 17ms et 3ms entre trous.....</i>	<i>24</i>
<i>Figure 25: comparaion de la fragmentation mesurée entre un retard entre trous de 17ms et 3ms.....</i>	<i>25</i>
<i>Figure 26: photo du tir optimisé pour la fragmentation.....</i>	<i>25</i>
<i>Figure 27: Simulations conjointes des vibrations, de la fragmentation et des projections.....</i>	<i>26</i>
<i>Figure 28: Visualisation d'interférences d'ondes.....</i>	<i>29</i>
<i>Figure 29: Simulation d'endommagement en tunnel.....</i>	<i>29</i>
<i>Figure 30: Simulation du champ de vibration en fonction de divers paramètres.....</i>	<i>30</i>

## II. Le modèle DNA-Blast :

Sans entrer dans le détail, la description des effets d'une explosion peut se décomposer comme cela :

1. La charge explosive détone et se décompose en gaz à hautes pressions et hautes températures
2. Les gaz s'appliquent sur la paroi du trou de mine qui les contient et créent un champ de contrainte dans la roche
3. Ce champ de contrainte, par son aspect impulsionnel, génère une onde de contrainte qui se propage dans la roche en l'endommageant
4. Cet endommagement est le foyer de fissures dans le massif
5. Les gaz se détendent au travers des fissures séparant ainsi les fragments de roche
6. La pression de ces gaz appliquée sur les faces des fragments, produit des forces qui mettent en mouvement les fragments.
7. Les fragments adoptent une trajectoire balistique
8. Dans les zones où l'endommagement de la roche n'a pas été suffisant pour créer des fragments, l'onde de contrainte continue son trajet jusqu'à épuisement de son énergie quelle dissipe en faisant vibrer le massif.

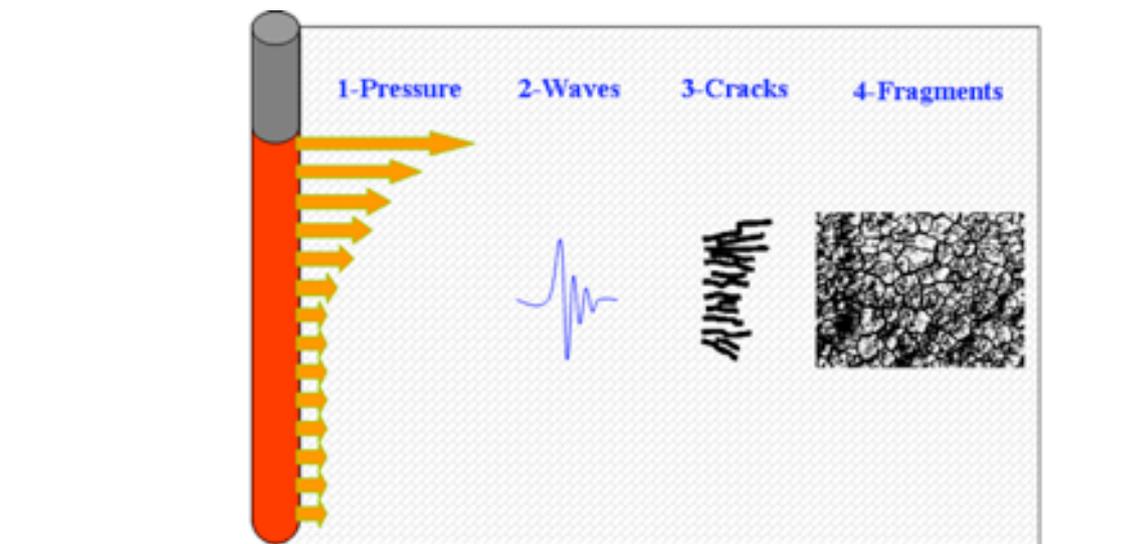


Figure 1 : Schéma du mécanisme de fragmentation

Comme expliqué dans l'introduction, le modèle DNA-Blast est construit autour de mécanismes élémentaires (gènes), chacun décrivant un des aspects du mécanisme global et tous reliés entre eux par des liaisons décrivant leurs interactions.

A la lecture du mécanisme décrit ci-dessus, on se rend compte qu'avec, au minimum, les gènes suivants, il est possible de modéliser efficacement les effets d'une explosion :

- Un gène de détonique  
(qui décrit l'évolution de la pression consécutive à une détonation)
- Un gène de propagation d'une onde de contrainte  
(résultant d'un champ de pression)
- Un gène d'interférence d'ondes  
(cas de plusieurs charges explosives)
- Un gène d'endommagement d'un matériau  
(affaiblissement des caractéristiques du matériau en fonction des contraintes)
- Un gène de fissuration en fonction de l'endommagement
- Un gène de balistique  
(trajectoire des fragments)

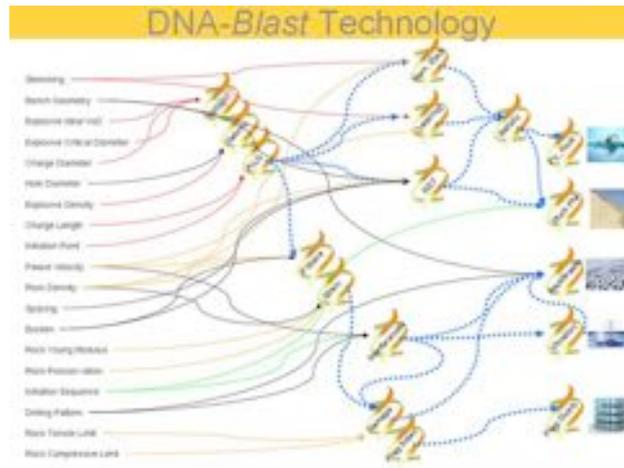


Figure 2 : Schéma de l'interaction des gènes

La connaissance contemporaine de ces phénomènes physiques permet de bâtir ces gènes sans difficulté particulière.

Reste à modéliser l'interaction entre ces gènes. Une explosion est un phénomène dynamique qui démarre lorsque le mineur appui sur le bouton de l'exploseur et se termine lorsque l'ensemble des fragments de roche se sont posés au sol et que le sol a cessé de vibrer. On est passé d'un état stable pré tir à un état stable post tir en passant par une succession de phénomènes transitoires. Le paramètre temporel intervient donc dans ce phénomène global.

Pour prendre en compte cet effet dynamique, une fois les interactions entre gènes décrites, le modèle s'exécute par pas de temps élémentaires. A la fin de chaque pas de temps, les interactions entre gènes sont mises à jour. Chaque nouveau pas de temps s'exécute en prenant comme condition initiale l'état du pas de temps précédent. L'aspect dynamique du phénomène est ainsi modélisé.

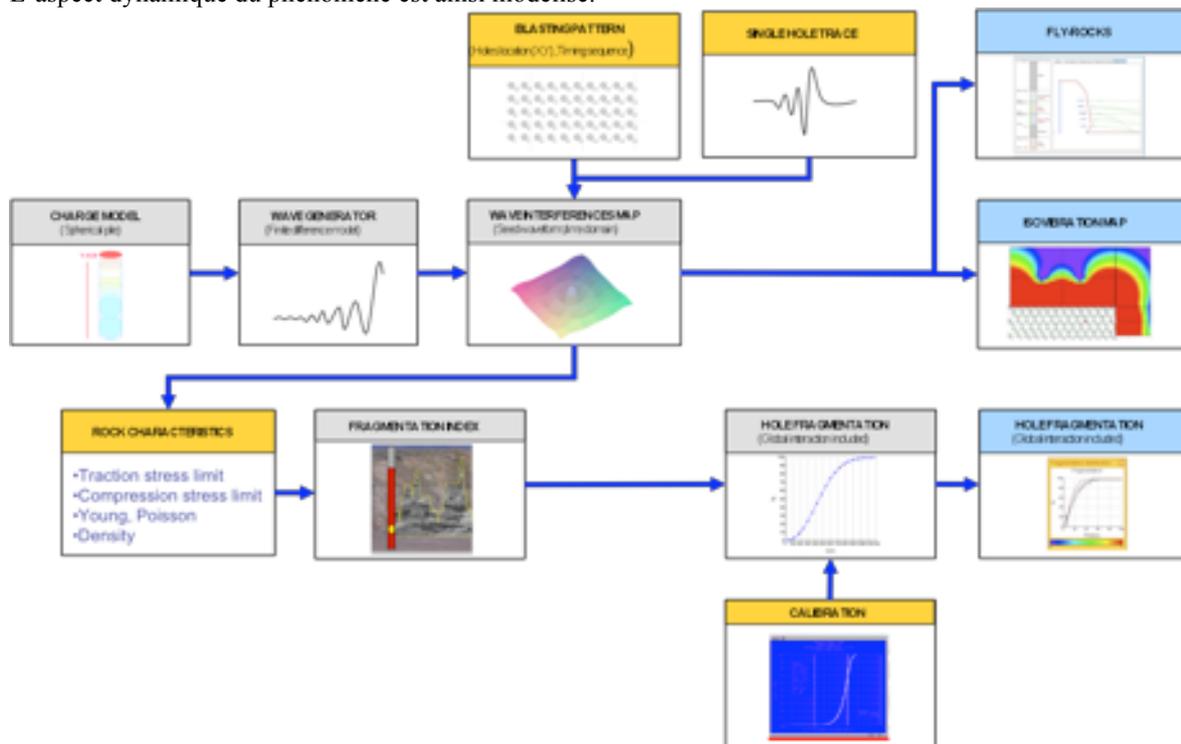


Figure 3 : Architecture du modèle DNA-Blast

THIS DOCUMENT IS PROVIDED "AS IS," AND COPYRIGHT HOLDERS MAKE NO REPRESENTATIONS OR WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, NON-INFRINGEMENT, OR TITLE; THAT THE CONTENTS OF THE DOCUMENT ARE SUITABLE FOR ANY PURPOSE; NOR THAT THE IMPLEMENTATION OF SUCH CONTENTS WILL NOT INFRINGE ANY THIRD PARTY PATENTS, COPYRIGHTS, TRADEMARKS OR OTHER RIGHTS. COPYRIGHT HOLDERS WILL NOT BE LIABLE FOR ANY DIRECT, INDIRECT, SPECIAL OR CONSEQUENTIAL DAMAGES ARISING OUT OF ANY USE OF THE DOCUMENT OR THE PERFORMANCE OR IMPLEMENTATION OF THE CONTENTS THEREOF.

## A. Comment modéliser, prédire l'état sismique autour d'un tir de mine.

Il existe aujourd'hui des méthodes couramment employées pour prédire le niveau de vibration, issue d'un tir de mine, en un point donné. Passons en revue les deux plus utilisées, à savoir la méthode de la charge unitaire et la méthode temporelle, et analysons leurs points forts et faibles.

### 1. BREVE ANALYSE CRITIQUE DE LA METHODE DE LA CHARGE UNITAIRE

La première méthode, appelée méthode de la charge unitaire ou de la distance réduite, prône que le niveau de vibration en un point donné est uniquement une fonction de la distance entre le tir et le point considéré et de la charge unitaire du tir. Celle-ci est définie comme étant la charge maximale instantanée mesurée sur l'ensemble des charges du tir. Il est généralement admis que deux charges sont séparées temporellement si leur écart est supérieur à 8 ms (cette valeur est largement discutable et discutée. Le paragraphe analysant brièvement la méthode temporelle en démontre d'ailleurs les limites)

L'expression retenue pour l'estimation du niveau maximal de vibration en un point donné est de la forme  $V = KD^\alpha Q^\beta$  où K,  $\alpha$ ,  $\beta$  sont des constantes caractérisant le tir et la configuration du terrain. Cette

équation est aussi plus connue sous la forme  $V = K \left( \frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^\alpha$  telle que mise en évidence par CHAPOT en France dans les années 1980.

On notera que :

- Le niveau de présente une symétrie axiale autour du tir
- La séquence d'initiation n'intervient pas dans le calcul
- Le nombre et la position des trous n'interviennent pas dans le calcul

### 2. BREVE ANALYSE CRITIQUE DE LA METHODE TEMPORELLE

La deuxième méthode appelée méthode temporelle, ou méthode du signal unitaire, s'appuie sur la signature sismique d'une charge mesurée en un point.

La signature sismique d'une charge, se définit comme l'enregistrement en un point donné des vibrations générées par une charge d'explosif tirée de manière isolée (sans interaction avec d'autres charges).

Cette signature sismique possède l'avantage d'intégrer les modifications du signal source causées par la traversée des différentes couches géologiques et la morphologie du terrain.

Un tir de mine étant constitué d'une succession de charges décalées temporellement, il suffit de décaler, pour chaque charge du tir, la signature sismique élémentaire de la charge, du retard de celle-ci (décalage temporel) et d'additionner entre elles toutes les signatures sismiques décalées, pour obtenir la signature sismique globale du tir. A partir de celle-ci, on obtiendra facilement le niveau de vibration maximal du tir.

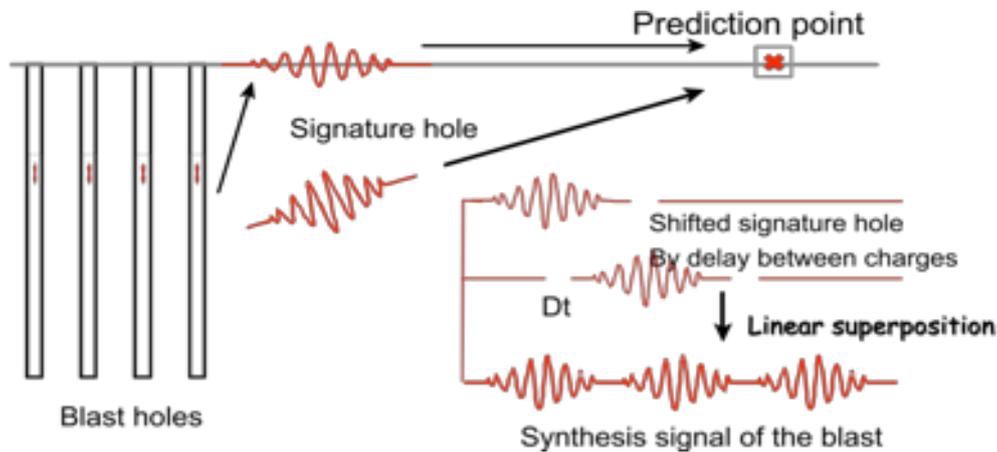


Figure 4: Schéma de la méthode « temporelle » ou de la signature sismique élémentaire

On notera que :

- La méthode prend en compte la séquence d'initiation.
- La méthode nécessite une signature sismique par type de charge.
- Il est possible de prendre en compte la position relative des trous entre eux par rapport au point de mesure en corrigeant le décalage temporel entre les charges du temps de parcours entre la charge et le point de mesure.
- Le niveau de vibration n'est estimé qu'à une distance égale à celle séparant le tir unitaire de référence et le point de mesure de la signature sismique élémentaire.
- En appliquant ce principe, la règle des 8 ms évoquée précédemment n'a plus de sens, puisqu'à chaque décalage temporel correspond un niveau de vibration différent alors même que la règle des 8ms prône qu'au-delà de 8ms, le niveau de vibration est constant.

### 3. L'APPROCHE VIBRATIONS DU MODELE DNA-BLAST

Nous allons maintenant aborder comment le modèle DNA-Blast modélise les vibrations de manière fiable, dans l'espace autour d'un tir et cela en prenant en compte l'ensemble de ses paramètres clés (géologie, position des trous, chargement des trous et, bien-sûr, la séquence d'initiation).

Pour cela nous partons du principe déjà évoqué au paragraphe précédent, mais généralisé, selon lequel la signature sismique d'un tir de mine, mesuré en point donné, est la somme de toutes les signatures sismiques

émises par l'ensemble des charges du tir. Cela peut s'écrire mathématiquement :  $SG(t) = \sum_{i=1}^N s_i(t)$  (1) ou :

- $SG(t)$  : représente la signature sismique du tir de mine (exprimée dans le domaine temporel)
- $s_i(t)$  : représente la signature sismique élémentaire de chaque charge du tir de mine (exprimée dans le domaine temporel)
- $N$  : le nombre de charge du tir de mine

Si l'on considère que chaque charge génère une signature sismique quasi-identique à l'amplitude près, l'expression (1) devient :

$$SG(t) = \sum_{i=1}^N a_i S(t - \Delta t_i) \quad (2) \text{ ou}$$

- $S(t)$  : représente la signature sismique élémentaire d'une charge type du tir de mine (exprimée dans le domaine temporel)
- $\Delta t_i$  : représente le décalage temporel d'une charge dans la séquence
- $a_i$  : représente le coefficient d'amplitude de la signature sismique élémentaire

Cette équation écrite dans le domaine fréquentiel devient :  $SG(f) = F(f)S(f)$  (3) ou

- $SG(f)$  : représente l'amplitude de la transformée de Fourier de SG(t)
- $S(f)$  : représente l'amplitude de la transformée de Fourier de S(t)
- $F(f)$  : représente une fonction d'amplification

$$\text{avec } F(f) = \left( \sum_{i=1}^N a_i \cos(2\pi f \Delta_i) \right)^2 + \left( \sum_{i=1}^N a_i \sin(2\pi f \Delta_i) \right)^2$$

D'autre part si l'on appelle  $D_0$  la distance de référence entre la charge unitaire et le point de mesure de la signature sismique et en appliquant la loi classique  $\left( V = K \left( \frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^\alpha \right)$  de décroissance de l'amplitude pour un seul trou, on obtient :

$$V_0 = K \left( \frac{D_0}{\sqrt{Q}} \right)^\alpha \text{ et } V_i = K \left( \frac{D_i}{\sqrt{Q}} \right)^\alpha \text{ alors } V_i = \left( \frac{D_i}{D_0} \right)^\alpha \left( \frac{\sqrt{Q_0}}{\sqrt{Q_i}} \right)^\alpha V_0 = a_i V_0$$

On peut donc déduire la valeur de  $a_i = \left( \frac{D_i}{D_0} \right)^\alpha \left( \frac{\sqrt{Q_0}}{\sqrt{Q_i}} \right)^\alpha$

On notera aussi que  $\Delta t_i = \Delta_i + \frac{D_i}{V_p}$  avec :

- $\Delta_i$  : représente le décalage temporel de la séquence d'initiation
- $\frac{D_i}{V_p}$  : représente le décalage temporel du trajet de l'onde sismique entre la charge et le point de mesure

En faisant l'hypothèse que le domaine fréquentiel de la signature sismique d'une charge est identique pour toutes les charges, il est donc possible de calculer un facteur d'amplification sismique en tout point autour du tir.

On notera que :

- Le facteur d'amplification prend en compte la position des trous, la séquence d'initiation et la charge de chaque trou
- Le facteur d'amplification est uniquement dépendant du temps d'arrivée du signal en un point, de la position des charges et de la fréquence

Ce facteur d'amplification sera utilisé dans le modèle DNA-Blast à plusieurs fins :

- connaître le niveau de vibration en un point donné en le multipliant par le spectre de la signature sismique et en effectuant ensuite une transformée de Fourier inverse
- pour la recherche d'une séquence d'initiation conduisant à un niveau de vibration minimal sur une zone
- dans la modélisation ou l'optimisation de la fragmentation. Ce facteur permet de corriger l'amplitude de l'onde émise par chaque trou dans le modèle DNA-Blast de fragmentation

Enfin, on notera que le calcul du facteur d'amplification permet d'effectuer très facilement une déconvolution du signal et d'obtenir une signature sismique élémentaire à partir de la signature sismique globale d'un tir.

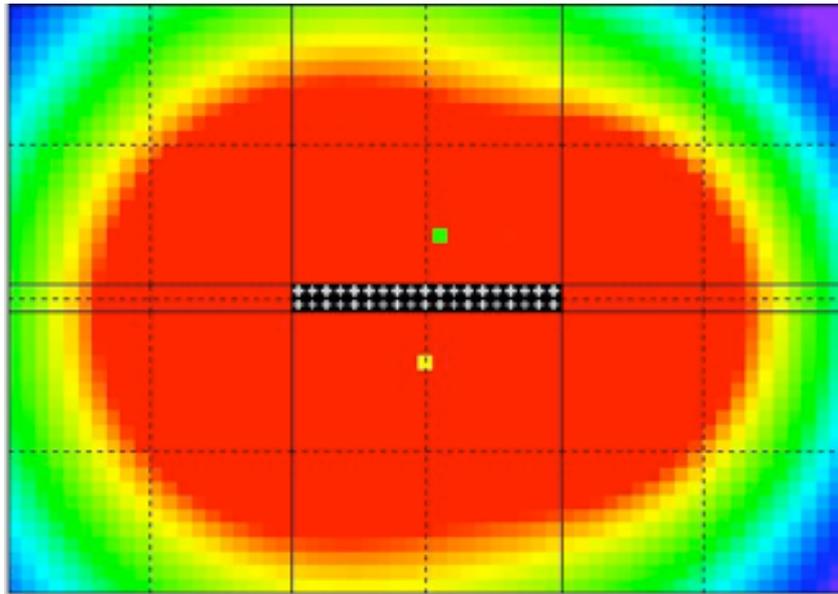


Figure 5: exemple de facteurs d'amplification pour une fréquence dominante de 10 Hz

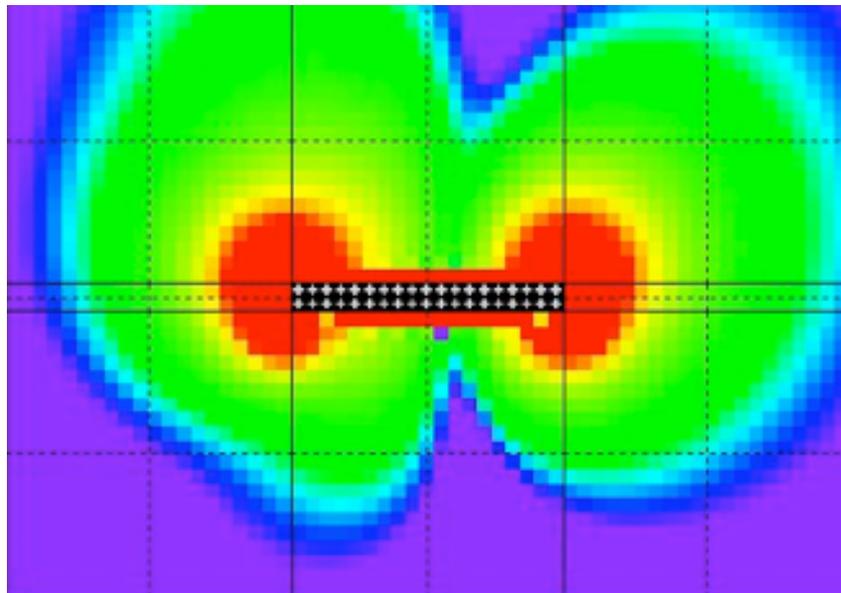


Figure 6: exemple de facteurs d'amplification pour une fréquence dominante de 40 Hz

## B. Modélisation de la Fragmentation

La fragmentation résulte d'un découpage de la matière en blocs élémentaires suivant des lignes de fragilité préférentielles construites entre des points d'endommagement de la matrice rocheuse.

Ces points d'endommagement sont créés par les ondes de contraintes qui se propagent dans le massif et qui, selon leur intensité et l'état de la matière, conduisent à endommager ou détruire localement celle-ci. La force qui permet de détacher les fragments entre eux suivant ces lignes provient de la pression des gaz lorsqu'ils s'immiscent dans les fissures et s'appuient sur les faces de ceux-ci.

Le mécanisme est donc très similaire à celui qu'utilise un enfant pour découper avec une aiguille une forme dans une feuille de papier. Il commence par percer la feuille d'une succession de trous en suivant les lignes qui marquent les contours de la forme. C'est l'équivalent de l'onde de contrainte qui se propage en endommageant (petits trous) la matière (feuille). Puis il saisit la feuille à chaque extrémité et à l'aide de ses mains exerce une force de chaque côté de celle-ci. C'est l'équivalent de la pression des gaz. La feuille se découpe en suivant une ligne qui relie les trous (zone de fragilité).

On peut donc bâtir un modèle de fragmentation basé sur ce principe en propageant une onde de contrainte, issue du champ de pression dans le trou de mine, dans le massif rocheux, et en déterminant l'ensemble des points de fragilité créés par cette onde, puis en les reliant entre eux afin de délimiter les blocs ainsi obtenus. Cette méthode ne pose aucun problème technique de mise en équation et de résolution numérique mais nécessite, pour qu'elle donne un résultat réaliste, une connaissance précise de l'état de la matière autour du trou.

En effet, les points de fragilité (trous dans la feuille) n'apparaissent au passage de l'onde de contrainte que parce qu'à l'échelle microscopique la matière n'est pas homogène. Elle présente des variations de structure qui font que telle ou telle zone résiste plus au moins à l'état de contrainte créé par l'onde. Ces variations de zones plus ou moins résistantes, ou plus ou moins faibles, vont être le berceau du réseau de "trous" au sein de la matrice rocheuse.

Il en résulte que si le mécanisme, tel que décrit, permet de modéliser le phénomène de fragmentation de manière théorique, seule une mesure très précise et détaillée à l'échelle microscopique de l'état mécanique de la roche permet son application. Or nous le savons, cette mesure, si elle est éventuellement réalisable en laboratoire à petite échelle, est aujourd'hui impossible à conduire sur un site d'exploitation, donc a fortiori à plus grande échelle.

### 1. DOIT-ON POUR AUTANT ABANDONNER CE PRINCIPE POUR MODELISER LA FRAGMENTATION D'UN TIR DE MINE?

Pas forcément ! L'approche microscopique du phénomène nous apprend que la roche présente des variations de structure réparties aléatoirement au sein de la matrice. On est présence d'un phénomène qui peut se décrire statistiquement. C'est de cette façon que nous allons décrire le mécanisme de fragmentation d'une matrice rocheuse par une onde de contrainte.

Prenons un cube élémentaire de matière. Nous savons que, vu à loupe, l'intérieur n'est pas homogène et présente des variations de structure, mais que, vu de l'extérieur (vision macro), ce cube semble homogène voir isotrope. On peut le caractériser par exemple par les valeurs suivantes : module de Young, coefficient de Poisson, résistance en traction et en compression. Il faut donc trouver une description de l'endommagement macroscopique qui reflète l'état microscopique.

Pour cela intéressons nous à l'endommagement créé par une onde. Une des meilleures analogies pour décrire une onde est certainement celle des vagues sur la mer. Si l'on regarde des vagues venir frapper une berge, on notera qu'au fil du temps celles-ci vont endommager la berge et cela aux points de faiblesse de la berge. Il est possible de relier l'endommagement de la berge à différentes caractéristiques des vagues (ondes).

THIS DOCUMENT IS PROVIDED "AS IS," AND COPYRIGHT HOLDERS MAKE NO REPRESENTATIONS OR WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, NON-INFRINGEMENT, OR TITLE; THAT THE CONTENTS OF THE DOCUMENT ARE SUITABLE FOR ANY PURPOSE; NOR THAT THE IMPLEMENTATION OF SUCH CONTENTS WILL NOT INFRINGE ANY THIRD PARTY PATENTS, COPYRIGHTS, TRADEMARKS OR OTHER RIGHTS. COPYRIGHT HOLDERS WILL NOT BE LIABLE FOR ANY DIRECT, INDIRECT, SPECIAL OR CONSEQUENTIAL DAMAGES ARISING OUT OF ANY USE OF THE DOCUMENT OR THE PERFORMANCE OR IMPLEMENTATION OF THE CONTENTS THEREOF.

- La hauteur de la vague (l'amplitude de l'onde). De très fortes amplitudes endommagent plus vite la berge. Une amplitude très importante peut même conduire à sa disparition, en une fois.
- La répétition des vagues sur la berge ou leur caractère cyclique ou alterné (fréquence de l'onde). L'effet de martèlement conduit à fatiguer la berge qui cède avec le temps
- La longueur de chaque vague (longueur d'onde). Plus elle est grande, plus elle exerce son effort longtemps sur la berge.

C'est à partir de ces trois caractéristiques que l'on se propose de bâtir le modèle de fragmentation de la roche (amplitude, fréquence, longueur d'onde).

Prenons un cube élémentaire de matière et soumettons-le au passage d'une onde de contrainte pendant une durée  $T$ .

Regardons pendant un temps très court  $dt$  l'effet de la partie de l'onde qui se trouve dans le cube élémentaire. Elle possède une amplitude  $A$  que l'on compare à la résistance limite Sigma limite ( $\sigma_{lim}$ ) de la roche selon l'état de l'onde.

On définit l'indice de fragmentation élémentaire  $if(dt) = \frac{A}{\sigma_{lim}}$  si  $\geq 1$ , sinon  $if(dt) = 0$

$$\text{et } [If]^1 = \sum_{dt=0}^{ct=T} if(dt)$$

On note que cet indice croît avec la durée d'application d'une onde dont l'amplitude est supérieure à la résistance de la roche. Elle est donc directement corrélable au nombre de zones de fragilité créées (trous) par l'onde et par conséquent inversement corrélable à la taille des fragments qui seront créés.

C'est la valeur  $If = \left[ \sum_{dt=0}^{ct=T} if(dt) \right]^{-1}$  que nous retiendrons comme indice de fragmentation et qui est en corrélation directe avec la taille des fragments qui seront créés dans le cube élémentaire.

## 2. COMMENT PASSER DE $If$ A LA DISTRIBUTION BLOCOMETRIQUE D'UN TROU?

L'espace autour du trou est découpé en volumes élémentaires. Le temps  $T$  nécessaire à l'onde de contrainte issue du trou de mine est découpé en tranches  $dt$ .

Sur chaque volume élémentaire ( $n$ ) on calcule  $If(n)$ . Après avoir trié les  $If(n)$  du plus petit au plus grand, on découpe l'étendue des valeurs  $[If(n)_{min}, If(n)_{max}]$  en intervalles que l'on nomme « classes blocométriques ».

Le nombre de valeurs  $If(n)$  par classe représente la distribution blocométrique élémentaire d'un trou.

On notera que :

- L'échelle des classes blocométriques est purement arbitraire
- L'échelle de l'axe Y est exprimée en % du nombre total  $n$  de blocs élémentaires
- Le même résultat, représenté en valeurs cumulées, donne la représentation classique d'une distribution blocométrique.

### 3. QUELQUES REMARQUES CONCERNANT LE MODELE

#### 1. Ce modèle prend en compte tous les paramètres clés d'un tir de mine (qualité de l'explosif, géologie, position des trous (maille), séquence d'initiation)

Les caractéristiques de l'explosif (diamètre critique, vitesse de détonation idéale, densité, longueur et diamètre de la charge) sont prises en compte afin de calculer de champ de pression sur la paroi du trou de mine. Les caractéristiques mécaniques de la roche (module de Young, coefficient de poisson, résistance en traction et compression, densité) qui sont nécessaires pour faire se propager l'onde de contrainte, sont également incluses dans le modèle.

Pour ce faire, on utilise un procédé de calcul par différences finies, ce qui permet de prendre en compte les variations des caractéristiques du rocher dans l'espace et le temps. Chaque cube élémentaire de roche du modèle peut être affecté de ses caractéristiques propres. A titre d'exemple, un des modules du logiciel DNA-Blast permet de d'affecter la géologie autour d'un trou à partir du log d'un trou obtenu lors de la foration.

Le modèle utilisé pour décrire l'onde de contrainte issue d'une charge cylindrique de longueur finie est basé sur le découpage de ladite charge en cylindres élémentaires de longueur égale au diamètre du trou. Pour chaque charge élémentaire un modèle de propagation d'onde à source sphérique est appliqué. L'interaction des ondes issues de chaque source se fait par superposition linéaire en décalant chacune d'elle d'un temps égal au diamètre du trou divisé par la vitesse de détonation.

#### 2. Ce modèle donne la distribution blocométrique de chaque trou et permet d'obtenir la distribution globale du tir ainsi qu'un fuseau de dispersion par concaténation de l'ensemble des courbes élémentaires.

Le modèle permet d'obtenir un distribution blocométrique propre à chaque trou du tir (chargement d'explosif par trou, géologie locale au trou et volume adressé défini par sa maille associée à son temps d'initiation – on notera que la maille utilisée est une maille réelle et non théorique ; c'est-à-dire la distance à la face libre créée par la détonation des trous précédents). La distribution blocométrique du tir s'obtient en additionnant les distributions élémentaires de chaque trou par classe puis en construisant la distribution cumulée globale du tir.

#### 3. Le modèle se calibre facilement a posteriori, à partir de mesures de terrain obtenues sur tout ou partie du tas abattu

Comme nous l'avons vu, le modèle permet d'obtenir une distribution blocométrique en échelle relative, chaque trou du tir ayant sa propre distribution. Pour calibrer le modèle, il suffit de caler l'échelle horizontale (taille des classes blocométriques) d'un trou ou d'un groupe de trou. Ce calage se fait en ajustant uniquement la taille de la plus grande classe, celle ou on atteint les 100% de passant. On notera  $K$  le coefficient de proportionnalité entre la taille simulée et la taille réelle de la plus grande classe.

Il est aussi possible d'ajuster précisément la forme de la courbe pour tenir compte de la non linéarité du mécanisme de fragmentation, si celle-ci est trop importante. Pour cela on calcule une fonction de transfert

$$F(\text{classe}) = \frac{\text{Distribution\_réelle}(\text{classe})}{\text{Distribution\_Théorique}(\text{classe})}$$

La connaissance de ces deux coefficients  $K$  et  $F(\text{classe})$  permet de calibrer le modèle pour une simulation future. On notera que cette calibration n'affecte pas l'influence des paramètres et qu'elle s'effectue une fois la simulation terminée. Elle n'est donc pas du tout pénalisante et peut être réalisée a posteriori, ce qui correspond à la réalité du terrain : le résultat blocométrique du tir n'est connu qu'une fois celui-ci réalisé et mariné.

#### **4. Le modèle prend en compte la séquence d'initiation et son influence sur les interférences d'ondes**

Un des aspects les plus importants du modèle est la prise en compte de la séquence d'initiation. Le modèle de fragmentation pour un trou s'appuie sur les effets de l'onde de contrainte qui traverse le volume de roche autour dudit trou. Il suffit donc de remplacer, pour chaque trou, l'onde élémentaire par la résultante des ondes de l'ensemble du tir au droit du trou pour obtenir l'influence de la séquence d'amorçage sur le volume du trou considéré. Si l'on reprend l'analogie de la berge endommagée par la vague, le dommage est créé par la combinaison de l'ensemble des vagues qui vient frapper la berge.

### III. Validation du modèle :

La première question qui vient immédiatement à l'esprit lorsque l'on présente une telle approche, est de connaître sa validité. En d'autres termes, les prédictions d'un tel modèle sont elles proches de la réalité et, sachant que modèle possède des imperfections, de combien s'écarte t-il de la réalité. Les deux exemples ci-dessous permettent de se faire une bonne idée de son degré de validité.

*(Pour des raisons de confidentialité le nom des mines est remplacé par un nom générique.)*

#### A. Cas A : modélisation de la fragmentation.

Sur la mine A, trois tirs ont fait l'objet d'un suivi particulier et d'une mesure de fragmentation in situ grâce à de l'analyse d'images mais aussi grâce à une opération de tamisage « manuel » de certaines parties du tas, de façon à affiner en particulier la quantification des particules fines. Il est à noter que la mesure de fragmentation in situ pour ces tirs n'a été réalisée que sur une portion du volume abattu et non pas sur sa totalité. La mesure concerne des zones situées au cœur du tir. Les distributions bolométriques obtenues ne sont donc représentatives que d'une partie du tas abattu.

Le protocole de validation du modèle est le suivant :

1. Modélisation du tir n°1
2. Calibration du modèle à l'aide des mesures in situ du tir n°1  
*(La calibration se fait à partir des courbes moyennes mesurées et simulées)*
3. Modélisation du tir n°2 en utilisant la calibration obtenue grâce au tir n°1
4. Modélisation du tir n°3 en utilisant la calibration obtenue grâce au tir n°1
5. Comparaison des résultats modélisés et mesurés pour le tir n°2
6. Comparaison des résultats modélisés et mesurés pour le tir n°3

Les graphiques ci-dessous représentent respectivement, les distributions bolométrique des valeurs mesurées et simulées.

La distribution bolométrique la plus grossière est en rouge, la distribution la plus fine en bleu et la distribution moyenne est en noire.

En analysant, l'effet de la calibration (obtenues à partir des valeurs moyennes mesurées) sur les valeurs hautes et basses de la distribution simulée, on note que les courbes sont très similaires et l'écart de pourcentage sur l'étendue des tailles de fragment n'excède pas 10%.

Cet écart est confirmé par les simulations des tirs n°2 et N°3 comparées aux valeurs mesurées pour les valeurs basses et hautes des distributions ; il est même inférieur (8%) pour la valeur moyenne. Cet écart est plus qu'acceptable, sachant que les valeurs mesurées ne représentent pas la totalité du tas abattu. Le modèle est donc validé et donne des résultats sans précédent.

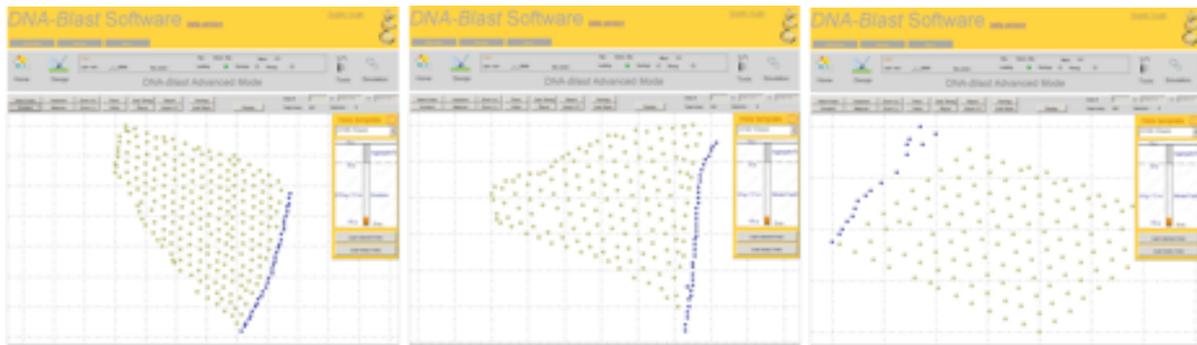


Figure 7 : tirs impliqués dans l'étude de cas

THIS DOCUMENT IS PROVIDED "AS IS," AND COPYRIGHT HOLDERS MAKE NO REPRESENTATIONS OR WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, NON-INFRINGEMENT, OR TITLE; THAT THE CONTENTS OF THE DOCUMENT ARE SUITABLE FOR ANY PURPOSE; NOR THAT THE IMPLEMENTATION OF SUCH CONTENTS WILL NOT INFRINGE ANY THIRD PARTY PATENTS, COPYRIGHTS, TRADEMARKS OR OTHER RIGHTS. COPYRIGHT HOLDERS WILL NOT BE LIABLE FOR ANY DIRECT, INDIRECT, SPECIAL OR CONSEQUENTIAL DAMAGES ARISING OUT OF ANY USE OF THE DOCUMENT OR THE PERFORMANCE OR IMPLEMENTATION OF THE CONTENTS THEREOF.

Les graphiques ci-dessous représentent les distributions blocométriques mesurées (traits pointillés) en comparaison des distributions blocométriques simulées (traits pleins).

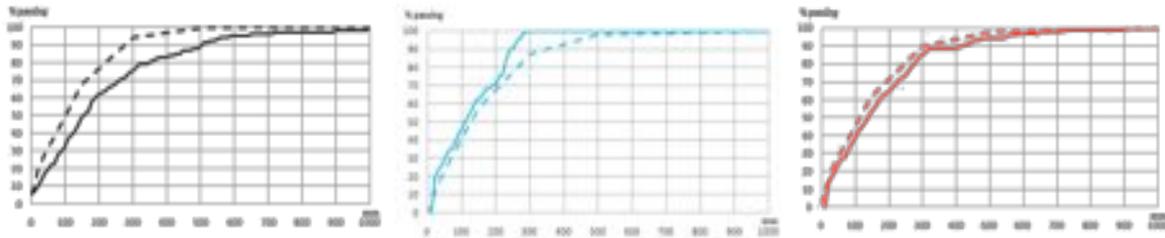


Figure 8: comparaison simulation/mesure de la fragmentation

### B. Cas A : modélisation des vibrations

Sur une carrière, deux sautages strictement identiques sont réalisés à quelques jours d'intervalle sur le même front. Ces deux sautages sont situés à la même distance de la maison « Contier » qui dispose d'un point d'enregistrement sismique permanent.(voir plan de localisation ci-dessous).

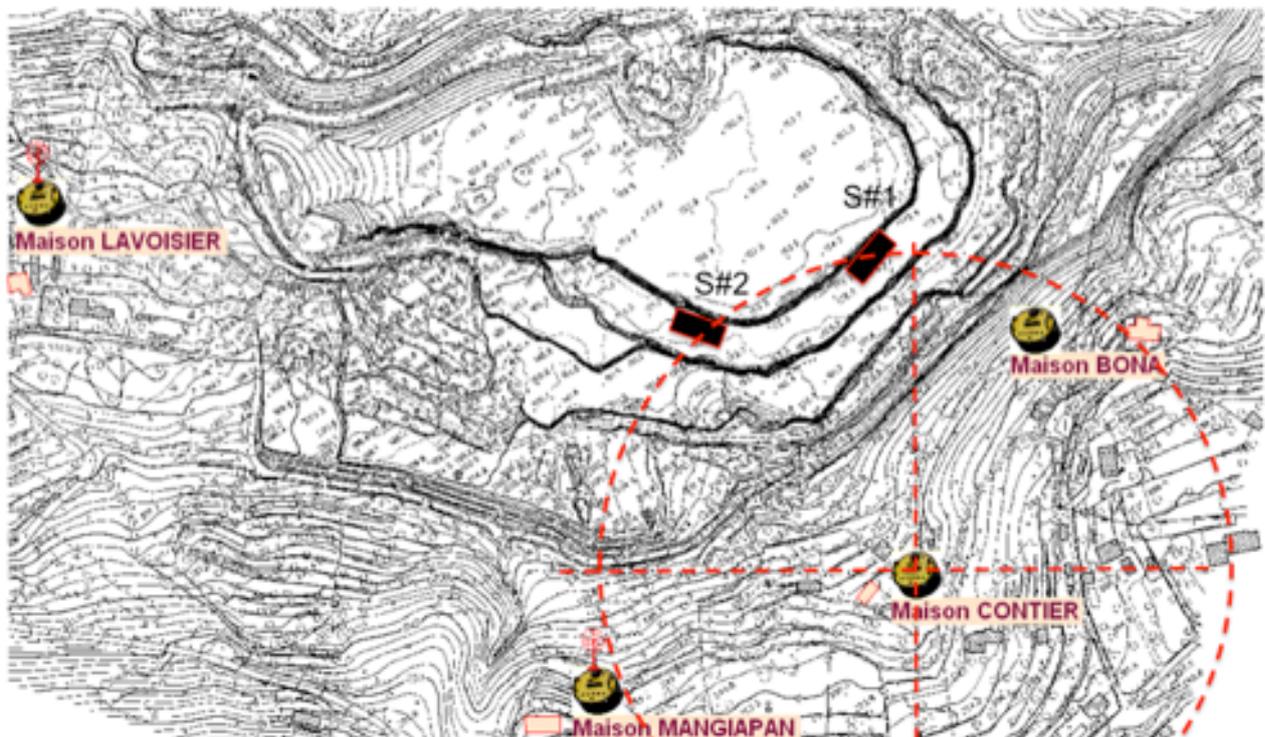


Figure 9 : Plan de carrière avec position des sautages et des sismographes

Les deux sautages strictement identiques (même nombre de trou, même chargement, même séquence de mise à feu) devraient donc produire quasiment le même niveau sismique au point « Contier » d'après la loi de propagation sismiques traditionnelle de type « Chapot », car ils sont situés à la même distance.

Cependant, les enregistrements sismiques montrent une nette différence de l'amplitude maximale de vibrations pour les deux tirs (voir tableau ci-dessous)

Point « Contier »	Sautage #1	Sautage #2	Amplification
PPV	1.3 mm/s	3.8 mm/s	2,9

Figure 10 : mesures de vibrations comparatives

Ce facteur d'amplification de presque 3 est difficilement explicable avec les modèles traditionnels de prévision de vibration.

Le modèle DNA-Blast permet de superposer au plan de la carrière, une carte d'iso amplification des vibrations.

THIS DOCUMENT IS PROVIDED "AS IS," AND COPYRIGHT HOLDERS MAKE NO REPRESENTATIONS OR WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, NON-INFRINGEMENT, OR TITLE; THAT THE CONTENTS OF THE DOCUMENT ARE SUITABLE FOR ANY PURPOSE; NOR THAT THE IMPLEMENTATION OF SUCH CONTENTS WILL NOT INFRINGE ANY THIRD PARTY PATENTS, COPYRIGHTS, TRADEMARKS OR OTHER RIGHTS. COPYRIGHT HOLDERS WILL NOT BE LIABLE FOR ANY DIRECT, INDIRECT, SPECIAL OR CONSEQUENTIAL DAMAGES ARISING OUT OF ANY USE OF THE DOCUMENT OR THE PERFORMANCE OR IMPLEMENTATION OF THE CONTENTS THEREOF.

On note que les facteurs d'amplification obtenus sont en phase avec les vibrations mesurées avec un écart maximal de 20%.

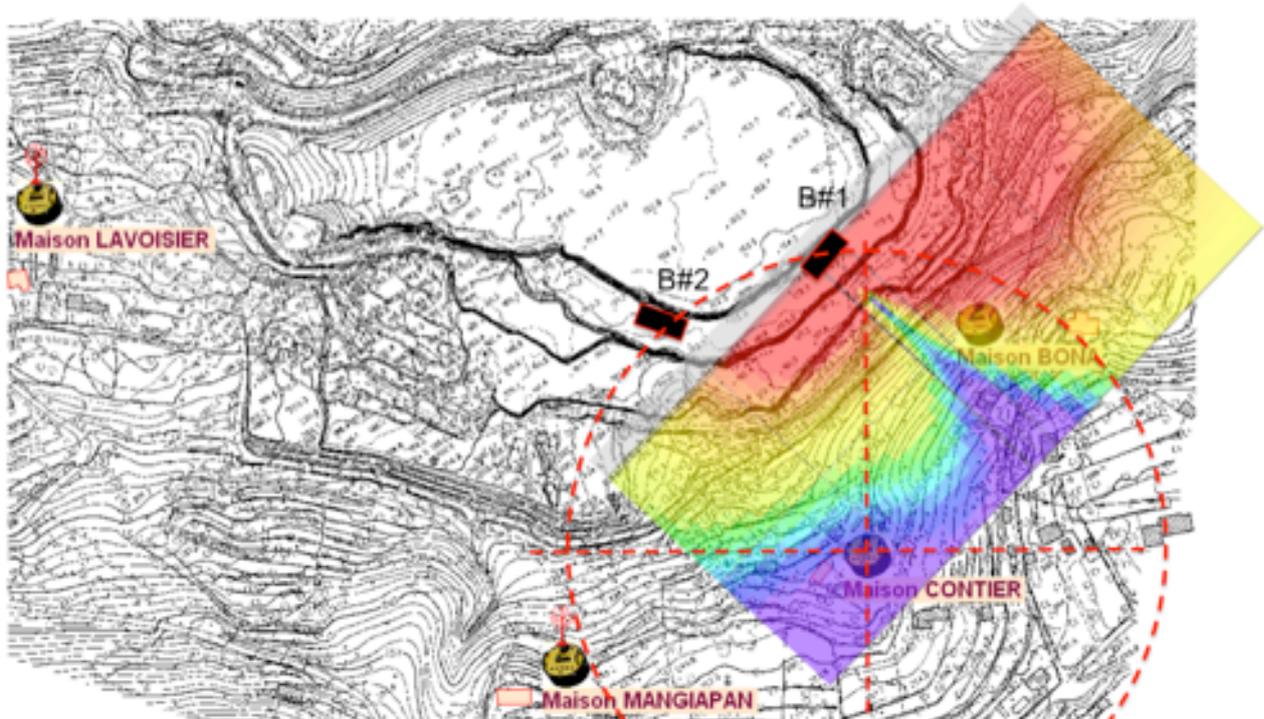


Figure 11 : carte d'iso-vibrations pour le Sautage #1

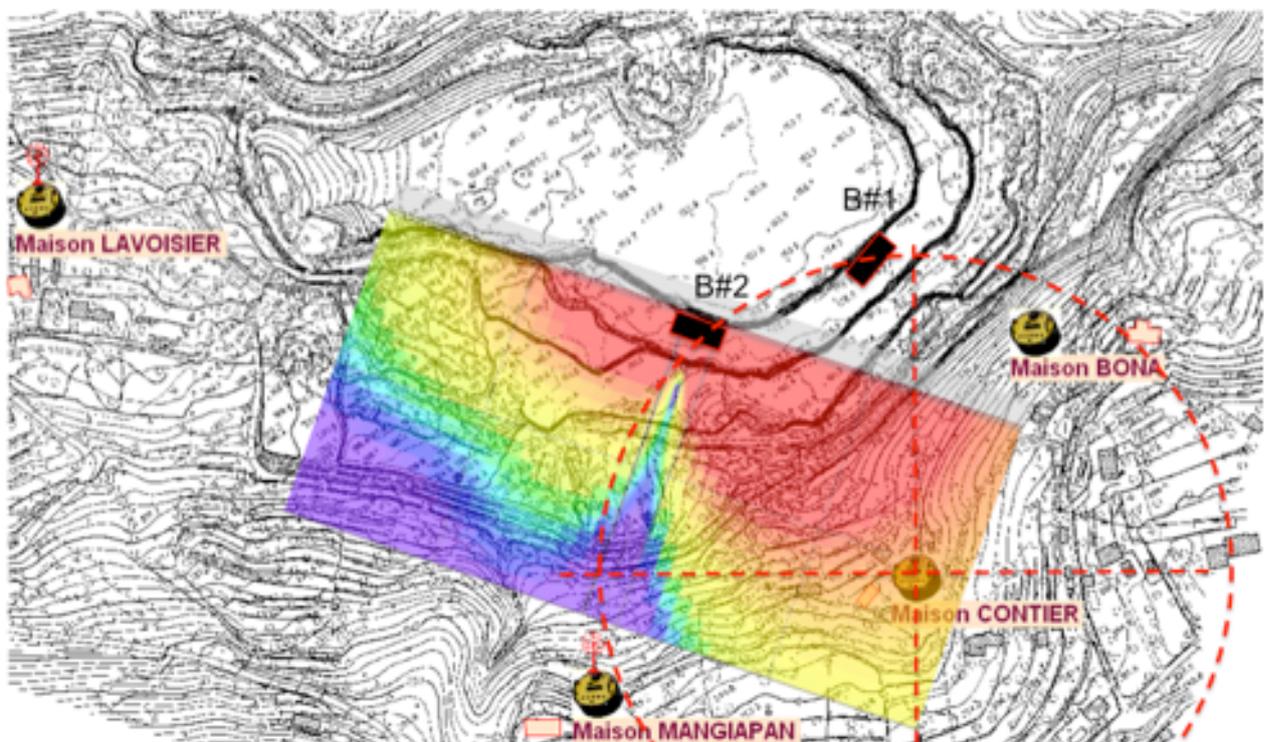


Figure 12 : carte d'iso-vibrations pour le Sautage #2

Point « Contier »	Sautage #1	Sautage #2	Amplification
PPV	1.3 mm/s	3.8 mm/s	2,9
DNA-Blast Simulation	0,9	3,2	3,5

Figure 13 : comparatif vibrations simulées et mesurées

THIS DOCUMENT IS PROVIDED "AS IS," AND COPYRIGHT HOLDERS MAKE NO REPRESENTATIONS OR WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, NON-INFRINGEMENT, OR TITLE; THAT THE CONTENTS OF THE DOCUMENT ARE SUITABLE FOR ANY PURPOSE; NOR THAT THE IMPLEMENTATION OF SUCH CONTENTS WILL NOT INFRINGE ANY THIRD PARTY PATENTS, COPYRIGHTS, TRADEMARKS OR OTHER RIGHTS. COPYRIGHT HOLDERS WILL NOT BE LIABLE FOR ANY DIRECT, INDIRECT, SPECIAL OR CONSEQUENTIAL DAMAGES ARISING OUT OF ANY USE OF THE DOCUMENT OR THE PERFORMANCE OR IMPLEMENTATION OF THE CONTENTS THEREOF.

DNA-Blast is a TBT software – [www.tbtech.fr](http://www.tbtech.fr)  
 Copyright ©2008 DNA-Blast. All Rights Reserved. [www.dna-blast.com](http://www.dna-blast.com)

## IV. Quels nouveaux usages et applications pour le modèle DNA-Blast ?

Une simulation numérique donnant un résultat fiable est un outil qui permet par exemple de faire des choix stratégiques en explorant différentes configurations, sans pour autant réaliser des essais in situ qui sont coûteux car ils nécessitent une instrumentation lourde pour comparer les résultats.

### A. Comparer des produits

**L'exemple ci-dessous montre comment le modèle DNA-Blast peut être utilisé pour se faire une idée de ce qu'apporterait l'emploi de détonateurs électroniques à la place de détonateurs de type non électriques et cela dans la configuration particulière d'un site donné.**

En supposant que l'on s'intéresse à la fragmentation, on souhaite, par exemple, être en mesure de quantifier précisément la différence de pourcentage de passant à 250 mm en tenant compte des caractéristiques exactes de la roche, de l'explosif utilisé, du diamètre des trous, etc. ...

Pour cela une configuration type d'un tir à 6 rangées de 30 trous est utilisée.

Dans le premier cas, celui des détonateurs non électriques, on utilisera une séquence d'initiation classique de 17 ms entre trous de la même rangée et de 42 ms entre rangées.

Pour le cas des détonateurs électroniques, on utilisera une séquence d'initiation dite à temps courts de 2 ms entre trous de la même rangée et de 5 ms entre rangées.

Les simulations mettent en évidence une amélioration de 4% du pourcentage de passant à 250 mm dans le cas des détonateurs électroniques et une réduction de l'écart entre plus gros et plus petit de 28%. En d'autres termes, on obtient une meilleure uniformité de la fragmentation. Reste au décideur à juger si cet écart, une fois quantifié, justifiera ou non le choix du système d'initiation électronique.



17 ms x 42 ms

1 ms x 3 ms

Figure 14: comparaison d'un tir avec détonateurs non-électriques et électroniques

### B. Prédire les niveaux de vibration

**L'exemple ci-dessous montre comment utiliser le modèle DNA-Blast pour gérer les vibrations émises dans l'environnement d'un site.**

La gestion des niveaux de vibration générés par un tir de mine est aujourd'hui une opération bien maîtrisée grâce à la méthode de la charge unitaire et des signatures sismiques. Cependant, si l'on maîtrise parfaitement les niveaux de vibration au niveau des points de contrôles sismiques (qui sont souvent limités à quelques unités), qu'en est-il des autres points ?

L'exemple ci-dessous montre comment utiliser le modèle DNA-Blast pour prédire le niveau de vibration d'un tir de mine sur toute une zone depuis le tir et jusqu'à une distance de 500m.

Un tir de mine type est modélisé ici avec une séquence d'initiation classique utilisant des détonateurs non électriques (17ms entre trous et 42 ms entre rangées). L'ouverture du tir se fait à une extrémité de la première rangée.

DNA-Blast permet d'évaluer le niveau de vibration d'un tir de mines en tout point d'une grille définie par l'utilisateur.

- Dans ce cas une première grille, à gros carreaux, est utilisée pour connaître l'évolution des niveaux de vibration entre la zone de tir et par exemple un village situé à 500 m de celui-ci.
- Une deuxième grille, à carreaux fins, est utilisée pour connaître les niveaux de vibrations au sein du village.
- Une troisième grille, à carreaux fins, est utilisée pour connaître les niveaux de vibrations au niveau d'un pylône électrique se trouvant à proximité de l'exploitation

La simulation montre clairement que les niveaux de vibration ne sont pas uniformes au sein du village et que le pylône est moins sollicité que certaines habitations pourtant bien plus près du tir !

Une deuxième simulation montre, qu'en changeant le point d'initiation, (au centre de la première rangée, cette fois), la répartition sismique est complètement différente.

Ces variations permettent d'expliquer et de comprendre les protestations de certains riverains certains jours, alors que le sismographe indique des niveaux très raisonnables.

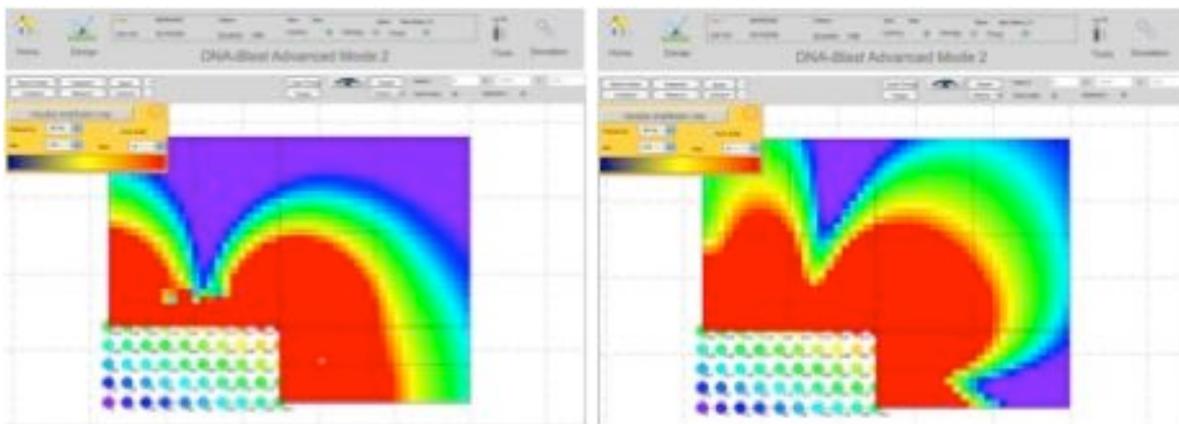


Figure 15: Carte d'amplification de vibrations pour 30hz et 90Hz, ouverture à gauche

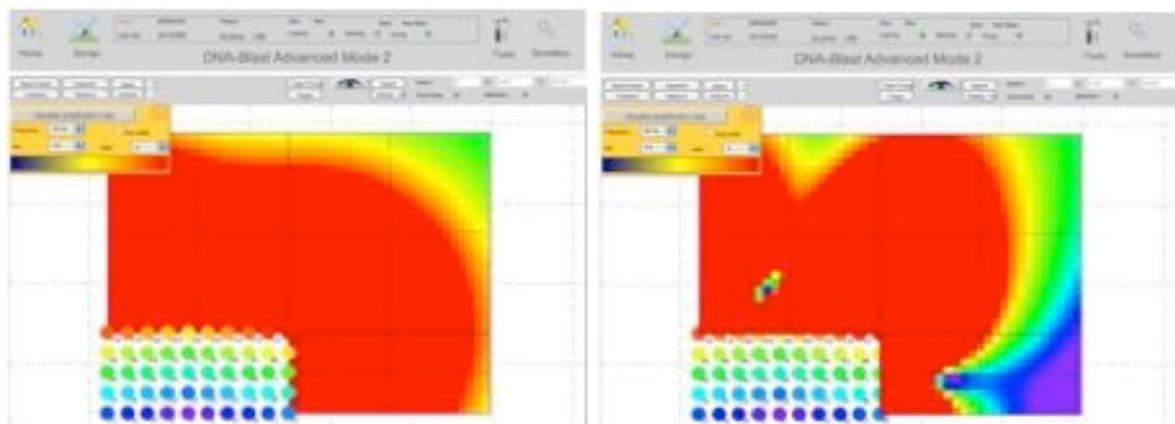


Figure 16: Carte d'amplification de vibrations pour 30hz et 90Hz, ouverture au centre, temps courts

THIS DOCUMENT IS PROVIDED "AS IS," AND COPYRIGHT HOLDERS MAKE NO REPRESENTATIONS OR WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, NON-INFRINGEMENT, OR TITLE; THAT THE CONTENTS OF THE DOCUMENT ARE SUITABLE FOR ANY PURPOSE; NOR THAT THE IMPLEMENTATION OF SUCH CONTENTS WILL NOT INFRINGE ANY THIRD PARTY PATENTS, COPYRIGHTS, TRADEMARKS OR OTHER RIGHTS. COPYRIGHT HOLDERS WILL NOT BE LIABLE FOR ANY DIRECT, INDIRECT, SPECIAL OR CONSEQUENTIAL DAMAGES ARISING OUT OF ANY USE OF THE DOCUMENT OR THE PERFORMANCE OR IMPLEMENTATION OF THE CONTENTS THEREOF.

## C. Optimiser le niveaux de vibration

L'exemple ci-dessous montre comment dans une carrière située sur la commune Burkeville aux USA il est possible de réduire les niveaux de vibration de plus de 50%.

(Etude de cas fournie courtoisement par la société South Technical Services)

La carrière réalise un minage avec les données principales ci-dessous:

- Deux charges par trous de 400 à 500 livres
- Amorçage électronique
- Niveaux sismiques : entre 0,45 et 0,50 inch/s
- Premières habitations situées entre 800 et 1000 pieds
- Roche de type granite



Figure 17 : vue en plan de la carrière de Burkeville

L'objectif visé est de supprimer une charge par trou tout en réduisant le niveau de vibration.

Le principe utilisé est l'optimisation de la séquence d'amorçage à l'aide de la mesure de la signature sismique élémentaire d'un trou. Cette signature sismique sert de base à la recherche de la meilleure combinaison retard entre trou d'une même rangée, retard entre rangées qui minimiseront le niveau de vibration en point donné.

Pour cela, le module optimisation automatique par signature sismique du logiciel I-Blast est utilisé. Ce module prend en compte la position exacte des trous, leur ordre de câblage et la vitesse de propagation des ondes P dans le sol pour effectuer l'optimisation de la séquence d'amorçage.

Ensuite une fois les retards calculés, une simulation numérique de l'influence du point d'ouverture est réalisée. On peut voir très nettement que l'ouverture à gauche du tir donne pour les deux points de mesure (petits carrés) un niveau de vibration inférieur (couleur verte au lieu de jaune/rouge).



Figure 18: I-Blast - module d'optimisation par signature sismique

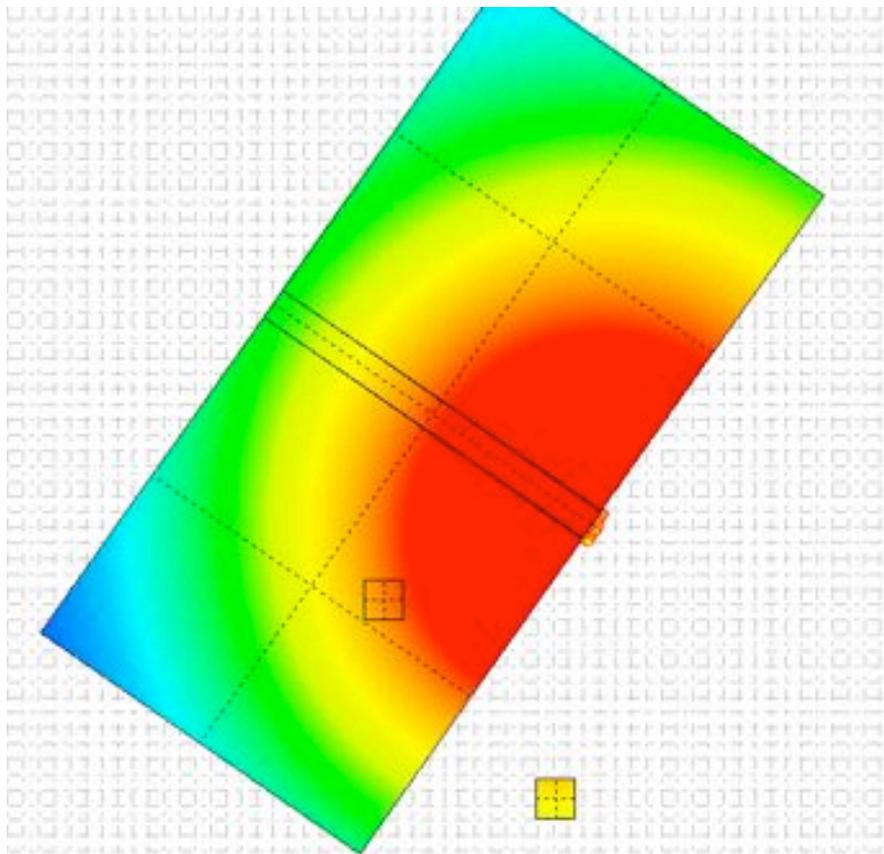


Figure 19: Simulation de la carte d'iso vibration avec ouverture à droite

THIS DOCUMENT IS PROVIDED "AS IS," AND COPYRIGHT HOLDERS MAKE NO REPRESENTATIONS OR WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, NON-INFRINGEMENT, OR TITLE; THAT THE CONTENTS OF THE DOCUMENT ARE SUITABLE FOR ANY PURPOSE; NOR THAT THE IMPLEMENTATION OF SUCH CONTENTS WILL NOT INFRINGE ANY THIRD PARTY PATENTS, COPYRIGHTS, TRADEMARKS OR OTHER RIGHTS. COPYRIGHT HOLDERS WILL NOT BE LIABLE FOR ANY DIRECT, INDIRECT, SPECIAL OR CONSEQUENTIAL DAMAGES ARISING OUT OF ANY USE OF THE DOCUMENT OR THE PERFORMANCE OR IMPLEMENTATION OF THE CONTENTS THEREOF.

DNA-Blast is a TBT software – [www.tbtech.fr](http://www.tbtech.fr)  
 Copyright ©2008 DNA-Blast. All Rights Reserved. [www.dna-blast.com](http://www.dna-blast.com)

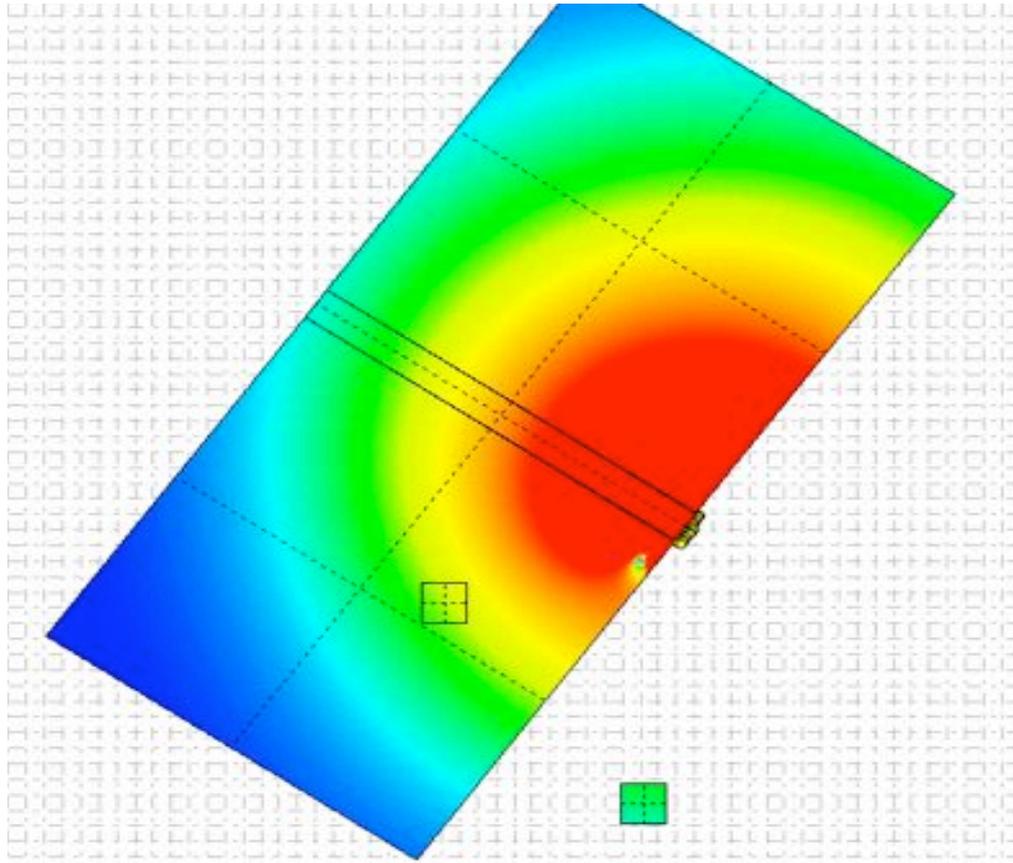


Figure 20: Simulation de la carte d'iso vibration avec ouverture à gauche

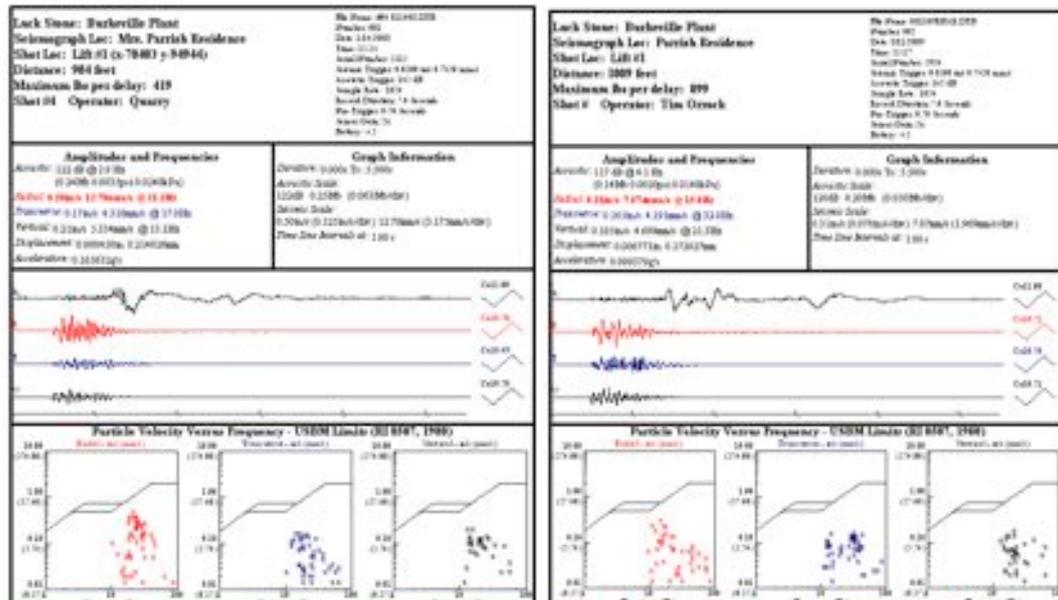


Figure 21: résultats comparatifs des tirs

THIS DOCUMENT IS PROVIDED "AS IS," AND COPYRIGHT HOLDERS MAKE NO REPRESENTATIONS OR WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, NON-INFRINGEMENT, OR TITLE; THAT THE CONTENTS OF THE DOCUMENT ARE SUITABLE FOR ANY PURPOSE; NOR THAT THE IMPLEMENTATION OF SUCH CONTENTS WILL NOT INFRINGE ANY THIRD PARTY PATENTS, COPYRIGHTS, TRADEMARKS OR OTHER RIGHTS. COPYRIGHT HOLDERS WILL NOT BE LIABLE FOR ANY DIRECT, INDIRECT, SPECIAL OR CONSEQUENTIAL DAMAGES ARISING OUT OF ANY USE OF THE DOCUMENT OR THE PERFORMANCE OR IMPLEMENTATION OF THE CONTENTS THEREOF.

Le tableau ci-dessous montre le résultat comparatif d'un tir effectué dans la même zone avant optimisation et du tir optimisé. Le tir optimisé montre une réduction du niveau de vibration de 40% pour une charge unitaire doublée et une distance tir capteur équivalente.

	Tir du 14/01/08	Tir du 11/08/09
Amplitude sismique	0,50 pouce/sec	0,31 pouce/sec
Charge par retard	419 livres	1009 livres
Distance	904 pieds	899 pieds

#### D. Optimiser la fragmentation

L'exemple ci-dessous montre comment dans une mine à ciel ouvert, il est possible d'améliorer la fragmentation grâce à la séquence d'amorçage.

Le principe utilisé est la réalisation d'interférences constructives entre les trous d'une même rangées afin de renforcer l'endommagement créé par chaque onde sismique issue de chaque trou.

Le module d'optimisation de I-Blast calcul automatiquement le retard entre trous afin créer le réseau d'interférences constructives et cela à partir de la position des trous (théorique ou réelle) et de la vitesse des ondes P dans le massif (voir illustration ci-dessous)

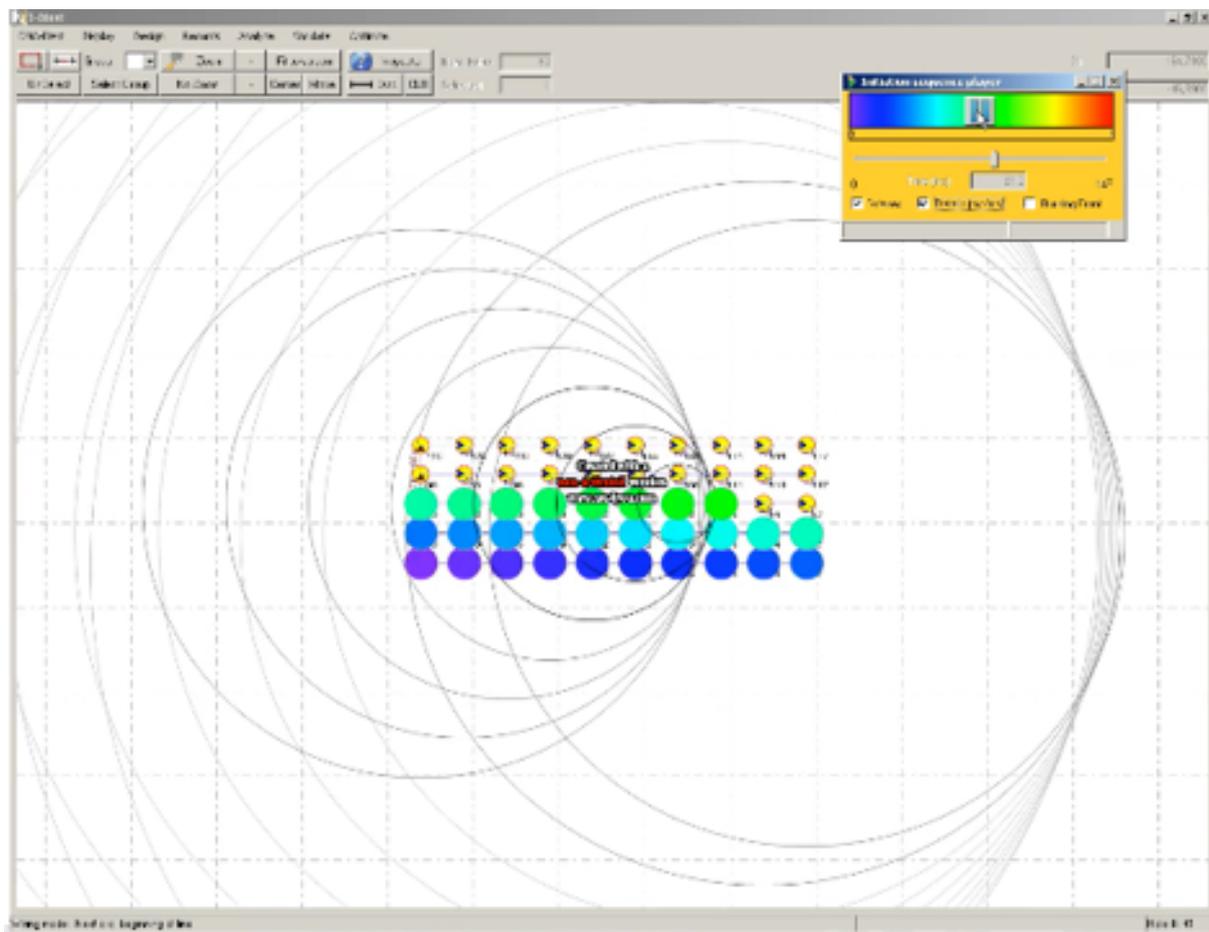


Figure 22: schéma d'interférences constructives simulé par I-Blast

Les graphiques ci-dessous montrent la comparaison de la simulation de l'endommagement sur la première rangée du front de taille entre la séquence de mise à feu traditionnelle (17msx42ms, amorçage non électrique) et la séquence de mise à feu optimisée (3ms x 42ms, amorçage électronique).

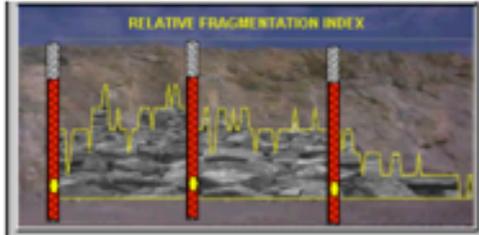
La courbe jaune tracé sur le front de taille représente un indice de fragmentation proportionnel à l'endommagement de la roche. Pour la séquence à 17 ms on observe un indice relativement homogène avec une

THIS DOCUMENT IS PROVIDED "AS IS," AND COPYRIGHT HOLDERS MAKE NO REPRESENTATIONS OR WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, NON-INFRINGEMENT, OR TITLE; THAT THE CONTENTS OF THE DOCUMENT ARE SUITABLE FOR ANY PURPOSE; NOR THAT THE IMPLEMENTATION OF SUCH CONTENTS WILL NOT INFRINGE ANY THIRD PARTY PATENTS, COPYRIGHTS, TRADEMARKS OR OTHER RIGHTS. COPYRIGHT HOLDERS WILL NOT BE LIABLE FOR ANY DIRECT, INDIRECT, SPECIAL OR CONSEQUENTIAL DAMAGES ARISING OUT OF ANY USE OF THE DOCUMENT OR THE PERFORMANCE OR IMPLEMENTATION OF THE CONTENTS THEREOF.

valeur moyenne relative de 38,6%. Pour la séquence optimisée à 3ms entre trous, cet indice grimpe à 54,5% mais sa répartition est moins homogène.

## Standard delay :17 ms

DNA Fragmentation Index : 38.6 %



## Optimized delay :3 ms

DNA Fragmentation Index : 54.5 %

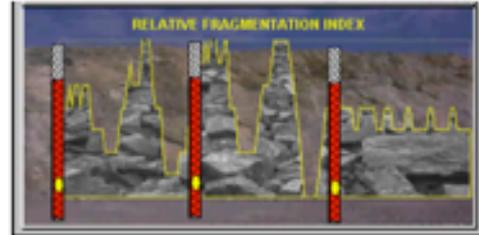


Figure 23: comparaison de séquences d'amorçage pour la fragmentation

Les deux graphiques ci-dessous représentent les écarts de distribution blocométrique entre les deux séquences, l'un étant le résultat de la simulation numérique réalisée par I-Blast, l'autre étant le résultat des mesures effectuées par la mine.

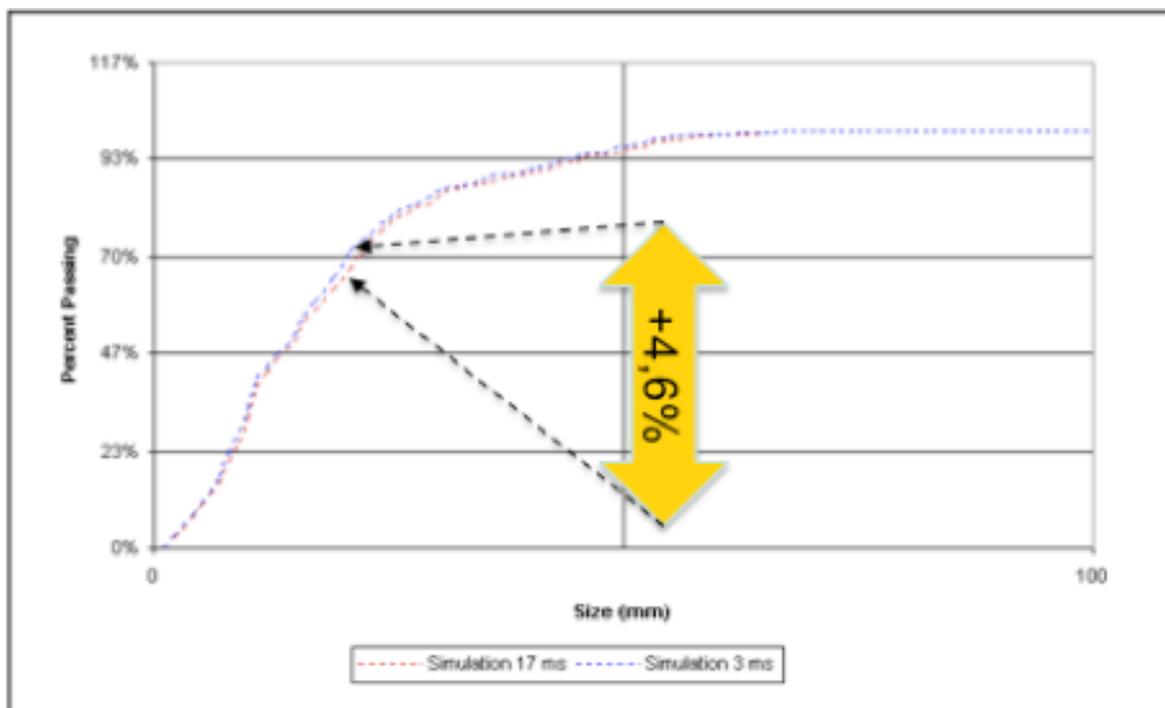
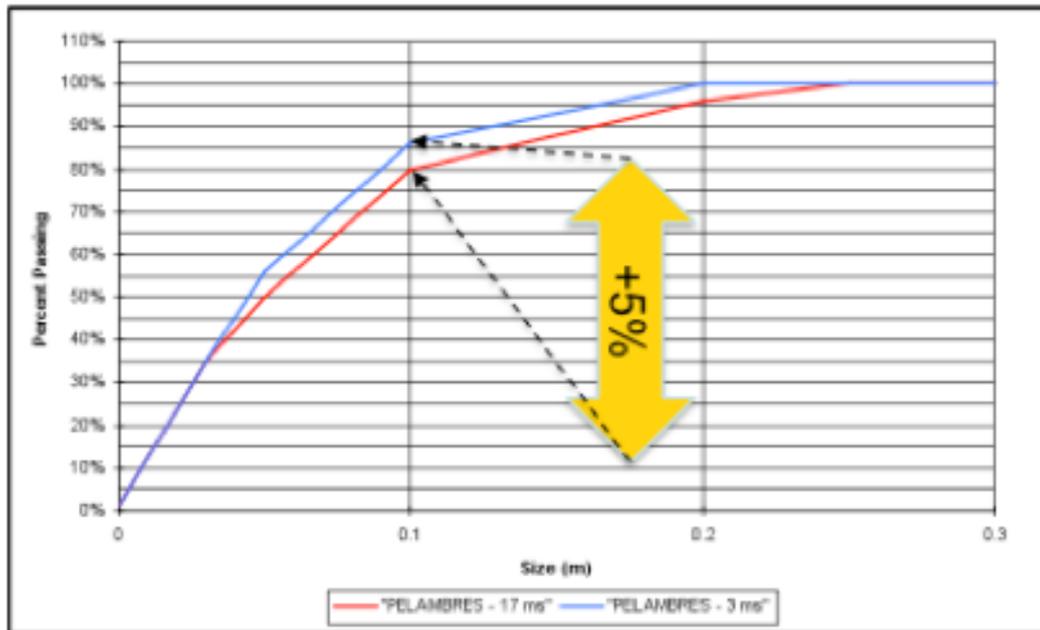


Figure 24: I-Blast simulation de fragmentation comparée entre 17ms et 3ms entre trous



**Figure 25: comparaison de la fragmentation mesurée entre un retard entre trous de 17ms et 3ms**

Ce résultat mesuré de +5% de pourcentage de passant à 100mm par rapport au 4,6% estimés par simulation, se traduit par une économie annuelle de 25 millions de dollars sur le poste concassage, broyage (estimé par la mine).



**Figure 26: photo du tir optimisé pour la fragmentation**

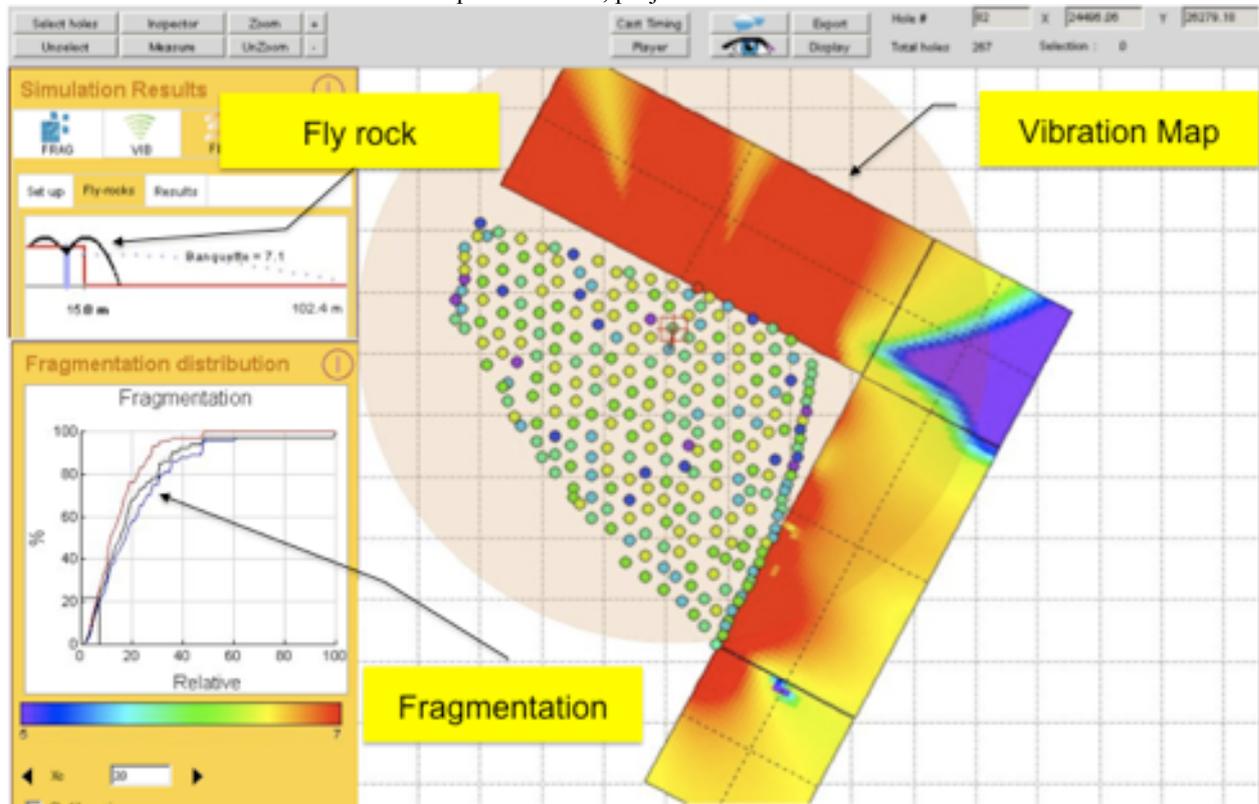
THIS DOCUMENT IS PROVIDED "AS IS," AND COPYRIGHT HOLDERS MAKE NO REPRESENTATIONS OR WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, NON-INFRINGEMENT, OR TITLE; THAT THE CONTENTS OF THE DOCUMENT ARE SUITABLE FOR ANY PURPOSE; NOR THAT THE IMPLEMENTATION OF SUCH CONTENTS WILL NOT INFRINGE ANY THIRD PARTY PATENTS, COPYRIGHTS, TRADEMARKS OR OTHER RIGHTS. COPYRIGHT HOLDERS WILL NOT BE LIABLE FOR ANY DIRECT, INDIRECT, SPECIAL OR CONSEQUENTIAL DAMAGES ARISING OUT OF ANY USE OF THE DOCUMENT OR THE PERFORMANCE OR IMPLEMENTATION OF THE CONTENTS THEREOF.

DNA-Blast is a TBT software – [www.tbtech.fr](http://www.tbtech.fr)  
 Copyright ©2008 DNA-Blast. All Rights Reserved. [www.dna-blast.com](http://www.dna-blast.com)

## Conclusion

La modélisation des effets complets d'un tir de mine, longtemps rêvée, est aujourd'hui une réalité. Le logiciel DNA-Blast modélise les effets d'un tir dans leur globalité en s'appuyant sur un ensemble de mécanismes élémentaires (gènes) reliés entre eux par leur paramètres physiques communs et cela en fonction du temps.

Par conséquent, le modèle permet une approche du mécanisme de fragmentation des roches tout en modélisant simultanément les effets secondaires tels que vibrations, projections ou effets arrière.



**Figure 27: Simulations conjointes des vibrations, de la fragmentation et des projections**

Validé sur des configurations réelles, les simulations effectuées ne s'écartent que de quelques pourcents des valeurs mesurées ce qui permet de considérer le modèle comme fiable et utile.

DNA-Blast Software est aujourd'hui un modèle unique prenant en compte l'ensemble des paramètres clés intervenant dans un tir de mine : géologie, plan de foration, chargement des trous avec qualité des explosifs et bourrage et surtout la séquence d'initiation ou d'amorçage qui fait cruellement défaut dans les modèles actuels.

Cela ouvre de nouvelles perspectives dans l'optimisation des tirs. Ainsi chaque mineur, chef de poste ou manager, a maintenant la possibilité d'évaluer les effets d'une configuration de tir en terme de résultat technique ou de sécurité et d'en évaluer l'impact financier et cela en quelques clics sur internet, car c'est aussi cela l'innovation du modèle DNA-Blast. (Version d'évaluation en accès libre sur [www.dna-blast.com](http://www.dna-blast.com)).

Le dernier apport du modèle DNA-Blast provient de son caractère numérique liant les résultats d'un tir aux paramètres clés de sa conception et qui permet de réaliser des simulations inverses. C'est à dire, de partir du résultat escompté (fragmentation, vibrations, projections,...) pour déterminer les paramètres initiaux de mise en œuvre (séquence d'initiation, maille, bourrage,...).

« De l'Objectif à la Conception », tel est certainement le plus fascinant coté du modèle DNA-Blast qui sera détaillé dans un prochain article.

## V. Bibliography

- Bernard, Thierry. "Control of Explosive Energy : Action of the explosive on the surrounding area". Thesis, Institut de Geodynamique URA-CNRS, 1995
- Borg, D. "Emulsion explosive Technology" 5th High-Tech Seminar on Blasting Technology, Instrumentation and explosives Applications, 1994
- Brent, G. "Studies On the effect of burden on Blast Damage" - Fragblast International Journal for Blasting and Fragmentation, vol.6 #2, 2002
- Chapot, P. Study of the vibrations caused by the explosives in the rock solid masses. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1981
- Hadamard, Jacques. Lessons on the wave propagation, 1903
- Chiapetta, R.F. "The use of High-Speed motion-picture photography in evaluating blast design", 6-10 sept. 1993
- Chiapetta, R.F., M. Hammele. "Analytical High Speed Photography to evaluate air decks, stemming retention and gas confinement" - 1<sup>st</sup> Annual High-Tech Seminar – State-of-the-art Blasting Technology Instrumentation and applications, 1989
- Dumay, Daniel. "EXPLO2D - Study and development of the thermodynamic aspects", 1992
- Euvrard, Daniel. "Numerical resolution of the partial derivative equations of physics, mechanics and engineering: Finite differences, finite elements, problems in not limited fields".
- Favreau, R.F., "Generation of strain waves in rock by an explosion in a spherical cavity." Journal of Geophysical Research, vol. 74, p. 4267, 1969
- Floyd, J. "Rockmass response quantification". Daveyfire, Inc.- Weaverland Quarry, Jun. 2001
- Hamdi, E., J. du Mouza, J.A. Fleurisson. "Blasting Energy and Rock Mass Fragmentation" Fragblast International Journal for Blasting and Fragmentation", vol.5 #3, p.183, 2001
- Holmberg R., P-A. Persson. 'Constants for Modelling' Fragblast International Journal for Blasting and Fragmentation, vol.8 #2, 2004
- Holsapple, K. A., "Impact crater scaling laws". NASA Tech. Memo., NASA TM-89810, p. 392-393, May 1987
- Liard, Jean-Jacques. "Efficiency of the stemming in blast-holes", 1993
- Onederra, I. "A fragmentation modelling Framework." Fragblast International Journal for Blasting and Fragmentation, vol.8 #3, p.195, 2004
- Onederra, I., S. Sesen. "Selection of inter-hole and inter-row timing for surface blasting - an approach based on burden relief analysis"
- Ouchterlony, F., S. Nie, U. Nyderg, J. Deng. "Monitoring of large open cut rounds" Fragblast International Journal for Blasting and Fragmentation, vol.1 #1, 1997
- Persson, P-A., R. Homberg, J. Lee. Rock Blasting & Explosives Engineering. Chapter 11 : Blast Performance Control, p.306+, Chapter 4 : Shock Waves and Detonations, Explosive Performance, p.128+
- Rossmannith, H.P. "The Mechanics and physics of advanced blasting-waves, shocks, fracture, damage, impact and profit" – Short Course FragBlast8, May 2006
- Rossmannith, H.P., K. Uenishi. "One-Dimensional block model for bench blasting." Fragblast International Journal for Blasting and Fragmentation, vol.4 #3-4, 2000
- Rossmannith, H.P., A. Daehnke, J.F. Schatz. "On dynamic gas pressure induced fracturing." Fragblast International Journal for Blasting and Fragmentation, vol.1 #1, 1997
- Schmidt & Housen, "Some recent advances in the scaling of impact and explosion cratering" Int. J. Impact Engr. 5: 543-60, 1987.

Segarra, P., J.A. Sanchidrián, L.M. López, J.A. Pascual, R. Ortiz, A. Gómez & B. Smoech. "Analysis of bench face movement in quarry blasting." Explosives and Blasting Technique, Holmberg ed.

Souers, P.C. R. Garza, "Size effect and Detonation Front Curvature." The tenth American Physical Society topical conference on shock compression of condensed matter. AIP Conference Proceedings, Volume 429, pp. 325-328, 1998.

Tosello R., "Shock Waves & Detonation Waves" Detonic courses ISITV, 2005-2006

Vanbrabant, F. "Modelamiento Interaccion de Ondas." Jornadas de Tronadura, 2001

## VI. Annexe : exemples de résultats

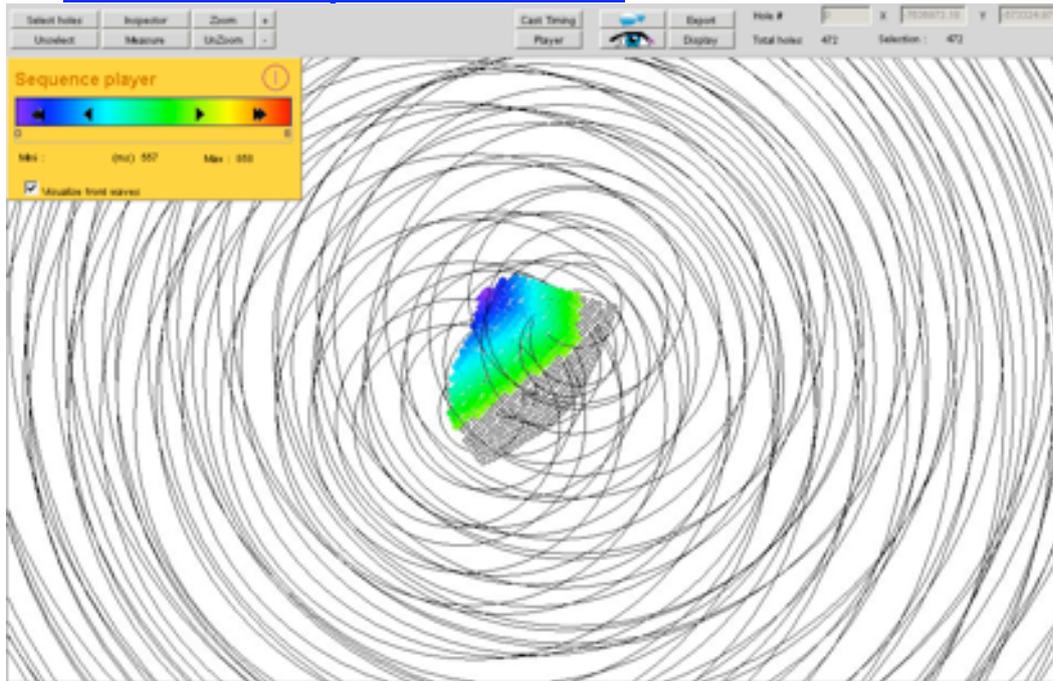


Figure 28: Visualisation d'interférences d'ondes

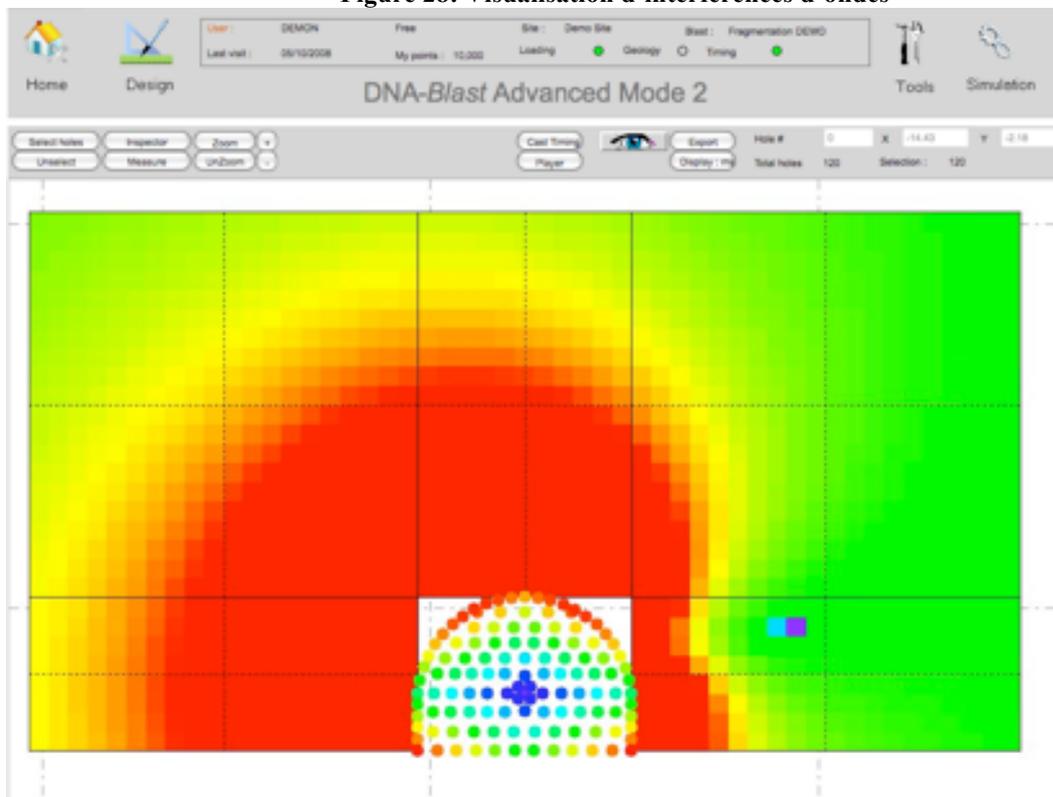
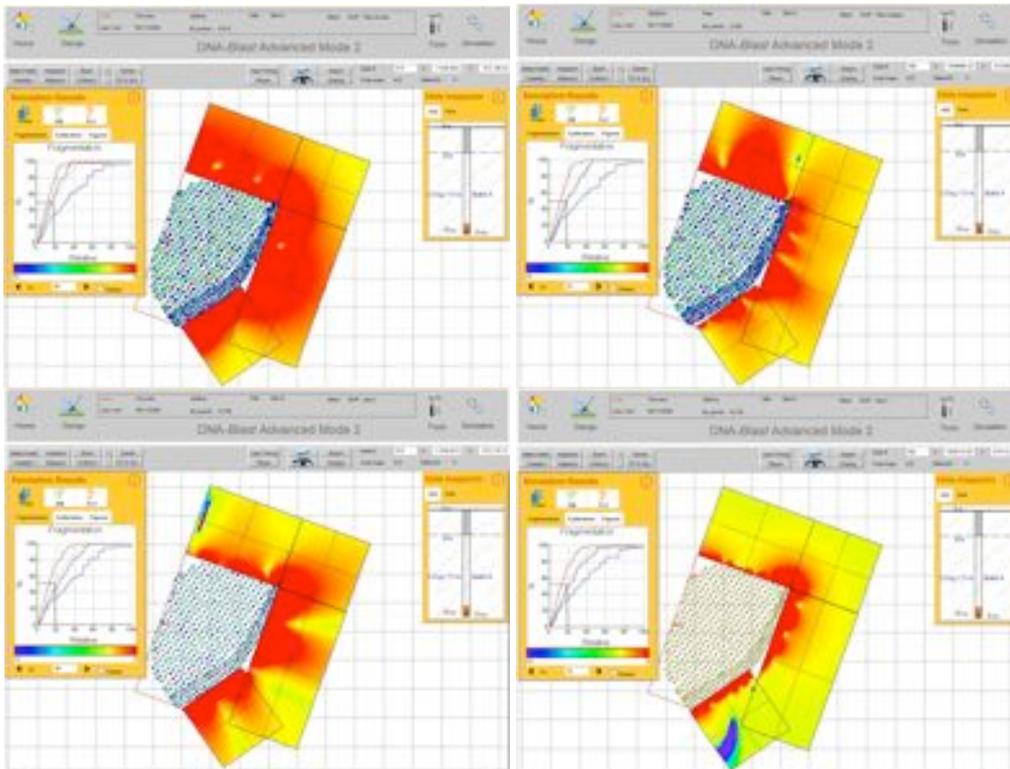


Figure 29: Simulation d'endommagement en tunnel

THIS DOCUMENT IS PROVIDED "AS IS," AND COPYRIGHT HOLDERS MAKE NO REPRESENTATIONS OR WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, NON-INFRINGEMENT, OR TITLE; THAT THE CONTENTS OF THE DOCUMENT ARE SUITABLE FOR ANY PURPOSE; NOR THAT THE IMPLEMENTATION OF SUCH CONTENTS WILL NOT INFRINGE ANY THIRD PARTY PATENTS, COPYRIGHTS, TRADEMARKS OR OTHER RIGHTS. COPYRIGHT HOLDERS WILL NOT BE LIABLE FOR ANY DIRECT, INDIRECT, SPECIAL OR CONSEQUENTIAL DAMAGES ARISING OUT OF ANY USE OF THE DOCUMENT OR THE PERFORMANCE OR IMPLEMENTATION OF THE CONTENTS THEREOF.

DNA-Blast is a TBT software – [www.tbtech.fr](http://www.tbtech.fr)  
 Copyright ©2008 DNA-Blast. All Rights Reserved. [www.dna-blast.com](http://www.dna-blast.com)



**Figure 30: Simulation du champ de vibration en fonction de divers paramètres**

THIS DOCUMENT IS PROVIDED "AS IS," AND COPYRIGHT HOLDERS MAKE NO REPRESENTATIONS OR WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, NON-INFRINGEMENT, OR TITLE; THAT THE CONTENTS OF THE DOCUMENT ARE SUITABLE FOR ANY PURPOSE; NOR THAT THE IMPLEMENTATION OF SUCH CONTENTS WILL NOT INFRINGE ANY THIRD PARTY PATENTS, COPYRIGHTS, TRADEMARKS OR OTHER RIGHTS. COPYRIGHT HOLDERS WILL NOT BE LIABLE FOR ANY DIRECT, INDIRECT, SPECIAL OR CONSEQUENTIAL DAMAGES ARISING OUT OF ANY USE OF THE DOCUMENT OR THE PERFORMANCE OR IMPLEMENTATION OF THE CONTENTS THEREOF.

DNA-Blast is a TBT software – [www.tbtech.fr](http://www.tbtech.fr)  
Copyright ©2008 DNA-Blast. All Rights Reserved. [www.dna-blast.com](http://www.dna-blast.com)