

## GEOLOGIE, PARAMETRES DE TIR ET DEGRE DE FRAGMENTATION DES ROCHES.

### 4.0. INTRODUCTION.

Il n'est pas facile de dresser une liste totalement exhaustive des paramètres influençant la fragmentation lors de l'abattage à l'explosif, la bibliographie est très foisonnante sur ce sujet. La liste ci-dessous sera donc partielle et les influences des paramètres de tir seront examinées dans le cadre de cette étude « statistique » dans la mesure où ils ont évolué dans la pratique des tirs sur les carrières DMD et ALZO.

La géométrie du tir (espacement, banquette, hauteur), la quantité d'explosif, la séquence d'amorçage, la direction du tir par rapport aux plans de discontinuités du massif, les mines de pied et le nombre de rangées seront donc étudiés. Dans un premier temps, quelques indications bibliographiques seront données puis la méthode d'analyse utilisée, le réseau de neurones, sera explicitée et les « informations contenues » dans les tirs disponibles seront extraites pour nous permettre de comprendre le « fonctionnement » des tirs sur les carrières étudiées.

### 4.1. DONNEES GEOLOGIQUES.

#### 4.1.1. INFLUENCE DES DISCONTINUITES GEOLOGIQUES.

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 (D.02). 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 difficile à observer (voir photo en annexe).

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

#### 4.1.2. INFLUENCE DU TYPE DE ROCHE.

Dans le modèle de Kuznestov (B.14), la nature de la roche est traduite par un facteur que l'on peut faire varier de 0,7 à 1,3.

Equation de Kuznetsov:

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

D<sub>50</sub> diamètre correspondant à 50% de passant.

A variant de 7 à 13 suivant la roche.

Q la charge en équivalent TNT (en kg).

V le volume par trou (en m<sup>3</sup>)

C'est un peu court à mon avis pour caractériser la nature des roches (ou la traduire en équation). Kristiansen (D.24) quantifie par ces travaux l'influence du type de roche sur la

fragmentation à charge spécifique constante. Dans son article, Reichholf (D.26), 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 (D.01) l'utilise dans son travail de thèse concernant la fragmentation à l'explosif d'un béton. Cette « caractéristique intrinsèque » d'une roche, que l'on retrouve également dans Charles (B.26), 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.

## **4.2. PARAMETRES DE TIR.**

### **4.2.1. LA CHARGE SPECIFIQUE.**

C'est l'outil principal pour caractériser un tir.

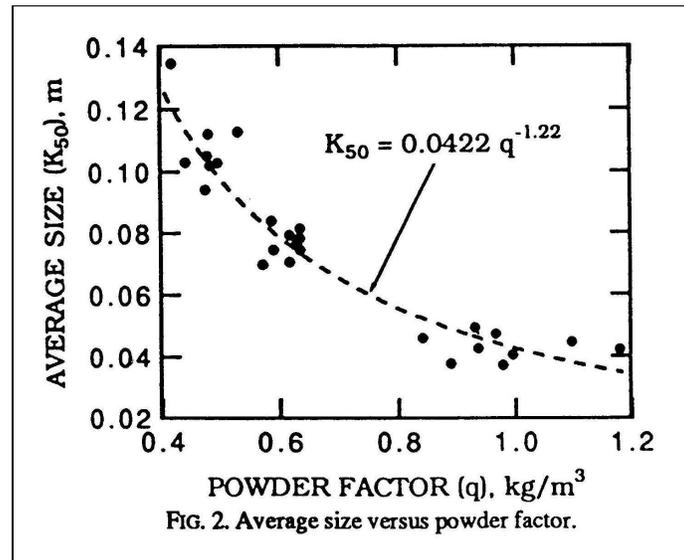


Figure 4.2.1.a.

En Kg/m<sup>3</sup> ou Kg/tonnes, cet indicateur suffit à Kuznestov (B.14), et à d'autres, Stagg (D.23), figure 4.2.1.a, pour estimer le D<sub>50</sub> d'un tir. Il est évident pour tous qu'en augmentant la charge spécifique on diminue le D<sub>50</sub>, le cas contraire ne pouvant être envisagé a priori.

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 (D.24), figure 4.2.1.b, où il montre l'évolution de la fragmentation en fonction de la charge spécifique pour des cubes de béton.

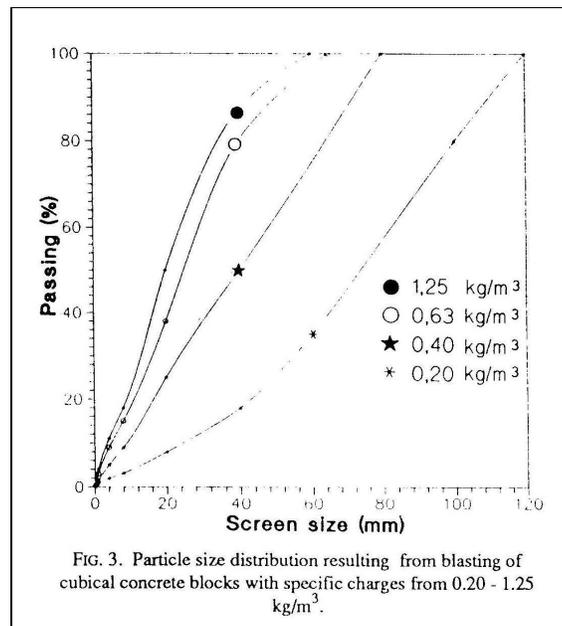


Figure 4.2.1.b.

#### 4.2.2. LA GEOMETRIE DU 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 (D.19), 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.

#### 4.2.3. L'AMORCAGE.

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 (D.09).

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, Rossmann (D.06), par contre les études sur le terrain sont encore peu nombreuses quant à la démonstration d'une efficacité dans la fragmentation des roches, Katsabanis (D.17) et Grant (D.12), figures 4.2.3.a et 4.2.3.b. Au niveau de la maîtrise des vibrations les résultats sont plus probants, Bernard (D.14).

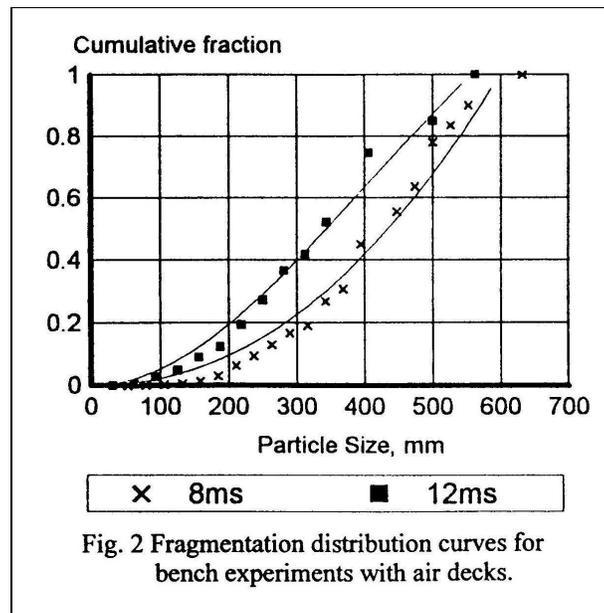
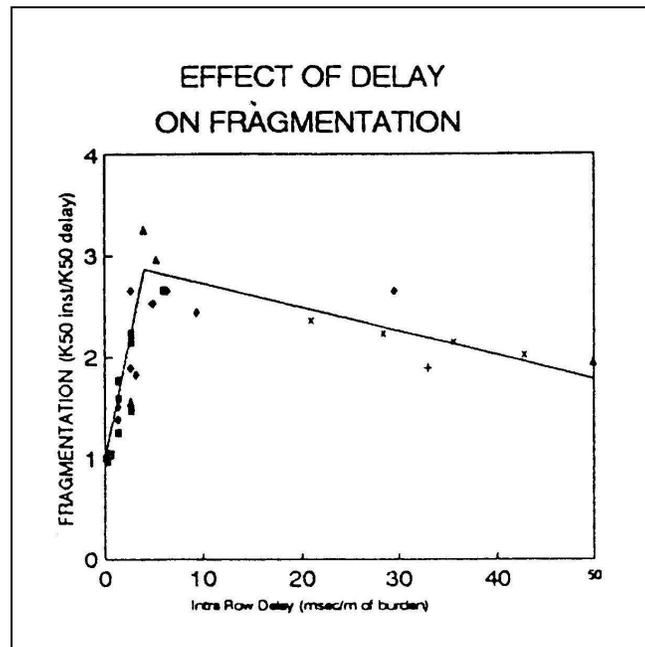


Figure 4.2.3.a.



#### **4.3. METHODOLOGIE PROPOSEE.**

L'index de tir le plus couramment utilisé est la charge spécifique mais il ne peut rendre compte, à lui seul, de la conception d'un tir. Pour réaliser une étude « statistique » plus complète, il faut donc définir d'autres index qui rendront compte de la configuration géométrique du tir, de l'influence conjointe de trous voisins ... Un tir sera donc défini par n index, qui serviront de « vecteur » d'entrée pour l'analyse « statistique » des données. Ces index vont permettre de distinguer les tirs les uns des autres. Le but n'est pas d'interpréter le tir au travers de ces index mais de permettre de placer chaque tir dans un espace à n dimension (plus 2 pour le résultat du tir) pour ensuite calculer une fonction d'interpolation sur les données expérimentales dans cet espace. Ces n index n'ont donc pas nécessairement un sens physique (même si cela est

souhaitable pour une compréhension plus intuitive) mais sont calculés pour que les particularités de chaque tir soient significativement distinguées.

Le vecteur de sortie sera le résultat du tir, la fragmentation, définie par deux paramètres explicités au chapitre 2, le pourcentage de roches fragmentées, index de fragmentation, et l'énergie de fragmentation, index énergétique.

#### 4.3.1. CALCUL DES INDEX DE TIR.

##### 4.3.1.1. LA CHARGE SPECIFIQUE.

Il n'y a pas à expliciter ce facteur car il est si couramment employé qu'il se passe de tout commentaire. Nous utiliserons une formulation en g/m<sup>3</sup>, ces données, poids des explosifs et cubatures, étant présentes directement dans les fiches de tirs disponibles sur les deux carrières.

Dans les deux cas, l'explosif le plus couramment employé est le nitrate fuel. Ceci de façon presque exclusive sur la carrière ALZO. Pourtant, et en particulier sur la carrière DMD, il est indispensable de distinguer au moins deux types d'explosifs qui sont utilisés de manière courante, le nitrate fuel et les gels, Cologel principalement. Il est donc utile, si l'on ne veut pas en venir à une formulation en énergie, de disposer de deux index nous permettant de distinguer les tirs « exclusivement » réalisés avec du nitrate fuel des autres. De plus les énergies des explosifs sont calculées à partir d'essai en piscine et il n'est pas évident que le comportement d'un explosif soit identique ou comparable entre un essai en piscine et un massif rocheux. La capacité de confinement d'un massif rocheux pouvant sensiblement modifier les caractéristiques de l'explosion. La formulation sera donc la suivante :

Soit  $M_n$  la masse de nitrate fuel,  $M_t$  la masse totale des explosifs et  $V$  le volume du tir.

La charge spécifique (CS) sera la somme des masses de tous les explosifs mis en œuvre, divisé par le volume du tir.

$$CS = M_t / V$$

La charge spécifique additionnelle (CSA) sera la proportion du deuxième explosif (en général plus puissant) multiplié par la charge spécifique (CS).

$$CSA = (M_t - M_n) / V$$

##### 4.3.1.2. LA FLECHE.

Le lien entre la hauteur du front, l'espacement des trous, la largeur de la banquette, de la charge spécifique et le résultat du tir est intuitif. Ceci est couramment employé entre autre pour obtenir des tirs à haut rendement de bloc où l'on réduit, par rapport à un tir courant, l'espacement en conservant une charge spécifique comparable, Cappello (D.19). Cette considération pratique, nous devons la traduire sous la forme d'une ou plusieurs quantités.

Nous prendrons le rapport Espacement (E) / Banquette (B) et le rapport Surface de la maille / Hauteur (H) pour caractériser la symétrie du tir. Les deux index calculés seront exprimés en Kg/M<sup>3</sup> comme la charge spécifique. La formulation sera la suivante :

$$IF_1 = CS * E / B = M_t / (B^2 * H)$$

$$IF_2 = CS * (E * B)^{0,5} / H = M_t / \{(E * B)^{0,5} * H^2\}$$

E = espacement, B = banquette, H = hauteur du front, CS = charge spécifique,  $M_t$  = masse totale des explosifs.

##### 4.3.1.3. LA SEQUENCE D'AMORCAGE.

Malheureusement pour cette thèse, les données recueillies pour celle-ci ne comportent pas l'utilisation de micro-retards électroniques. Les numéros de détonateur (électrique et nonel) sont donc séparés par l'intervalle de temps habituel de 25 ms. Pourtant l'influence de ce paramètre est connue. Il y a quatre choses à prendre en compte simultanément pour bien rendre compte de cette influence:

L'espacement des trous,  $E$ .

Le micro-retard utilisé,  $\mu$ .

La vitesse de propagation des ondes de choc,  $V_C$ .

La vitesse de propagation de la fissuration,  $V_f$ .

Considérons une vitesse de propagation des ondes de choc de 5000 m/s et une vitesse de propagation des fissures de 500 m/s pour un espacement de 5 mètres :

Si le micro-retard est de l'ordre de 1 ms il faut tenir compte de manière prépondérante de la somme des ondes de choc.

Si le micro-retard est de l'ordre de 10 ms, il faut tenir compte de manière prépondérante de la « rencontre » des fissurations provenant de trous consécutifs.

On peut retrouver une illustration de cette idée dans la figure 4.2.3.b.

Ceci oblige donc à la création de deux index, index de choc et index de fissuration. Dans le cas de l'index de fissuration, on peut douter de cet effet au-delà des trous immédiatement consécutifs, alors que pour l'index de choc, il est probable que l'interaction puisse être plus lointaine.

Je propose donc de formuler ces index de la manière suivante:

Soit  $\mu$  le micro-retard,  $V_f$  la vitesse de propagation des fissures,  $V_C$  la vitesse de propagation des ondes de choc,  $E$  l'espacement.

Index de fissuration:

**Si  $V_f * \mu > E$  alors  $IF = CS$ .**

**Si  $E \geq V_f * \mu \geq E / 3$  alors  $IF = CS * \{(V_f * \mu) - E / 3\} / (2 * E / 3)$ .**

**Si  $V_f * \mu < E / 3$  alors  $IF = 0$ .**

En considérant que si les fissurations se rencontrent, elles vont réduire le confinement des charges et donc l'énergie transmise au massif. Si les retards consécutifs ne sont pas identiques, on pourra effectuer une moyenne.

Nous discriminons donc les tirs de la manière suivante :

Soit  $t_1$  et  $t_2$  les instants de déclenchement des charges pour les trous voisins 1 et 2,  $\mu = t_2 - t_1$  alors :

Si la fissure provenant du trou 1 arrive au trou 2 avant que celui-ci ne soit déclenché, on considère qu'il n'y a pas d'interaction,  $IF = CS$ .

Si les fissures se rejoignent à une distance du trou 2 supérieure à  $E/3$ , interaction maximum, alors  $IF = 0$ .

Si les fissurations se rejoignent à une distance  $d$  inférieure à  $E/3$  alors  $IF$  est proportionnelle au rapport entre  $d$  et  $E/3$  soit  $IF = CS * \{(V_f * \mu) - E / 3\} / (2 * E / 3)$ .

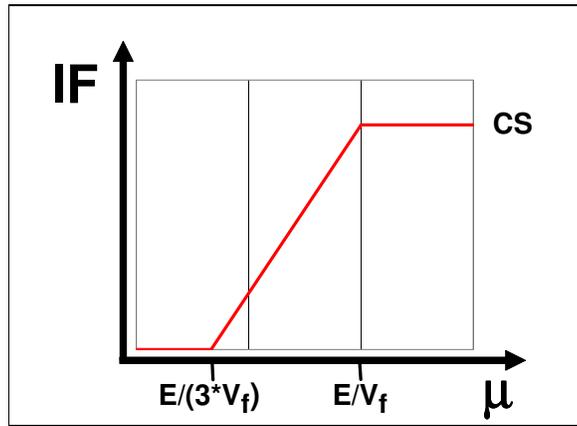


Figure 4.3.1.2.a.

Index de choc:

L'interaction entre trous est calculée de la manière suivante:

**Si  $0,008 \geq \mu + V_c / E_i$  alors  $IC_i = CS * (0,008 - \{ \mu + E_i / V_c \}) / 0,008$ .**

**si  $0,008 < \mu + V_c / E_i$  alors  $IC_i = 0$ .**

$E_i$  est la distance du trou  $i$  au trou pour lequel on fait le calcul ;  $0,008 = 8$  ms.

En considérant que plus l'arrivée des ondes de choc provenant des trous voisins est proche de la détonation initiale plus l'énergie transmise au massif est importante. A noter qu'il n'y a pas de décroissance de l'énergie en fonction de la distance et que le  $\Delta t$  est considéré en valeur absolue.

Pour cet index nous considérons qu'il y a interaction entre deux trous 1 et  $i$  si l'onde de choc provenant du trou  $i$  arrive au trou 1 avec un décalage  $\Delta t$  ( $\Delta t = \mu + V_c / E_i$ ) par rapport à la détonation du trou 1 inférieure à 8 ms. Cette valeur de 8 ms est souvent choisie pour déterminer si les amorçages sont simultanés ou non dans la pratique.

Si le  $\Delta t$  est supérieur à 8 ms alors  $IC_i = 0$ , il n'y a pas d'interaction.

Si  $\Delta t = 0$ , l'interaction est maximum  $IC_i = CS$  (calcul théorique seulement car il faut que  $\mu = 0$  et  $E_i = 0$ ).

Si  $\Delta t$  est compris entre 0 et 8 ms alors  $IC_i = CS * (0,008 - \{ \mu + E_i / V_c \}) / 0,008$ .

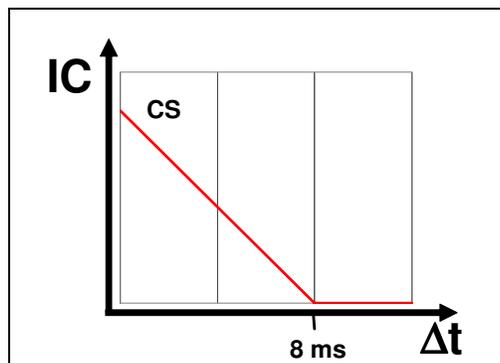


Figure 4.3.1.3.b.

L'ensemble des trous voisins devra être sommé et on y ajoute celui pour lequel on fait le calcul.

$$IC = CS + \sum_i (IC_i).$$

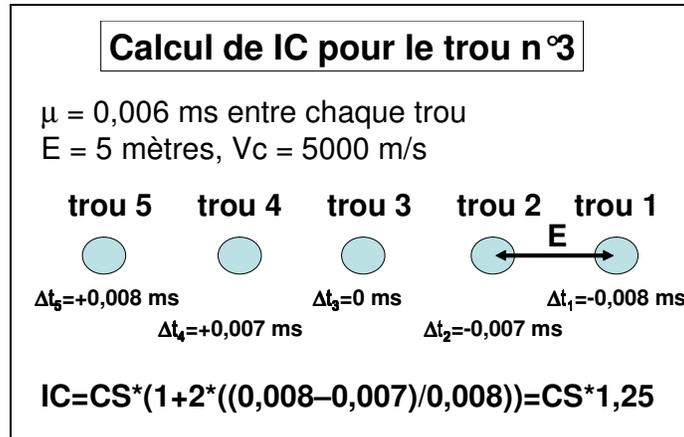


Figure 4.3.1.3.c.

Si la configuration varie, on effectue une moyenne sur l'ensemble des trous.

#### 4.3.1.4. LE NOMBRE DE RANGEES.

Souvent cité comme facteur influençant positivement la fragmentation (énergie utile de fragmentation augmentant). Nous prendrons la formulation suivante:

**IR = CS, pour une rangée.**

**IR = CS \* (1+1/2), pour deux rangées.**

**IR = CS \* (1+2/3), pour trois rangées** et ainsi de suite en considérant les volumes soumis à deux rangées d'explosifs.

On considère donc que le volume compris entre deux rangées d'explosifs est soumis à une charge double. Soit Q la quantité d'explosif totale mise en œuvre et V le volume du tir, alors pour deux rangées on a :

$$IR = ( Q/2 + 2 * Q / 2 ) / V = 3/2 * CS.$$

Les tirs sur plusieurs rangées sont donc nettement distingués des tirs sur une rangée par cet index.

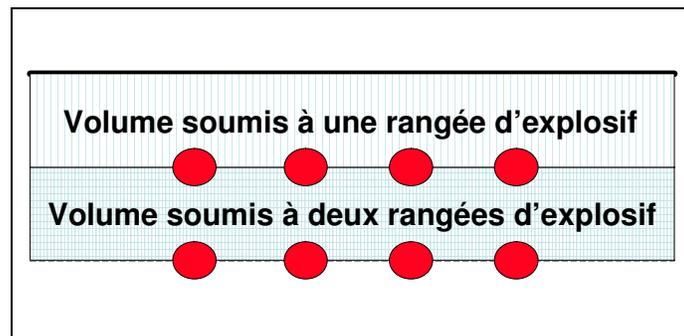


Figure 4.3.1.4.a.

#### 4.3.1.5. LES MINES DE PIEDS.

La présence ou l'absence de mine de pied à une influence certaine sur la planéité du carreau mais aussi sur le confinement des charges. On peut envisager une formulation basée sur l'espacement du « découpage » de la ligne de pied, soit:

**IP = CS \* (nb de mine verticale/ nb de mine horizontale)**, s'il y a des mines de pied.

**IP = 2 \* CS**, s'il n'y en a pas.

Cette formulation permet de nettement différencier les tirs ayant une mine de pied par mine verticale ( IP = CS ) des tirs n'ayant pas de mine de pied ( IP = 2 \* CS). S'il y a plus d'une mine de pied par mine verticale alors le confinement des charges explosives décroît. Donc une formulation qui permet de traduire cette décroissance est la suivante :

**IP = CS \* (nb de mine verticale / nb de mine horizontale).**

#### 4.3.1.6. LA POSITION DE L'AMORÇAGE.

L'importance de la position et de la méthode d'amorçage sur le confinement des charges est connue. On peut estimer par exemple à + 30% l'énergie supplémentaire ainsi dégagée pour un amorçage fond de trou, Thum (D.09).

La formulation pourra être la suivante:

**IA = CS (1+1/3)** pour un amorçage fond de trou.

**IA = CS** pour un amorçage latéral.

#### 4.3.1.7. INDEX DE REPARTITION.

Tous ces index sont liés à la quantité d'explosif mis en œuvre mais il est tout à fait possible que l'efficacité du tir soit totalement ou partiellement déconnecté de l'énergie explosive mise en œuvre. C'est pourquoi il est souhaitable d'introduire un ou plusieurs index concernant la répartition spatiale des charges. On peut penser en particulier qu'en fonction de la position des charges une partie seulement du massif sera concernée par le « concassage » à l'explosif et que le reste du massif sera uniquement déplacé.

Je propose donc l'index suivant qui est un pourcentage de surface:

$$\mathbf{IR = (E * E) / (E * B) = E / B}$$

E = Espacement, B = Banquette.

Un index de même nature concernant la hauteur de bourrage aurait également une certaine utilité mais cette information n'est pas disponible sur la plupart des fiches de tir.

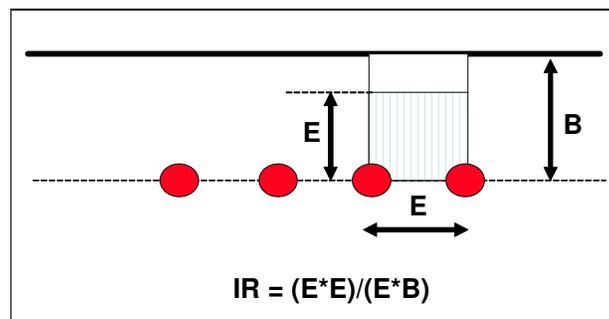


Figure 4.3.1.7.

#### 4.3.2. CHOIX D'UN INDEX GEOLOGIQUE.

Nous ajouterons à ces index de tir, un index à caractère plus « géologique » qui permettra de prendre en compte la direction du plan de foration en relation avec les directions des principales discontinuités géologiques.

Il apparaît à tous l'importance de facteurs géologiques sur le résultat du tir. Dans notre cas, il ne s'agit pas de comparer différentes carrières, différents types de roches mais de voir à

l'intérieur de chaque carrière supposée homogène d'un point de vue « géologique », si la direction des tirs, par rapport aux discontinuités géologiques, peut, de manière significative, influencer le résultat du tir.

A partir de l'étude géologique réalisée par le MUL (Leoben), il a donc été nécessaire de sélectionner une ou deux séries de plan ayant à priori une influence sur le résultat du tir. Cet éclairage est très restrictif et assez peu naturaliste, car il s'attache plus à mettre en équation le gisement qu'à le décrire précisément.

Sur la carrière ALZO, l'étude géologique a mis en évidence six familles de discontinuités sur le site (diaclasses, stratification, ...). Nous ne retiendrons que la stratification comme paramètre géologique significatif. Ce choix peut paraître totalement arbitraire lorsque l'on visite la carrière, car pour les autres discontinuités les plans sont parfois plus nombreux et moins espacés, mais ce plan de stratification est un plan de glissement très important et dès que cela est possible le front de taille reprend naturellement ce pendage. L'étude géologique montre également la présence de zones karstifiées et d'un cône de déjection au niveau d'une faille. Les tirs correspondants à ces zones seront distingués par un index d'état de la roche (assez subjectif mais qui permettra aussi de caler le réseau de neurones).

De prime abord, la géologie de la carrière DMD semble moins complexe que celle de la carrière ALZO. Le pendage est sub-horizontale et il y a deux familles de diaclasses qui « marquent » la géométrie de la carrière, voir photographies en annexe. Pourtant la composition chimique de la roche et l'épaisseur des bancs sont très variables et cela a probablement de l'importance au niveau du comportement mécanique de la roche mais nous n'en tiendrons pas compte pour limiter le nombre d'index.

Les paramètres géologiques retenus seront donc les suivants:

La direction des deux familles de diaclasses, qui sont pratiquement à 90°.

Le calcul de cet index géologique sera basé sur le produit vectoriel des vecteurs normaux des différents plans considérés.

$$IG = \vec{P} \wedge \vec{F} \cdot CS = \sin \alpha \cdot CS.$$

P vecteur unitaire normal à la discontinuité géologique.

F vecteur unitaire normal au plan de foration.

$\alpha$  angle formé par les deux vecteurs.

Pour la carrière DMD, il y aura deux index géologiques, IG<sub>1</sub> et IG<sub>2</sub>.

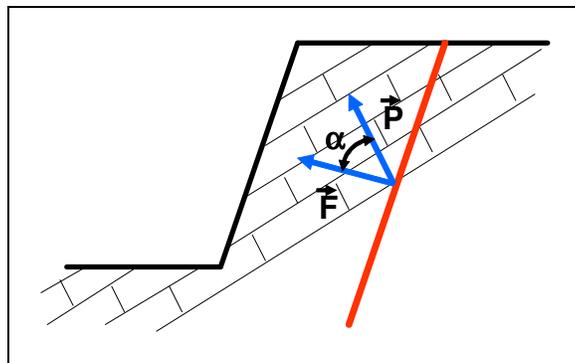


Figure 4.3.2.a.

Nous considérons donc que les discontinuités jouent un rôle de réflecteur dans la propagation des ondes. C'est-à-dire que si le plan de foration et les plans de discontinuités sont parallèles, l'explosif sera inefficace (IG = 0), par contre si le plan de foration est perpendiculaire

aux plans de discontinuités l'efficacité de l'explosif sera améliorée ( $IG = CS$ ). Les plans de discontinuités propageant de manière importante les effets de l'explosion dans cette configuration. Dans le cas intermédiaire la formule  $IG = \sin \alpha * CS$  traduit le plus ou moins grand parallélisme du plan de foration et des plans de discontinuités.

#### 4.3.3. REMARQUES SUR LE CHOIX DES INDEX.

La liste des index susceptibles de présenter un intérêt dans une analyse statistique ne sera jamais exhaustive de par l'évolution des techniques, des pratiques de tir ... On aurait pu en particulier mettre l'accent sur la qualité du bourrage, la répartition des charges dans la colonne, le diamètre de foration ... mais nous devons absolument nous limiter à un nombre d'index raisonnable pour réduire les risques de contresens dans l'interprétation des résultats.

En effet, la quantité de données disponibles étant loin d'être infini, comme l'indiquent les tableaux récapitulatifs en annexe, la multiplication des index pourrait conduire au cas, un index distinctif par tir ce qui n'aurait plus de sens d'un point de vue statistique.

La pertinence d'un index sur un cas concret n'est vérifiée que lors de l'apprentissage par le réseau de neurones sur un jeu de données réelles. Au cours de cet apprentissage, le réseau de neurones ne va retenir que les index qui lui semble les plus pertinents pour l'interprétation des tirs. Certains index seront parfois totalement rejetés par le réseau de neurones qui considérera qu'ils ne participent d'aucune manière à la détermination du résultat granulométrique.

Un index mal formulé pourra également être pointé si des variations de cet index produisent des effets opposés à ceux attendus. Il faudra donc reformuler cet index pour qu'il réponde de manière satisfaisante aux données disponibles. Ce jeu d'index doit donc être adapté à chaque cas spécifique de carrière et de géologie. Leurs formulations ne doivent pas être figées et le rôle du concepteur du réseau de neurones est d'adapter la structure des index en fonction de sa connaissance du cas spécifique qu'il doit traiter.

La méthode d'analyse par réseau de neurones pourrait être utilisée directement sur les données brutes, les paramètres de tir, mais cela ne donne pas de résultat convaincant. Le « formatage » sous la forme d'index permet d'obtenir une certaine « linéarité » entre les index d'entrée et de sortie. La convergence des algorithmes vers une solution utilisable est facilitée si les index sont formulés de manière adéquate. De plus, les index pourront être utilisés pour comparer l'analyse par réseau de neurones à d'autres méthodes d'analyse (Analyse en composante principale, Krigeage).

#### 4.4. UTILISATION D'UN RESEAU DE NEURONES.

Nous avons donc défini la granulométrie par deux paramètres (au chapitre 2), l'énergie de fragmentation, index énergétique, et le pourcentage de roche fragmentée, index de fragmentation, et le tir par 10 index. Il nous faut maintenant établir une « corrélation » entre résultat et conception du tir. Pris séparément, aucun index de tir ne permet de prédiction même approximative. L'étude simultanée des variations de plusieurs d'entre eux est nécessaire pour analyser la fragmentation.

Le souhait des partenaires du projet européen est de disposer d'un outil prédictif. Développer un réseau de neurones est donc la solution qui a été retenue. Sans entrer dans le détail de la théorie des réseaux de neurones, on peut schématiser le principe de celui que nous utiliserons de la manière suivante:

Soit un jeu de vecteur d'entrée  $X_i$ , les index de tir et géologique, correspondant à un jeu de vecteur de sortie  $Y_j$ , les deux paramètres de fragmentation. Alors on associe l'entrée et la sortie par un jeu de matrice comme ci dessous.

$$M_1 * X_i + B_1 = \lambda_j ; L_j = \phi (\lambda_j )$$

$$M_2 * L_j + B_2 = \lambda_k ; L_k = \phi (\lambda_k )$$

$$M_3 * L_k + B_3 = \gamma_l ; Y_l = \phi (\gamma_l )$$

$\phi$  étant la fonction sigmoïde,  $\phi (x) = 1 / (1 + \exp (-x))$ , qui pour tout  $x$  réel donne un  $\phi (x)$  appartenant à  $] 0,1 [$ .  $M_1$ ,  $M_2$  et  $M_3$  étant les matrices de poids et  $B_1$ ,  $B_2$  et  $B_3$  étant les matrices de biais.

Le nombre de couches intermédiaires, deux dans le cas présenté ci-dessous, est fixé par le concepteur du réseau de neurones en fonction de la non-linéarité attendue du jeu de données, de son intuition quant au comportement des roches vis à vis de la fragmentation à l'explosif et de l'étude attentive des données disponibles, les cas particuliers en priorité.

Les valeurs des coefficients des différentes matrices seront fixées lors de la phase dite d'apprentissage.

L'intérêt de la méthode est principalement qu'elle ne présuppose pas du comportement qu'aura la roche à la sollicitation mécanique auquel elle est soumise. Aucune contrainte mécanique n'est calculée, les caractéristiques mécaniques de la roche ne sont pas incluses dans le modèle. Le réseau de neurones va mettre en relation au travers d'une interpolation, des données expérimentales concernant d'une part la configuration du tir et d'autre part le résultat du tir, la granulométrie. Pour une roche et une carrière, c'est l'ensemble des données expérimentales disponibles qui va créer un modèle implicite entre Entrées, paramètres de tir, et Sortie, granulométrie.

On ne va pas expliquer les phénomènes mécaniques très complexes auxquelles sont soumises les roches. Mais modestement, dans un domaine restreint des variables de tir et de granulométrie, nous allons construire une fonction d'interpolation qui nous permettra ensuite d'étudier l'évolution de la fragmentation d'une roche (dans une carrière) en fonction des variations de paramètre de tir. C'est une approche pragmatique qui va permettre de résoudre des cas concrets et aider le praticien dans ces choix.

## **4.5. PRESENTATION DES RESULTATS ET SIMULATIONS.**

### **4.5.1. LA CARRIERE ALZO.**

Sur cette carrière la diversité des modes de tir rend la comparaison des tirs complexe. En effet, la maille, la hauteur des fronts, la séquence d'amorçage, la direction des tirs et bien entendu la charge spécifique sont très variables.

Par exemple sur les 28 tirs disponibles pour cette étude, pour lesquels on dispose d'un nombre suffisant d'image ( au moins 80 tombereaux), seul quatorze d'entre eux présentent une maille (4,5 \* 7) et une séquence d'amorçage (2 trous consécutifs par micro-retard) identiques, une hauteur de front peu variable (25 à 30 mètres), ne restant variable que la charge spécifique et l'orientation du tir. L'étude paramètre par paramètre est donc impossible, le nombre de données se réduisant pour chaque variation d'un seul paramètre comme peau de chagrin. Par contre cette variabilité « excessive » est un avantage dans l'approche par réseau de neurones car chaque tir nous apporte des informations sur le comportement du massif rocheux vis à vis du tir à l'explosif et en particulier sur le résultat granulométrique.

Nous ne produirons donc qu'un diagramme « brute », index énergétique en fonction de la charge spécifique en distinguant bien les différents types de tir, tirs courants et tirs de relevage. L'étude paramètre par paramètre sera donc réalisée par des simulations à l'aide du réseau de

neurones présenté ci avant en ayant pris soin au préalable de vérifier les capacités d'un tel réseau à l'apprentissage et à la simulation sur des données connues, phase de validation.

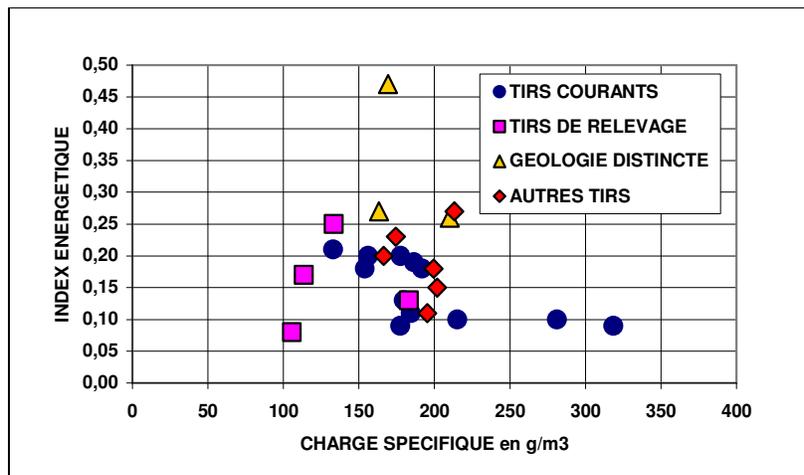


Figure 4.5.1.1.a.

#### 4.5.1.1. LA CHARGE SPECIFIQUE.

On voit donc sur la figure 4.5.1.1.a que la charge spécifique a une influence inattendue et significative sur les index de fragmentation. En effet pour les tirs courants la corrélation est négative. C'est-à-dire que plus la charge spécifique est élevée moins l'énergie réellement utilisée pour la fragmentation est importante. Une augmentation de la consommation en explosif conduit donc à une production moindre de matériau fin. Cela pourrait être expliqué par un confinement trop important de la charge explosive.

#### 4.5.1.2. L'APPRENTISSAGE.

Cette opération va permettre de fixer les valeurs des coefficients dans les différentes matrices. On part d'un jeu de valeurs aléatoires dans les matrices et l'on compare le résultat obtenu à la réalité. L'erreur calculée est ensuite rétro-propagée (Back-propagation) dans l'ensemble des matrices.

Soit  $P_i - Y_i$  (valeur réelle - valeur calculée) l'erreur calculée sur le  $i$ ème composant du vecteur de sortie alors l'erreur sur le  $i$ ème neurone de la dernière couche du réseau de neurones est  $E_i = Y_i * (1 - Y_i) * (P_i - Y_i)$ , et à l'aide du paramètre d'apprentissage  $\mu$  on va pouvoir ajuster les paramètres  $\alpha_{ij}$  et  $\beta_i$  pour le niveau précédent, les matrices  $M_3$  et  $B_3$  :

$$\Delta\alpha_{ij} = \mu * L_{kj} * E_i$$

$$\Delta\beta_i = \mu * E_i$$

Et ainsi de suite pour les couches précédentes. Pour plus de détails on pourra se reporter à la bibliographie.

Après un certain nombre de cycles d'apprentissage, on peut considérer que la phase d'apprentissage est terminée. On peut également choisir de définir une erreur totale maximum en deçà duquel on considère l'apprentissage comme terminé. Dans le cas présent, le nombre de cycle d'apprentissage a été fixé à 100 000 et l'erreur totale maximum n'a pas été fixée.

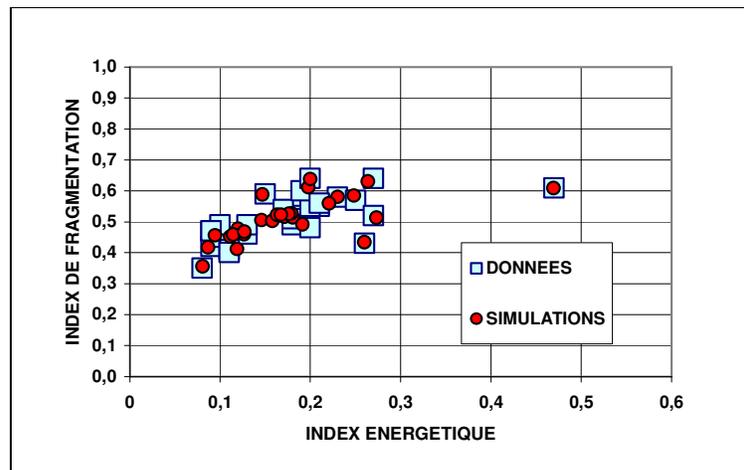


Figure 4.5.1.2.a.

La figure 4.5.1.2.a montre les résultats obtenus pour les 28 tirs sélectionnés pour cette phase d'apprentissage. Certains points sont assez mal rendus, erreur de 0,05 sur l'index de fragmentation, erreur de plus de 0,05 sur l'index énergétique mais on peut être assez satisfait que les points « extrêmes » dans toutes les directions soient assez bien rendu ce qui nous permettra d'effectuer des simulations « fiables » jusqu'à ces extrémités.

Globalement, on peut être satisfait car l'on va pouvoir étudier des variabilités de 0,2 dans l'axe de l'index énergétique, et de 0,3 dans l'axe de l'index de fragmentation ce qui correspond environ à une différence de 16 % sur le passant à 100 mm, tir 53A99 (33,48 %) et tir 48A99 (49,33 %).

#### 4.5.1.3. LA VALIDATION.

Cette étape du travail a pour but de montrer que la structure du réseau de neurones a été bien choisie et que celui-ci est capable de « prédiction » vérifiable par rapport à des données existantes. Compte tenu du faible nombre de tirs disponibles pour l'analyse, on ne pourra pas être trop exigeant sur les résultats.

Le choix des données qui vont servir à cet apprentissage de la phase de validation est le suivant : un quart des données (7) seront simulés à partir d'un apprentissage comprenant uniquement les autres données (21) et on vérifiera si il y a une bonne adéquation entre simulations et données réelles.

Au niveau de l'index énergétique et de l'index de fragmentation on peut donc considérer que les points sont correctement rendus, figure 4.5.1.3.a.

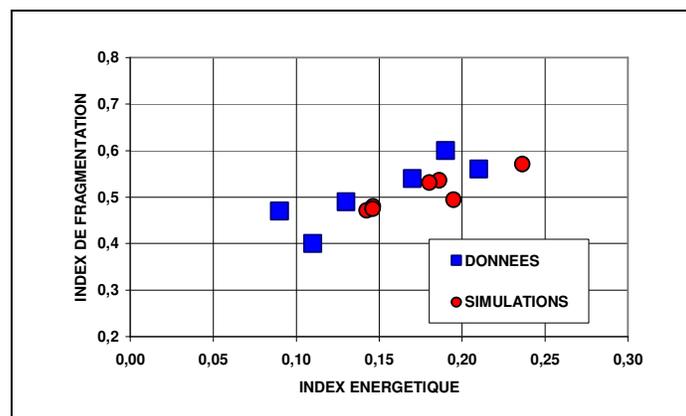


Figure 4.5.1.3.a.

#### 4.5.1.4. SIMULATIONS.

Les schémas de tir sur la carrière ALZO sont assez étonnants. Le tir courant est constitué de la manière suivante:

Maille de 4,5 par 7 (espacement \* banquette).

Hauteur de 25 mètres environ.

3 mines de pied pour 2 mines verticales.

Amorçage de deux trous voisins sur le même numéro de micro-retard.

Nous allons faire varier sur les 14 tirs correspondants à ce schéma certains paramètres pour entrevoir qu'elles sont les choix potentiellement intéressants qui s'offrent à nous pour « améliorer » les tirs. **A noter que pour cette carrière, il faut réduire au maximum la valeur de l'index énergétique et donc réduire la proportion de matériau fin (0-30 mm).**

##### 4.5.1.4.1. LA SEQUENCE D'AMORCAGE.

Le nombre de trous verticaux consécutifs ayant le même numéro de micro-retard varie de 2 à 6 sur les données disponibles. Nous allons donc simuler cette extrémité (6 trous sur le même micro-retard) pour voir si des modifications dans la séquence d'amorçage pourraient apporter une diminution des index de fragmentation.

Si six trous consécutifs sont sur un même numéro, on observe une variation de la valeur de l'index énergétique et de la valeur du pourcentage sans lien apparent entre les deux et un sens de variation très différent suivant les points, figure 4.5.1.4.1.a.

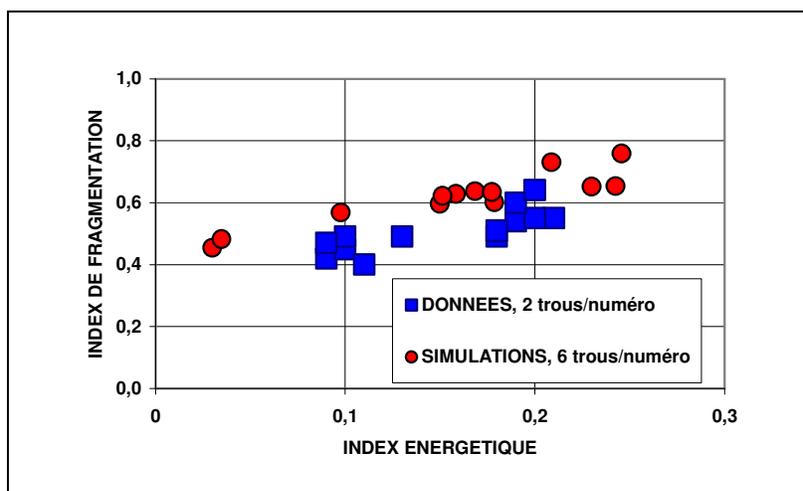


Figure 4.5.1.4.1.a.

Cette indication est intéressante car elle montre que l'on peut obtenir des gains très significatifs par modification de la séquence d'amorçage. C'est peut être une justification à l'emploi des micro-retards électroniques pour cette carrière. Ce résultat sera à confirmer étant donné le faible nombre de données qui varient suivant ce paramètre.

##### 4.5.1.4.2. L'ENERGIE, VARIATION DE LA CHARGE SPECIFIQUE.

Dans cette carrière, l'explosif employé est le nitrate fuel de manière quasi exclusive. L'augmentation de l'énergie passe donc par une augmentation de la quantité de nitrate fuel utilisé. Simulons une augmentation et une diminution de 10% de cette quantité pour les quatorze tirs courants.

L'augmentation de 10% permet une diminution de l'index énergétique de 0,05 et de 0,05 environ sur l'index de fragmentation, figure 4.5.1.4.2.a. Au contraire, une diminution d'énergie entraîne une augmentation inverse.

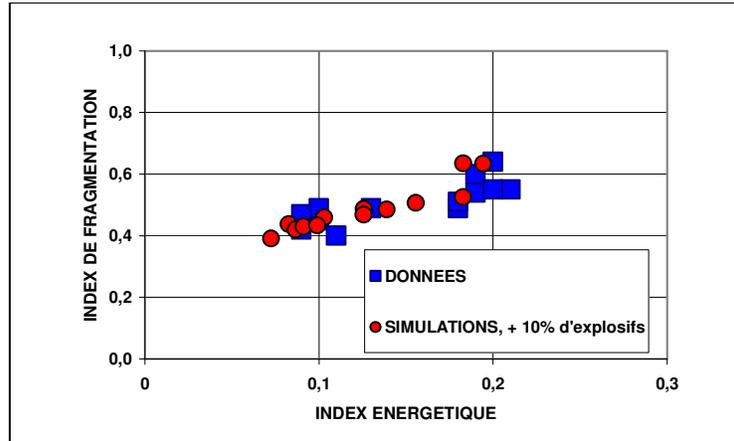


Figure 4.5.1.4.2.a.

Ce résultat, bien que surprenant, peut être expliqué par le fait que sur cette carrière, on travaille avec des quantités d'explosifs « trop » faibles, de l'ordre de 200 g/m<sup>3</sup>. Le confinement de cet explosif est donc trop important, ce qui peut expliquer qu'une augmentation de l'énergie réduise le confinement des charges et donc que globalement l'énergie transmise au massif diminue. Ce comportement atypique est valable pour des charges allant de 180 à 350 g/m<sup>3</sup>. Au-delà il est probable que l'on retrouve un comportement plus classique de l'explosif (en deçà de 180g/m<sup>3</sup> on risque surtout l'échec de tir).

#### 4.5.1.4.3. LA MAILLE.

L'importance de la forme de la maille dans le tir à l'explosif n'est plus à démontrer. Dans le cas présent, la maille « classique » est assez dissymétrique 4,5 mètres d'espacement pour 7 mètres de banquette. De part la hauteur des fronts et les effets arrières de tir, il paraît difficile de diminuer la banquette hormis pour les tirs d'une hauteur très inférieure à la moyenne. On ne peut donc jouer que sur l'espacement. Sans modifier la charge spécifique, on fait varier l'espacement de 3,5 à 5,5 mètres. On obtient une modification importante du résultat. Pour une maille de 5,5 \* 7 l'index énergétique augmente de 0,1 et l'index de fragmentation de 0,1. Pour la maille de 3,5 \* 7, l'index énergétique sera diminué de 0,1 et l'index de fragmentation de 0,2 , figures 4.5.1.4.3.a et 4.5.1.4.3.b.

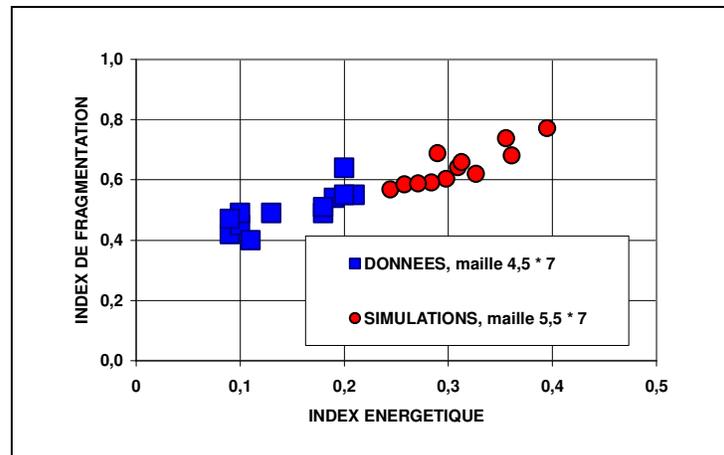


Figure 4.5.1.4.3.a.

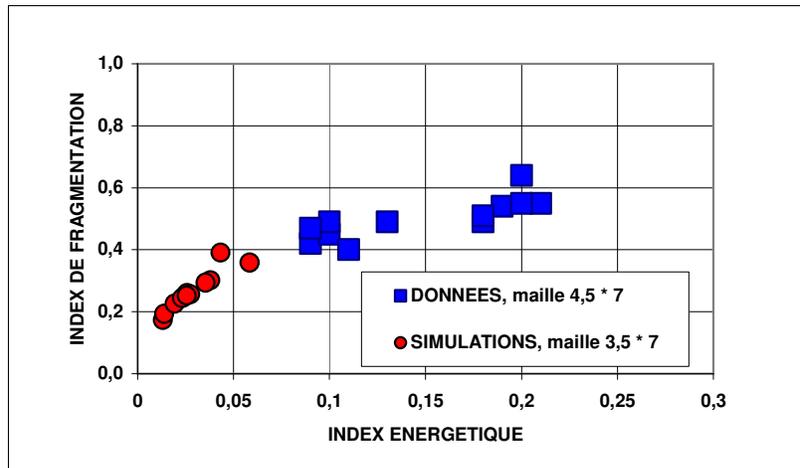


Figure 4.5.1.4.3.b.

Ces résultats montrent que la production de blocs est favorisée par une maille dissymétrique. Dans le cas de la carrière ALZO, il n'est donc pas souhaitable de réaliser des mailles « carrés ». Il est au contraire envisageable de passer à une maille de 3 \* 7 même si les résultats ne devraient pas être aussi spectaculaires que ne le laisse présager le réseau.

#### 4.5.1.4.4. LA DIRECTION DU TIR.

Il semble d'après les simulations, que sur cette carrière il existe une direction de tir plus favorable en ce qui concerne la diminution de l'index énergétique et du pourcentage de roches fragmentées, direction « parallèle » à la stratification. En simulant les 14 tirs courants dans cette orientation, on obtient des résultats assez spectaculaires avec une diminution moyenne de l'index énergétique de 0,05 et de l'index de fragmentation de 0,1 (à noter que certains tirs sont déjà dans cette orientation), figure 4.5.1.4.4.a.

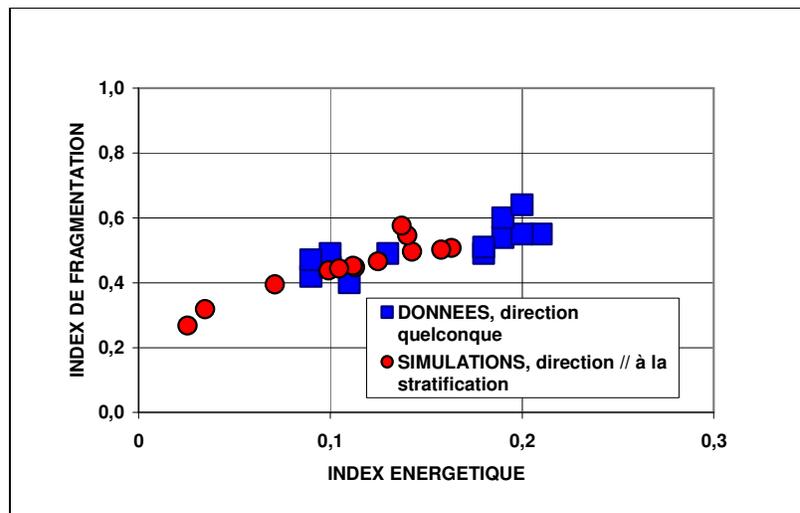


Figure 4.5.1.4.4.a.

Donc le choix de la direction du front de taille est déterminant quant au résultat du tir. Mais on doit savoir que l'on ne peut pas toujours choisir la direction du tir et que dans le cas de la carrière ALZO, choisir cette direction « optimale » présente des risques en terme de stabilité des talus. Même si cela peut sembler un choix intéressant, il est souhaitable de faire évoluer le tir d'une autre manière en utilisant les autres paramètres de tir. Par contre dans une étude statistique, ce paramètre doit être explicité sous peine de contresens dans l'interprétation des résultats.

#### 4.5.1.4.5. RECAPITULATIF.

Nous avons montré l'intérêt de la modification de quelques index de tir sur la fragmentation, essayons maintenant de quantifier plus précisément cet impact. Pour cela, prenons un tir courant, tir n° 25A99, et faisons évoluer un à un les paramètres.

Pour l'énergie, on voit que la courbe obtenue, figure 4.5.1.4.5.a, a une plage de variation très étendue, plus de 0,2 dans l'index énergétique et presque 0,3 sur l'index de fragmentation.

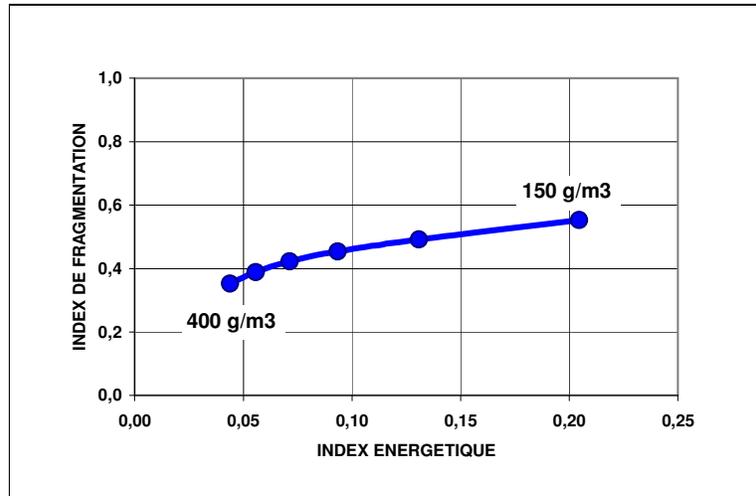


Figure 4.5.1.4.5.a.

On voit également qu'au-delà de 250g/m3 les variations sont faibles. Des données supplémentaires au-delà de 400 g/m3 aurait probablement montré un point de rebroussement. En tout état de cause, on peut proposer à l'industriel de travailler en règle générale dans une plage de charge spécifique de 300 à 400 g/m3 et de conduire quelques essais au-delà en faisant attention au risque de projections.

Pour la direction de tir, on peut voir sur la figure 4.5.1.4.5.b son influence sur les paramètres de fragmentation. Une variation de 0,05 sur l'index énergétique (et de 0,05 sur l'index de fragmentation). On voit également, sur ces graphiques, l'impact de la formulation de l'index géologique en particulier du sinus sur la forme de la courbe.

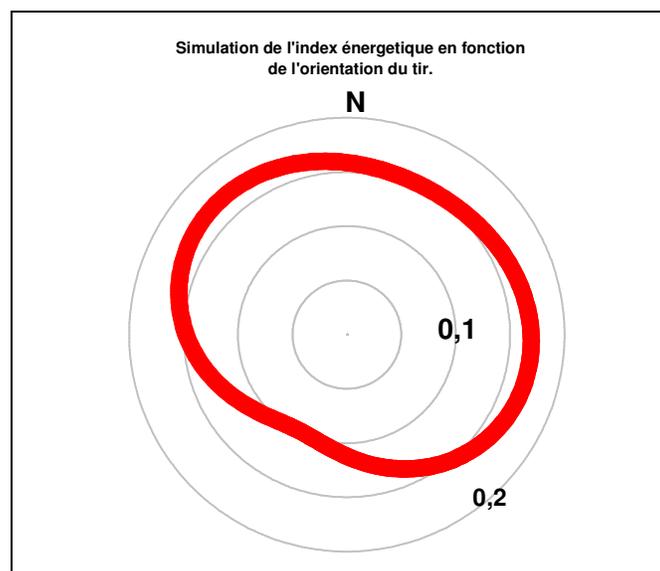


Figure 4.5.1.4.5.b.

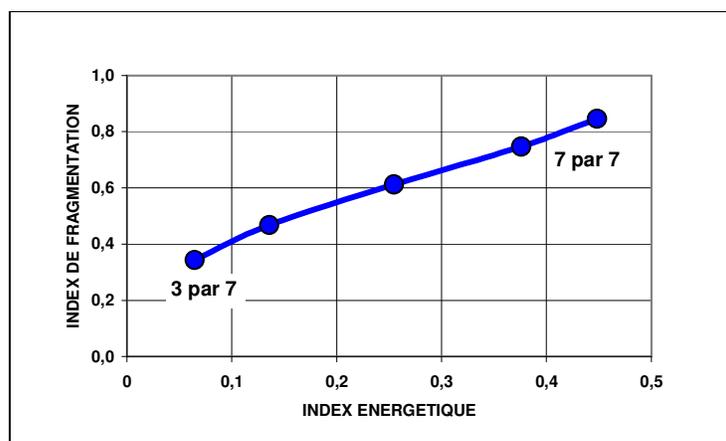


Figure 4.5.1.4.5.c.

Pour la maille, une variation de 3 \* 7 à 6 \* 7, figure 4.5.1.4.5.c, permet un changement notable dans les index de fragmentation, 0,4 dans l'axe énergétique, 0,5 sur l'index de fragmentation. Rappelons que pour cette simulation la charge spécifique est constante. Dans le cadre de nouveaux essais, on pourrait envisager une maille, par exemple de 3 \* 7, en faisant également varier la charge spécifique autour de 350 g/m<sup>3</sup>.

Pour les délais, les résultats bien que très stimulants, sont quand même à considérer avec prudence, figure 4.5.1.4.1.a, le nombre de points évoluant pour ce paramètre étant faible.

Globalement on voit l'intérêt du choix d'un réseau de neurones pour l'interprétation de données de tir d'abattage à l'explosif qui auraient été difficile à comprendre et « interpoler » sans l'aide de cette technique.

#### 4.5.2. LA CARRIERE DMD.

Le faible nombre de données disponibles sur la carrière est dû à des modifications de paramétrage de FRAGSCAN-CAMION à partir de l'année 2000, en particulier la distance Caméra-Camion a été modifiée entraînant un « glissement » des données dans l'échelle des diamètres. Nous ne disposons donc pas suffisamment de données pour réaliser la phase de validation du réseau de neurones. Toutefois celui-ci étant identique au précédent, nous supposons qu'il est apte à réaliser des simulations même sur cette carrière.

Sur cette carrière DMD, six points ont été considérés comme « géologiquement » distincts, ce qui réduit à 15 le nombre de tir pouvant nous apporter de l'information. A DMD, pour les tirs courants, on va trouver des charges spécifiques élevées de 400 à 600 g/m<sup>3</sup> ; des mailles de 7 \* 6.2 ; des micro-retards de 25 ms réalisés par le système nonel. La hauteur des fronts est de l'ordre de 15 mètres, liste en annexe.

Nous produirons pour cette carrière un diagramme brut, index énergétique en fonction de la charge spécifique puis nous passerons aux simulations qui seront moins nombreuses que pour ALZO car l'information contenue dans les données disponibles est moins riche.

##### 4.5.2.1. LA CHARGE SPECIFIQUE.

Sur la carrière DMD, la charge spécifique est très variable. La figure 4.5.2.1.a montre le comportement aux variations de charge spécifique. Il n'est pas possible d'établir de corrélation entre charge spécifique et résultat de fragmentation.

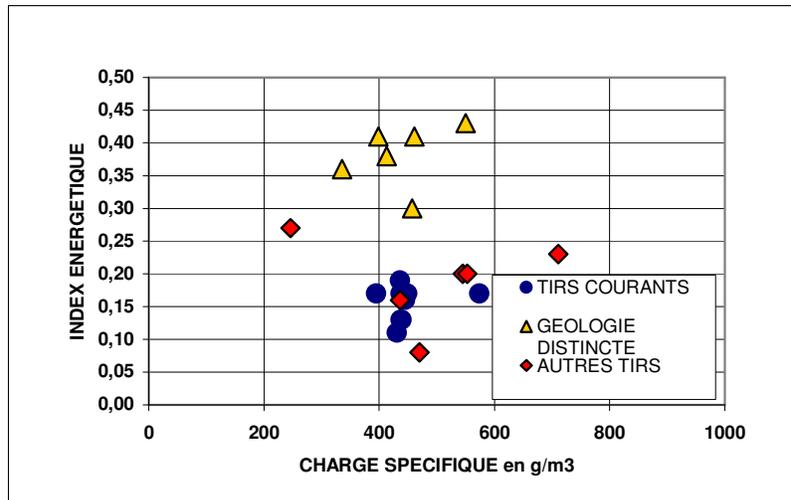


Figure 4.5.2.1.a.

#### 4.5.2.2. L'APPRENTISSAGE.

Réalisé dans les mêmes conditions que pour la carrière ALZO, nombre de cycle fixé à 100 000, on peut être satisfait de la bonne adéquation entre données et simulations, figure 4.5.2.2.a, même si le faible nombre de données ne garantit pas la fiabilité des simulations qui vont suivre.

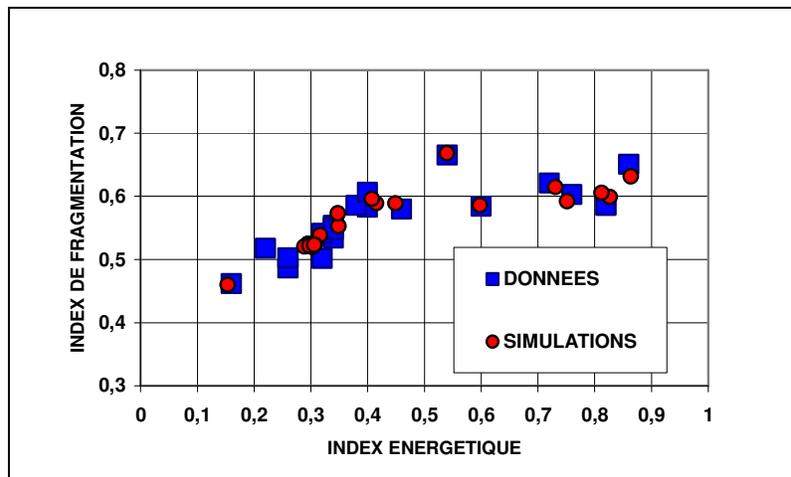


Figure 4.5.2.2.a.

Globalement, on va pouvoir étudier une variation de 0,2 sur l'index énergétique et de 0,25 pour l'index de fragmentation. **Notre objectif sur cette carrière étant de parvenir à augmenter de manière significative le pourcentage de roche fragmentée, index de fragmentation.** Rappelons tout de même que tous les blocs « oversize » ne sont pas vus par Fragscan ni extrapolés par le modèle Fragscan-bis, voir chapitre 2, et que l'on peut toujours se poser la question: Est-ce que le pourcentage de blocs vus suit la même tendance que le pourcentage de bloc « oversize » réel ?

#### 4.5.2.3. SIMULATIONS.

Le schéma de tir classique sur la carrière DMD est le suivant:

Maille de 7 \* 6,2 (espacement \* banquette).

Hauteur variant de 12 à 18 mètres.

Une mine de pied par mine verticale.

Amorçage fond de trou nonel avec des retardateurs de 25 ms entre trous.

Nous allons faire varier sur les tirs correspondants, les paramètres de tir ayant été significativement modifiés dans la pratique des tirs sur les données disponibles. C'est à dire:

Le nombre de rangées.

Le nombre de mines de pied.

La charge spécifique.

Ensuite nous tenterons d'expliquer le comportement de ce massif rocheux vis à vis d'une augmentation de la charge spécifique en fonction de la direction du tir.

#### 4.5.2.4. LE NOMBRE DE RANGEES.

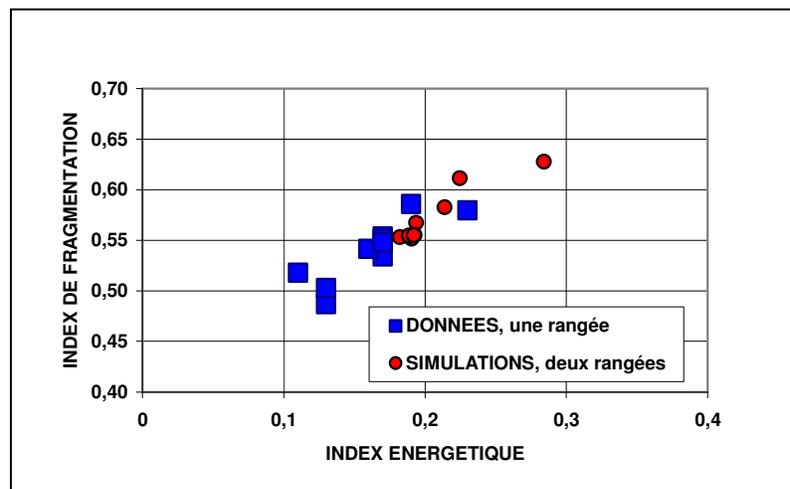


Figure 4.5.2.4.a.

Variante de 1 à 2 dans les données disponibles, nous allons voir sur la figure 4.5.2.4.a que cela provoque une augmentation de l'index énergétique mais aussi, et de manière nette, une augmentation de l'index de fragmentation. C'est donc une direction de recherche qui est à explorer même si cela devait entraîner un bouleversement du mode d'exploitation.

#### 4.5.2.5. LES MINES DE PIED.

Variante de 1 à 2 dans les données disponibles, nous allons voir sur la figure 4.5.2.5.a que l'impact du doublement des mines de pied est pratiquement nul puisque l'on retrouve des résultats proches de ceux retrouvés lors de l'apprentissage. L'abandon des mines de pied étant préconisé pour des raisons de sécurité, il serait souhaitable en considérant également le point précédent, que l'exploitant passe à un mode de tir sur plusieurs rangées sans mines de pied même si cela doit conduire à un abaissement de la hauteur des fronts de taille et à une maille réduite.

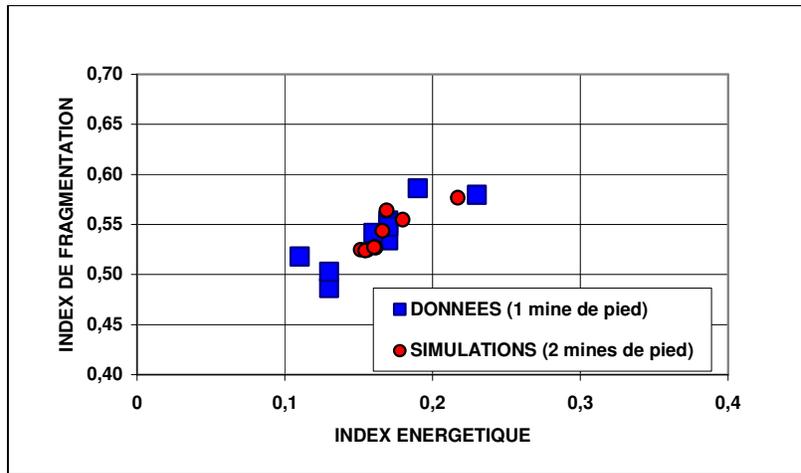


Figure 4.5.2.5.a.

#### 4.5.2.6. LA CHARGE SPECIFIQUE.

En ce qui concerne la charge spécifique, comme le montre la figure 4.5.2.6.a l'impact est assez significatif. L'augmentation de la charge spécifique améliore la fragmentation de la roche. Mais étant donné que sur le terrain la consommation est déjà « excessive » en explosifs sur cette carrière on peut se demander si l'exploitant ne prend pas son gisement à « rebrousse poil » et s'il ne serait pas plus judicieux de s'intéresser à d'autres paramètres pour optimiser la fragmentation sur le site et réduire la proportion de blocs « oversize ».

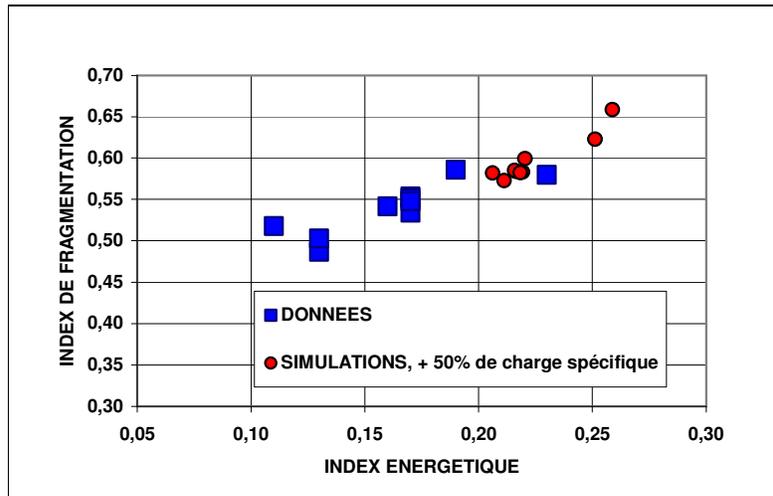


Figure 4.5.2.6.a.

#### 4.5.2.7. LA DIRECTION DU TIR.

Pour expliquer les résultats « médiocres » des tirs sur cette carrière on peut s'intéresser à l'impact des discontinuités géologiques. En effet, cette carrière a la particularité d'avoir des diaclases très marquées, une karstification très importante sur le sommet de la carrière et il est visible que des circulations d'eaux ont participé à l'élargissement des fissures de diaclases (voir photos en annexe). On se retrouve donc dans une configuration très défavorable à une exploitation en gradins, les discontinuités se comportant en réflecteur « total » par rapport aux ondes de choc. De plus les diaclases ouvertes ont tendance à absorber l'énergie de gaz.

Sur le terrain, une direction particulièrement défavorable a été remarquée, front de taille en biais par rapport aux deux familles de diaclases ouvertes. Sur la figure 4.5.2.7.a nous voyons que cette direction est distinguée par la simulation mais de manière opposée à ce que l'on

attendait. Cela met donc en lumière la difficulté de trouver des index de tir pertinents, adaptés à chaque cas spécifique de géologie.

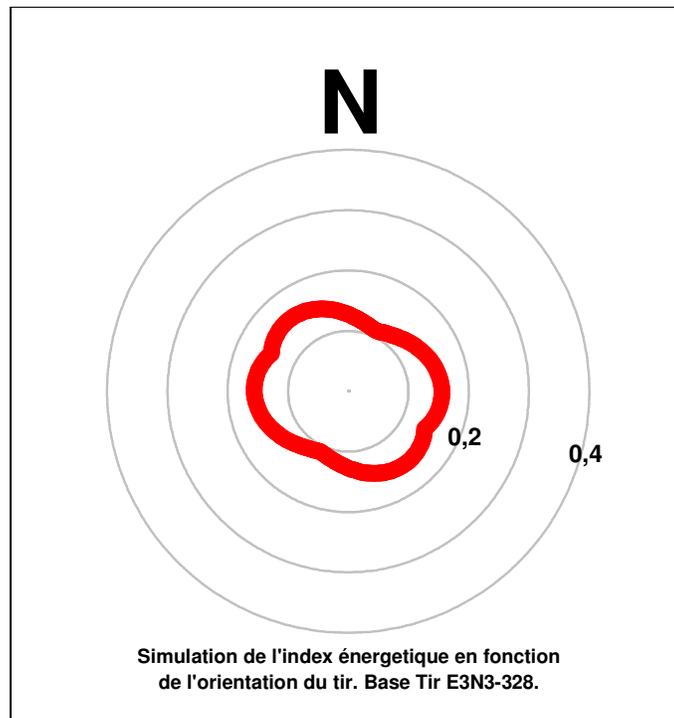


Figure 4.5.2.7.a.

Toutefois la figure 4.5.2.7.b nous montre que le comportement atypique de ce massif rocheux, vis à vis d'une variation de charge spécifique, est lié à la géologie de la carrière. En effet les deux directions de diaclase sont clairement identifiées et on voit que dans ces deux directions l'impact d'un doublement de la charge spécifique n'est pas identique ce qui s'explique par l'espacement moyen entre les diaclases, un mètre environ pour la direction D1 et cinq mètres environ pour la direction D2 .

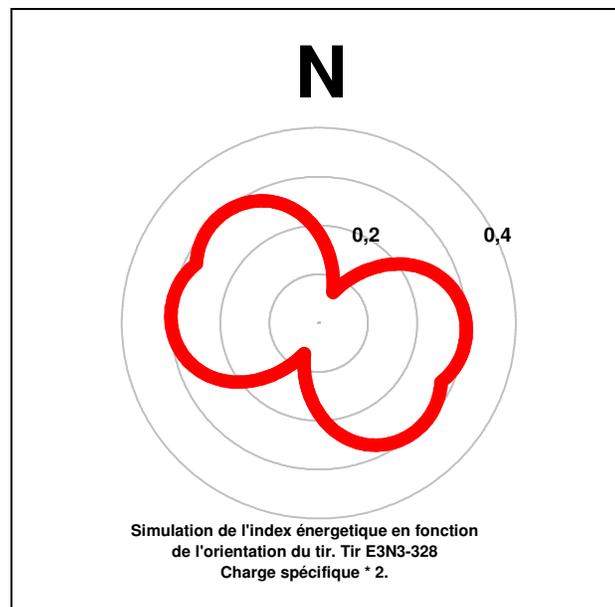


Figure 4.5.2.7.b.

Si on se place maintenant dans ces deux directions, figure 4.5.2.7.c, on voit, par exemple, que pour une augmentation de 100 % d'énergie l'impact est positif dans la direction D1 (direction la plus courante des tirs). Par contre dans la direction D2 l'impact est négatif, ceci pouvant également être expliqué par le faible nombre de données disponibles dans cette direction.

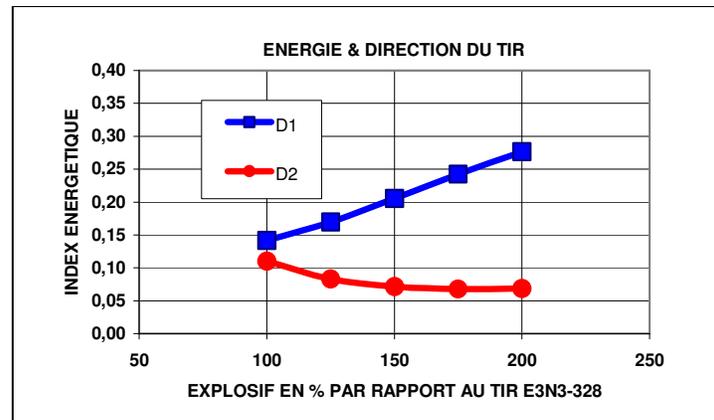


Figure 4.5.2.7.c.

#### 4.5.2.8. RECAPITULATIF.

Les résultats pour la carrière DMD sont moins intéressants et convaincants que sur la carrière ALZO. Ceci a deux causes principales :

Le faible nombre de données disponibles.

Le peu de variabilité des paramètres de tir.

En particulier la maille varie peu, les micro-retards sont constants, les directions de tir sont peu nombreuses et il est donc difficile d'attribuer à un paramètre une influence incontestable, faute de pouvoir extrapoler à partir d'un jeu de données trop constant.

La seule certitude que l'on peut avoir, c'est que le doublement des rangées apporte une meilleure fragmentation. Par contre, l'effet d'une variation de charge spécifique, par exemple en fonction de la direction du tir, laisse dubitatif. Ce que l'on peut dire, c'est que, sur cette carrière, l'énergie explosive fournie n'a pas un rapport évident avec le résultat du tir. De nouvelles voies doivent donc être explorées, en particulier les micro-retards faibles [0-5 ms], les tirs multi-rangées, la suppression des mines de pied, les directions de tir et aussi pourquoi pas les tirs en surface.

#### 4.6. BIBLIOGRAPHIE.

- D.01. 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.
- D.02. Batifoulier, novembre 1971. *Constatations pratiques sur les effets de l'explosif en fonction du matériau rencontré*.** *Revue de l'Industrie Minérale* « Mines et Carrières ». .
- D.03. Aler, du Mouza., 1996. *Measuring fragmentation efficiency of mine blasts*.** Proceedings of the Workshop on Measurement of Blast Fragmentation, Balkema : Montréal, pp 257-263.
- D.04. Weber, du Mouza, Romdhane-Bouden, Blanchier, octobre 1988. *La fragmentation des roches à l'explosif en carrière*.** *Revue de l'Industrie Minérale* « Mines et Carrières ». pp 27-31.
- D.05. Rossmannith, Knasmillner, 1990. *The role of rayleigh-waves in rock fragmentation*.** Fragblast 90. Proceedings of the 2nd International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Australian Institute of Mining and Metallurgy : Brisbane, pp 109-116.
- D.06. Rossmannith, 2000. *The influence of delay timing on optimal fragmentation in electronic blasting*.** Proceedings of the 1<sup>st</sup> World Conference on Explosives and Blasting Technique, Balkema : Munich, pp 141-147.
- D.07. Petzold, Hammelmann, 2000. *The second generation of electronic blasting systems*.** Proceedings of the 1<sup>st</sup> World Conference on Explosives and Blasting Technique, Balkema : Munich, pp 159-164.
- D.08. Mogi, Hoshino, Kou, 2000. *Reduction of blast vibration by means of sequentially optimized delay blasting*.** Proceedings of the 1<sup>st</sup> World Conference on Explosives and Blasting Technique, Balkema : Munich, pp 219-224.
- D.09. Thum, 2000. *Blasting techniques and explosives in the german quarry industry*.** Proceedings of the 1<sup>st</sup> World Conference on Explosives and Blasting Technique, Balkema : Munich, pp 109-116.
- D.10. Cervellera, mars 2002. *Influence de l'amorçage sur le rendement de l'explosif*.** Les Techniques de l'Industrie Minérale, n° 13, , pp 111-115.
- D.11. Du Mouza, Hadj Hassen, mars 2002. *Caractérisation du massif rocheux*.** Les Techniques de l'Industrie Minérale, n° 13, pp 13-25.
- D.12. 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.
- D.13. Hagan, 1983. *The influence of controllable blast parameters on fragmentation and mining costs*.** Proceeding of the 1<sup>st</sup> International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Balkema : Luléa, pp 31-51.
- D.14. Bernard, avril 1994. *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.
- D.15. Langefors, Kihlström, 1967. *The modern technique of rock blasting*.** John Wiley & sons, New York.
- D.16. Maerz, Germain, 1995. *Block size determination around underground opening using simulations based on scanline mapping*.** Fractured and jointed rock masses, pp 27-33.

- D.17. Katsabanis, Liu, 1996. *Delay requirements for fragmentation optimization.*** Proceedings of the Workshop on Measurement of Blast Fragmentation, Balkema : Montréal, pp 241-246.
- D.18. Liu, Katsabanis, 1997. *A numerical study of the effects of accurate timing on rock fragmentation.*** International Journal of Rock Mechanics & Mining, Sci. Vol 34, n° 5, pp 817-835.
- D.19. Cappello, avril 1994. *Analyse tectonique et minage appliqués à la production d'enrochement.*** Revue de l'Industrie Minérale « Mines et Carrières », pp 47-50.
- D.20. Ouchterlony, Niklasson, Abrahamsson, 1990. *Fragmentation monitoring of production blast at MRICA.*** Fragblast 90. Proceedings of the 2nd International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Australian Institute of Mining and Metallurgy : Brisbane, pp 283-289.
- D.21. Thum, 1971. *Quantité d'énergie requise pour l'extraction et la fragmentation des roches au moyen d'explosifs.*** Explosifs, n° 1, pp 6-27.
- D.22. Thum, 1972. *Technique et applications d'explosions progressives et contrôlées.*** Explosifs, n° 2, pp 41-52.
- D.23. 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.
- D.24. 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.
- D.25. Cunningham, 2000. *The effect of timing precision on control of blasting effects.*** Proceedings of the 1<sup>st</sup> World Conference on Explosives and Blasting Technique, Balkema: Munich, pp 123-127.
- D.26. Reichholf, Moser, 2000. *The influence of rock and rock mass parameters on the blasting result in terms of fragmentation.*** Proceedings of the 1<sup>st</sup> World Conference on Explosives and Blasting Technique, Balkema : Munich, pp 171-178.