



# **Réduire de 30 à 70% les niveaux de vibrations aux voisinage des carrières : une réalité en 2010**

par Thierry BERNARD (Ingénieur A&M, Docteur en Sciences )

## I. Introduction:

Si la fragmentation des roches à l'aide d'explosif est un phénomène facilement maîtrisable au niveau des exploitations de mines et carrières, on ne peut pas en dire autant pour les effets secondaires des tirs de mine. Les vibrations, les projections et la surpression aérienne restent aujourd'hui des phénomènes indésirables, n'apportant aucune contribution à l'exploitation et pouvant perturber significativement des tiers.

Dans cet article, nous nous intéresserons particulièrement aux vibrations du sol induites par les tirs de mines. En 1994 le législateur a fourni un texte (arrêté du 22 septembre 1994) donnant un cadre réglementaire relatif aux vibrations émises par les tirs de mines dans l'environnement. En simplifiant, pour un signal sismique dont le contenu fréquentiel serait compris entre 5 et 30 Hz, le niveau de vibrations ne doit pas dépasser 10 mm/s. Le respect de ce niveau de vibration dans cette plage de fréquence, assure à l'exploitant de ne pas créer de désordre structurel dans des habitations d'usage courant. Cependant avec la prise de conscience environnementale qui anime la planète depuis une dizaine d'année, Il est courant de voir des exploitations viser des niveaux de vibration inférieurs afin de limiter la gêne ou le ressenti de ces vibrations par les riverains.

Dans cet optique, il n'existe pas vraiment de règle, car la perception humaine d'une vibration n'est pas uniquement liée à son amplitude, mais à un ensemble de paramètres qui incluent la sensibilité propre de chaque individu ainsi que son activité. On notera tout de même que d'après des études menées par ..... et ..... 75% des individus, au cours d'une activité normale d'une journée, corrélerent la perception des vibrations à leur amplitude. C'est donc tout naturellement ce paramètre que nous allons faire varier pour minimiser la perception des vibrations.

## II. Les techniques de réduction des niveaux de vibration

### A. La technique de réduction des niveaux de vibration basée sur la quantité d'explosif

Depuis que l'on utilise de l'explosif, tout le monde a remarqué, en première approximation, que les effets d'une charge d'explosif sont directement liés à la quantité d'explosif qui la constitue. Cette notion intuitive s'applique bien évidemment aux vibrations émises dans l'environnement.

Faisons quelques instants l'analogie entre une pierre jetée dans l'eau et les vagues qu'elle crée avec une charge explosive dans le sol et les vibrations qu'elle génère. On se rend bien compte que plus l'on jette une grosse pierre (emploi d'une grosse charge) plus l'amplitude des vagues (vibrations) sera élevée. Cette constatation physique a fait l'objet de nombreux travaux à travers le monde afin d'établir une relation entre la quantité d'explosif unitaire (« par trou ») employée et l'amplitude des vibrations à une distance donnée de la charge. En France, P. Chapot du LCPC proposa, dans les années 1980, une loi (1) qui depuis s'est imposée dans la majeure partie des études sismiques.

Cette loi s'énonce comme suit : 
$$V = k \left( \frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^\alpha \quad (1)$$

Avec  $V$  amplitude des vibrations,  $D$  distance entre la charge explosive et le point de mesure,  $Q$  la charge unitaire,  $K$  et  $\alpha$  deux paramètres liés à la configuration (principalement le terrain) qu'il faut déterminer pour chaque site. Une fois ces deux valeurs déterminées pour un site donné (ou une zone particulière du site). Il est alors possible d'ajuster pour chaque emplacement d'un tir, la charge unitaire  $Q$  afin de viser un niveau de vibration  $V$ .

Cette méthode, associée à cette loi (1), est utilisée avec succès depuis plus de 20 ans. Elle présente cependant une limite d'emploi technico-économique que nous allons expliquer.

Chapot détermina une valeur moyenne de  $\alpha$  de -1.8.

Pour bien comprendre le phénomène, on peut arrondir cette valeur à -2, alors la loi (1) devient :  $V \cong k \frac{Q}{D^2}$  (2)

On notera que l'amplitude  $V$  est alors directement proportionnelle à la charge unitaire  $Q$  mais aussi inversement proportionnelle au carré de la distance. Ce sont ces deux constatations qui sont à l'origine des limitations. Ainsi pour réduire de 30% un niveau de vibration il faudra réduire la charge unitaire dans les mêmes proportions pour une distance identique, par contre si la distance est réduite de 30% c'est de 200% qu'il faudra réduire la charge unitaire pour conserver le même niveau de vibration !

Ainsi toute tentative de réduire le niveau de vibration pour en minimiser le ressenti se soldera par une diminution importante de la charge unitaire. Si la charge unitaire devient trop petite, l'impact économique sera trop fort ce qui obligera à conserver un niveau de vibration, certes inférieur au niveau réglementaire, mais pas assez bas pour en atténuer le ressenti.

D'autre part les praticiens se sont vite rendus compte que cette loi ne prenait en compte ni la séquence d'initiation, ni le nombre et la position des trous ce qui a débouché sur la méthode suivante :

## [B. La technique réduction des niveaux de vibration basée sur une signature sismique élémentaire.](#)

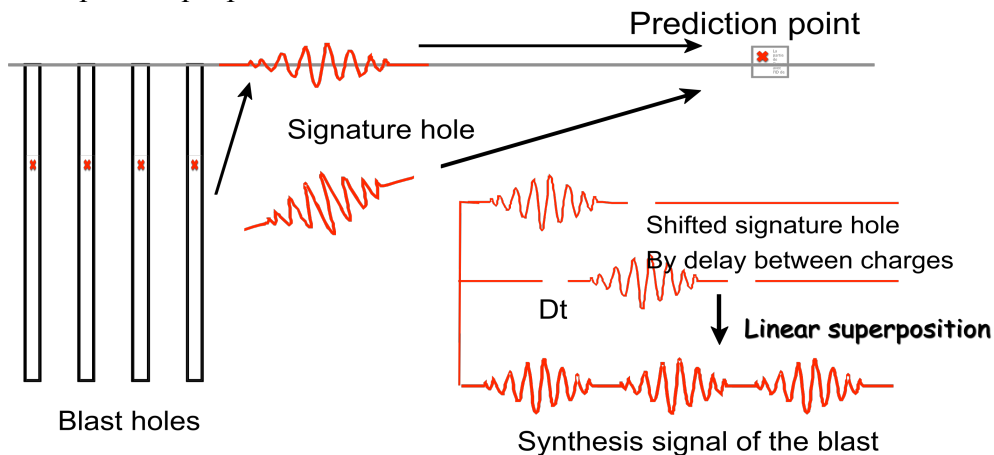
La deuxième méthode est appelée de diverses façons selon les auteurs et les pays. On trouve en outre : méthode du trou signature, méthode de la signature sismique d'un trou, modélisation sismique hybride ou méthode temporelle. Dans tous les cas elle s'appuie sur la signature sismique d'une charge mesurée 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

ismiques décalées, pour obtenir la signature sismique globale du tir. A partir de celle-ci, on obtiendra facilement le niveau de vibration maximal du tir. Pour reprendre l'analogie de la pierre jetée dans l'eau, lorsque l'on jette plusieurs pierres les unes après les autres, l'amplitude des vagues en un point donné est égale à la somme des amplitudes de chacune de vagues créées par chaque pierre.



**Figure 1: Schéma de la méthode «du trou signature ou de la signature sismique élémentaire»**

Cette méthode offre un cadre global pour décrire les vibrations en point donné à partir des vibrations d'une seule charge. De plus elle prend en compte la séquence d'initiation (décalage temporel entre les charges) ainsi que la position relative des trous entre eux (correction du décalage temporel du au temps de parcours des ondes entre la source et le point de mesure). Elle permet par conséquent, en testant différents décalages temporels entre les charges, de déterminer celui qui conduira à l'amplitude minimale des vibrations.

Énoncée dans les années 80 simultanément en Europe et aux Etats Unis elle aurait du s'imposer comme la méthode à utiliser pour réduire les niveaux de vibration car elle ne joue que sur une paramètre immatériel, le temps, et non sur la quantité d'explosif.

Mais, les praticiens se rendent vite compte que pour mettre en œuvre cette méthode il faut disposer de système d'initiation permettant de mettre à feu une charge à une date bien précise que ne permettent pas les détonateurs de l'époque..

Dans les années 80, les détonateurs électroniques sont encore à l'état de concept et c'est seulement depuis moins de 10 ans que cette technologie s'est démocratisée. Elle est aujourd'hui pleinement opérationnelle et disponible au catalogue de tous les distributeurs d'explosifs.

Les praticiens se rendent aussi compte que, bien que le principe soit simple, il faut effectuer de nombreux calculs dans le cas d'un tir de mines avec des dizaines de charges. Dans les années 80, l'utilisation dans ce domaine d'activité de l'ordinateur personnel est au même stade que le détonateur électronique : embryonnaire. Il faudra attendre les années 2000 pour disposer de machines suffisamment puissantes pour effectuer des simulations simples dans un temps raisonnable. Il faut entendre par simulations simples, des simulations qui consistent à additionner les signaux temporels juste en les décalant du retard de mise à feu. Mais les mathématiques nous permettent des calculs bien plus évolués qui permettent de prendre en compte la position relative des trous entre eux associée au contenu fréquentiel. Ces calculs nécessitent une puissance de calcul importante et sont ne réalisables que depuis peu.

### C. Les applications de ces techniques en 2010

Avec la disponibilité des détonateurs électroniques, les sismographes numériques et la puissance des ordinateurs portables, il n'y a plus d'obstacle à la mise en place de ces techniques.

Les trois exemples ci-dessous illustrent les possibilités de contrôle de vibrations grâce au logiciel I-Blast, basé sur la technologie DNA-Blast. Ce logiciel a été développé spécifiquement au cours de ces quatre dernières années afin d'exploiter ce potentiel.

#### 1. MODÉLISATION DES VIBRATIONS – CARTES D'ISO VIBRATION

L'exemple ci-dessous montre comment le modèle DNA-Blast peut établir une carte des niveaux de vibration sur toute une zone depuis le tir et jusqu'à une distance de 500m.

Dans la première partie, un exemple sur un tir de mine fictif est utilisé pour illustrer le principe, puis un exemple sur un cas concret montre comment exploiter le principe.

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 l'extrémité gauche de la première rangée.

I-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 vibration 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, et en le déplaçant au centre de la première rangée, la répartition sismique est complètement différente.

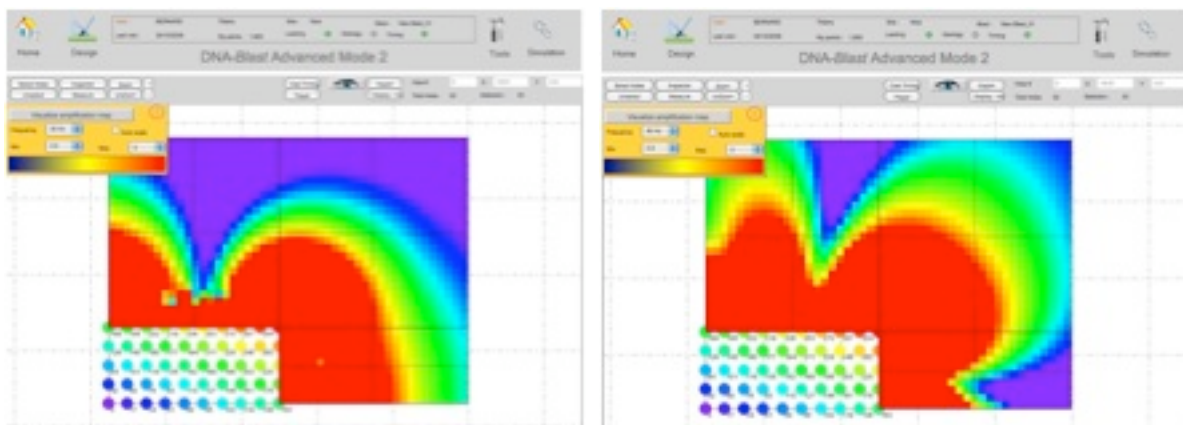


Figure 2: Carte d'amplification de vibrations pour 30hz et 90Hz, ouverture à gauche



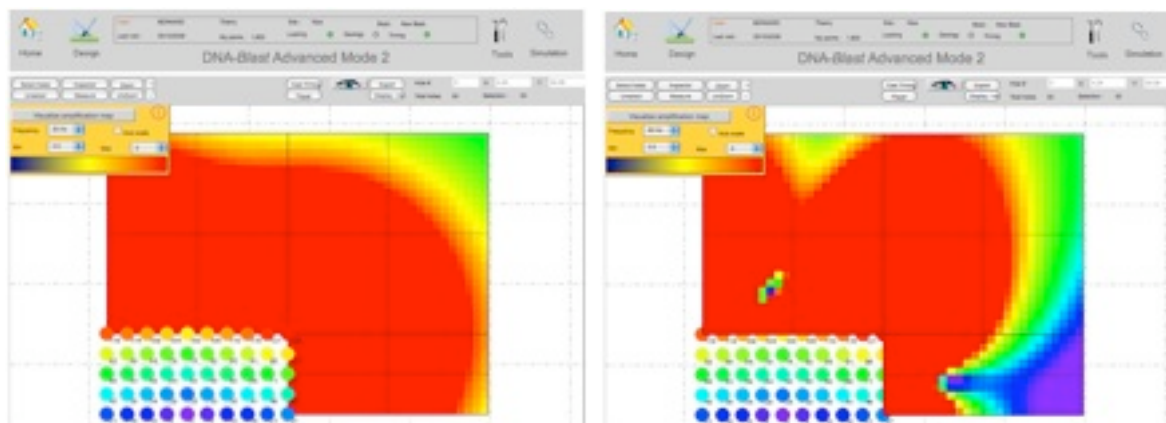


Figure 3: Carte d'amplification de vibrations pour 30hz et 90Hz, ouverture au centre, temps courts

Ces variations permettent d'expliquer et de comprendre les protestations de certains riverains certains jours, alors que le sismographe indique des niveaux très raisonnables ou que le mineur a travaillé à l'identique mais que le résultat ne l'est pas.

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 « BOB » qui dispose d'un point d'enregistrement sismique permanent.(voir plan de localisation ci-dessous).

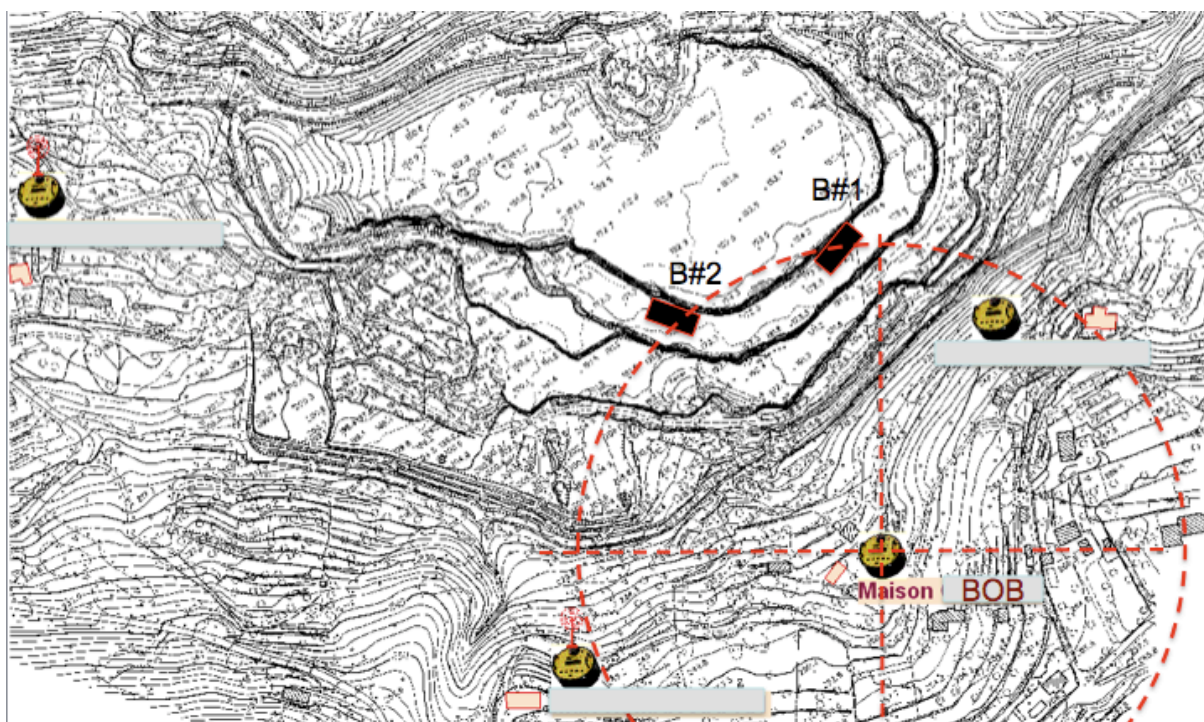


Figure 4 : Plan de carrière avec position des sautages et des sismograpes

Les deux sautages étant strictement identiques (même nombre de trous, même chargement, même séquence de mise à feu), ils devraient donc produire quasiment le même niveau

sismique au point « BOB » d'après la loi de propagation sismique 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 vibration pour les deux tirs (voir tableau ci-dessous)

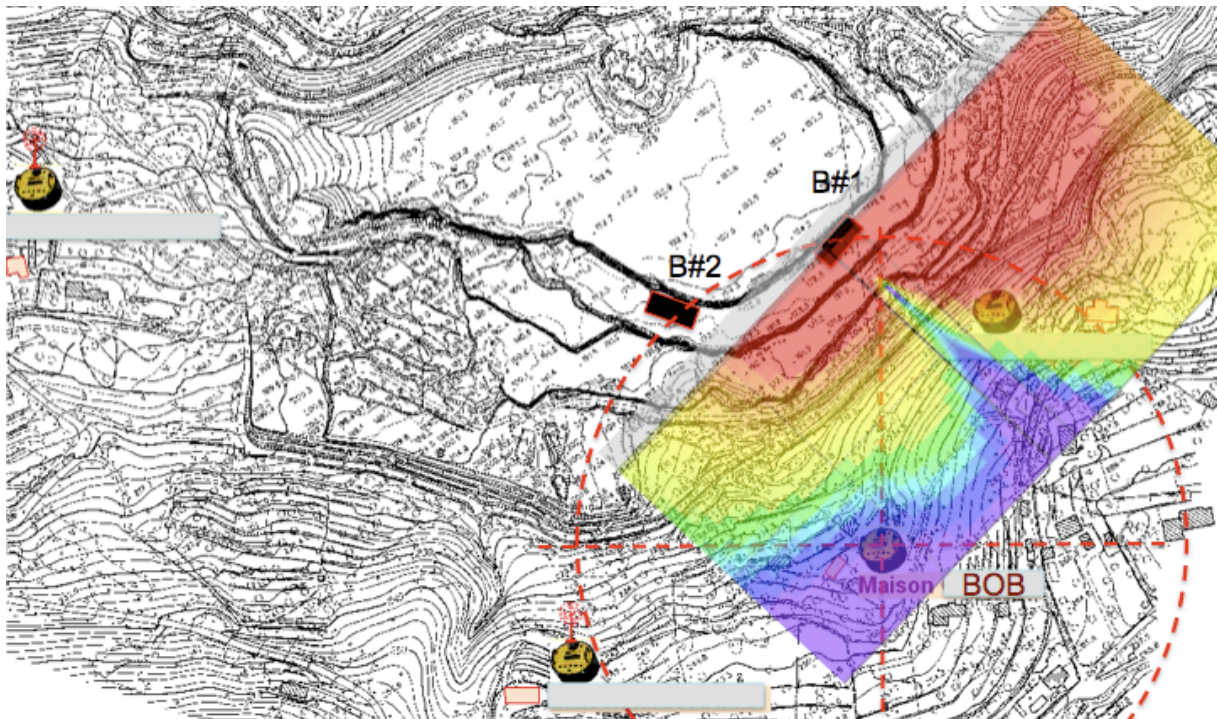
Point « BOB »	Sautage #1	Sautage #2	Amplification
PPV	1.3 mm/s	3.8 mm/s	2,9

**Figure 5 : mesures comparatives des vibrations**

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.

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



**Figure 6 : carte d'iso-vibration pour le Sautage B#1**



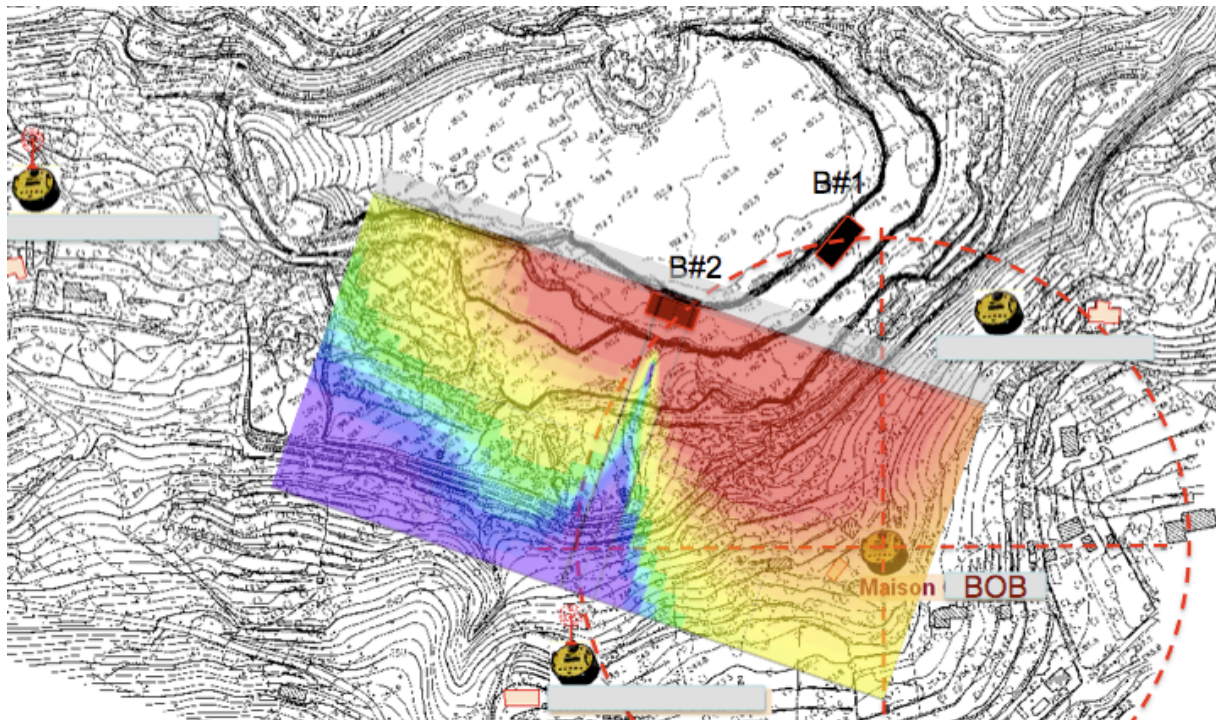


Figure 7 : carte d'iso-vibration pour le Sautage B#2

Point « BOB »	Sautage #1	Sautage #2	Amplification
Vibrations mesurées	1.3 mm/s	3.8 mm/s	2,9
I-Blast Simulation	0,9	3,2	3,5

Figure 8 : comparatif vibrations simulées et mesurées

## 2. RÉDUIRE LE NIVEAU DE VIBRATION : EXEMPLE 1

L'exemple ci-dessous montre comment, dans une carrière située sur la commune de Burkeville aux USA, il est possible de réduire les niveaux de vibration de plus de 50% en utilisant des détonateurs électroniques associés à la méthode du trou signature réalisée avec le logiciel

I-Blast. (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, environ 190 kg
- Amorçage électronique
- Niveaux sismiques : entre 0,45 et 0,50 inch/s soit environ 12 mm/s
- Premières habitations situées entre 800 et 1000 pieds, soit environ 300 m
- Roche de type granite



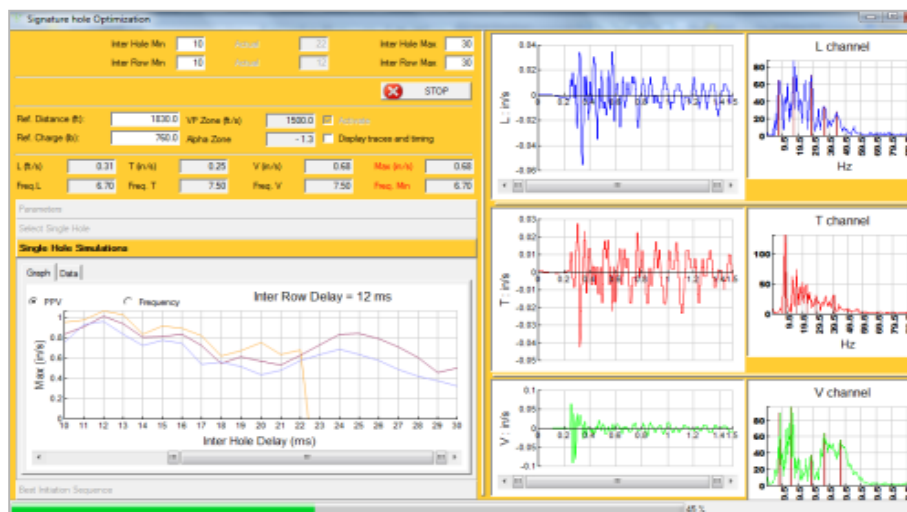


**Figure 9 : vue en plan de la carrière de Burkville**

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 minimisera le niveau de vibration en point donné.

Pour cela on utilise le module optimisation automatique par signature sismique du logiciel I-Blast. 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.

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 10: I-Blast - module d'optimisation par signature sismique**

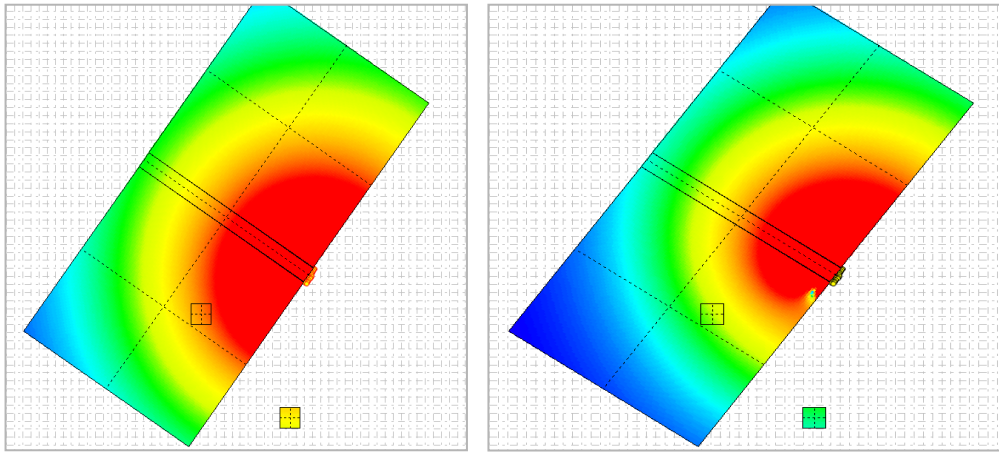


Figure 11: Carte d'iso vibration : comparaison d'ouverture à droite et à gauche

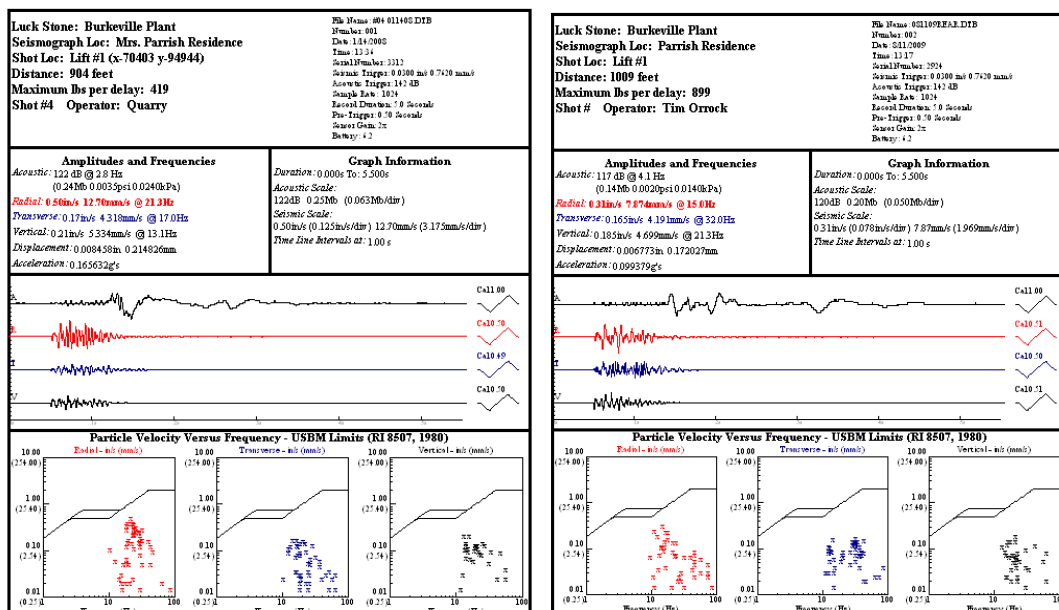


Figure 12: résultats comparatifs des tirs

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

	Tir du 14/01/08 avant optimisation	Tir du 11/08/09 après optimisation	Variation
Amplitude sismique	12,7 mm/s	7,8 mm/s	-38 %
Charge par retard	189 kg	454	+140 %
Distance	298 m	296 m	0 %

Depuis, la carrière continue d'utiliser la méthode et maintient les mêmes niveaux de vibration avec la même charge unitaire.

### 3. RÉDUIRE LE NIVEAU DE VIBRATION : EXEMPLE 2

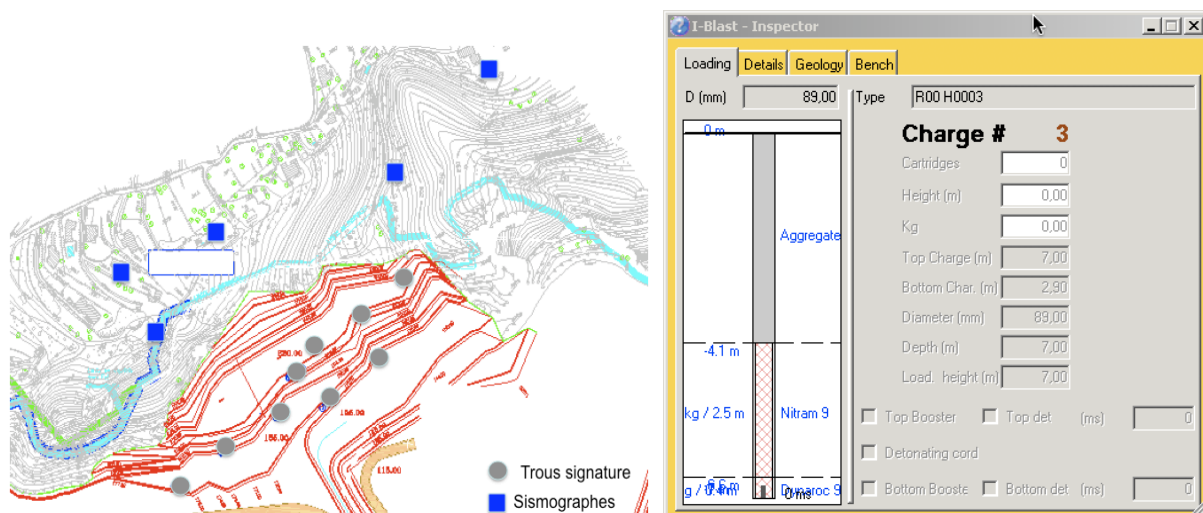
L'exemple suivant se passe dans une carrière du Sud de la France. Il démontre comment la méthode du trou signature, poussée à l'extrême, utilisée conjointement avec des détonateurs électroniques et réalisée avec le logiciel I-Blast, permet une réduction significative des vibrations avec une précision de prévision des résultats.

*(Pour des raisons de confidentialité les noms ont été changés et les niveaux de vibration exprimé en %)*

Les tirs sont situés à une distance d'environ 200 m des habitations et la configuration moyenne d'un tir est la suivante :

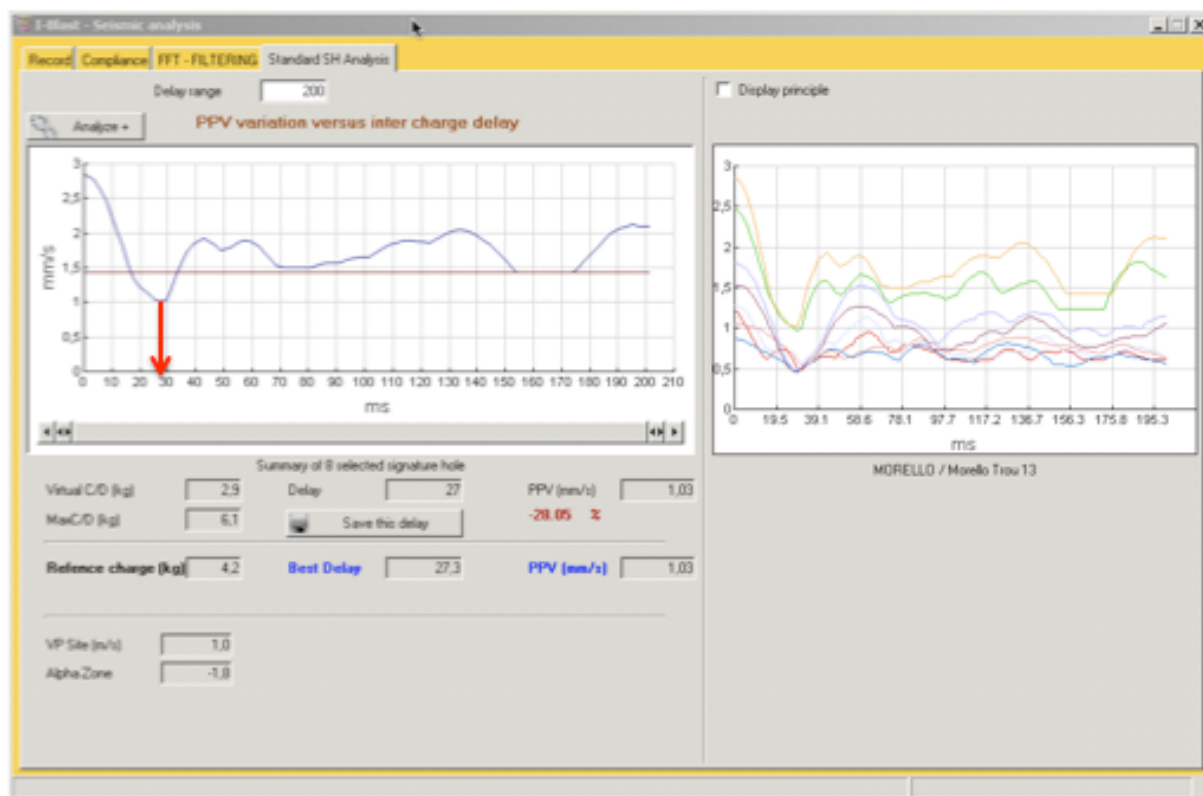
- Hauteur de front de 4 m
- Une charge par trous de 4 kg
- Amorçage séquentiel électrique
- Niveaux sismiques : 100 %
- Premières habitations situées vers 200 m
- Roche de type calcaire

Une campagne de « trous signatures » réalisée sur l'ensemble de la zone sensible a permis de rechercher pour chaque zone le retard optimal entre trous afin de minimiser les vibrations.



**Figure 13: Emplacement des trous signature et détail de chargement d'un trou**

Le graphique ci-dessous donne un exemple, pour une zone spécifique, du choix d'un retard de 27 ms qui minimise les vibrations :



**Figure 14: Analyse d'un trou signature**

Un premier tir d'essai est ensuite réalisé avec une séquence d'amorçage optimisée à 27 ms et des détonateurs électroniques. Le résultat sismique, exprimé en 100%, est alors de 53% seulement des valeurs initiales, soit une baisse de 47%.

Ce tir réalisé, avec des détonateurs électroniques, de :

- Calibrer le modèle
- Calculer précisément un nouveau retard pour le tir suivant

La calibration du modèle consiste à ajuster la vitesse des ondes P du massif de façon à ce que l'écart entre le niveau de vibration simulé par le logiciel et la valeur mesurée soit le plus faible. Dans le cas présent on obtient une valeur simulée de 51% par rapport au 53% mesurés. Le modèle est considéré comme valide.

L'étape suivante consiste à recalculer l'enregistrement sismique d'un trou signature moyen à partir de l'enregistrement sismique du tir complet. Cette étape délicate, appelée déconvolution en mathématique, permet d'obtenir une signature sismique qui intègre la géologie du terrain du dernier tir et l'ensemble des paramètres de celui-ci.

A partir de cette nouvelle signature sismique et de la position exacte des trous (levé topographique) une nouvelle séquence d'initiation optimale peut être calculée. Dans cet exemple, le nouveau retard est de 21 ms.

Le tir sera réalisé et le niveau de vibration mesuré sera (en niveau relatif) de seulement 35% de la valeur initiale pour une valeur simulée estimée à 36 %



AU FINAL, ON AURA REDUIT LE NIVEAU DE VIBRATION DE 30 à 64 % SELON LES ZONES.

### **III. Conclusion**

Le contrôle des niveaux de vibration par la méthode du « trou signature » est un complément indispensable à la méthode de la charge unitaire pour qui veut continuer à baisser son niveau de vibration sans baisser sa charge unitaire.

La méthode prend tout son sens depuis que les détonateurs électroniques sont disponibles. Ils trouvent la leur utilisation principale (celle pour laquelle ils ont été originellement conçus) grâce à leur possibilité de programmation du retard d'initiation et à leur précision intrinsèque inférieure à la milliseconde.

Associé à un logiciel de simulation numérique puissant capable de déterminer les retards de mise à feu optimum pour minimiser les niveaux de vibrations, il est possible réduire de 30% ou plus les niveaux de vibration sans changer la charge unitaire d'un tir.

#### **IV. Bibliographie**

Bernard, Thierry. "Control of Explosive Energy : Action of the explosive on the surrounding area". Thesis, Institut de Geodynamique URA-CNRS, 1995

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

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+

N Djordjevic, A Kavetsky, A Scott, Blast Design Optimization to Minimize Vibration of Structures, FRAGBLAST 90, Brisbane August 26-31

REAMER S. K., HINZEN K.-G., STUMP B. W., Near-source characterization of the seismic wavefield radiated from quarry blasts Revue, Geophysical journal international ISSN 0956-540X 1992, vol. 110, no3, pp. 435-450

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