



HAL
open science

Utilisation des réseaux de neurones pour examiner la fragmentation des roches à l'explosif et établir son influence sur la rentabilité de l'exploitation dans les carrières

Denis Nourry

► **To cite this version:**

Denis Nourry. Utilisation des réseaux de neurones pour examiner la fragmentation des roches à l'explosif et établir son influence sur la rentabilité de l'exploitation dans les carrières. Géologie appliquée. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2002. Français. NNT : 2002ENMP1148 . pastel-00579396

HAL Id: pastel-00579396

<https://pastel.hal.science/pastel-00579396>

Submitted on 23 Mar 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Collège doctoral

N° attribué par la bibliothèque

0000000000

THESE

Pour obtenir le grade de
Docteur de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris
Spécialité « Technique et économie de l'exploitation du sous-sol »

Présentée et soutenue publiquement par
Denis NOURRY
Le 7 novembre 2002

UTILISATION DE RESEAUX DE NEURONES POUR EXAMINER LA FRAGMENTATION DES ROCHES A L'EXPLOSIF ET ETABLIR SON INFLUENCE SUR LA RENTABILITE DE L'EXPLOITATION DANS LES CARRIERES

Directeur de thèse: Jacques Schleifer
Jury

| | | | |
|-----------------|------------|--------------------------|------------|
| M. P. MOSER | Professeur | Université de Leoben | Rapporteur |
| M. P. WEBER | Professeur | Ecole des Mines d'Alès | Rapporteur |
| M. R. CHAVEZ | Docteur | Nitro Bickford | Examineur |
| M. M. DUCHENE | Professeur | Ecole des Mines de Paris | Examineur |
| M. J. SCHLEIFER | Docteur | Ecole des Mines de Paris | Examineur |

Centre de Géotechnique et d'Exploitation du Sous-sol
Ecole des Mines de Paris
77305 Fontainebleau

Remerciements :

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'un vaste projet européen, Blast-Control, dont le but a été de montrer l'impact de la fragmentation des roches à l'explosif sur l'ensemble du cycle productif primaire d'une carrière et d'avancer dans la compréhension de l'influence des paramètres de tir sur la granulométrie résultante. Ce projet a été mené en collaboration avec cinq partenaires : La société Nitro-Bickford (France), le groupe Lhoist (Belgique), le groupe Calcinor SA (Espagne), Armines par le Centre de Géotechnique et d'Exploitation du Sous-sol de l'Ecole des Mines de Paris, l'Université de Leoben (Autriche) par le département d'ingénierie minière.

Je tiens à remercier particulièrement Monsieur Jacques Schleifer, mon directeur de thèse, pour ses conseils.

Je tiens également à remercier Monsieur Moser, Monsieur Chavez et l'ensemble des personnes ayant participé au projet Blast-Control pour l'accueil que j'ai reçu auprès de chacun des partenaires.

Je remercie Monsieur Tessier, pour son aide sur l'ensemble de mon travail.

Je remercie également Catherine Bonhomme pour son aide.

Mes remerciements vont également à l'ensemble des personnes que j'ai croisé au cours des années passées au sein du CGES.

TABLE DES MATIERES.

| | |
|--|-----------|
| TABLE DES MATIERES. | 3 |
| 0. INTRODUCTION. | 7 |
| 1. ACQUISITION ET STRUCTURATION DES DONNEES. | 8 |
| 1.0. INTRODUCTION. | 8 |
| 1.1. DESCRIPTION DES EXPLOITATIONS..... | 8 |
| 1.1.1. LA CARRIERE DMD. | 8 |
| 1.1.2. LA CARRIERE ALZO. | 9 |
| 1.2. LES ELEMENTS ECONOMIQUES. | 9 |
| 1.3. INTEGRITE DE L'INFORMATION PAR TIR. | 10 |
| 1.4. OBTENTION DE L'INFORMATION PAR SEQUENCE..... | 12 |
| 1.4.1. LA FORATION. | 12 |
| 1.4.2. LE MINAGE..... | 13 |
| 1.4.3 LE TRANSPORT..... | 13 |
| 1.4.4. LE CHARGEMENT. | 15 |
| 1.4.5. LE CONCASSAGE PRIMAIRE. | 16 |
| 1.5. RECAPITULATIF..... | 18 |
| 1.6. QUALITE - EXHAUSTIVITE..... | 20 |
| 1.7. POSITIONNEMENT..... | 23 |
| 1.8. GESTION DES DONNEES FRAGSCAN. | 24 |
| 1.9. GESTION DES DONNEES TECHNIQUES DE TIR. | 25 |
| 1.10. BIBLIOGRAPHIE..... | 26 |
| 2. MODELISATION DES DISTRIBUTIONS GRANULOMETRIQUES. | 27 |
| 2.0. INTRODUCTION. | 27 |
| 2.1. MESURE DE LA GRANULOMETRIE. | 27 |
| 2.1.1. LE TAMISAGE MANUEL. | 27 |
| 2.1.2. LA MESURE EN NOMBRE..... | 27 |
| 2.1.3. LA MESURE A LA FICELLE..... | 28 |
| 2.1.4. LA MESURE PAR ANALYSE D'IMAGE..... | 29 |
| 2.2. MODELES USUELS. | 30 |
| 2.2.1. MODELISATION DES COURBES GRANULOMETRIQUES. | 30 |
| 2.2.2. « LOIS » DE FRAGMENTATION. | 30 |
| 2.3. L'OUTIL FRAGSCAN-CAMION..... | 31 |
| 2.3.1. LE TEST LATHAM. | 31 |
| 2.3.2. LES BIAIS. | 33 |
| 2.3.3. MODELE EN SURFACE OU MODELE EN VOLUME. | 35 |
| 2.4. CHOIX D'UN MODELE GRANULOMETRIQUE..... | 35 |
| 2.4.1. LES HYPOTHESES DE LA MODELISATION. | 35 |
| 2.4.2. LE MODELE GRANULOMETRIQUE. | 36 |
| 2.5. ANALYSE DES GRANULOMETRIES..... | 40 |
| 2.5.1. CORRECTION DE L'EFFET DE TRONCATURE. | 40 |
| 2.5.2. ESSAI SUR DES GRANULOMETRIES REELLES..... | 41 |
| 2.5.3. ILLUSTRATION DU MODELE FRAGSCAN-BIS..... | 42 |
| 2.5.4. UN ESSAI D'INTERPRETATION..... | 43 |
| 2.6. DU MODELE GRANULOMETRIQUE AU MODELE ENERGETIQUE..... | 43 |
| 2.7. LES RESULTATS DU MODELE GRANULOMETRIQUE. | 45 |
| 2.7.1. CARRIERE ALZO. | 45 |
| 2.7.2. CARRIERE DMD..... | 46 |
| 2.8. LES RESULTATS DU MODELE ENERGETIQUE..... | 46 |
| 2.8.1. CARRIERE ALZO. | 46 |
| 2.8.2. CARRIERE DMD..... | 47 |
| 2.9. BIBLIOGRAPHIE..... | 49 |

| | |
|---|-----------|
| 3. INCIDENCE DE LA GRANULOMETRIE SUR LES FLUX ET LES COUTS D'EXPLOITATION..... | 51 |
| 3.0. INTRODUCTION..... | 51 |
| 3.1. CALCUL DES PARAMETRES ECONOMIQUES..... | 51 |
| 3.1.1. LES COUTS DE PRODUCTION..... | 51 |
| 3.1.2. CALCUL DES FLUX MOYENS..... | 52 |
| 3.1.3. LA VALEUR D'UN STOCK ET LA VALEUR AJOUTEE..... | 52 |
| 3.1.4. CALCUL DES FLUX « INSTANTANES »..... | 54 |
| 3.1.5. LE DIAGRAMME FLUX-COUT-FRAGMENTATION..... | 54 |
| 3.2. LA FORATION ET LE MINAGE..... | 55 |
| 3.2.1. INTRODUCTION..... | 55 |
| 3.2.2. CARRIERE ALZO..... | 55 |
| 3.2.3. CARRIERE DMD..... | 57 |
| 3.3. LE CYCLE CHARGEMENT-TRANSPORT-CONCASSAGE PRIMAIRE..... | 59 |
| 3.3.1. INTRODUCTION..... | 59 |
| 3.3.2. CARRIERE ALZO..... | 60 |
| 3.3.2.1. DONNEES GLOBALES TIR PAR TIR..... | 61 |
| 3.3.2.2. UTILISATION D'UN RESEAU DE NEURONES..... | 63 |
| 3.3.2.3. LE RESEAU DE NEURONE POUR LA CARRIERE ALZO..... | 64 |
| 3.3.2.4. SIMULATIONS POUR LA CARRIERE ALZO..... | 65 |
| 3.3.3. CARRIERE DMD..... | 69 |
| 3.3.3.1. LES DONNEES BRUTES..... | 69 |
| 3.3.3.2. LE RESEAU DE NEURONE POUR LA CARRIERE DMD..... | 72 |
| 3.3.3.3. SIMULATION POUR LA CARRIERE DMD..... | 73 |
| 3.4. BIBLIOGRAPHIE..... | 76 |
| 4. GEOLOGIE, PARAMETRES DE TIR ET DEGRE DE FRAGMENTATION DES ROCHES..... | 77 |
| 4.0. INTRODUCTION..... | 77 |
| 4.1. DONNEES GEOLOGIQUES..... | 77 |
| 4.1.1. INFLUENCE DES DISCONTINUITES GEOLOGIQUES..... | 77 |
| 4.1.2. INFLUENCE DU TYPE DE ROCHE..... | 77 |
| 4.2. PARAMETRES DE TIR..... | 78 |
| 4.2.1. LA CHARGE SPECIFIQUE..... | 78 |
| 4.2.2. LA GEOMETRIE DU TIR..... | 79 |
| 4.2.3. L'AMORCAGE..... | 79 |
| 4.3. METHODOLOGIE PROPOSEE..... | 80 |
| 4.3.1. CALCUL DES INDEX DE TIR..... | 81 |
| 4.3.1.1. LA CHARGE SPECIFIQUE..... | 81 |
| 4.3.1.2. LA FLECHE..... | 81 |
| 4.3.1.3. LA SEQUENCE D'AMORCAGE..... | 81 |
| 4.3.1.4. LE NOMBRE DE RANGEES..... | 84 |
| 4.3.1.5. LES MINES DE PIEDS..... | 84 |
| 4.3.1.6. LA POSITION DE L'AMORCAGE..... | 85 |
| 4.3.1.7. INDEX DE REPARTITION..... | 85 |
| 4.3.2. CHOIX D'UN INDEX GEOLOGIQUE..... | 85 |
| 4.3.3. REMARQUES SUR LE CHOIX DES INDEX..... | 87 |
| 4.4. UTILISATION D'UN RESEAU DE NEURONES..... | 87 |
| 4.5. PRESENTATION DES RESULTATS ET SIMULATIONS..... | 88 |
| 4.5.1. LA CARRIERE ALZO..... | 88 |
| 4.5.1.1. LA CHARGE SPECIFIQUE..... | 89 |
| 4.5.1.2. L'APPRENTISSAGE..... | 89 |
| 4.5.1.3. LA VALIDATION..... | 90 |
| 4.5.1.4. SIMULATIONS..... | 91 |
| 4.5.1.4.1. LA SEQUENCE D'AMORCAGE..... | 91 |
| 4.5.1.4.2. L'ENERGIE, VARIATION DE LA CHARGE SPECIFIQUE..... | 91 |
| 4.5.1.4.3. LA MAILLE..... | 92 |

| | |
|---|------------|
| 4.5.1.4.4. LA DIRECTION DU TIR. | 93 |
| 4.5.1.4.5. RECAPITULATIF..... | 94 |
| 4.5.2. LA CARRIERE DMD. | 95 |
| 4.5.2.1. LA CHARGE SPECIFIQUE..... | 95 |
| 4.5.2.2. L'APPRENTISSAGE..... | 96 |
| 4.5.2.3. SIMULATIONS. | 96 |
| 4.5.2.4. LE NOMBRE DE RANGEES. | 97 |
| 4.5.2.5. LES MINES DE PIED. | 97 |
| 4.5.2.6. LA CHARGE SPECIFIQUE..... | 98 |
| 4.5.2.7. LA DIRECTION DU TIR. | 98 |
| 4.5.2.8. RECAPITULATIF. | 100 |
| 4.6. BIBLIOGRAPHIE..... | 101 |
| 5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES. | 103 |
| 5.1. LA DEMARCHE..... | 103 |
| 5.2. LES RESULTATS..... | 104 |
| 5.2.1. LA CARRIERE ALZO. | 104 |
| 5.2.2. LA CARRIERE DMD. | 105 |
| 5.3. PERSPECTIVES. | 105 |
| 5.3.1. VERS UN MODELE GRANULOMETRIQUE MULTIMODALE. | 105 |
| 5.3.2. UTILISATION DES CARACTERISTIQUES INTRINSEQUES DES ROCHES. | 108 |
| 5.3.3. PERSPECTIVES GENERALES. | 109 |
| 5.4. BIBLIOGRAPHIE..... | 111 |
| 6. ANNEXES. | |
| 7. RESUME. | |

0. INTRODUCTION.

La productivité et la rentabilité d'une carrière à ciel ouvert sont-elles influencées par la fragmentation des roches lors de l'abattage à l'explosif ?

Cette question, simple en apparence, est pourtant une interrogation permanente dans le secteur de l'industrie minière. Les outils permettant de quantifier cette influence n'existent pas ou répondent à la question de manière partielle (ou partielle). L'objet de ce travail est donc d'organiser les outils existants, de développer un système de collecte et d'analyse de données, pour permettre le suivi sur une carrière, de la productivité, des coûts de production, ... en parallèle avec l'analyse de la fragmentation des roches lors de l'abattage à l'explosif. L'unité de suivi de la production sera le tir, remplaçant les habituelles unités de temps (jour, mois,...).

Une autre question récurrente dans le secteur de l'industrie minière est: Quelles sont les modifications dans la réalisation des tirs qui permettent de modifier la courbe granulométrique résultant d'un tir ?

La bibliographie est très riche sur ce sujet. De nombreux paramètres déterminants ont été identifiés. De nombreuses méthodes d'évaluation existent. La principale difficulté réside dans la détermination de la granulométrie « exacte » des tirs. Cette énième étude sur le sujet devra donc être quantitative pour valider les choix techniques.

L'intérêt économique est bien réel, en calculant précisément les flux, les coûts d'exploitation ... pour l'ensemble du cycle de production d'une carrière, en corrélation avec la granulométrie des tas issus des tirs d'abattage à l'explosif, on pourra déterminer un (ou des) optimum de fragmentation pour une carrière, en ayant au préalable défini les besoins de la carrière en terme de granulométrie.

Une approche par réseau de neurones sera largement utilisée dans ce travail pour l'interprétation des données expérimentales tant pour l'étude des flux que pour l'étude des tirs d'abattage à l'explosif.

Cette thèse a eu pour cadre le projet européen, BLAST CONTROL (BE97/4604). Cinq partenaires ont été associés pour ce projet: Nitro-Bickford (fabricant d'explosifs, France), Calcinor SA (carrière Alzo, Espagne), Groupe Lhoist (carrière des Dolomies de Marches les Dames, Belgique), Armines-Ecole des Mines de Paris (France) par le Centre de Géotechnique et d'Exploitation du Sous-sol, le Département d'Ingénierie et d'Economie Minière de l'Université de Leoben (Autriche).

1. ACQUISITION ET STRUCTURATION DES DONNEES.

1.0. INTRODUCTION.

Le fil conducteur de ce travail est de construire un outil permettant l'analyse conjointe d'une part des performances économiques (flux et coûts) d'une carrière et de la granulométrie résultant du tir et d'autre part des paramètres techniques des tirs d'abattage à l'explosif et de la granulométrie résultant du tir. Afin de répondre globalement à la question suivante : la pratique du tir a-t-elle une influence sur les performances économiques ?

Sur les carrières, les opérations étudiées seront les suivantes: **Foration, Minage, Chargement, Transport, Concassage primaire**, on se limite donc à la chaîne primaire de production.

Plutôt que de réaliser ce travail en coût réel, difficilement accessible, nous avons choisi de calculer pour chaque opération se déroulant sur la carrière, et pour chaque tir, des unités d'œuvres (heure, mètre...). Celles-ci, multipliées par un coût moyen annuel par unité d'œuvre nous donneront le coût d'une opération pour chaque tir. Les flux pour chaque opération sur un tir seront également calculés. Nous diviserons les unités d'œuvres par le volume (volume, tonnage, ...) traité. Le calcul des coûts d'exploitation et des flux dont on effectuera une analyse « statistique » sera explicité au chapitre 3.

La granulométrie d'un tir sera déterminée à partir des informations collectées par le système Fragscan-Camion (voir chapitre 2). Cette information sera complétée par la mesure de la proportion de 0-30 mm après concassage primaire (sur des convoyeurs à bande après criblage), lorsque celle-ci est disponible sur un mode tir par tir.

Les paramètres techniques de tir suivants seront recueillis: La géométrie du tir (espacement, banquette, hauteur), l'orientation du « plan » de foration par rapport aux principales discontinuités géologiques, les explosifs utilisés (Type et quantité), la séquence et la position de l'amorçage, le nombre de mine de pied, le nombre de rangées (voir chapitre 4).

On pourrait dérouler la réflexion sur la gestion des données depuis l'acquisition jusqu'aux résultats à comparer d'un point de vue statistique mais il me semble plus logique de construire la structure de la base de données à partir de ce que l'on veut étudier. Le choix de ce que l'on souhaite comparer va automatiquement générer des contraintes. Elles vont se répercuter sur l'organisation des données mais aussi sur leur mode d'acquisition. L'outil devra être le plus universel possible, et s'appliquera à toute sorte de carrière. Au cours de cette réflexion, nous chercherons les points critiques d'une telle structure. A partir de là, nous déterminerons l'interface propre à chaque carrière qui permettra de « formater » les données acquises sur chaque site.

Le fonctionnement des exploitations ALZO et DMD, qui ont servi de cadre à ce travail, sera sommairement abordé puis le choix du diagramme de comparaison des performances économiques sera explicité, il a été proposé par Ricardo Chavez de Nitro-Bickford. Suivra l'explication des différents formats composant le squelette de la base de données et la façon de transférer les informations depuis les données de terrain jusqu'aux informations sur un mode tir par tir pour les opérations indiquées ci-dessus. Sera ensuite indiqué le diagramme de comparaison de l'efficacité des tirs qui sera explicité aux chapitres 2 et 4.

1.1. DESCRIPTION DES EXPLOITATIONS.

1.1.1. LA CARRIERE DMD.

La carrière des Dolomies de Marches les Dames (DMD), groupe Lhoist, est située à une dizaine de kilomètres de Namur en Belgique en bordure de la Meuse. C'est un gisement de

dolomie à pendage faible et chimie très variable dont les usages industriels et agricoles sont divers. Pour répondre aux besoins de leurs différents clients, les exploitants sont obligés à un suivi rigoureux des teneurs en plusieurs éléments (Mg, Fe principalement). Cette obligation de qualité impose qu'aucun mélange ne soit effectué entre les tirs avant le concassage primaire : ce qui est un atout très appréciable pour ce travail. La carrière est exploitée sur deux postes, mais l'installation de concassage fonctionne 24h/24h. Deux machines sont utilisées pour la foration, la première exclusivement pour la foration verticale. Les conducteurs de foreuse ne participent pas à l'opération de minage. L'équipe de minage réalise deux à trois tirs par semaine, elle est également chargée de la purge manuelle des talus. Le chargement est réalisé par deux chargeuses. Quatre tombereaux de 75 tonnes, un tombereau de 50 tonnes et un tombereau de 35 tonnes constitue la flotte de transport. Ils ont pour charge l'alimentation du concasseur primaire pour les matériaux destinés à un usage industriel (celui dont nous effectuerons l'étude). Ils sont aussi chargés de l'alimentation de l'installation de production de granulats et de l'alimentation d'un « stock de nuit ». La nuit le concasseur est alimenté par une chargeuse. Au poste de concassage primaire, un opérateur surveille en permanence la chaîne de production et note l'arrivée de chaque tombereau. Une entreprise sous traitante est employée pour le décapage des terres et pour l'alimentation d'un trommel, production de « petits » enrochements.

1.1.2. LA CARRIERE ALZO.

La carrière ALZO, Calcinor SA, est située en Espagne, au pays basque, au sud de San Sébastien. C'est un gisement de calcaire probablement récifal à fort pendage dont l'utilisation principale est la production de chaux. Cette exploitation, dont les réserves sont limitées, a besoin de réduire au maximum la production de fine (0-30 mm) car les débouchés ne sont pas satisfaisants et de plus la mise en décharge pose des problèmes d'environnement. La carrière compte 15 employés répartis sur deux postes, deux chefs de poste ; un chef de carrière et un ingénieur de production qui s'occupe également des autres installations de la carrière (usine de préparation de la chaux, unité de préparation des granulats). Le poste du matin est consacré à la foration avec trois machines, une foreuse hydraulique à marteau fond de trou pour les mines verticales, deux crawls pneumatiques pour les mines horizontales. Lorsqu'il y a un tir sur la carrière, une fois par semaine environ, l'équipe de foreur, le chef de poste et le chef de carrière sont chargés de sa réalisation. Pour le chargement en carrière, deux chargeuses identiques sont utilisées : il peut donc y avoir mélange entre tir dans la trémie d'alimentation du concasseur primaire. Le transport vers le concasseur primaire est réalisé avec trois tombereaux de 60 tonnes et un tombereau de 35 tonnes. Au niveau du concasseur primaire, un agent est chargé de la surveillance de l'installation et de son bon fonctionnement. Sur le poste de l'après midi, une seule chargeuse est utilisée et le concasseur primaire est alimenté par deux tombereaux.

1.2. LES ELEMENTS ECONOMIQUES.

L'approche habituelle que l'on retrouve par exemple dans Peck (A.01) et Michaud (C.09) pour la comparaison des tirs sur l'ensemble des opérations sur le cycle de production est de comparer les coûts. Il est vrai que cette préoccupation de maîtriser les coûts de production est très importante sur toutes les carrières.

Mais dans certains cas la préoccupation principale du carrier est de maîtriser ces flux pour satisfaire les besoins de ses clients. Ces deux préoccupations sont donc à prendre en compte de manière conjointe. De plus, si l'on travaille comme nous, à partir de coûts moyens théoriques par unité d'œuvre, une amélioration des flux va se traduire par une diminution des coûts moyens réels. Il est donc bien nécessaire de raisonner tant en terme de coûts qu'en terme de flux. La figure 1.2.a nous montre comment on améliore de manière certaine les performances économiques d'une carrière à partir de l'étude d'un diagramme Flux - Coût.

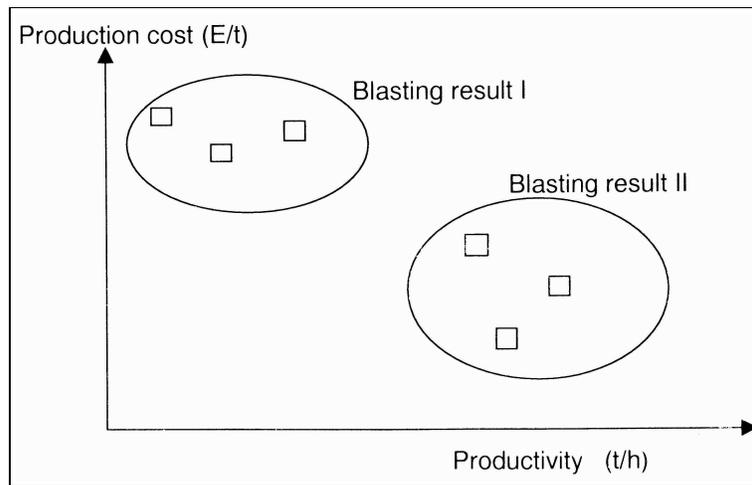


Figure 1.2.a.

On peut ensuite considérer qu'un fragment de dimension Φ_1 a plus d'intérêt qu'un fragment de dimension Φ_2 en fonction de l'usage qui pourra en être fait. Nous envisagerons donc de calculer une valeur du matériau en fonction de la courbe granulométrique de celui-ci, figure 1.2.b, et de sa « position » dans le cycle de production - Un fragment de diamètre Φ_1 ayant plus d'intérêt dans un stock calibré que dans un mélange.

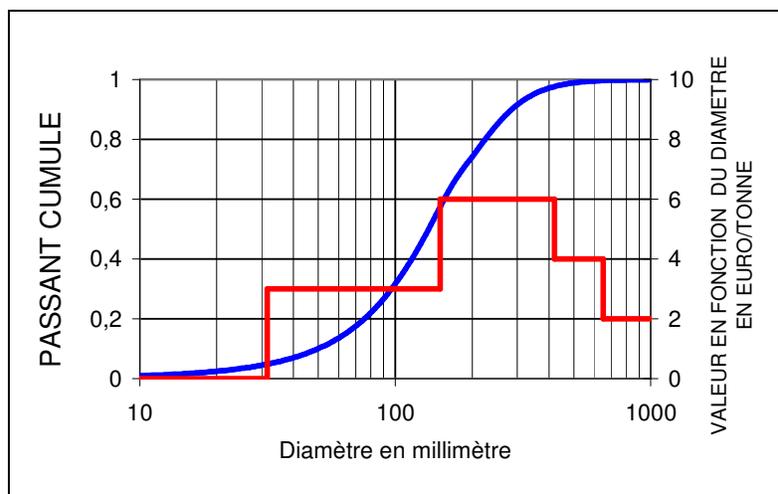


Figure 1.2.b.

Nous obtenons donc un troisième axe de comparaison des tirs, la granulométrie que nous traduirons par une valeur moyenne du stock traité, figure 1.2.b. Il est évident que d'autres paramètres (distance, organisation du transport, ...) vont interférer dans cette représentation, le traitement de ces « interférences » sera pour partie l'objet du chapitre 3.

1.3. INTEGRITE DE L'INFORMATION PAR TIR.

Pour calculer et comparer des coûts et des flux de production, nous devons être à même de déterminer des unités d'œuvres (dans la plupart des cas se sont des heures de fonctionnement) et des volumes traités par tir pour chaque opération à étudier. Nous pouvons donc par exemple recueillir les heures de tombereau affecté à un tir et d'un autre coté le volume du tir que nous retrouvons dans la fiche de tir. Cette approche est à priori très alléchante car elle ne nécessite pas un système d'acquisition de données très complexe. Cette méthode que l'on

peut appliquer dans de nombreux cas se heurte pourtant à deux difficultés : l'exhaustivité des masses et celle des heures.

L'exhaustivité des masses: Peut-on être certain que tout le matériau d'un tir sera transporté vers le concasseur primaire? Cela n'est en général pas le cas puisque les plus gros blocs ayant un débouché en travaux hydrauliques sont triés au chargement et donc soustraits au flux classique vers le concasseur primaire. Si l'on prend le cas de la carrière DMD, figure 1.3.a, on voit que les « fuites » sont encore plus nombreuses, tri des blocs, création d'un stock tampon pour la nuit, flux vers une deuxième installation de concassage ...

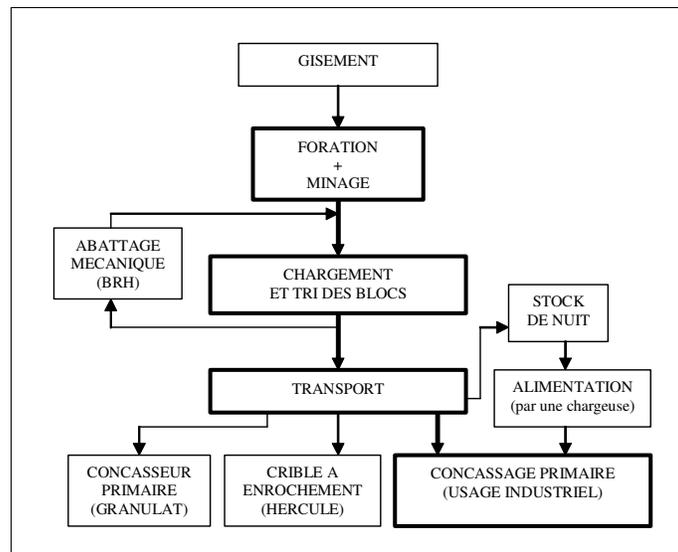


Figure 1.3.a.

L'exhaustivité des heures: Dans le cadre d'un auto-pointage, on peut supposer que le sérieux des chauffeurs dans cette opération de pointage va permettre une connaissance exhaustive des heures affectées à chaque tir. Dans le cadre d'un pointage automatique ou semi-automatique la fiabilité du capteur devra être totale pour garantir cette exhaustivité.

Ces difficultés nous montrent qu'il n'est pas possible de travailler de manière séparée sur les unités d'œuvres (heures en général) et sur les volumes traités. C'est à dire qu'il est nécessaire pour chaque opération, avant de calculer le total des unités d'œuvres et des volumes, de vérifier qu'à chaque séquence de travail correspond effectivement un volume traité. On entend par séquence de travail ou séquence de production une période de temps continue où l'on va clairement identifier à la fois la durée effective de travail, la quantité de matériau traité, la provenance du matériau et la personne, le groupe de personne ou l'engin qui travaille.

On arrive donc à une étape essentielle dans la structure d'acquisition et de traitement des données avec une séquence de production comprenant :

Le type d'opération : chargement, transport...

L'affectation (à un tir).

Le type, le numéro et la configuration du véhicule (et/ou de l'équipe).

Le type et le nombre d'unité d'œuvre

Le type (unité) et le volume traité.

La sommation par opération, par véhicule va nous permettre d'obtenir les unités d'œuvres et les volumes traités sur un mode tir par tir.

En principe il est tout à fait possible d'adjoindre à l'information par séquence une composante de type granulométrique ou une autre caractéristique du matériau (couleur, radioactivité, ...), mais l'extrapolation de la courbe granulométrique dans le but de quantifier le pourcentage de fines n'est possible qu'avec un nombre suffisant d'images qu'on ne retrouve pas si l'on considère uniquement les données granulométriques correspondant à une séquence de production (voir chapitre 2).

Dans le cadre d'une analyse des données par séquence et non plus tir par tir (voir chapitre 3), on peut être amené à s'intéresser à la position de la séquence dans l'échelle du temps. Dans ce cas on peut adjoindre à l'information par séquence les dates et heures de début et fin de celle ci ; ceci étant facultatif pour le calcul des coûts et des flux.

1.4. OBTENTION DE L'INFORMATION PAR SEQUENCE.

Il est maintenant question d'obtenir à partir des données collectées sur le terrain une information par séquence de production. Pour chaque opération, foration, minage, chargement, transport, concassage primaire, nous devons donc définir qu'elles seront nos unités d'œuvres, le type de volume traité et le moyen de les collecter.

1.4.1. LA FORATION.

Le calcul des coûts réels de foration nécessite la prise en compte de nombreux paramètres: consommation en gas-oil, outil de foration, consommables, entretien, amortissement de la machine, main d'œuvre... Il est rare, et également impossible, que cette information soit recueillie sur un mode tir par tir. Nous devons donc définir nos unités d'œuvres de manière plus simple. Il est certain qu'une affectation des heures de foration par machine et par tir est tout à fait envisageable ce qui correspondrait aux séquences de production suivantes:

FORATION, affectation (n° du tir), type et numéro de la machine, durée de la séquence, volume total du tir. Il pourrait y avoir plusieurs séquences par tir si le travail est fractionné et/ou effectué par plusieurs machines. Cette affectation des heures doit être totalement rigoureuse et l'on doit exclure par exemple les heures de transfert pour effectuer une comparaison objective des tirs.

Dans le cas des carrières ALZO et DMD, cette information n'est pas collectée. Nous devons donc nous contenter des informations contenues dans les fiches de tir, c'est à dire le linéaire de foration hors sur-profondeur. Cette donnée est très objective mais a tout de même l'inconvénient de ne pas tenir compte des caractéristiques locales du matériau (altération, faille,...). Pour être également plus objectif dans notre comparaison des tirs, il faudra distinguer pour chaque tir les différents diamètres de foration utilisés mais aussi la foration sub-horizontale et la foration sub-verticale où les rendements sont différents.

La séquence de production de foration sera donc la suivante:

FORATION.

Affectation (n° du tir).

Numéro et type de la machine.

Type de foration (verticale/horizontale) et diamètre de foration.

Linéaire correspondant de foration (unité d'œuvre).

Volume du tir.

Le volume du tir est celui calculé par le responsable du tir et il nous est transmis sur la fiche de tir. Même si ce calcul de volume n'est pas toujours aussi précis que nous le souhaitons, il est toujours réalisé par la même personne et de la même façon.

Lors du calcul final des coûts et des flux tir par tir, il faudra noter que le volume total du tir est affecté à chaque séquence de production. Ainsi il est nécessaire de savoir qu'on se rapporte toujours au volume total du tir. C'est pourquoi il faut ajouter un index montrant qu'il s'agit bien du volume total du tir. En effet, il est pratique de rapporter le linéaire de foration horizontale, le linéaire de foration verticale au volume total du tir pour mieux apprécier la part relative de chacun des types de foration. Les coûts unitaires par unité d'œuvre correspondront donc à chaque ensemble type de machine, type de foration et diamètre de foration. On peut bien sûr adjoindre une information pour situer la séquence dans le temps mais cela ne représente pas un caractère obligatoire.

1.4.2. LE MINAGE.

Là encore, il serait souhaitable de recueillir les heures de main d'œuvre pour la mise en œuvre des explosifs (et pourquoi pas pour la conception des tirs). Mais cette information est rarement disponible et, de plus, les temps incompressibles, par exemple de mise en sécurité avant le tir, sont difficiles à estimer et à inclure dans un comparatif. C'est pourquoi on peut faire le choix de ne retenir comme unité d'œuvre que les quantités de consommables (explosifs, détonateurs ...). Mais la part de main d'œuvre est loin d'être négligeable dans cette opération. De plus le coût de mise en œuvre des explosifs est totalement différent pour un tir de relevage et un tir classique. Le mode de conditionnement des explosifs est également à prendre en compte. Je propose donc, en plus des unités d'œuvres par consommables, de travailler sur des rendements moyens pour différents modes de mise en œuvre: Mine de pied et tir de relevage = 100 Kg/heure, mine sub-verticale = 300 Kg/heure, chargement par camion citerne = 600 kg/heure (Rendements approximatifs observés sur les deux carrières).

Le but n'est pas de calculer de manière exacte les coûts mais plutôt de se fixer des ordres de grandeur pour faciliter la comparaison entre tirs. Le volume est le volume total du tir.

La séquence de production de minage à la forme suivante:

MINAGE.

Affectation (n° du tir).

Type d'unité d'œuvre (type d'explosif, de consommable ou main d'œuvre).

Nombre d'unité d'œuvre (quantité ou heure).

Volume total du tir.

Le volume du tir est celui calculé par le responsable du tir et il nous est transmis sur la fiche de tir. Même si ce calcul de volume n'est pas toujours aussi précis que nous le souhaitons, il est toujours réalisé par la même personne et de la même façon.

1.4.3 LE TRANSPORT.

Les deux opérations chargement et transport sont dépendantes et nous verrons par la suite que les séquences de chargement seront calculées dans les cas de figures traitées ici à partir des cycles de transport. C'est pourquoi nous commencerons par décrire le mode d'acquisition et de calcul des séquences de production de transport.

Pour le transport, la séquence de production générique choisie est la suivante:

TRANSPORT.

Numéro et type du véhicule,

Type et nombre d'unité d'œuvre.

Type de volume et nombre de volume transporté (nombre de cycle de transport ou tonnage).

On ne tient pas compte des coûts réels en particulier le gasoil à cause de la difficulté de l'affecter sur un mode tir par tir. Les unités d'œuvres sont bien entendues des heures mais on peut tout à fait envisager une autre façon de comptabiliser le travail, par exemple, les kilomètres parcourus. L'unité en général la plus appropriée pour dénombrer le volume traité est le nombre de cycle de transport. Mais là aussi, c'est une question de convention, et l'on peut envisager de comptabiliser les masses transportées si elles sont mesurées lors du transport, juste avant ou juste après.

Dans le cas de nos deux carrières ALZO et DMD, c'est bien la connaissance du cycle de transport qui est nécessaire. La durée d'un cycle peut être mesurée entre deux passages sur un point fixe : le concasseur primaire, si l'on ne dispose pas d'un positionnement GPS. C'est le choix qui a été fait sur les deux carrières. Le pointage est manuel sur la carrière DMD où un opérateur note l'arrivée de chaque camion avec une précision de 15 minutes environ. Il n'y a pas alors d'affectation à un tir. Dans le cas de la carrière ALZO, le chauffeur, à l'aide d'un boîtier, prévient l'automate qui gère l'ensemble de l'installation de concassage primaire, de son arrivée sur l'aire de déchargement. Son départ est automatiquement enregistré par l'automate. Là, non plus, il n'y a pas directement d'affectation à un tir.

La gestion des affectations à un tir est différente pour les deux installations. Pour la carrière DMD, le brigadier (chef d'équipe) note sur un agenda les plages de temps où l'installation de concassage primaire reçoit tel ou tel tir (il n'y a jamais de mélange de tir). Pour la carrière ALZO, le conducteur de l'installation de concassage primaire a une table d'affectation dynamique des camions aux tirs qui est automatiquement et immédiatement transmise à l'automate qui croise instantanément les informations de pointage et d'affectation.

Dans les deux cas, l'acquisition du cycle de transport, début et fin, et son affectation à un tir ne sont pas réalisées sur le même support. Cette situation nous éclaire sur la nécessité de laisser aux exploitants la possibilité de gérer de manière distincte le pointage des cycles de transport (et plus généralement tout cycle élémentaire de production) et l'affectation à un tir (et d'ailleurs à tout autre mode d'affectation). Le pointage est à réaliser obligatoirement en direct alors que l'affectation à un tir qui doit néanmoins être la plus précise possible, n'a pas nécessairement à être réalisée en temps réel.

Il est, de plus, souhaitable de prévoir dans la structure d'acquisition et de traitement des données une étape où l'on retrouve d'un côté l'affectation du véhicule et d'un autre côté, les caractéristiques du cycle de transport, par exemple n° de camion, début du cycle, fin du cycle.

Nous obtenons donc deux niveaux supplémentaires dans la structure d'acquisition et de traitement des données. C'est en premier lieu, d'une part, la table d'affectation des véhicules aux tirs et d'autre part, le cycle de production élémentaire non affecté à un tir. Puis pour remonter à l'information par séquence de production, il nous suffit de croiser les cycles de production élémentaires et les plages d'affectation : ce qui nous permet d'obtenir des séquences de transport élémentaires. Il faut ensuite sommer les séquences élémentaires directement consécutives appartenant à la même affectation (même tir) et au même camion pour obtenir les séquences de production de transport. Notons que cette information par séquence de production de transport peut être associée à une information sur sa position dans le temps (début et fin) de manière facultative.

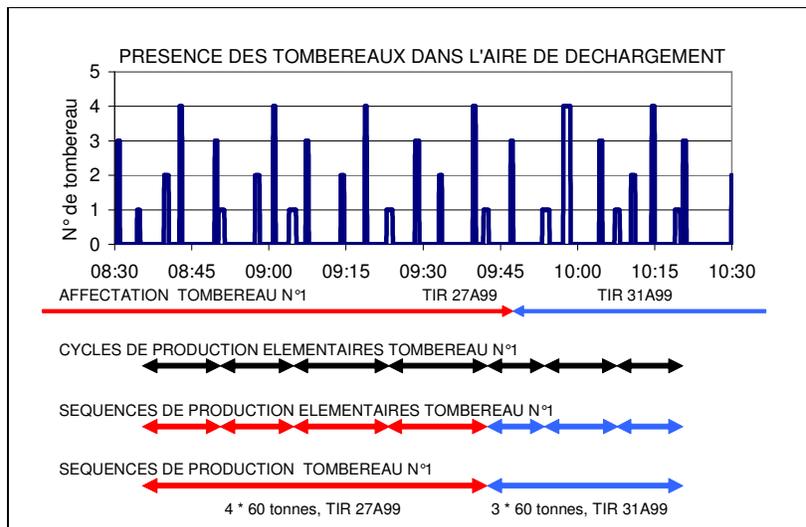


Figure 1.4.3.a.

La forme de ces informations sera la suivante:

Affectation: N° de tir, n° du véhicule, bornes extrêmes de l'affectation (basée sur l'heure de déchargement du tombereau).

Cycle de production élémentaire: N° du véhicule, début et fin du cycle de production.

Séquence de production élémentaire de transport:

Affectation.

Numéro du véhicule.

Nombre d'unité d'œuvre de la séquence élémentaire (en général durée du cycle)

Début et fin de la séquence élémentaire.

Type et volume traité (un cycle en général).

La notion de type de volume et la nécessité de l'indiquer n'est pas évidente mais elle permettrait par exemple de différencier deux matériaux ayant des masses volumiques différentes.

Séquence de production de transport:

TRANSPORT.

Affectation (n° de tir).

Numéro, type de véhicule et configuration.

Type et nombre d'unité d'œuvre.

Type et volume traité.

Début et fin de la séquence.

1.4.4. LE CHARGEMENT.

Sur les carrières DMD et ALZO, nous ne disposons d'aucune information directement collectée concernant les volumes traités pour l'opération chargement. Nous devons donc utiliser l'information contenue dans les séquences de production élémentaires de transport, pour calculer les séquences de production de chargement. Par contre, nous savons qu'il est *improbable* que deux chargeuses travaillent en même temps sur un même tir.

La méthode de calcul des séquences de production de chargement est la suivante: Prenons toutes les séquences de production élémentaires de transport affectées à un même tir et qui se chevauchent. La séquence de production de chargement calculée aura alors comme bornes extrêmes, les bornes extrêmes de toutes ces séquences de production élémentaires de transport, figure 1.4.4.a. En ce qui concerne le volume traité nous devons distinguer tous les types de camions chargés. C'est à dire que l'on obtiendra plusieurs séquences de production de chargement ayant les mêmes bornes (et même durée) mais concernant chacune un type de volume chargé.

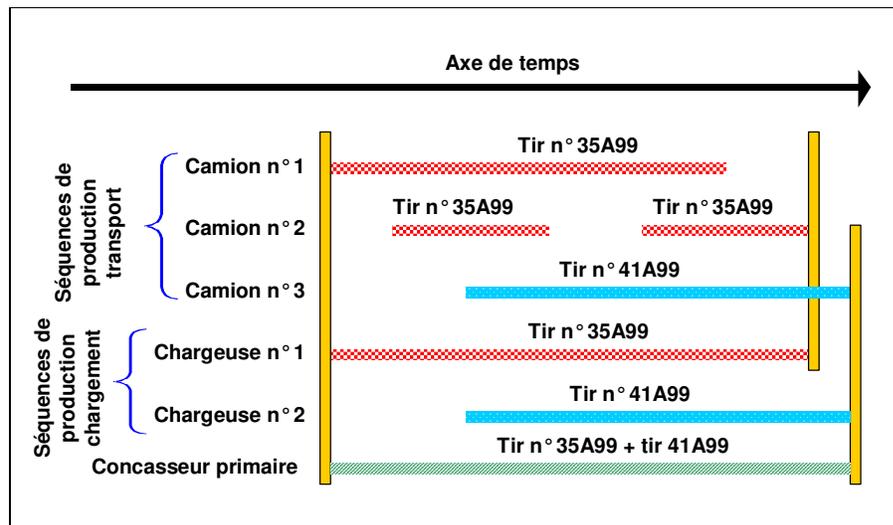


Figure 1.4.4.a.

Nous devons donc faire attention lors de la sommation finale des unités d'œuvres. Ceci implique la mise en place d'un index qui permettra de reconnaître les séquences de production de chargement simultanée dont on ne peut sommer les unités d'œuvres (heures). On voit bien ici l'intérêt de conserver l'information sur les bornes de la séquence de production pour éviter d'additionner des plages de temps simultanées.

La séquence de production de chargement aura donc la forme suivante:

CHARGEMENT.

Affectation (n° de tir).

Numéro, type du véhicule et configuration (Cette information nécessitera d'obtenir la configuration et l'affectation de chaque chargeuse sur la période considérée).

Type et nombre d'unité d'œuvre.

Type de volume et volume traité.

Début et fin de la séquence.

1.4.5. LE CONCASSAGE PRIMAIRE.

Comme nous l'avons dit, sur la carrière DMD il n'y a pas de mélange de tir au niveau du concasseur primaire. Par contre, sur la carrière ALZO, plusieurs tirs sont mélangés à l'entrée de la trémie d'alimentation du concasseur primaire et il n'est donc pas possible de les distinguer lors du concassage primaire. Deux conceptions différentes ont donc été proposées pour définir les unités d'œuvres et les volumes traités selon les cas :

Cas de la carrière ALZO: On procède de la même manière que pour le passage des données de transport aux données de chargement. L'information de base est la séquence de production élémentaire de transport. Prenons toutes les séquences de production élémentaires de transport qui se chevauchent mais qui n'ont pas nécessairement la même affectation (n° de tir). Alors la séquence de production de concassage primaire calculée aura comme bornes les bornes extrêmes de toutes ces séquences de production élémentaires de transport. De plus il y aura une séquence par affectation (n° de tir) et par type de volume (type de camion), figure 1.4.4.a.

Le volume par type de volume sera sommé sur la séquence attribué à une même affectation (n° de tir) même si les volumes ne proviennent pas nécessairement de l'affectation en question.

Il n'y a pas de ventilation des masses et des heures au prorata des masses provenant des différents tirs mais fusion des flux. On voit donc apparaître un biais dans la comparaison des tirs mais il paraît inévitable dès qu'il y a mélange dans la provenance des flux.

La séquence de production de concassage primaire pour la carrière ALZO aura donc la forme suivante:

CONCASSAGE PRIMAIRE.

Affectation (n° de tir).

Numéro, type de concasseur et configuration.

Type et nombre d'unité d'œuvre.

Type de volume et volume traité.

Début et fin de la séquence.

Cas de la carrière DMD: Sur cette carrière comme il est possible de distinguer les plages d'affectation propre à un tir, il est proposé, en plus, de distinguer les périodes où le concasseur concasse effectivement des périodes où il y a fonctionnement à vide.

Ce choix est réalisé dans l'optique de montrer de manière plus lisible l'influence de la granulométrie sur le concassage primaire. Dans ce cas, le capteur utilisé est un capteur d'intensité du courant électrique dont nous récupérons, à l'aide d'un automate, une information moyennée sur cinq secondes. Le fonctionnement à vide est caractérisé par une valeur nettement inférieure au fonctionnement en charge. Nous pouvons donc transformer ce signal (intensité en fonction du temps) en un signal carré distinguant les plages de fonctionnement des autres.

Pour les volumes traités, nous disposons de mesures sur des bascules dynamiques en sortie de concassage et criblage primaire, (0-31,5) ; (31,5 - 300), ce qui nous donne par ailleurs une information de la granulométrie en sortie de concasseur primaire. La séquence de production de concassage primaire est donc obtenue de la manière suivante:

Sur la plage d'affectation à un tir, on cumule les plages de travail effectif de concassage et également les volumes transportés par les bandes transporteuses.

La séquence de production de concassage primaire pour la carrière DMD aura donc la forme suivante:

CONCASSAGE PRIMAIRE.

Affectation (n° de tir).

Numéro, type de concasseur et configuration.

Type et nombre d'unité d'œuvre (heures de travail effectif).

Type de volume et volume traité.

Début et fin de la séquence.

Là encore, on peut noter, dans la structure d'acquisition et de traitement des données, deux niveaux inférieurs aux séquences de production de concassage primaire. Ceci concerne en premier lieu les plages d'affectation à un tir (qui n'ont pas pour vocation de respecter les bornes réelles de concassage) et les plages de travail effectif continu. Et en une deuxième étape, ces plages de travail effectif sont affectées individuellement à un tir. Dans le cas des séquences de production de concassage primaire (cas de la carrière DMD uniquement) il n'y a pas de bornes de début et de fin de séquence de production de concassage primaire ou plutôt elles sont facultatives et ne représentent pas la durée (nombre d'unité d'œuvre) de la séquence de production. On voit donc qu'il faut prévoir de distinguer les bornes d'une séquence de travail, de la durée effective de travail même si, dans de nombreux cas, la durée de travail correspond à la différence entre les deux bornes.

1.5. RECAPITULATIF.

Trois sources d'informations sont donc utilisées pour l'étude du cycle de Chargement - Transport - Concassage primaire. Il s'agit:

Du signal de présence des dumpers dans l'aire de déchargement.

Du signal d'intensité du concasseur primaire.

Des flux enregistrés sur les bascules dynamiques après concassage primaire.

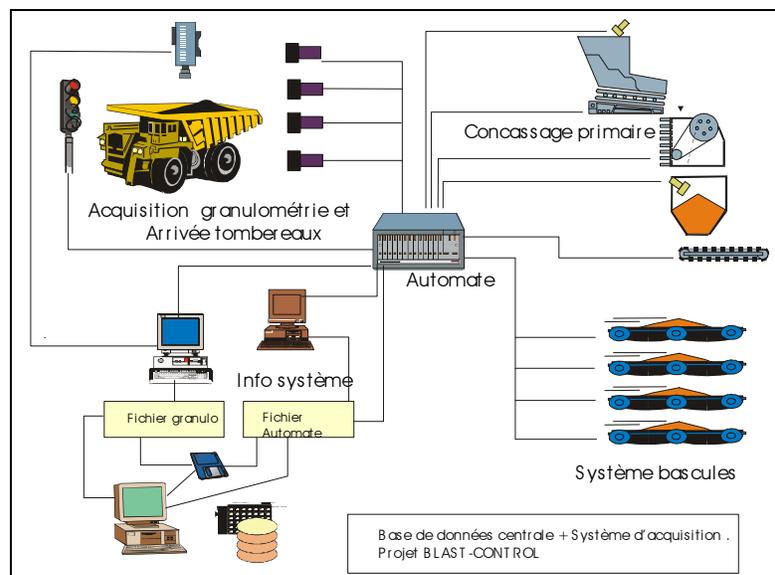


Figure 1.5.a.

L'ensemble de ces informations est collecté manuellement ou par l'automate qui gère l'installation de concassage primaire, figure 1.5.a. Cet automate génère un fichier quotidien. Pour le projet Blast-Control, ce fichier a été prénommé « CRUSHER FILE ». D'autres informations ont été collectées sur ce fichier, en particulier les hauteurs de trémies avant concassage primaire pour la carrière ALZO, pour répondre au besoin des carriers.

Dans le cas de la carrière DMD, ce fichier ne porte pas d'affectation au tir. Dans le cas de la carrière ALZO, cette information est transmise à l'automate à l'aide d'un tableau d'affectation dynamique (n° de camion \Leftrightarrow n° de tir).

D'un point de vue conceptuel, nous pouvons donc considérer que dans les deux cas, nous avons, d'un côté une table d'affectation : tableau d'affectation du brigadier pour la carrière DMD et une table d'affectation dynamique pour la carrière ALZO, et d'un autre côté, un fichier de production non affecté à un tir. Pour dégager l'information essentielle contenue dans les « Crusher files » nous pouvons extraire:

Les plages de présence camion, début et fin.

Les plages de travail continu du concasseur primaire, début et fin.

Les plages de marche continue des bascules dynamiques, début, fin et tonnage.

Soit:

Pour le TRANSPORT :

N° de camion, arrivée au concasseur primaire, départ du concasseur primaire.

Nous devons ensuite rechercher le début de cycle de transport de la « ligne » précédente de présence du camion dans l'aire de déchargement pour obtenir un cycle complet de production, soit :

N° de camion, début du cycle de transport, fin du cycle de transport.

Pour le CONCASSAGE :

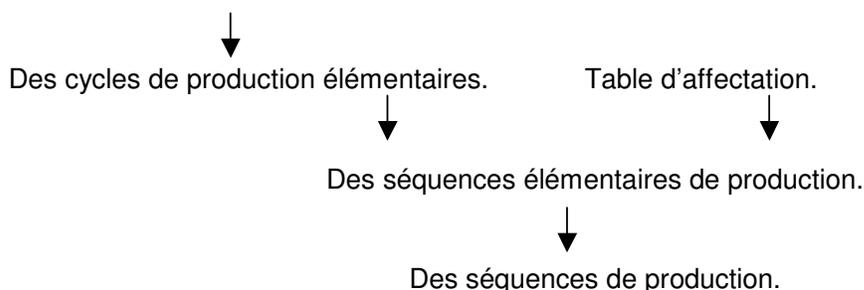
N° du concasseur, début de concassage, fin de concassage.

Pour les BASCULES DYNAMIQUES :

N° de la bascule, début de passage de matériau, fin de passage de matériau, tonnage.

Nous devons ensuite croiser ces informations avec les plages d'affectation pour obtenir les séquences de production. Ceci nous montre que pour toute opération, nous pouvons définir plusieurs niveaux de données:

Des plages d'information continues.



Récapitulatif sur les séquences de production.

Il y a donc sept points à définir pour caractériser une séquence de production:

Le type d'opération. Transport, Chargement ...

L'affectation à un stock de matériau, le tir en règle général.

La machine (et/ou l'équipe) et sa configuration et la configuration de l'opération. La configuration de la machine c'est le diamètre de foration pour une foreuse mais aussi taille du godet pour une chargeuse... La configuration de l'opération permet de différencier les spécificités de l'opération

(foration horizontale/verticale, chargement de bloc/tout venant ...). Ceci permettant de choisir le coût unitaire par unité d'œuvre.

Le type, le nombre d'unité d'œuvre et leur « sommabilité ». Par exemple pour une chargeuse, il n'est pas possible d'additionner deux fois les mêmes heures (même début et fin de séquence de production).

Le type de volume, le volume et sa « sommabilité ». Par exemple le nombre de détonateur est à rapporter au volume du tir, de même pour la quantité d'explosif et pourtant on n'additionne pas les volumes des deux séquences de production car c'est le volume **total** du tir.

La position de la séquence sur l'échelle du temps. Début et fin de la séquence.

1.6. QUALITE - EXHAUSTIVITE.

Nous supposons que l'ensemble des informations collectées manuellement est aussi exhaustive et précise que possible. Ceci concerne les fiches de tir, les plages d'affectation des différents engins, concasseurs, les pointages de camion sur la carrière DMD. Par contre au cours du projet Blast Control, nous nous sommes aperçus de certains dysfonctionnements des différents capteurs qu'il est bon de souligner.

Carrière ALZO, capteur de présence camion: Comme nous l'avons dit précédemment le conducteur de dumper indique sa présence dans l'aire de déchargement à l'aide d'un boîtier. Cette action est volontaire et un oubli intentionnel ou non est tout à fait possible. Dans le but de vérifier l'exhaustivité des pointages, j'ai croisé les informations de pointage camion et les variations de niveau de la trémie, voir figure 1.6.a. Seuls les postes sur lesquels l'exhaustivité des pointages a pu être reconstituée ont été validés et retenus.

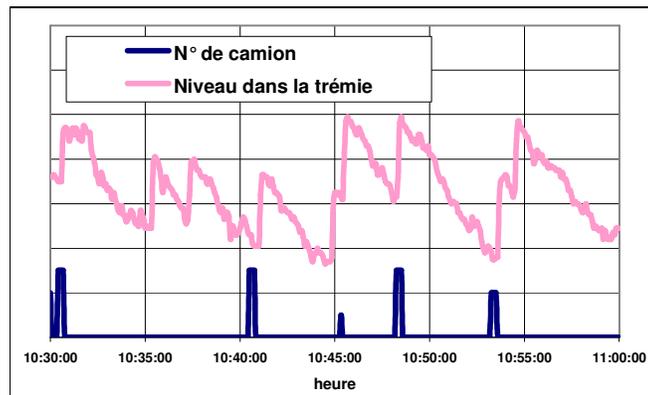


Figure 1.6.a.

Carrières DMD et ALZO, bascules dynamiques: Les documents techniques sur les bascules dynamiques indiquent des précisions de l'ordre de 1 à 2 %. Atteindre cette précision est possible mais uniquement si les bascules sont tarées très régulièrement. A l'entame du projet Blast Control toutes les bascules dynamiques sans exception ont montré des dysfonctionnements majeurs rendant inutilisables les données collectées.

En premier lieu, il y a eu un problème de saturation des bascules dynamiques, carrière DMD figure 1.6.b, entraînant une sous estimation des flux et une impossibilité de déterminer le % de fines après concassage primaire.

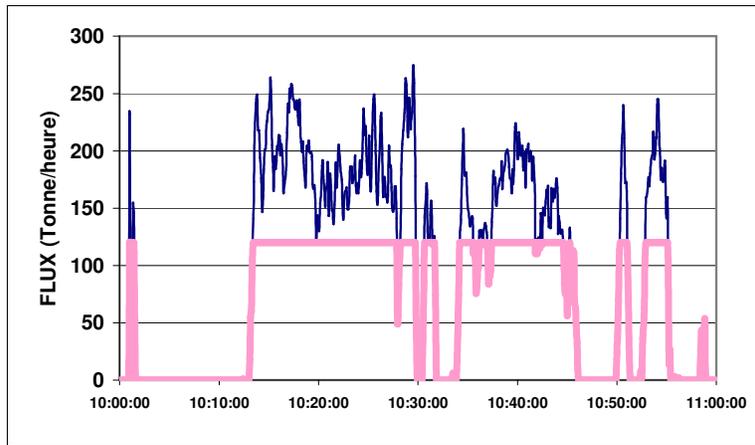


Figure 1.6.b.

Mais on peut noter aussi un problème de calage des bascules dynamiques, carrière ALZO, figure 1.6.c, avec une incohérence des données avant et après réglage. La fiabilité de tels instruments de mesure peut donc être largement remise en cause et si l'on souhaite s'en servir comme tel on peut préconiser une vérification bi-mensuelle de ces instruments.

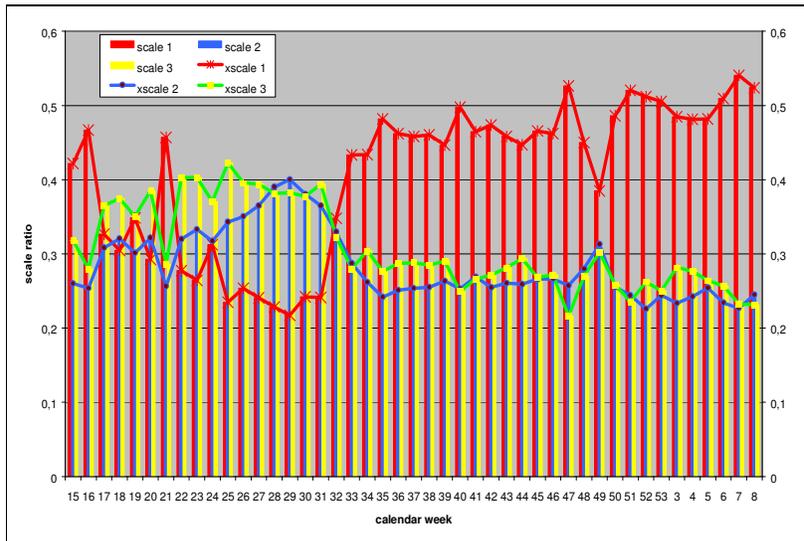


Figure 1.6.c.

Carrières DMD et ALZO, Fragscan:

Trois types de dysfonctionnement de Fragscan ont pu être répertoriés (voir aussi 1.8) :

- Choix inadéquat de l'algorithme de traitement de l'image.
- Déclenchement intempestif de la prise de vue.
- Eclairage non uniforme de la surface photographiée.

Pour repérer ces dysfonctionnements sur la donnée vectorielle, l'image n'étant pas en général conservée, j'ai calculé trois indicateurs (sur l'information Fragscan en pixels) - Taille du bloc maximum - Pente maximum entre deux classes granulométriques - Pente moyenne de la courbe granulométrique (voir aussi chapitre 2). Les dysfonctionnements de Fragscan sont identifiés lorsque la proportion d'image ayant une valeur « anormale » pour un indicateur est trop importante. Par exemple pour le bloc maximum si la valeur est inférieure à 130 mm ou supérieure à 900 mm, on peut suspecter un dysfonctionnement. La figure 1.6.d. illustre les choix réalisés au niveau des pentes moyenne et maximum pour la carrière ALZO. A noter que les

images ne sont pas éliminées individuellement sur le seul critère de ces indicateurs mais aussi par paquets sur les plages de temps où le nombre d'image erronée est trop important, figure 1.6.e. Sur le terrain, un certain nombre d'images erronées ont été repérées, les valeurs trouvées sur les trois paramètres, taille de bloc maximum, pente moyenne et pente maximum, ont permis de définir des coupures permettant de sélectionner les images à valider. Le caractère brutal de ces coupures est atténué par le fait que les images sont éliminées ou conservées sur des plages de temps continues importantes.

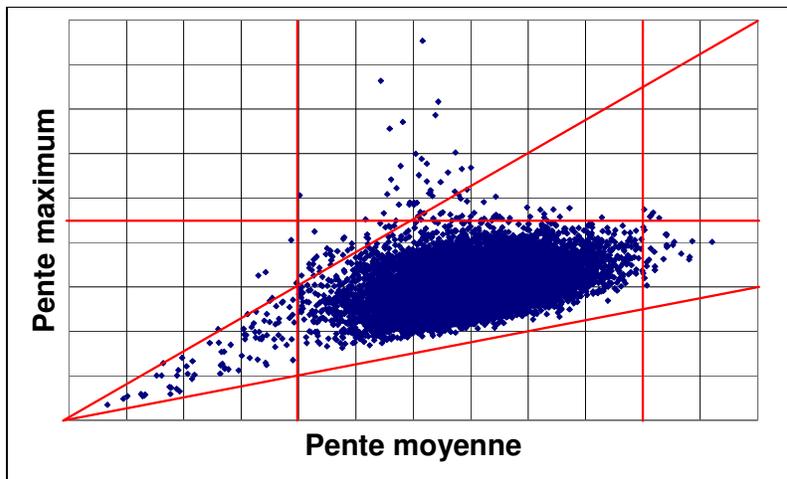


Figure 1.6.d.

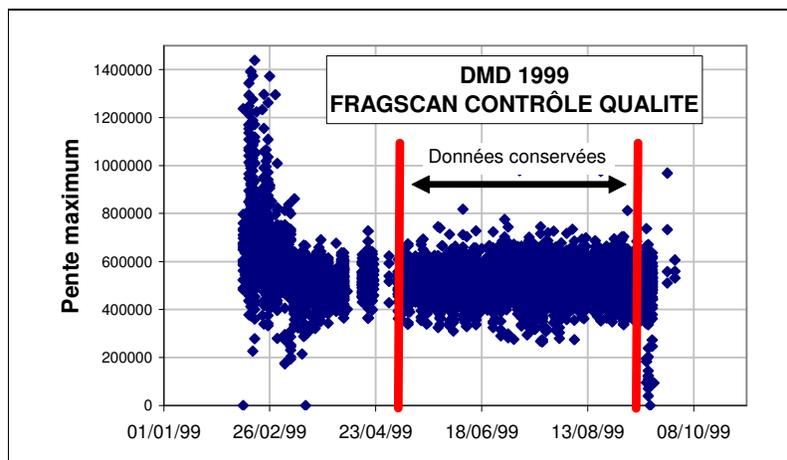


Figure 1.6.e.

Calcul des volumes : On peut aussi évoquer le problème de la précision dans le calcul des volumes. Cela peut paraître trivial mais, par le retour d'expérience du projet Blast-Control, on peut s'apercevoir que les erreurs d'estimation peuvent être très significatives (en particulier sur les fiches de tir). C'est donc un point important à prendre en compte et il sera donc prudent de ne comparer des masses que si elles procèdent du même mode d'acquisition et de calcul.

Précision de l'affectation: Une autre question peut être évoquée c'est la précision de l'affectation d'un engin à un tir. Peut-on être sûr que chaque photo Fragscan, que chaque cycle de camion est affecté au bon tir ... Là encore on supposera le sérieux du travail d'affectation des flux à un tir.

1.7. POSITIONNEMENT.

Ces informations, séquences de production, nous permettent de calculer des coûts et des flux mais nous ne pouvons réellement les comparer alors que la position des tirs varie. Il est donc nécessaire d'avoir une approche spatiale de ces séquences de production.

Pour la foration et le minage, nous pouvons nous contenter de la position du tir et de la direction du plan de foration par rapport aux divers objets géologiques.

Pour le chargement, le transport et le concassage primaire, il est nécessaire d'avoir une information sur le trajet qui conduit du tir au concasseur primaire.

Nous pouvons raisonner en considérant la position des différents stocks utilisés, la chargeuse emprunte du matériau au tir et le place sur les dumpers - Les dumpers sont chargés lors d'une séquence de production de chargement et décharge dans la trémie du concasseur primaire - Le concasseur primaire est alimenté lors de séquence de production de transport et fourni le matériau à l'installation de traitement des matériaux. On voit donc que chaque séquence de production utilise un stock amont, lié à une séquence de production amont, et produit un ou plusieurs stocks avals et ainsi de suite. Dans le cas d'une carrière on peut schématiser cela de la manière suivante, figure 1.7.a.

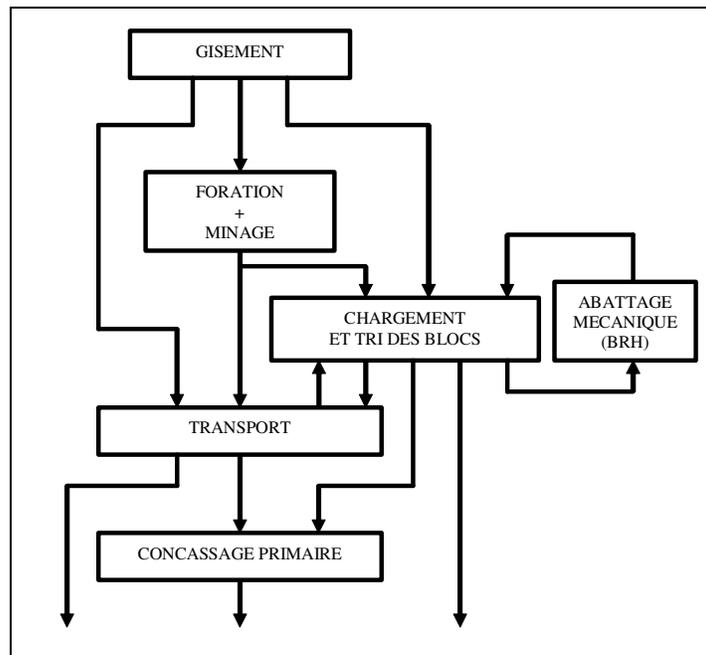


Figure 1.7.a.

Il est donc important de positionner ces stocks dans l'espace et également pour les opérations de transport de définir le trajet d'une manière ou d'une autre. Dans les deux carrières ALZO et DMD, nous disposons de l'information suivante: La position des deux trous de forage externes (approximativement pour la carrière ALZO), la hauteur du front et son inclinaison, la position du concasseur primaire, une mise à jour annuelle du plan de l'exploitation. Nous pouvons donc « positionner » l'ensemble des séquences de production. Pour réduire le nombre de paramètres à étudier au chapitre 3, le trajet de transport sera défini par la différence de dénivelé entre l'aire de chargement et l'aire de déchargement et la distance horizontale du trajet qui sera mesurée sur le plan. Il n'y a pas de trajet complexe sur ces carrières.

1.8. GESTION DES DONNEES FRAGSCAN.

L'information minimum que l'on peut attendre du système Fragscan est que, pour chaque photo prise, la date et l'heure de prise de vue soit conservées, ainsi qu'un vecteur en surface cumulé (pixels) correspondant à chaque dimension de « tamis » utilisé. Connaissant la surface totale de l'image on peut aisément transformer ce vecteur en % de surface attribué à chaque classe granulométrique préétablie. En plus de cette information, sont également conservés le vecteur des classes granulométriques et le type de camion car la distance Caméra-Surface et le rapport d'échelle peuvent varier (voir chapitre 2).

La prise de vue est déclenchée automatiquement par des capteurs (carrière ALZO) ou manuellement par un opérateur (carrière DMD).

L'affectation à un tir est tout à fait possible mais ne présente pas un caractère d'obligation. Sur la carrière DMD, le brigadier (chef d'équipe) met à jour en temps réel l'affectation des images Fragscan par contre sur la carrière ALZO les données sont enregistrées sans affectation à un tir.

Sur la carrière DMD, il n'y a donc pas de difficulté pour sommer les « images » Fragscan, après en avoir vérifié la qualité, afin d'obtenir un vecteur en % de surface en fonction des classes granulométriques et ce, pour chaque tir. Sur la carrière ALZO le problème est plus complexe par l'arrivée de matériau en provenance de plusieurs tirs à la fois. Nous avons défini, au sous-chapitre concernant le transport, des séquences de transports élémentaires. Nous allons compléter les séquences de production élémentaires par une information sur la présence du camion dans l'aire de déchargement, début et fin. Avec un peu de chance, on peut supposer que la prise de vue Fragscan est déclenchée dans cette plage de temps.

Malheureusement les horloges des PCs qui déterminent l'heure de prise de vue Fragscan et les plages de présence de camion dans l'aire de déchargement n'étaient pas toujours synchronisées et les échelles de temps se sont « dilatées » de manières différentes. Si on suppose que la « dilatation relative » des échelles de temps est faible sur une journée (quelques secondes au maximum) alors il suffit de décaler l'échelle de temps de Fragscan pour obtenir une synchronisation des plages de présence de camion dans l'aire de déchargement et des images Fragscan sur une journée.

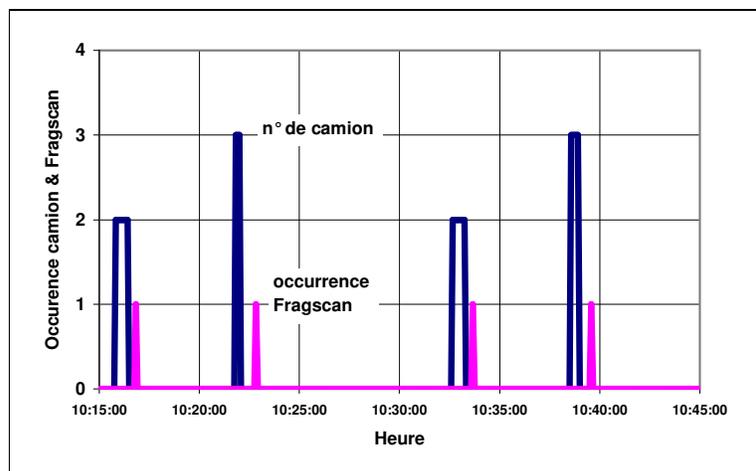


Figure 1.8.a.

D'un point de vue mathématique, si l'on considère la présence de camion comme un signal binaire en fonction du temps et les prises de vue Fragscan comme des Dirac alors il nous suffit de maximiser l'intégrale suivante:

$$\int_t \{f_1(t) * f_2(t + \Delta t)\} dt$$

$f_1(t)$ signal de présence des camions.

$f_2(t)$ signal de prise de vue Fragscan.

Le Δt qui maximise l'intégrale est proche du décalage entre les deux horloges et nous permet de réaliser l'affectation des images Fragscan tir par tir car nous connaissons maintenant pour chaque image le n° du camion auquel il se rapporte. Figure 1.8.a.

1.9. GESTION DES DONNEES TECHNIQUES DE TIR.

Les données nécessaires à une analyse économique des tirs ne sont pas identiques aux données nécessaires à une analyse technique des tirs, par exemple il importe peu dans l'analyse économique de connaître le nombre de rangée alors que cette information est primordiale dans la compréhension des tirs. Pour l'analyse technique des tirs les informations suivantes seront recueillies:

L'espacement, la banquette et la hauteur des fronts.

La charge spécifique.

L'orientation du plan de foration par rapport aux principales discontinuités géologiques.

Le nombre de mine de pied.

Le nombre de rangées.

La position de l'amorçage.

Sur la carrière ALZO, la pratique de la séquence d'amorçage étant particulière, nous devons envisager une donnée supplémentaire : le nombre de trous consécutifs sur le même retard.

D'autres informations pourtant essentielles : diamètre de foration, hauteur de bourrage ... ne sont pas recueillies dans la mesure où elles n'ont pas variées dans la pratique des tirs sur les données disponibles.

1.10. BIBLIOGRAPHIE.

A.01. Peck, Hendricks, 1995. *Total Mining System : An intelligent management, production control and planning facility* Mine planning and equipment selection. Proceedings of the 4th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, Balkema : Calgary.

A.02. Chavez, Moser, Schleifer, 2000. *An integrated control system for blasting and production chain optimisation in open pit mining and quarrying.* Explosives and blasting technique. Proceedings of the 1st World Conference on Explosives and Blasting Technique, Balkema : Munich.

A.03. Wald, 1998. *An overview of concepts of fusion of earth data.* Future trends in remote sensing, ENSMP, pp 385-390.

2. MODELISATION DES DISTRIBUTIONS GRANULOMETRIQUES.

2.0. INTRODUCTION.

L'objet de ce chapitre est d'utiliser au mieux les ressources de l'outil d'analyse d'image Fragscan-Camion et d'approcher à l'aide d'un modèle statistique, la distribution granulométrique réelle des échantillons étudiés.

On peut retenir quatre méthodes principales de mesure de la granulométrie:

La mesure par tamisage.

La mesure à la ficelle.

La mesure en nombre de bloc.

Les méthodes par analyse d'image.

Chacune a ses avantages et ses inconvénients et nous allons les décrire car elles vont nous éclairer sur les moyens de passer de la mesure en général, qui pourra comporter divers biais, à la granulométrie considérée comme réelle de l'échantillon.

Des modèles usuels utilisés dans le domaine de l'abattage à l'explosif seront ensuite décrits. Puis nous passerons à l'élaboration d'un nouveau modèle dont la source de données est le système Fragscan-Camion. Au préalable nous pointerons les qualités et les points faibles d'un tel système.

Ce modèle sera basé sur l'utilisation de fonction statistique classique et sera illustré également par des mesures réalisées par tamisage. La relation Surface-Energie, communément admise, Steiner (B.32), nous permettra ensuite de passer du modèle granulométrique à un modèle énergétique. Ce modèle énergétique décrivant une granulométrie sera utilisé au chapitre 4 pour mettre en relation les paramètres de tir et en particulier la charge spécifique et le résultat du tir, la granulométrie exprimée dans ce modèle énergétique.

2.1. MESURE DE LA GRANULOMETRIE.

2.1.1. LE TAMISAGE MANUEL.

C'est la méthode traditionnelle et normalisée (AFNOR, CE) pour mesurer une granulométrie. Elle est rarement employée sur les produits d'abattage à l'explosif en raison du volume d'échantillon à sélectionner mais plutôt en aval du process dans les installations de concassage. Le principe est simple, on choisit d'abord les n tamis qui vont servir au tracé du graphique. Ces tamis ont des dimensions qui sont en général choisies pour être équidistants dans l'échelle logarithmique des diamètres par exemple 1; 2; 5; 10; 20; 31,5; soit 0; 0.3; 0.6 ... en LOG D. On réalise ensuite les opérations de tamisage de l'échantillon en partant du tamis ayant le plus grand diamètre. On pèse pour chaque tamis la masse de refus. On obtient donc en premier lieu « une courbe » en refus par tamis qu'il est aisé de transformer en « une courbe » en passant cumulé. On peut ensuite tracer cette courbe granulométrique dans un diagramme semi-logarithmique (LOG D) à qui l'on préfère parfois un diagramme LOG-LOG. Le choix de l'échelle logarithmique, pour les diamètres, peut être discuté mais il s'agit d'un changement de variable qui permet de représenter et comparer des granulométries très dissymétriques.

2.1.2. LA MESURE EN NOMBRE.

Cette méthode est couramment employée car elle peut être utilisée alors même que les fines de l'échantillon ont disparu. C'est le cas par exemple pour l'étude des débris issus de météorite. Cette méthode a été développée par Hartmann (B.16), figure 2.1.2.a, en 1969. Il présente des exemples divers et notamment des données issues de l'abattage à l'explosif.

La méthode est la suivante: on cumule le nombre de blocs inférieurs à un diamètre D. On trace ensuite dans un diagramme Log-Log les nombres de blocs cumulés en fonction des diamètres. Dans la plupart des cas, la courbe obtenue est « linéaire » sur une large plage de diamètre. La pente (et l'intersection avec l'axe des diamètres) est caractéristique de la granulométrie étudiée.

Cette technique nous sera utile pour valider l'outil de mesure de la fragmentation par analyse d'image Fragscan et en particulier dans l'amélioration des résultats obtenus au « Test Latham ».

L'intérêt de cette méthode est de pouvoir travailler sur un échantillon tronqué ou sur un échantillon où l'on ne peut accéder à certaines fractions granulométriques par l'effet de la ségrégation, et notamment sur des mesures réalisées en surface d'échantillon. Cette technique est donc intéressante car elle peut être mise en œuvre très simplement sur le terrain ou, à partir de photographies, sur tout type d'échantillon.

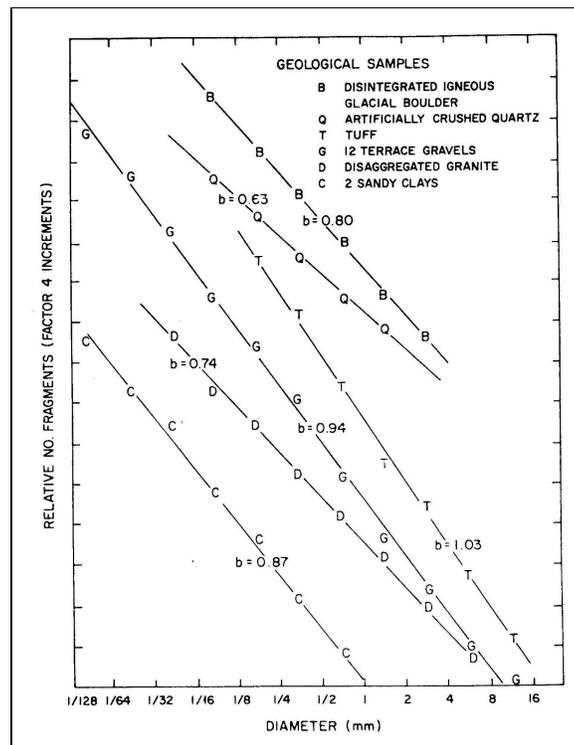


Figure 2.1.2.a.

2.1.3. LA MESURE A LA FICELLE.

La méthode est la suivante : on tend une ficelle le plus près possible du tas que l'on souhaite mesurer. Cette ficelle doit être de 10 à 40 fois plus longue que le plus gros bloc intersecté par elle. Soit M_t la longueur de la ficelle. On choisit une limite de longueur apparente L_i des blocs au-dessous duquel on ne fera pas de mesure. Cette limite doit être fixée pour que l'on ait à mesurer au moins de 50 à 100 blocs. Pour chaque galet recouvert par la ficelle, on notera d'une part sa plus grande longueur apparente L_s (que l'on considérera comme une estimation du diamètre D du bloc) et d'autre part la longueur intersectée m . Les m étant considérés comme proportionnels aux volumes des différentes fractions considérées ; la différence entre M_t et la somme des m permet de calculer la proportion de fine $\{M_t - \sum(m)\}/M_t$. Cette méthode a été proposée par A. Cailleux (B.01) notamment. Le choix de L_s , comme estimation du diamètre du bloc, est peut être discutable, il serait peut être souhaitable lorsque les blocs sont manipulables de mesurer le diamètre réel du bloc. En tout cas, cette méthode de

mesure est encore largement utilisée. Ce qui montre qu'elle permet, pour le moins, de comparer des granulométries. C'est aussi une méthode économique en équipement mais fastidieuse à mettre en œuvre.

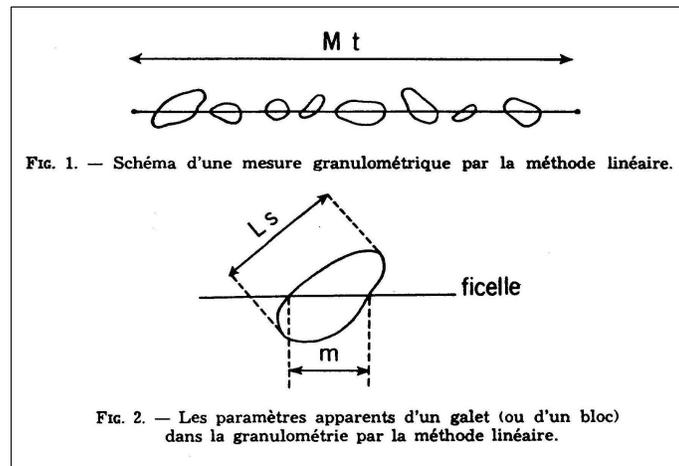


Figure 2.1.3.a.

Si l'on considère un volume V , par exemple cubique de dimension $L*L*L$. ; et l'on considère des éléments de volume horizontaux de type $dS*L$, alors la granulométrie de V est exactement décrite par l'intégrale des granulométries de tous ces éléments de volume $dS*L$, si ces granulométries ont été réalisées avec la méthode décrite ci-dessus (en utilisant le diamètre réel des blocs).

En utilisant cette méthode à la surface d'un tas on commet plusieurs erreurs:

- La proportion de fine n'est pas mesurée mais on en donne une estimation probablement assez aléatoire.
- On utilise comme échantillon une projection des n premiers centimètres du tas et non une coupe (linéaire) du tas.

Les problèmes liés à la configuration de l'échantillon: ségrégation, répartition non homogène des différentes classes granulométriques à l'intérieur du tas ..., demeurent.

2.1.4. LA MESURE PAR ANALYSE D'IMAGE.

C'est la méthode la plus récente. Elle a vu le jour grâce au progrès de l'informatique et au développement de la morphologie mathématique. Son avantage principal réside dans les possibilités d'automatisation des processus d'acquisition et de traitement de données.

Le principe est le suivant: On prend une photographie de la surface de l'échantillon de blocs que l'on souhaite mesurer. Cette image numérique (en pixels), la plupart du temps en 256 niveaux de gris, est traitée pour obtenir une image binaire ou les pixels blancs représentent les blocs à mesurer et les pixels noirs les contours. Dans le cas de Fragscan, la surface des blocs, pour chaque classe granulométrique, est alors obtenue par une méthode d'érosion-dilatation propre à la morphologie mathématique, basée sur la technique dite des ouvertures à partir des contours partiels. On obtient donc comme résultat, dans un premier temps, un vecteur qui pour chaque classe granulométrique donne une surface en pixels. D'autres produits, Wipfrag et Split entre autres, cherchent à détecter les contours entiers de chaque bloc. Sur les blocs ainsi isolés, on effectue des analyses dimensionnelles.

Pour la suite du calcul, c'est à dire, pour passer de cette mesure en pourcentage de surface, à un besoin en pourcentage de masse, divers modèles existent, notamment des modèles cubiques, sphériques ou par ellipsoïdes ...

En considérant cette méthode comme une généralisation de la méthode de mesure à la ficelle, on peut faire le raisonnement suivant:

Soit un volume V cubique de dimension L*L*L contenant un échantillon de bloc de granulométrie G. Alors cette granulométrie est exactement décrite par la somme des granulométries réalisées sur des éléments de volume horizontaux dz*L*L. On prend pour chaque bloc les deux paramètres suivants: le diamètre D et la surface intersectée par l'élément de volume de dz*L*L. En prenant une photographie à la surface du tas, on effectue donc une projection des n premiers centimètres (voir aussi sous-chapitre 2.3.3.).

2.2. MODELES USUELS.

2.2.1. MODELISATION DES COURBES GRANULOMETRIQUES.

Il existe de nombreux modèles utilisés pour la modélisation des courbes granulométriques. Le plus couramment utilisé, dans le domaine de l'abattage à l'explosif, est la courbe de Rosin-Rammler dont l'équation est la suivante:

$$Y = 100 * [1 - \exp\{-(D / X_c)^n\}]$$

C'est la fonction de répartition Y du pourcentage cumulé de matériau passant au travers d'un tamis de diamètre D.

Xc est appelé diamètre caractéristique, il correspond au point d'inflexion de la courbe.

n, le coefficient d'uniformité, est caractéristique de l'étalement de la courbe granulométrique et, indirectement, de la densité du matériau.

La plupart des auteurs considèrent qu'une seule courbe de Rosin-Rammler suffit à bien représenter le résultat d'un tir. Pour les situations plus complexes, Blanchier (B.04) indique qu'il est possible d'utiliser plusieurs courbes de Rosin-Rammler pour modéliser le résultat d'un tir.

La courbe de Gaudin-Gates-Schumann a l'équation suivante:

$$Y = 100 * (D / D_{max})^n$$

La partie supérieure de la courbe granulométrique est généralement assez mal rendue.

L'ensemble de ces modèles a comme point commun d'être très empirique et également d'être assez éloignés des modèles classiquement utilisés en statistique pour la modélisation des fonctions de répartition. L'intérêt, par exemple, du modèle de Rosin-Rammler est qu'il se linéarise facilement et qu'il se prête donc bien à une résolution par la méthode des moindres carrés.

2.2.2. « LOIS » DE FRAGMENTATION.

D'autres travaux cherchent à estimer le résultat du tir en fonction des paramètres de tir et des caractéristiques des matériaux. Il s'agit en particulier du modèle de Kuznetsov présenté ci-après ou du modèle Kuz-Ram qui a pour base l'équation de Kuznetsov et le modèle de Rosin-Rammler.

Equation de Kuznetsov:

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

D50 diamètre correspondant à 50% de passant.

A variant de 7 à 13 suivant la roche.

Q la charge en équivalent TNT (en kg).

V le volume par trou (en m³)

Modèle Kuz-Ram:

$$X_c = D_{50} / (0,693)^{1/n}$$

$$n = (2,2 - 14 * (B / d) * (1 - w / B) * (1 + 0,5 * ((S / B) - 1))) * (L / H)$$

B = Banquette (m); S = Espacement (m); H = Hauteur (m); d = diamètre du trou (mm); w = facteur de déviation (de 0,75 à 1,50 en m); L = hauteur de la charge (hors surprofondeur en m). Il existe d'autres versions du modèle Kuz-Ram.

Ces lois empiriques que l'on ajuste au mieux sur les résultats de terrain sont encore largement utilisées dans le domaine de l'abattage à l'explosif mais l'amélioration des moyens de calcul numérique devrait conduire à l'utilisation d'approches mécaniques ayant des fondements théoriques plus appropriés.

2.3. L'OUTIL FRAGSCAN-CAMION.

Cet outil, de la gamme Fragscan, a pour principe, de prendre des images des blocs de la surface supérieure visible du camion, sur un point fixe de la carrière, en général juste avant le déchargement au concasseur primaire. On peut cumuler ainsi plusieurs centaines de mesures individuelles afin d'obtenir une appréciation de la granulométrie du tas.

Chaque image est traitée individuellement. Les résultats individuels sont sommés pour obtenir le résultat total du tir considéré. L'image est acquise en ordonnant une prise de vue instantanée, à une caméra noir & blanc CCD, soit automatiquement à l'aide de capteur de présence de camion sous la caméra, soit manuellement par un opérateur. Cette méthode permet d'accumuler de nombreux échantillons du tas, de façon très commode. On subit, néanmoins, une certaine ségrégation des matériaux pendant le chargement et le transport.

2.3.1. LE TEST LATHAM.

Ce test a été proposé lors du congrès Fragblast 6 (Johannesburg, Afrique du sud, Août 1999). Il a été imaginé par J.P. Latham, enseignant spécialisé en exploitation des carrières à la Royal School of Mines (Londres). Il s'agit de comparer la granulométrie réelle d'un échantillon avec celle fournie par un système de mesure par analyse d'image. Les dix échantillons testés en aveugle répondent tous à une courbe parfaite de Rosin-Rammler et l'on connaît le rapport d'échelle des photographies à la réalité.

Le coefficient d'uniformité n varie de 0,5 à 1,75 et le diamètre caractéristique Xc de 20 à 65 mm.

Plusieurs systèmes d'analyse d'image ont été testés dont Fragscan. Le résultat pour le système Fragscan est donné en figures 2.3.1.b et 2.3.1.c. Ce que l'on peut dire des résultats de ce test, c'est que pour le coefficient n (étalement de la courbe) les valeurs sont très différentes mais la relation d'ordre est strictement conservée. Pour le diamètre caractéristique Xc (point d'inflexion de la courbe granulométrique), à n constant, la relation d'ordre est également conservée. A mon avis, l'écart entre réalité et le résultat du système Fragscan est dû à un modèle inadéquat de passage de la mesure en surface (pixels) au résultat granulométrique exprimé en pourcentage de masse.

Pour valider l'utilisation que nous allons faire de Fragscan et indiquer des directions d'améliorations éventuelles du système Fragscan, un calcul en nombre de blocs a été réalisé. A partir des résultats intermédiaires du système Fragscan, pourcentage cumulé de surface en fonction du diamètre, le modèle utilisé est un modèle en carré (un bloc de diamètre D occupe

une surface D^2). A partir des données de l'échantillon réel, dont on connaît l'équation de Rosin-Rammler (en masse), on prendra alors un modèle cubique (un bloc de diamètre D a un volume de D^3). On supposera une densité de 2,7 et un poids total de l'échantillon de 200 kg. La surface vue d'un bloc sera de D^2 . **On suppose que les blocs les plus importants sont vus en priorité.**

Sur l'ensemble des graphiques, exemple figure 2.3.1.a, on voit que la pente est identique ce qui semble montrer que le système Fragscan compte correctement le nombre de bloc d'une même taille mais qu'il affecte la surface trouvée à un diamètre erroné.

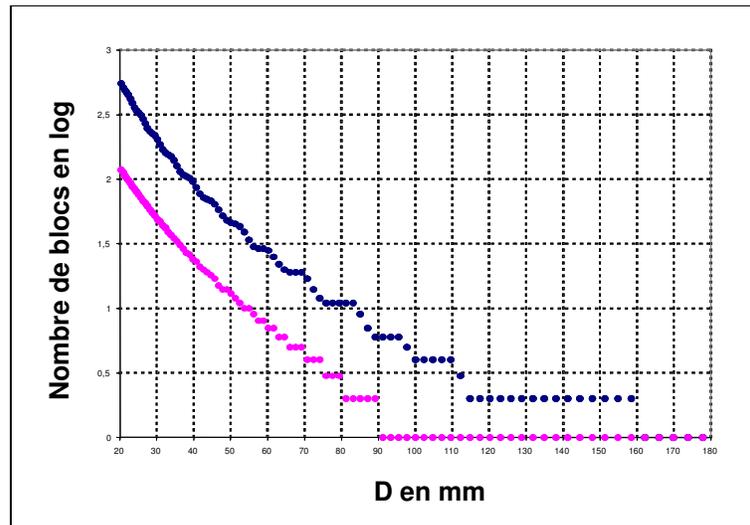


Figure 2.3.1.a.

Il suffit donc de trouver un modèle qui tienne compte de la densité, de la forme des fragments, de la masse totale de l'échantillon, de la surface de la mesure, ...et principalement d'un biais « constant » dans la mesure du diamètre.

Ce modèle devrait donc être modifiable pour prendre en compte la configuration de l'échantillon. **En particulier, l'opérateur devra pouvoir juger de l'état de ségrégation du tas : Total, partiel ou nul.** Total, si les blocs les plus gros sont vus en priorité; Nul, si les blocs vus sont représentatifs de l'ensemble de la granulométrie. Un simple décalage de 0,1 (dans l'échelle logarithmique des diamètres) avec un modèle cubique, a permis d'obtenir les résultats suivants, figure 2.3.1.b et 2.3.1.c, pour les photographies du test Latham. Il y aurait donc une possibilité de « caler » le système Fragscan à partir d'un jeu de donnée relativement restreint.

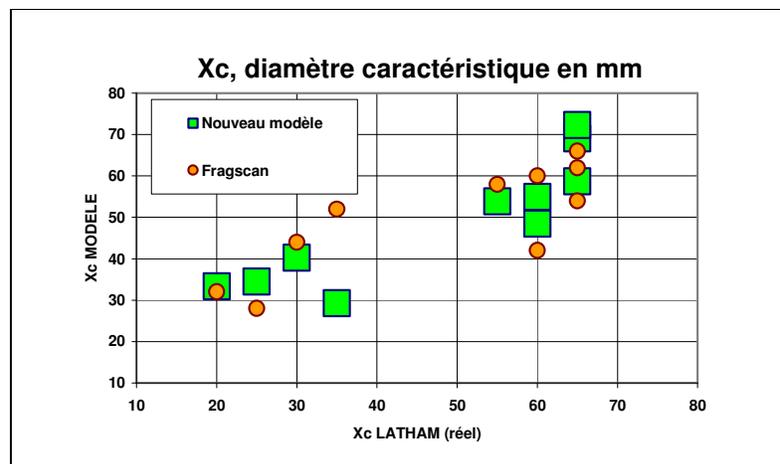


Figure 2.3.1.b.

Ceci n'étant pas l'objet de ce travail de thèse, nous nous contenterons d'utiliser comme base de travail les résultats intermédiaires du système Fragscan, c'est à dire des courbes en pourcentage cumulé de surface en fonction du diamètre du passant.

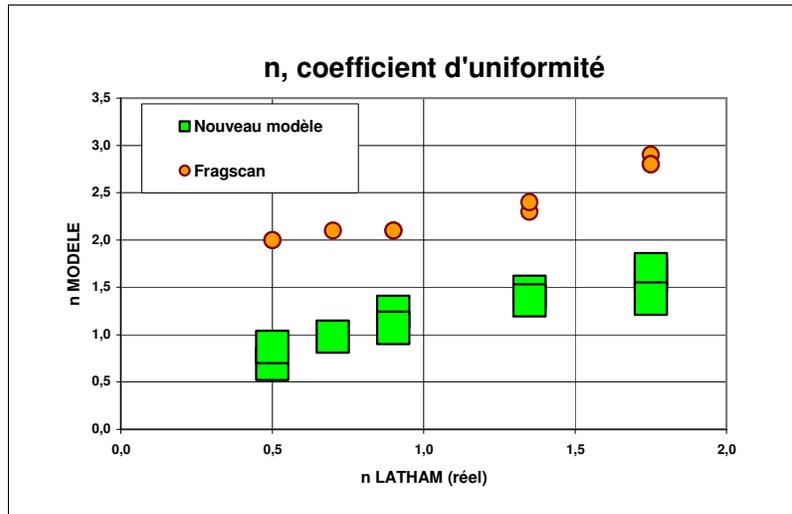


Figure 2.3.1.c.

2.3.2. LES BIAIS.

La mesure sur camion avant déchargement au niveau du concasseur primaire présente de manière évidente deux biais:

L'absence des plus gros blocs triés lors du chargement des camions.

La ségrégation des particules les plus fines par rapport aux particules plus grossières.

Ces deux biais impliquent pour le moins une troncature de la distribution granulométrique sur les particules les plus fines et sur les particules les plus grosses.

Pour la ségrégation relative des particules les plus fines comparativement aux particules les plus grossières, il est difficile de quantifier son influence sur ce que voit l'appareil de mesure à la surface du camion. Comme de toute façon, le système Fragscan-Camion, ne voit pas les particules les plus fines (limite de détection d'environ 50 mm, dans le cas de ces installations), on fera l'hypothèse que la ségrégation relative des particules comprise entre 100 mm et 315 mm est faible et elle devra être négligée.

Un autre biais de la mesure par analyse d'image a pu être décelé pendant ce travail. C'est l'effet de la distance Caméra-Surface du camion. Ce biais a pu être mis en évidence par comparaison des mesures réalisées sur plusieurs types (et tailles) de camion sur un même tir. Ce biais consiste principalement en un décalage dans l'échelle logarithmique des diamètres, cet effet est présenté en figure 2.3.2.a.

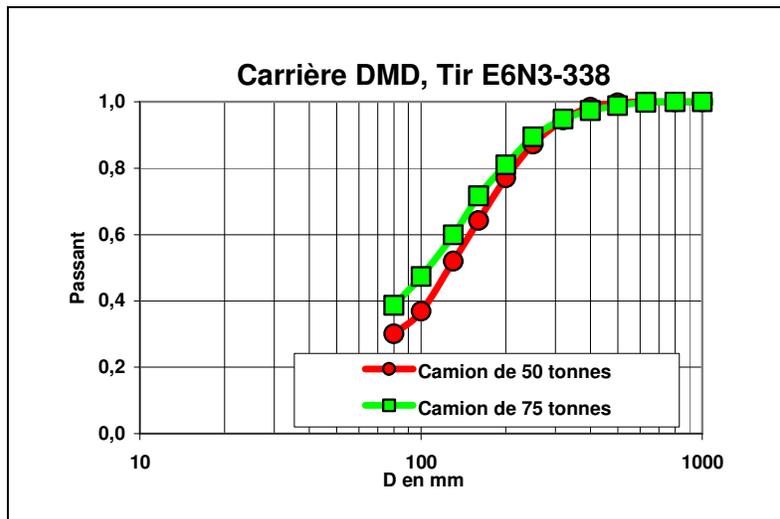


Figure 2.3.2.a.

Un dernier biais a pu être détecté lors de l'étude du test Latham. Il est lié au phénomène de seuillage, passage de l'image en 256 niveaux de gris à l'image binaire, et à la difficulté de mesurer les classes granulométriques proches de la limite de détection de la caméra, la surface cumulée attribuée à la plus petite classe granulométrique étant pratiquement constante (les surfaces noires de l'image). Cet effet du seuillage est présenté en figure 2.3.2.b.

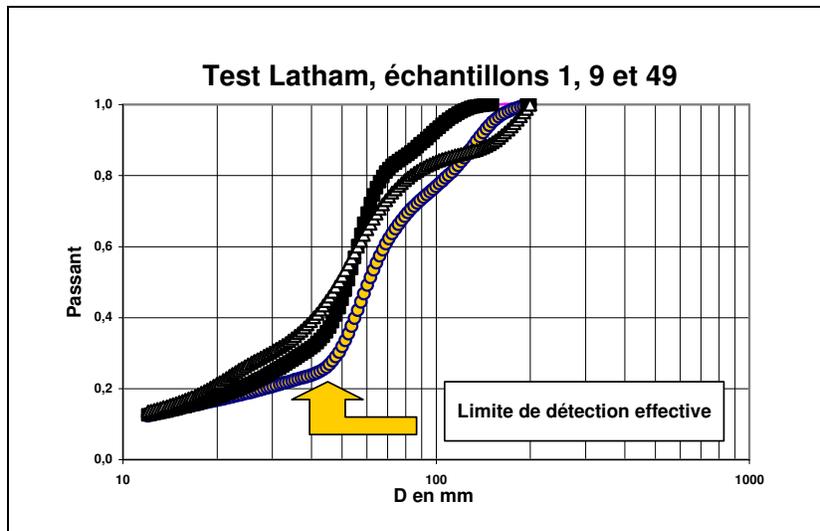


Figure 2.3.2.b.

La sommation des images FRAGSCAN est aussi une source potentielle d'erreur. En effet si on prend un camion de blocs de densité 1,9 et un camion de fine de densité 2,05, l'erreur en masse est de 7,5 % pour un même volume. Ce biais sera néanmoins négligé.

Pour la suite de ce travail, et pour limiter au maximum les effets de ces divers biais, j'ai fait le choix de n'utiliser que les mesures provenant d'un type de tombereau. Nous utiliserons donc uniquement les tombereaux de 75 tonnes pour la carrière DMD et les tombereaux de 65 tonnes pour la carrière ALZO.

Sur la carrière DMD, la position de la caméra ayant changé en début d'année 2000, je n'utiliserai que les résultats de l'année 1999.

2.3.3. MODELE EN SURFACE OU MODELE EN VOLUME.

La granulométrie d'un tas, fonction de répartition, est représentée par le pourcentage cumulé en masse, en fonction du diamètre du passant. La difficulté, pour les méthodes par analyse d'image, est le passage d'une mesure en surface à un résultat en volume et en masse.

Pour certains auteurs, le calcul des pourcentages passe par un décompte des blocs vus en surface en fonction du diamètre passant, ils considèrent la masse totale de l'échantillon comme la somme des masses de tous les blocs comptés. Les blocs peuvent être considérés comme des sphères, des cubes ou tout autre type de volume.

Pour d'autres auteurs le pourcentage relatif d'une classe granulométrique est calculé par le rapport de la surface affectée à une classe à la surface totale de l'image. C'est en quelque sorte une généralisation de la méthode de mesure à la ficelle. En général, le pourcentage de fine est évalué en utilisant la surface de l'image non affectée aux classes granulométriques supérieures (comme pour la méthode de mesure à la ficelle), figure 2.3.3.a.

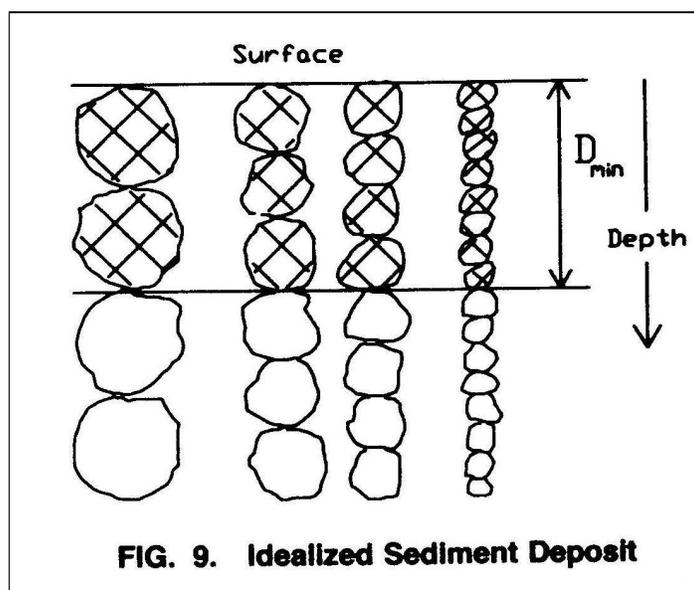


Figure 2.3.3.a.

Pour la suite de ce travail, nous utiliserons toujours comme base de travail le résultat en pourcentage de surface, libre à chacun ensuite d'utiliser le modèle de son choix pour calculer la courbe granulométrique en pourcentage cumulé de masse. Le pourcentage de fine ne sera pas évalué à priori, sa détermination sera pour partie l'objet de la modélisation. Nous utiliserons comme point de départ du calcul, pour le pourcentage de fine, la surface relative non affectée aux classes granulométriques supérieures.

Ce choix, modèle en surface, n'est pas généralisable à toutes les configurations d'échantillonnage et **ne s'applique que si la ségrégation est considérée comme nulle**. En particulier le rapport entre surface et épaisseur de l'échantillon est à prendre en compte lors de la détermination du modèle choisi.

2.4. CHOIX D'UN MODELE GRANULOMETRIQUE.

2.4.1. LES HYPOTHESES DE LA MODELISATION.

Après cette présentation de l'outil Fragscan-Camion, de certains biais et défauts inhérents aux techniques de mesure par analyse d'image, il devient possible de proposer une base de travail pour la modélisation des distributions granulométriques issus du tir d'abattage à l'explosif dont la mesure est effectuée par analyse d'image à la surface des camions. La base

du calcul sera la courbe calculée à partir des surfaces cumulées affectées à chaque classe granulométrique. Les fines seront affectées d'une valeur, à savoir la surface de l'image non affectée aux blocs plus grossiers, cette valeur n'étant qu'une base de départ pour le calcul du modèle.

L'objet principal de ce modèle est la prise en compte des troncatures pour les fines et les blocs; Cela sera un paramètre essentiel du modèle. On supposera que la ségrégation relative des blocs compris entre 100 mm et 315 mm est négligeable, 2 à 2,5 dans l'échelle logarithmique des diamètres. On supposera également que la distance Caméra - Surface du camion est pratiquement constante.

2.4.2. LE MODELE GRANULOMETRIQUE.

Un modèle granulométrique a été adopté après avoir dépouillé les résultats du système Fragscan-Camion sur l'année 1999, sur les carrières ALZO et DMD. L'approche suivie a été de travailler sur des densités de probabilité plutôt que sur les habituelles fonctions de répartition, courbes granulométriques, ce qui permet une compréhension plus intuitive de la répartition en masse des blocs en fonction de leur diamètre. Pour cela un calcul préparatoire est nécessaire.

Le point de départ de ce calcul est un vecteur en proportion de surface cumulée pour chaque classe granulométrique. La première étape est de réaliser une interpolation entre les points. Cette interpolation a été réalisée par une spline cubique. C'est un polynôme de degré 3 par morceaux, C2 aux points de liaison des polynômes. Cette courbe est donc dérivable et sa dérivée est C1 (continue et à dérivée continue).

C'est cette courbe dérivée qui servira de base à la modélisation. Les autres modèles, Rosin-Rammler, G-G-S ... sont basés exclusivement sur un travail sur les fonctions de répartition, l'originalité du présent modèle consiste à travailler sur les densités.

Sur les deux carrières, ces densités montrent deux maximums, figure 2.4.2.a. Après vérification, sur des données issues de tamisage, figures 2.5.2.a, 2.5.2.b et pour s'assurer que ce n'est pas un artefact de calcul, il est apparu que le modèle choisi devrait donc pouvoir rendre compte de ces deux maximums.

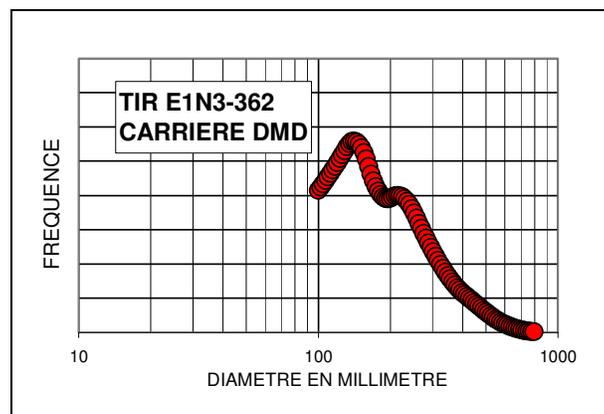


Figure 2.4.2.a.

Le choix du modèle a été guidé par l'étude des données disponibles. Un modèle rend parfaitement compte des deux maximums, il est constitué par deux fonctions Log-normale inversées l'une par rapport à l'autre, figure 2.4.2.b. Ces fonctions Log-normale, qui sont des densités, sont continues et définies sur un demi-espace (nulle sur l'autre demi-espace). Chacune d'entre elles est définie par trois paramètres; le premier paramètre constitue le diamètre maximum (ou minimum) de la densité et les deux autres caractérisent l'étalement et la moyenne relative de la densité.

A partir de ces trois paramètres on peut calculer une moyenne et un écart type classique plus facilement utilisable pour une comparaison entre tir.

Pour que notre modèle soit une densité, le pourcentage relatif de chacune des populations doit également être déterminé.

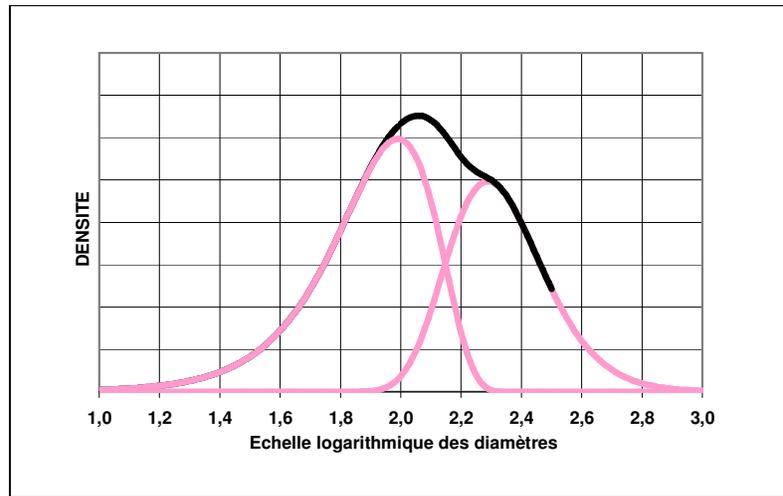


Figure 2.4.2.b.

Un dernier paramètre va nous permettre d'éviter les difficultés liées aux troncatures (blocs et fines). Soit T, la somme du pourcentage des fines et blocs tronqués (ou invisible à cause de la ségrégation), alors le pourcentage (100 - T) est affecté à l'ensemble des classes granulométriques vu par le système Fragscan, voir figure 2.4.2.c.

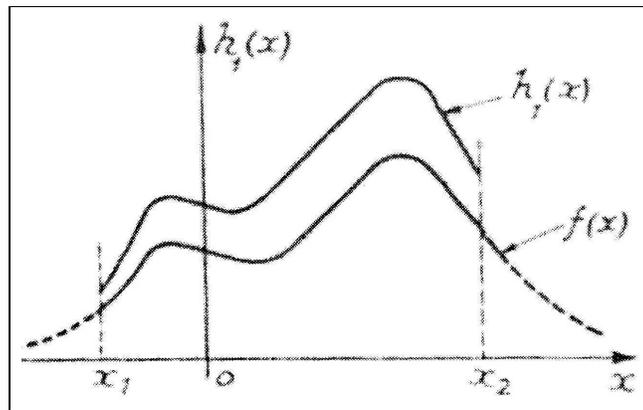


Figure 2.4.2.c.

Le calcul des paramètres du modèle sera réalisé sur une feuille de calcul Excel en utilisant la méthode des moindres carrés et un algorithme utilisant une méthode de descente de gradient (préprogrammé sous Excel).

Le modèle G_f est composé de deux fonctions f_1 et f_2 tel que:

$$G_f = \gamma * f_1 + (1 - \gamma) * f_2$$

γ étant la proportion relative de chacune des deux populations.

Chaque population, f_1 et f_2 , est déterminée par trois paramètres:

$$f_1 = \{1/(w_1 * \beta_1 * (2 * \pi)^{0,5})\} * \exp[-\{\ln(w_1) - \alpha_1\}^2 / \{2 * \beta_1^2\}]$$

$$f_2 = \{1/(w_2 * \beta_2 * (2 * \pi)^{0,5})\} * \exp[-\{\ln(w_2) - \alpha_2\}^2 / \{2 * \beta_2^2\}]$$

$$w_1 = \Phi - \zeta_1, w_2 = \zeta_2 - \Phi.$$

Φ diamètre du fragment dans l'échelle logarithmique des diamètres, ζ_1 , α_1 , β_1 paramètres de la fonction f_1 , ζ_2 , α_2 , β_2 paramètres de la fonction f_2

Pour chaque population, f_1 et f_2 , la moyenne μ est égale à $\exp(\alpha + 0,5 * \beta)$ et l'écart type σ est tel que $\sigma^2 = \mu^2 * (\exp(\beta^2) - 1)$

Le dernier paramètre sera nommé, paramètre de troncature T.

Soit $G_{init}(\Phi)$ la fonction à modéliser alors on aura à minimiser la somme suivante:

$$S_{\Phi} \{[G_f(\Phi) / (1 - T)] - G_{init}(\Phi)\}^2$$

Précisons ici que l'ensemble des calculs est réalisé dans l'échelle logarithmique des diamètres. Pour des raisons pratiques, l'intégrale est discrétisé par pas de 0,01 dans l'échelle logarithmique des diamètres. Les bornes de l'intégrale étant 2 et 2,5 (100 et 315 mm). L'ensemble de cette méthode sera dénommé Fragscan-bis dans la suite de ce travail.

Outre les observations faites sur les résultats Fragscan-Camion sur les carrières, deux articles principalement m'ont conforté dans cette hypothèse, modèle multi-modale et fonction lognormale inverse pour la fonction f_1 .

L'article de Zhukov (B.08), figure 2.4.2.d, qui décrit des résultats de broyage comme des fonctions qui ressemblent à des fonctions log-normales inverses. De plus dans un diagramme LOG-LOG les fonctions de répartition des fonctions log-normales inverses sont « linéaires » sur une large plage de diamètre.

L'article de Gilvarry (B.13), figure 2.4.2.e, qui montre que les fonctions classiques de Rosin-Rammler caractérisent mal les fractions granulométriques grossières, d'où l'intérêt d'un modèle multi-modal. Dans cet article on calcule une différentielle dans le diagramme LOG-LOG pour définir différentes populations de fragment. Une dérivation dans un diagramme semi-logarithmique aurait permis de visualiser de manière plus intuitive les différentes populations.

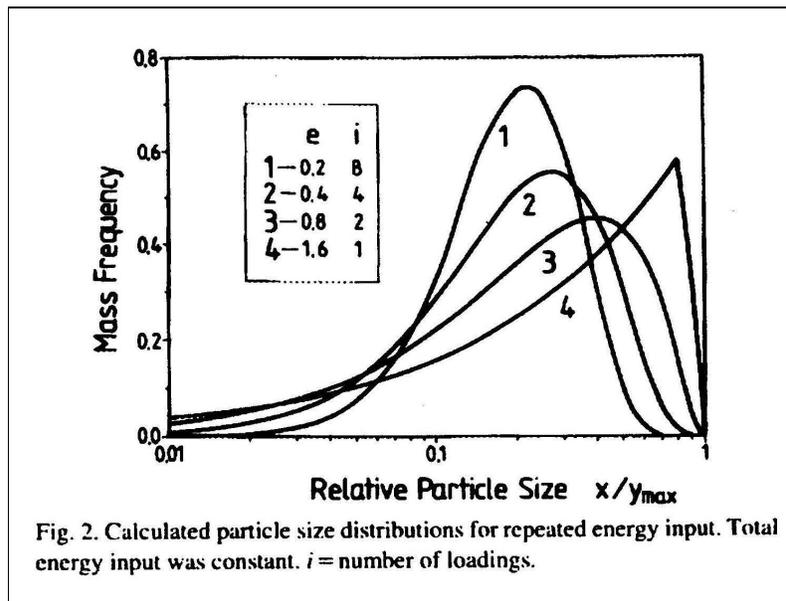


Figure 2.4.2.d.

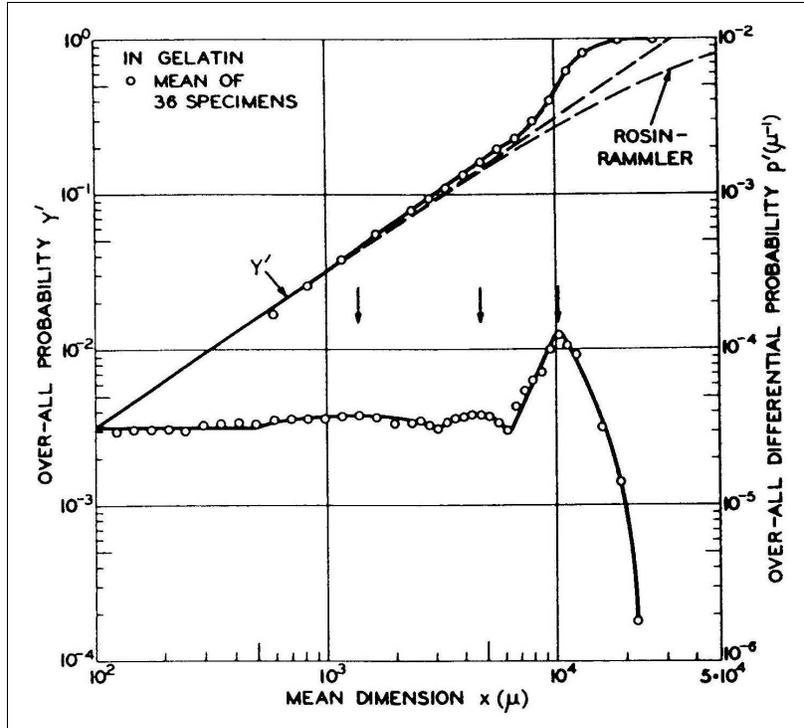


Figure 2.4.2.e.

2.5. ANALYSE DES GRANULOMETRIES.

2.5.1. CORRECTION DE L'EFFET DE TRONCATURE.

Les deux graphiques, figures 2.5.1.a et 2.5.1.b, pour les carrières DMD et ALZO, montrent qu'en analyse d'image, le fait de considérer les parties noires de l'image binaire comme représentative de la proportion de fine est un bon point de départ. En effet si l'on regarde les données avant et après correction de l'effet de troncature, la corrélation est assez signifiante. C'est à dire que cette portion noire de l'image augmente lorsque la proportion de fine augmente d'après le modèle Fragscan-bis.

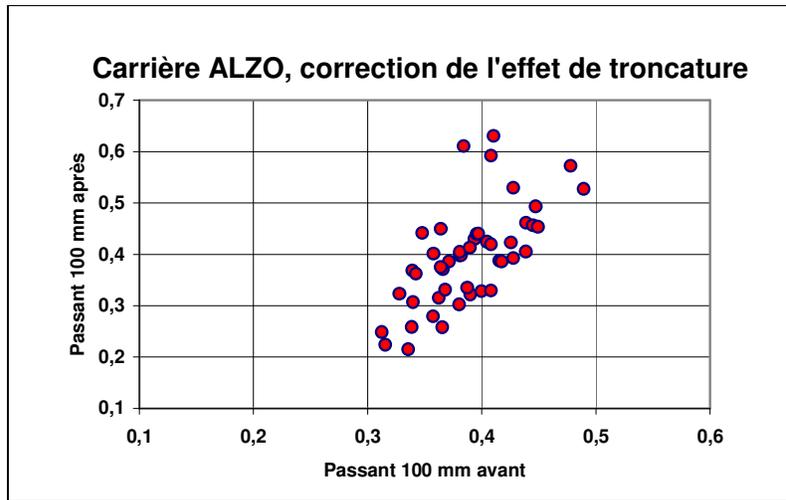


Figure 2.5.1.a.

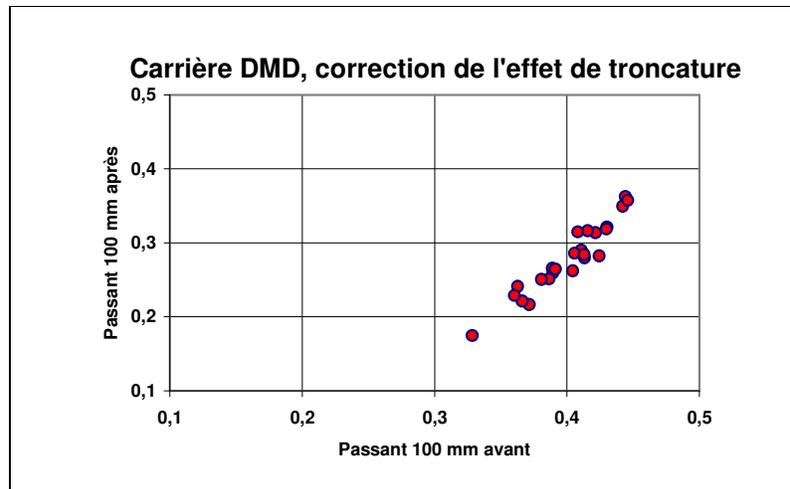


Figure 2.5.1.b.

Pour les données issues de la carrière DMD la relation d'ordre du passant à 100 mm avant modélisation est conservée de façon normale après modélisation, avec tout de même un point d'inflexion sur la courbe lorsque la proportion de fines devient importante.

Pour les données issues de la carrière ALZO, cette relation n'est pas conservée, c'est à dire que deux points ayant un même passant à 100 mm avant modélisation pourront avoir un passant à 100 mm très différent après modélisation. Une explication de ce phénomène est qu'il existe deux familles de granulométries distinctes dont le comportement diffère à la modélisation (et probablement déjà au seuillage).

2.5.2. ESSAI SUR DES GRANULOMETRIES REELLES.

Le département d'ingénierie minière de l'université de Leoben (Autriche) nous a permis d'utiliser pour ce travail des données issues de mesure par tamisage. Il s'agit de bloc de roche de forme cubique (200 mm et 100 mm). L'explosif est placé dans un trou percé au centre du cube. Après explosion, les fragments sont recueillis et tamisés suivant l'échelle suivante:

0,1 ; 0,25 ; 0,5 ; 1 ; 5 ; 10 ; 20 ; 31,5 ; 40 ; 50 ; 63 ; 80 ; 100 et 125 mm.

Dans l'échelle logarithmique cela correspond à des tamis allant de -1 à 2,10 environ avec des pas de l'ordre de 0,30.

La méthode d'interpolation et de dérivation de Fragscan-bis donne les résultats présentés en figure 2.5.2.a. et 2.5.2.b. Il convient de préciser que dans le cas de tamisage réel, le paramètre de troncature n'a pas de raison d'être.

Pour la roche issue de la carrière ALZO, on voit nettement apparaître sur ces deux courbes, courbe mesurée par le système Fragscan-Camion (Tir 20A99) et courbe de tamisage des fragments issus d'un cube (200 mm), deux modes distincts. La présence de deux modes pour les données issues de l'analyse d'image n'est donc pas un artefact de calcul et il est donc probable que les distributions granulométriques issues de tir à l'explosif présentent dans la plupart des cas plusieurs modes.

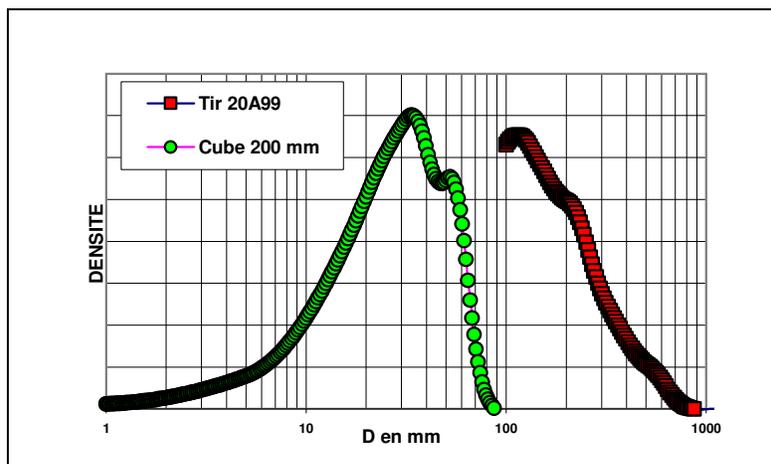


Figure 2.5.2.a.

Pour le grès (Imberg), la charge en gramme est identique dans les deux configurations (cube de 100 mm et cube de 200 mm). Ces deux courbes de tamisage présentent de manière très lisible deux modes. Ces deux courbes présentent également des similitudes de formes qui ne sont probablement pas le fruit du hasard.

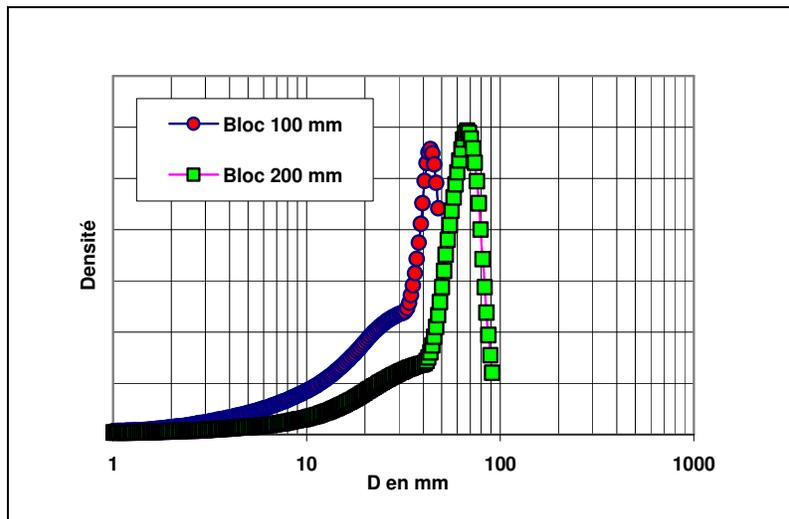


Figure 2.5.2.b.

2.5.3. ILLUSTRATION DU MODELE FRAGSCAN-BIS.

Comme nous l'avons vu précédemment, la modélisation n'est calculée que sur un court segment de l'échelle logarithmique des diamètres: Entre 2 et 2,5, soit entre 100 mm et 315 mm. Ce choix est guidé par des nécessités techniques comme le seuil de détection du système Fragscan-Camion mais aussi pour limiter au mieux l'effet de ségrégation relative des différentes classes granulométriques qui semble sur les données disponibles (ALZO en particulier) s'amplifier au-delà de 315 mm. Il y a une autre raison à ce choix. Lors du contrôle qualité des images Fragscan (voir chapitre 1) nous nous sommes aperçus que sur une image la présence de blocs de dimension supérieure à 1000 mm correspond soit à un déclenchement intempestif de prise de vue (prise de vue du sol par exemple) ou à une mauvaise détection des contours de bloc liée à un problème d'éclairage. Pour éliminer ce type d'image erronée, toutes les images contenant un bloc supérieur à 900 mm (2,9 dans l'échelle logarithmique) ont été éliminées.

Cette troncature artificielle s'ajoute à la troncature « naturelle » réalisée au chargement. On écarte les blocs les plus importants pour éviter tout blocage au concasseur primaire. L'effet de cette double troncature sur les données des deux carrières est bien différent.

Pour les données de la carrière ALZO, il semble bien en effet que l'on tronque la partie supérieure de la population de matériau plus grossier, figure 2.5.2.a.

Pour les données de la carrière DMD, cette population n'est pas tronquée.

Ceci peut permettre d'envisager la conclusion suivante : pour la carrière ALZO, les gros blocs écartés par le tri à la chargeuse et/ou par le tri lié au contrôle qualité des images Fragscan font partie de la population f_2 vu par le système Fragscan-Dumper. Pour la carrière DMD, les blocs écartés par le tri à la chargeuse principalement, ne font pas partie de la population f_2 vu par le système Fragscan-Camion. Ils forment donc par la même, une troisième population distincte, composante de la granulométrie réelle du tas (et qui ne pourra être étudiée).

Cette troisième population a pu également être mise en évidence sur des données issues de la bibliographie, Rascheef (B.26), est présentés en figure 2.5.3.a.

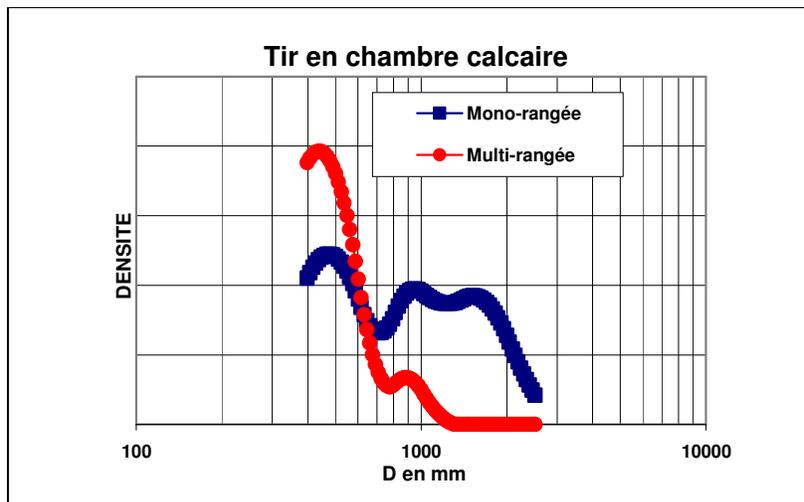


Figure 2.5.3.a.

2.5.4. UN ESSAI D'INTERPRETATION.

Lors de travaux sur le poinçonnement ayant eu lieu en 2000-2001 au CGES, des données granulométriques ont été recueillies. Ces données de tamisage ont été interpolées et dérivées selon la méthode de Fragscan-bis. Quelques-unes des courbes obtenues présentent deux modes. Sachant que lors du poinçonnement, deux modes de rupture coexistent, compression et cisaillement, il est probable que chaque population granulométrique soit caractéristique d'un mode de rupture. Cette hypothèse ne pouvant être démontrée rigoureusement avec les données disponibles nous en resterons au stade de l'hypothèse, c'est à dire que si différentes populations de fragments peuvent être distinguées sur une courbe granulométrique (de fragmentation) alors il est probable que le type de contrainte ayant provoqué la rupture soit caractéristique de chaque population.

2.6. DU MODELE GRANULOMETRIQUE AU MODELE ENERGETIQUE.

Pour une utilisation statistique pratique des données granulométriques il est obligatoire de réduire le nombre de paramètres de comparaison. Dans le cas présent on voit bien l'importance du paramètre de pourcentage γ qui caractérise la proportion des populations f_1 et f_2 .

La fonction f_2 variant peu sur chacune des carrières, il est envisageable de la considérer comme constante et de l'assimiler à une fragmentation « inéluctable », c'est à dire qu'elle pourra être assimilable à une fragmentation limite.

Un deuxième paramètre va donc caractériser l'étalement de la courbe f_1 . Cet étalement étant proportionnel à l'énergie utilisée pour la fragmentation, nous pouvons calculer un index énergétique. Celui-ci utilise la relation liant l'énergie utilisée lors de la fragmentation à la surface nouvelle créée, Steiner (B.32) et Ortiz (D.01). Le modèle utilisé pour le calcul de surface est un modèle cubique. La fonction f_2 étant peu variable, nous considèrerons la surface nouvelle produite en supposant l'état initial du matériau « assimilable » en totalité à f_2 . De toute façon, l'essentiel de la surface nouvelle créée concerne la population f_1 quel que soit la courbe granulométrique initiale choisie.

La relation Energie-Surface utilisée, figure 2.6.a, étant celle produite lors du travail de Roland Ortiz sur le béton. Cette courbe caractéristique d'un matériau n'a été déterminée pour les matériaux des carrières ALZO et DMD que récemment par l'université de Leoben et n'a donc pas pu être utilisée pour ce travail.

Calculons les surfaces spécifiques correspondantes aux populations P1 et P2 pour une tonne de matériau.

$$S_1 = \int_{\Phi} f_1(\Phi) * 6 * \Phi * \Phi * d\Phi$$

$$S_2 = \int_{\Phi} f_2(\Phi) * 6 * \Phi * \Phi * d\Phi$$

Si la surface initiale est assimilée en totalité à S_2 alors la surface spécifique créée pour une tonne de matériau lors de l'explosion est :

$$\Delta S = - S_2 + (\gamma * S_1 + (1 - \gamma) * S_2)$$

soit

$$\Delta S = \gamma * (S_1 - S_2)$$

Or l'énergie réellement utilisée pour la fragmentation est à mettre en relation avec la surface nouvelle créée, voir figure 2.6.a, soit :

$$Eu = R (\Delta S)$$

Nous obtenons donc une énergie utile de fragmentation en Joule / tonne, index énergétique. Etant donné l'utilisation d'une courbe correspondant à un autre matériau, le béton, nous utiliserons cette énergie calculée uniquement comme un index de comparaison. Les relations d'ordre entre les énergies calculées pour différentes courbes granulométriques étant conservées même si les valeurs peuvent être assez éloignées de la réalité.

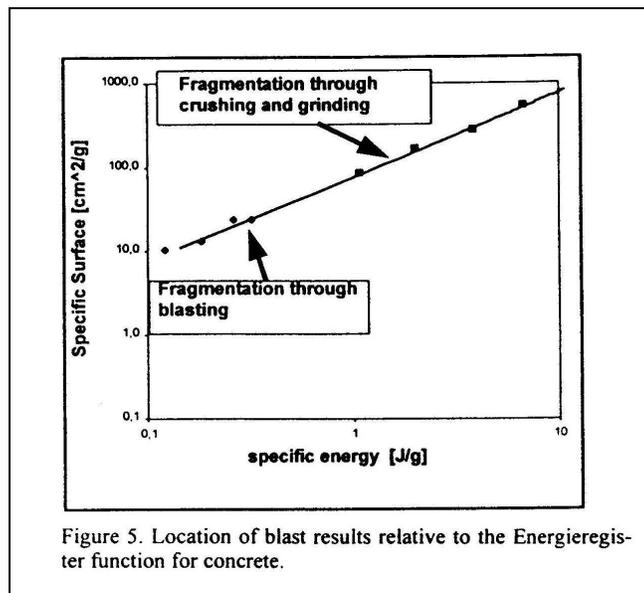


Figure 2.6.a.

Nous obtenons donc deux paramètres qui caractérisent la granulométrie d'un tir :

Index de fragmentation, γ , proportion de la population P1.

Index énergétique, Eu , énergie utilisée pour la création de nouvelle surface spécifique.

On peut remarquer que les deux paramètres ne sont pas totalement indépendants.

2.7. LES RESULTATS DU MODELE GRANULOMETRIQUE.

Les données granulométriques ne sont pas aisées à manipuler d'un point de vue statistique. Il s'agit dans la plupart des cas d'un vecteur (Tamis - Passant) ou de sa modélisation (Passant = $f(\Phi)$) qui est une fonction.

Dans le cas du modèle de Rosin-Rammler, les deux paramètres X_c et n le coefficient d'uniformité permettent assez facilement de comparer des données granulométriques. X_c : le diamètre caractéristique, donne la position relative de la courbe dans l'axe des diamètres. n est à mettre en relation avec l'étalement de la courbe et la densité du matériau.

Dans notre cas, avec l'utilisation d'un nouveau modèle, on pourra revenir à des concepts plus simples: D_{80} , D_{50} , D_{20} (diamètre pour lequel il y a 80%, 50% ou 20% de passant).

Toutefois, sachant que ce modèle est calculé dans l'échelle logarithmique des diamètres, il nous faut conserver cette même logique. La position relative de la courbe sera donc donnée par le D_{50} (exprimé dans l'échelle logarithmique des diamètres), l'étalement de la courbe sera donné par le $D_{80}-D_{20}$ exprimé dans l'échelle logarithmique des diamètres.

2.7.1. CARRIERE ALZO.

Le diagramme, figure 2.7.1.a, $D_{80}-D_{20}$ en fonction du D_{50} pour données 1999 et 2000 montre que trois points se détachent nettement de la moyenne des autres tirs. Il existe donc, pour le moins, deux populations à distinguer sur cette carrière. Pour les autres tirs, ce diagramme ne permet pas de juger s'ils font partie d'une seule et même population.

La position sur la carrière des trois points atypiques du diagramme peut expliquer leur faible D_{50} notamment. En effet, ces trois tirs sont situés sur une faille et dans un cône de déjection.

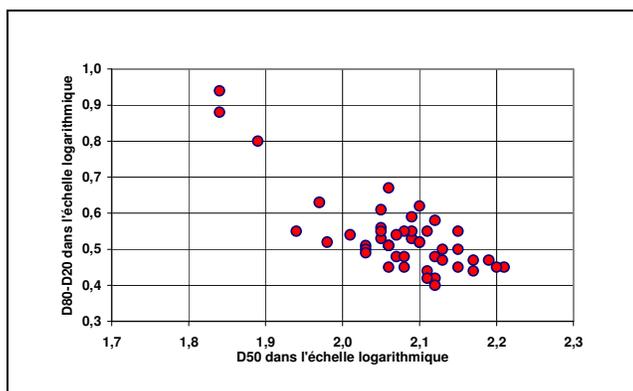


Figure 2.7.1.a.

Deux populations peuvent donc être distinguées, par un D_{50} supérieur ou inférieur à 1,9 (environ 80 mm) et un étalement ($D_{80}-D_{20}$) supérieur ou inférieur à 0,7.

Dans la population 1, les données varient de 1,9 à 2,2 environ pour le D_{50} et de 0,4 à 0,7 pour le $D_{80}-D_{20}$.

Dans la population 2, le D_{50} varie de 1,8 à 1,9 et le $D_{80}-D_{20}$ est compris entre 0,75 et 0,95.

2.7.2. CARRIERE DMD.

Le diagramme, figure 2.7.2.a, D₈₀-D₂₀ en fonction du D₅₀ pour les données 1999, montre une faible corrélation entre le diamètre moyen et l'étalement de la courbe.

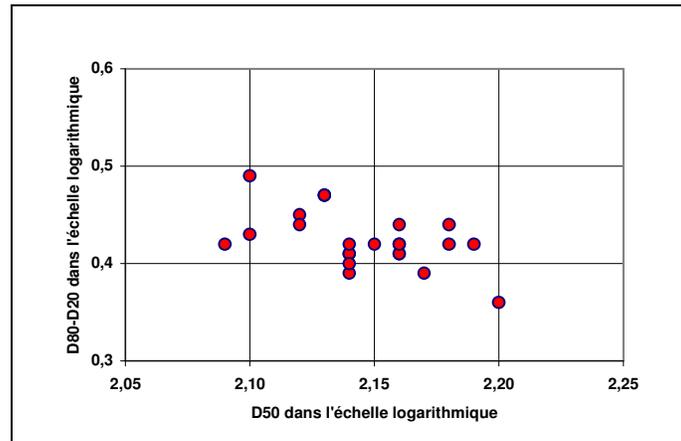


Figure 2.7.2.a.

Le D₅₀ varie de 2,1 à 2,2 et le D₈₀-D₂₀ varie de 0,35 à 0,5. Les données sont donc beaucoup moins variables que pour la carrière ALZO.

2.8. LES RESULTATS DU MODELE ENERGETIQUE.

Nous avons donc obtenu deux index; La proportion γ relatif des deux populations f_1 et f_2 constituant la granulométrie, index de fragmentation, et l'énergie utilisée pour la fragmentation, index énergétique.

Ces deux index peuvent être compris également de manière plus explicite et intuitive que les précédents (D₅₀ et D₈₀-D₂₀):

Quelle est l'énergie utilisée lors de la fragmentation ?

Index énergétique.

Quelle est la proportion de roche fragmentée ?

Index de fragmentation.

Ceci n'étant pas pour l'instant justifié d'un point de vue théorique.

2.8.1. CARRIERE ALZO.

Etant donné la dispersion des données, un premier diagramme, figure 2.8.1.a, en échelle logarithmique pour l'index énergétique a été utilisé. On y distingue très nettement les trois points atypiques. Ces points sont caractérisés par une « énergie » de fragmentation considérable. Est-ce un broyage lié au déplacement de la faille ? On peut le supposer.

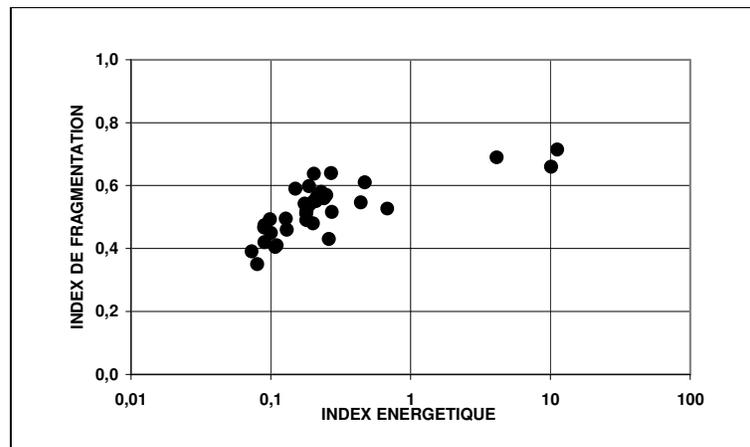


Figure 2.8.1.a.

Six autres points peuvent également être sortis de la population principale. Dans la figure 2.8.1.b, échelle normale pour l'index énergétique, ils sont indiqués comme ayant une géologie distincte. Pour certains, la proximité (géographique) avec les trois points atypiques permet de penser qu'ils sont également influencés par cette faille. Pour d'autres, l'existence de karstifications nombreuses sur la carrière est une explication probable à leur position sur le diagramme (le relevé de l'ensemble des karstifications n'a pas pu être réalisé de manière totalement exhaustive). Pour cette carrière ALZO, nous distinguerons donc deux populations de granulométrie de tir.

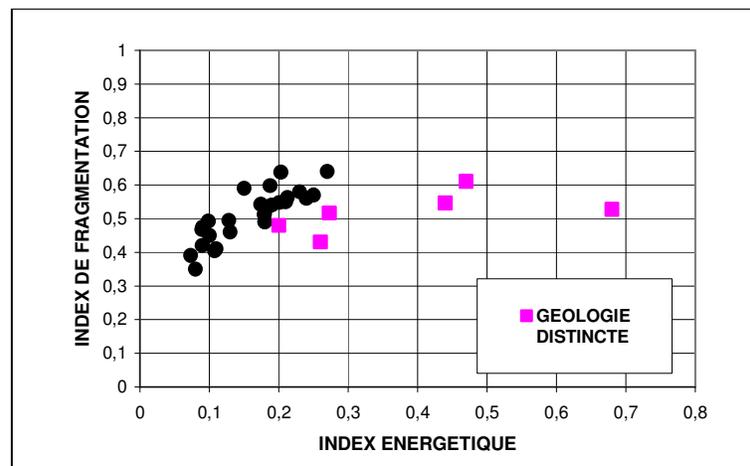


Figure 2.8.1.b.

Une première population non influencée par des phénomènes géologiques.

Une deuxième population fortement, à très fortement, influencée par des phénomènes géologiques.

Si l'on regarde plus précisément la première population, on distingue deux sous-groupes. Nous verrons au chapitre 4 si la conception des tirs est la cause de ces différences. A noter que pour cet industriel, **la diminution de l'énergie de fragmentation, index énergétique, lors des tirs à l'explosif est un objectif majeur car il correspondra à une diminution de la proportion de fines générées lors du tir.**

2.8.2. CARRIERE DMD.

Le diagramme présenté en figure 2.8.2.a pour la carrière DMD est beaucoup moins explicite que pour la carrière ALZO. Toutefois, il paraît évident, à la visite du site, que des

différences géologiques notables existent sur la carrière. Différences en fonction de la position sur l'échelle stratigraphique, en fonction de la profondeur par rapport à la topographie initiale et des développements plus ou moins importants suivant les secteurs du Karst.

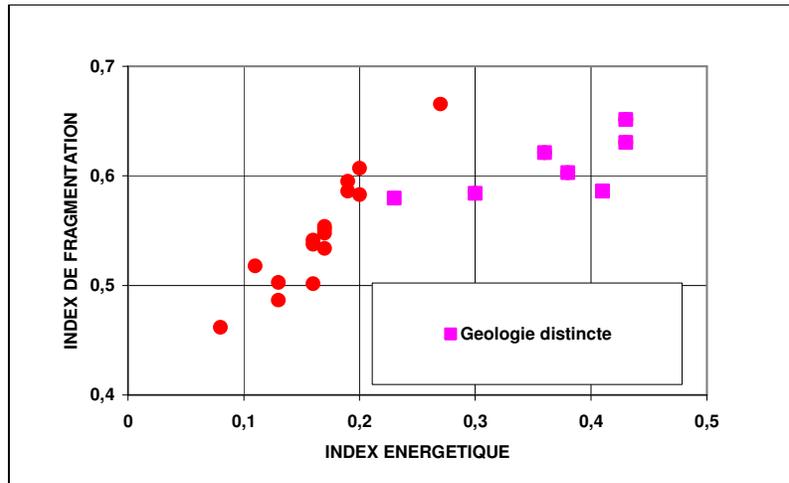


Figure 2.8.2.a.

Comme pour la carrière ALZO, nous distinguerons donc deux catégories de tir:

Les tirs où l'influence de phénomènes géologiques est négligeable.

Les tirs où l'influence de phénomènes géologiques est significative.

L'étude statistique sera quelque peu difficile car il n'y aura plus qu'une quinzaine de tirs « propres ». Dans le cas de la carrière DMD, **l'objectif est d'augmenter la proportion de roche fragmentée, index de fragmentation.**

2.9. BIBLIOGRAPHIE.

- B.01. Cailleux et Tricart, 1963. *La granulométrie des blocs et galets.*** Initiation à l'étude des sables et des galets, Centre de Documentation Universitaire,
- B.02. Rosin, Rammler, 1933. *The laws governing the fineness of powdered coal.*** Journal of the institute of fuel, Vol 7, pp 29-36.
- B.03. Chavez, Cheimanoff, Schleifer, 1996. *Sampling problems during grain size distribution measurements.*** Mémoire de thèse de l'ENSMP.
- B.04. Blanchier, Mai 1994. *Blocométrie et productivité du chargement.*** *Revue de l'Industrie Minérale* « Mines et Carrières » pp 58-60.
- B.05. 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.
- B.06. Parker, 1991. *Some random notes on grain sorting.*** Grain sorting seminar, Switzerland, pp 20-75.
- B.07. Moser, Cheimanoff, Ortiz, Hochlodinger, 2000. *Breakage characteristics in rock blasting.*** Proceedings of the 1st World Conference on Explosives and Blasting Technique, Balkema : Munich, pp 165-170.
- B.08. Zhukov, Mizonov, Filitchev, Bernotat, 1998. *The modelling of grinding processes by means of the principle of maximum entropy.*** Powder Technology, pp 248-253.
- B.09. Diplas, 1991. *Surface and subsurface granulometry.*** Grain sorting seminar, Switzerland, pp 157-162.
- B.10. Harris, September 1968. *The application of size distribution equations to multi-event comminution processes.*** Society of Mining Engineers, AIME, Transactions, Vol 241, pp 343-357.
- B.11. Lange, Ahrens, 1981. *Fragmentation of ice by low velocity impact.*** Proc. Lunar Planet. Sci., pp 1667-1687.
- B.12. Gilvarry, 1961. *Fracture of brittle solids, distribution function for fragment size in single fracture.*** J. App. Physics, Vol 32, n°3, pp 391-399.
- B.13. Thornton, Kanchibotla, Bruton, Octobre 2001. *Modelling the impact of rockmass and blast design variation on blast fragmentation.*** Explo 2001. Proceedings of Explo Conference on Blasting, Australian Institute of Mining and Metallurgy : Hunter Valley, pp 197-205.
- B.14. Kuznetsov, 2001. *The mean diameter of the fragments formed by blasting rock.,*** Soviet Mining Science. Vol 9, n°2, pp 144-148.
- B.15. Hartmann, 1969. *Terrestrial, lunar and interplanetary rock fragmentation.*** Icarus, n°10, pp 201-213.
- B.16. Santamarina, Morley, Franklin, Wang, 1996. *Development and testing of a zooming technique for fragmentation.*** Measurement of blast fragmentation. Proceedings of the Workshop on Measurement of Blast Fragmentation, Balkema : Montréal, pp 133-139.
- B.17. Diplas, 2000. *Statistical approach to sediment sampling accuracy.*** Water resources research, Proceedings of the Workshop on Measurement of Blast Fragmentation, Balkema : Montréal, vol 36, n°2.

- B.18. Kellerhals, Bray, August 1971. *Sampling procedures for coarse fluvial sediments.*** Journal of the Hydraulics Division. Proceeding of the American Society of Civil Engineers, pp 1165-1180.
- B.19. Rollins, Wang, 1990. *Fragmentation prediction in bench blasting.*** Fragblast 90. Proceedings of the 2nd International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Australian Institute of Mining and Metallurgy : Brisbane, pp 195-198.
- B.20. Epstein, December 1948. *Logarithmico-normal distribution in breakage of solids.*** Industrial and engineering chemistry, pp 2289-2291.
- B.21. Johnson, Kotz. *Distributions in statistics: Continuous univariate distributions.*** New York, Wiley, pp 212-231.
- B.22. . Lange, Ahrens, 1981. *Fragmentation of ice by low velocity impact.*** Proc. Lunar Planet. Sci. 12B, pp 1667-1687.
- B.23. Djordjevic, 1999. *A two component model of blast fragmentation.*** The AusIMM Proceeding, n° 2, pp 1-6.
- B.24. Bond, December 1957. *Comminution exposure constant by the third theory.*** Mining Engineering, Transactions AIME, pp 1372-1376.
- B.25. Charles. January 1957. *Energy-Size reduction relationships in comminution.*** Mining Engineering, Transactions AIME, pp 80-88.
- B.26. Rascheeff, 1973. *Etude de la fragmentation des roches au moyen d'explosifs.*** Explosifs, n°3, pp 3-15.

3. INCIDENCE DE LA GRANULOMETRIE SUR LES FLUX ET LES COUTS D'EXPLOITATION.

3.0. INTRODUCTION.

Au chapitre 1, la structure d'acquisition et de traitement des données a permis d'obtenir des unités d'œuvres (heures, quantités d'explosifs, ...) correspondant à des volumes traités et ce pour les opérations suivantes: Foration, minage, chargement, transport et concassage primaire. Pour le chargement, le transport et le concassage primaire dans un premier temps sur des plages de temps continues et dans un second temps sur un mode global tir par tir.

Au chapitre 2 nous avons décrit les granulométries des tirs et à partir de la décomposition de celles ci en deux populations de fragments nous avons pu en obtenir une modélisation intégrale.

Il nous faut maintenant établir ou plutôt rechercher, un lien entre la performance de la production, en termes de coûts et de flux, et le résultat du tir en termes de fragmentation.

Nous distinguerons deux sous-groupes d'opération :

Foration + Minage.

Chargement + Transport + Concassage primaire.

Dans la mesure ou dans chaque sous-groupe les performances des différentes opérations sont strictement dépendantes les unes des autres.

Nous commencerons par calculer les coûts de production, les flux moyens, la valeur du stock en cours d'élaboration qui nous serviront de base pour l'analyse « économique » des données. Nous ferons un aparté pour un calcul de « flux instantané » qui nous permettra par la suite de travailler sur des données où l'organisation du cycle Chargement + Transport + Concassage primaire est très variable pour un même tir.

La comparaison des tirs pour le sous-groupe Foration + Minage, sera effectuée dans un diagramme Coûts - Fragmentation classique.

La comparaison des tirs pour le sous-groupe Chargement + Transport + Concassage primaire, sera effectuée sur un diagramme Flux - Coûts - Fragmentation dont le principe a été proposé par Ricardo Chavez (Nitro-Bickford). La nécessité de « normaliser » le cycle de production sera ensuite montrée et une solution sera proposée pour cela. La méthode d'analyse choisie est un réseau de neurones, ce qui nous permettra d'extraire les informations essentielles contenues dans les données disponibles. Des commentaires seront alors énoncés pour proposer aux carriers des solutions pour optimiser leur organisation et leurs performances en fonction de la fragmentation.

3.1. CALCUL DES PARAMETRES ECONOMIQUES.

3.1.1. LES COUTS DE PRODUCTION.

La méthode de calcul des coûts de production est basée sur l'utilisation de coût unitaire par unité d'œuvre. Ces coûts unitaires sont en général calculés annuellement par les entreprises, ces données étant malheureusement considérées par les entreprises participantes au projet européen Blast-Control comme confidentielles. Aussi nous avons dû utiliser des coûts de production approximatifs, probablement surestimés mais globalement assez proches dans leur proportionnalité. La table des coûts unitaires est présentée en annexe.

Connaissant les unités d'œuvres, les coûts unitaires et les volumes traités pour chaque opération, qui ne sont pas nécessairement identiques, il est maintenant possible de calculer

pour chaque opération, pour chaque tir, les coûts de production en Euro/tonne par la formule suivante:

$$\sum_i (UO_i * CU_i) / \sum_i (VT_i) * \text{densité}$$

UO_i = nombre d'unité d'œuvre, CU_i = Coût unitaire, VT_i = Volume traité.

La densité sera choisie égale à 2,7. Pour le transport, les tonnages théoriques constructeurs seront utilisés.

Pour une même opération, l'indice i correspondant aux différentes natures d'unité d'œuvre possible par exemple type de camion, type d'explosif ... Dans le cas de la foration et du minage on utilise directement le volume du tir.

3.1.2. CALCUL DES FLUX MOYENS.

La méthode de calcul des flux moyens est directement réalisée à partir des unités d'œuvre et des volumes traités. Etant donné le mode de calcul des unités d'œuvres pour la foration et le minage (voir chapitre 1) il n'y aura pas de flux calculé pour ces opérations.

La formule pour le Chargement, le transport ou le concassage primaire sera la suivante:

$$\sum_i (VT_i) / \sum_i (UO_i)$$

On voit bien apparaître un biais dans ce calcul. En effet, si, par exemple, on travaille avec un échelon de transport dépareillé, comment « additionner » les heures de chaque type de camion ? Nous nous intéresserons donc, de manière prépondérante, au flux de chargement, à charge pour nous de décrire le plus précisément possible l'organisation du cycle Chargement + Transport + Concassage primaire. Cela, par ailleurs, nous permettra de comprendre son influence sur les rendements de production.

3.1.3. LA VALEUR D'UN STOCK ET LA VALEUR AJOUTEE.

Si l'on prend l'exemple de la carrière ALZO, celle ci génère environ 30 % de 0-31,5 mm pour lesquels elle ne peut trouver de débouché commercial. C'est donc une perte d'exploitation importante car il faut bien transporter, stocker ... ces matériaux. Mais c'est aussi une perte très significative dans le sens de la gestion de la ressource, qu'une portion du gisement, rare dans le cas présent, soit irrémédiablement perdue. On ne peut donc pas raisonner uniquement en terme de coût de production pour qualifier les performances économiques. Une augmentation des coûts, si elle entraîne une diminution des quantités de stériles produits peut s'avérer tout à fait bénéfique à long terme sur la valorisation du gisement. Il est donc important, tout au long du cycle de production, de quantifier les coûts mais aussi la qualité de la valorisation du gisement.

Dans le cas de la carrière ALZO, fournisseur pour la production de chaux, le fuseau granulométrique d'entrée dans les fours est 31,5-100 mm. Le 0-31,5 mm est le stérile, le > 100mm est utilisé pour la production de granulat. On peut donc considérer que la taille d'un fragment détermine sa valeur. Dans le cas d'un problème minier, on utiliserait plutôt la teneur en minerai. Chaque transformation du matériau va permettre de déterminer un gain plus ou moins important dans la valorisation du gisement.

Pour une carrière de ce type on peut considérer quatre états du matériau : le gisement en place; le matériau après abattage à l'explosif; le matériau trié, chargé dans le tombereau et transporté jusqu'au concasseur primaire; le matériau concassé et trié en trois catégories, 0-31,5 + 31,5-100 + 100-400 mm.

Dans la mesure où notre approche est tir par tir, nous devrions déterminer quatre valeurs du matériau en cours de traitement pour chaque tir. Pour simplifier la démarche nous allons considérer la valeur du stock avant et après chaque sous-groupe d'opération.

Valeur 0 [Gisement]

<< Foration + Minage

Valeur 1 [Stock abattu]

<< Chargement + Transport + Concassage primaire

Valeur 2 [Stock concassé]

Comme la granulométrie n'est pas toujours disponible au cours du cycle de production, nous serons amenés à effectuer quelques simplifications. Une fonction $V_i(\Phi)$ sera proposé en fonction de la position du fragment dans le cycle de production et du diamètre du fragment. i sera la position dans le cycle de production, Φ le diamètre du fragment (voir Annexe).

La valeur ajoutée sera calculée pour une opération ou un sous-groupe d'opérations par la différence de la valeur du stock de matériau avant et après l'opération ou le sous-groupe d'opération.

La valeur ajoutée pour la foration et le minage sera donc :

$$VA_1 = \int_{\Phi} S_{\Phi} G_1(\Phi) * V_1(\Phi) d\Phi - \int_{\Phi} S_{\Phi} G_0(\Phi) * V_0(\Phi) d\Phi$$

Valeur du stock abattu - Valeur du gisement.

Pour le chargement, le transport et le concassage primaire, elle sera :

$$VA_2 = \int_{\Phi} S_{\Phi} G_2(\Phi) * V_2(\Phi) d\Phi - \int_{\Phi} S_{\Phi} G_1(\Phi) * V_1(\Phi) d\Phi$$

Valeur du stock concassé - Valeur du stock abattu.

$G_0(\Phi)$, $G_1(\Phi)$ et $G_2(\Phi)$ densités des différentes granulométries (courbes granulométriques en fréquence).

$V_0(\Phi)$, $V_1(\Phi)$ et $V_2(\Phi)$ valeurs du matériau en fonction du diamètre du fragment et de la position dans le cycle de production.

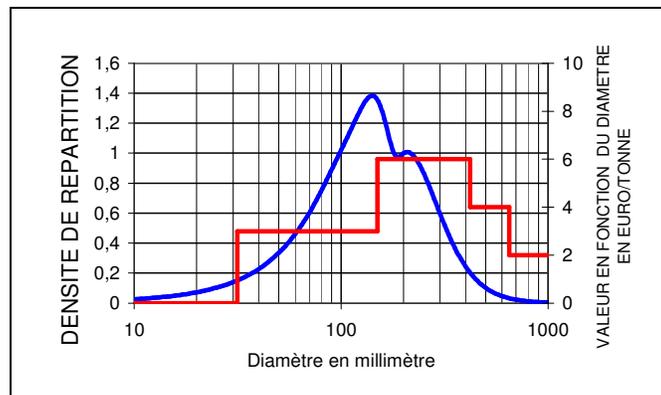


Figure 3.1.3.a.

Pour la carrière Alzo, nous ne disposons pas de la granulométrie après concassage primaire. Nous supposerons que les courbes granulométriques avant et après concassage primaire sont identiques à une translation près sur l'axe des diamètres (dans l'échelle logarithmique), figure 3.1.3.b.

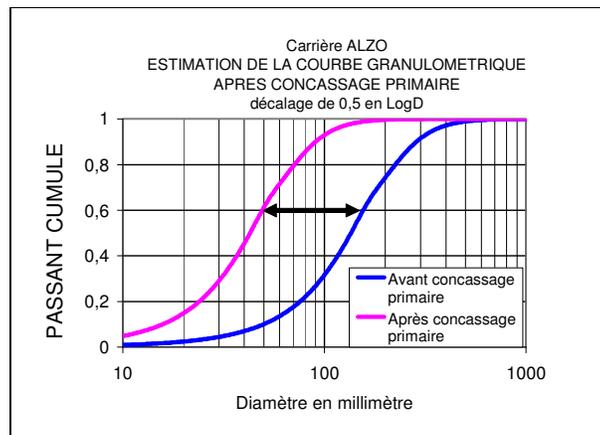


Figure 3.1.3.b.

3.1.4. CALCUL DES FLUX « INSTANTANES ».

Lorsque l'organisation du cycle de Chargement + Transport + Concassage primaire est très variable sur un tir, il est peu indiqué de travailler sur des moyennes qui gomment les effets de l'organisation, de la granulométrie, ... Pour remédier à cette difficulté, il est nécessaire de sélectionner des séquences temporelles où l'organisation est constante. En effectuant les calculs de coût et flux uniquement dans ces séquences, on obtient pour chaque tir plusieurs organisations. Cela nous permettra, on peut l'espérer, de distinguer les effets de la distance de transport, de l'organisation, de la granulométrie... sur les durées de cycle de transport.

Dans la pratique, ce travail n'est possible que lorsque la précision dans l'acquisition des cycles de transports est parfaite, c'est à dire quand chaque arrivée de camion au concasseur primaire ou sur un lieu de passage fixe, est notée dans l'échelle du temps avec une précision de quelques secondes. La marque d'une organisation constante étant certaine lorsque la durée des cycles de transport est peu variable.

3.1.5. LE DIAGRAMME FLUX-COUT-FRAGMENTATION.

La représentation des résultats, Chargement + Transport + Concassage primaire, sera effectuée dans un diagramme Flux - Coût - Valeur ajoutée plutôt que dans un diagramme classique Coût - Fragmentation car nous avons fait le choix de travailler avec des coûts horaires unitaires qui sont améliorés d'une année sur l'autre si les flux moyens augmentent. Donc une amélioration des performances d'une carrière passe aussi bien par une réduction des coûts que par une augmentation des flux qui se reportent sur les coûts unitaires pour l'année suivante.

Dans un premier temps les données brutes seront étudiées dans ce diagramme puis nous tenterons de « gommer » l'influence de facteurs comme la distance de transport ou l'organisation du cycle Chargement + Transport + Concassage primaire pour extraire des données disponibles des modes d'organisation « optimums » en fonction des distances et de la granulométrie.

Nous considérerons le flux de chargement comme base de notre étude économique. Dans de nombreux cas il correspond au flux de l'ensemble du cycle de chargement, transport et concassage primaire. Dans le cas où plusieurs tirs sont mélangés au niveau de l'alimentation du concasseur primaire, le flux de chargement reste propre à un tir et nous permet donc d'effectuer une comparaison tir par tir. Le flux de chargement utilisé est un flux global incluant les temps de chargement des godets mais aussi les temps de tri des blocs, les temps d'attentes ... **Il ne peut donc en aucun cas être comparé aux performances de chargement habituellement mesurées car celles-ci ne concernent en général que le temps de chargement moyen du godet.**

3.2. LA FORATION ET LE MINAGE.

3.2.1. INTRODUCTION.

Quelle est l'influence des paramètres techniques de foration et de minage sur le résultat du tir ? Comme nous l'avons vu au chapitre 1, nous ne disposons pas de données sur les temps de foration et de mise en œuvre des explosifs. Nous avons donc fixé des ratios de rendements qui nous permettent de calculer les coûts de production de la foration et du minage. La table des coûts est présentée en annexe. Dans la mesure où la pratique des tirs a évolué sur les carrières, nous allons étudier l'impact économique de la modification des paramètres de tir. Nous ne chercherons pas à comprendre le « fonctionnement » du tir ce qui est l'objet du chapitre 4.

3.2.2. CARRIERE ALZO.

Sur cette carrière, nous pouvons distinguer cinq types de tir :

Les tirs dit classiques avec une maille de 4,5 m * 7 m (espacement * banquette) et des mines de pied.

Les tirs de relevage dont l'espacement est de deux mètres dans la plupart des cas.

Les tirs à charge spécifique élevée mais où la configuration est globalement identique aux tirs classiques.

Les autres tirs qui se caractérisent par une banquette réduite (maille de 4,5*5).

Les tirs situés dans des zones où la roche est « dégradée » du fait de la géologie et qui ne seront pas représentés pour des raisons de clarté.

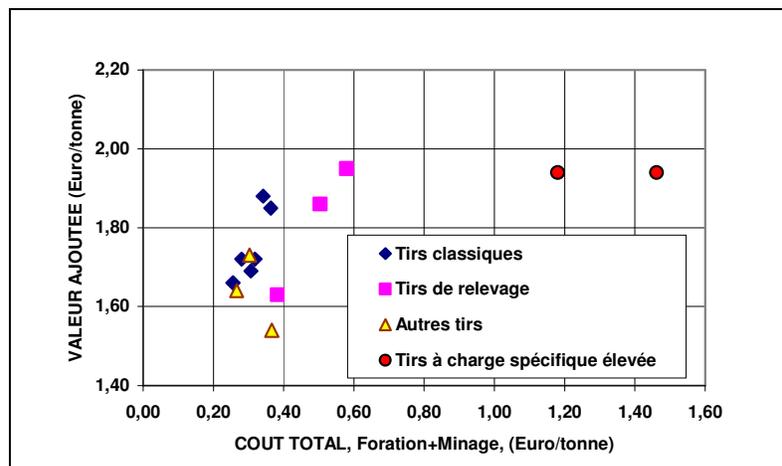


Figure 3.2.2.a.

On voit sur les figures 3.2.2.a et b, que les tirs de relevage ont un coût de revient plus élevé que les tirs classiques ce qui s'explique par un coût de foration horizontale plus élevé que le coût de foration verticale et de même un coût de mise en œuvre des explosifs plus élevé. Pour les autres tirs, maille réduite, l'influence de cette configuration ne semble pas être significative.

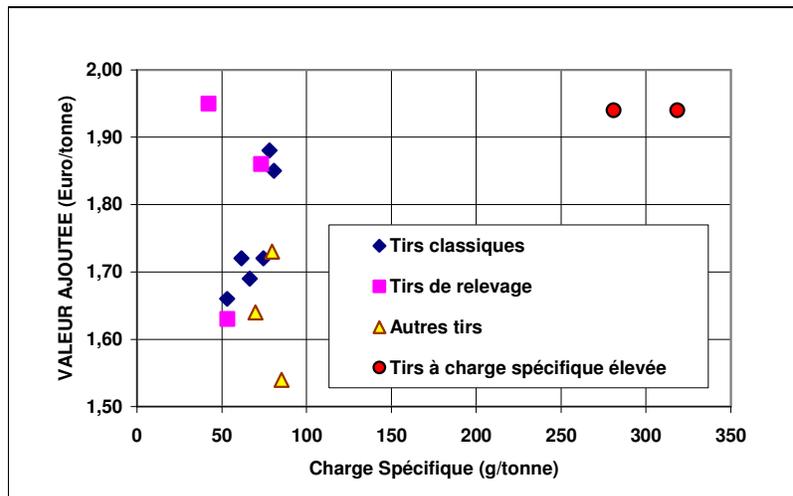


Figure 3.2.2.b.

On peut donc tirer deux enseignements de ces résultats pour la carrière ALZO:

Une maille plus symétrique n'apporte pas d'amélioration des tirs en terme de coût et de valeur ajoutée.

Une augmentation de la charge spécifique, tirs à charge spécifique élevée, apporte une amélioration de la valeur ajoutée avec en contrepartie une augmentation des coûts. Les tirs à charge spécifique élevée améliorent la valeur ajoutée (presque 2 Euros/t) mais avec une augmentation significative des coûts (>1 Euro/t). Les tirs classiques, avec une charge spécifique de l'ordre de 75 g/t, ont un coût de 0,30 Euro/t et une valeur ajoutée de 1,75 Euro/t.

Si on détaille maintenant les coûts du minage en foration verticale, foration horizontale, explosifs et consommables, mise en œuvre des explosifs, on voit, figure 3.2.2.c, que l'absence de mine de pied conduit à une réduction significative des coûts, tirs 20A99 et 39A99, même si l'on a réduit la maille sur ces deux tirs. Les tirs de relevage sont très coûteux en ce qui concerne la foration et la mise en œuvre des explosifs. Pour les tirs classiques et les tirs à charge spécifique élevée, le coût total du tir est en relation avec la consommation en explosifs. Pour chaque catégorie, les tirs ont été classés par charge spécifique croissante.

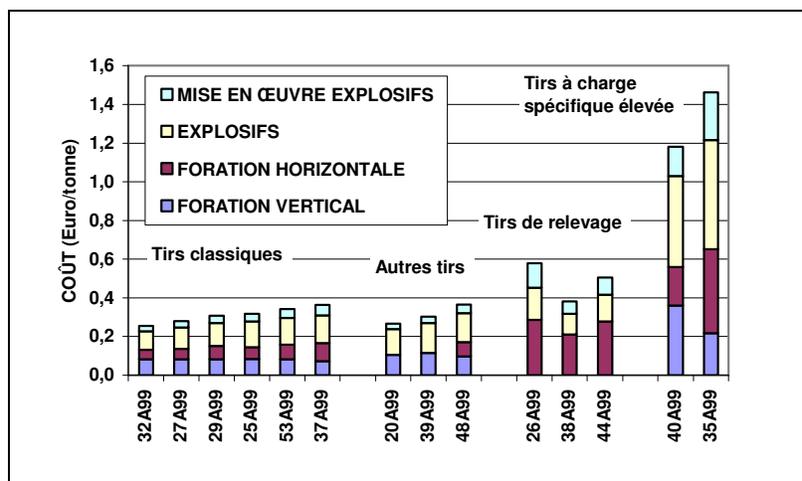


Figure 3.2.2.c.

On peut retenir pour cette carrière l'ordre de grandeur des coûts du minage: Pour les tirs classiques environ 0,32 Euro/tonne; Pour les tirs sans mines de pied environ 0,28 Euro/tonne;

Pour les tirs de relevage environ 0,5 Euro/tonne et pour les tirs à charges spécifiques excessives plus de 1 Euro/tonne.

3.2.3. CARRIERE DMD.

Sur cette carrière, nous pouvons distinguer quatre types de tir:

Les tirs dit classiques avec une maille de 7 * 6,2 (espacement * banquette).

Les tirs sur deux rangées.

Les autres tirs où la hauteur de front est réduite.

Les tirs situés dans des zones où la roche est « dégradée » du fait de la géologie et qui ne seront pas représentés pour des raisons de clarté.

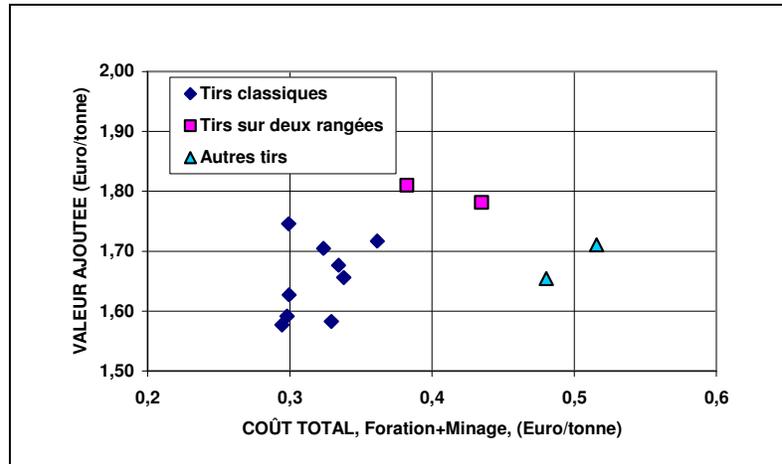


Figure 3.2.3.a.

On voit sur la figure 3.2.3.a que pour les tirs classiques il n'y a pas de lien entre coût et valeur ajoutée. Pour les tirs sur deux rangées, bien que le coût du minage ait augmenté, la valorisation du gisement est nettement meilleure. Avec le jeu de coûts unitaires et de valeurs des stocks intermédiaires choisis, on obtient pour un surcoût de 0,075 E/t une augmentation de 0,150 E/t de la valeur ajoutée.

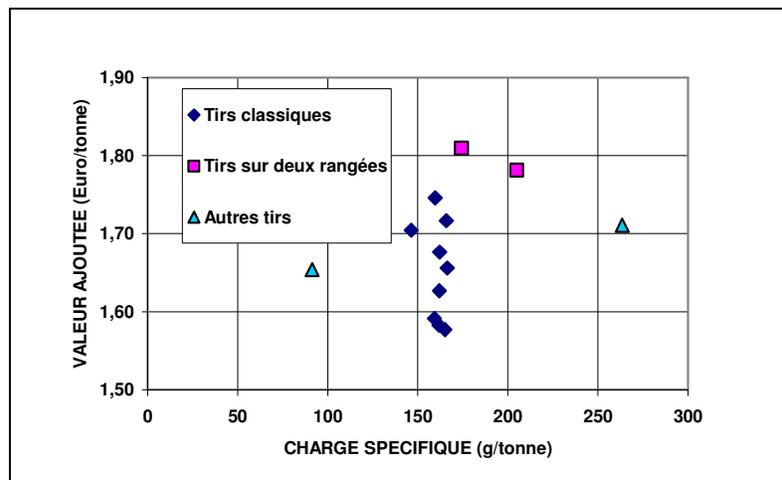


Figure 3.2.3.b.

Sur la figure 3.2.3.b, ce qui frappe c'est l'absence de relation entre charge spécifique et valeur ajoutée, ceci étant dû à une forte variabilité de proportion des différents types d'explosifs. On note aussi que les tirs sur deux rangées ont également comme conséquence des

consommations supérieures en explosifs. La figure 3.2.3.c nous montre la répartition des coûts pour les différents types de tir.

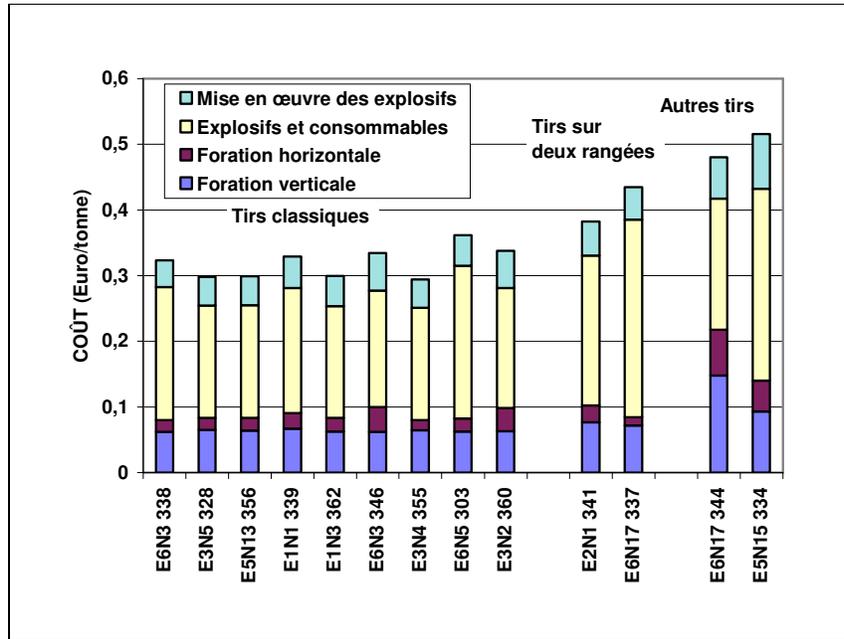


Figure 3.2.3.c.

3.3. LE CYCLE CHARGEMENT-TRANSPORT-CONCASSAGE PRIMAIRE.

3.3.1. INTRODUCTION..

La bibliographie concernant l'influence de la fragmentation sur les rendements du chargement, du transport et du concassage primaire est assez mince, le problème principal étant l'appréciation objective de la granulométrie d'un tir. Toutefois, poste à poste, une opinion « consensuelle » est communément véhiculée dans les articles.

Le chargement: Ce poste de travail est considéré par beaucoup d'auteurs comme très influencé par le foisonnement et la granulométrie du tir mais il est également généralement admis que la dextérité du conducteur peut totalement masquer toute autre influence.

Des études intéressantes, Moodley (C.08) et Michaud (C.09), mettent en évidence l'incidence d'un index granulométrique sur le rendement du chargement. On voit également souvent apparaître le terme de « Diggability », que l'on peut traduire par aptitude au chargement, comme caractérisant la fragmentation d'un tir, figure 3.3.1.a d'après (C.02).

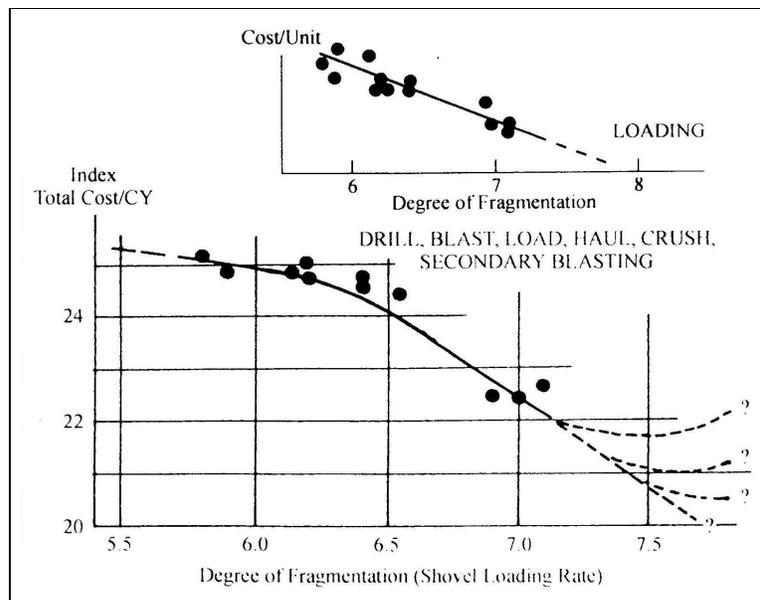


Figure 3.3.1.a.

Le transport: Sur ce poste de travail, il est peu d'auteurs qui se risquent à délivrer une opinion claire (et quantifiée) sur le sujet. Selon Michaud (C.09), figure 3.3.1.b, la productivité du roulage est sensiblement corrélée avec un index granulométrique probablement assimilable avec la densité du matériau. Dans cet article, il apparaît que la productivité du cycle de roulage a été assimilée à la quantité de matériau transportée par cycle. Le gain apporté par une granulométrie plus étalée (et donc une plus forte densité) est montré. C'est donc une masse transportée par cycle plus importante. Ceci ne signifie pourtant pas que la productivité ait augmenté car, pour calculer un flux, il est nécessaire de connaître en sus de la masse transportée, la durée du cycle de transport.

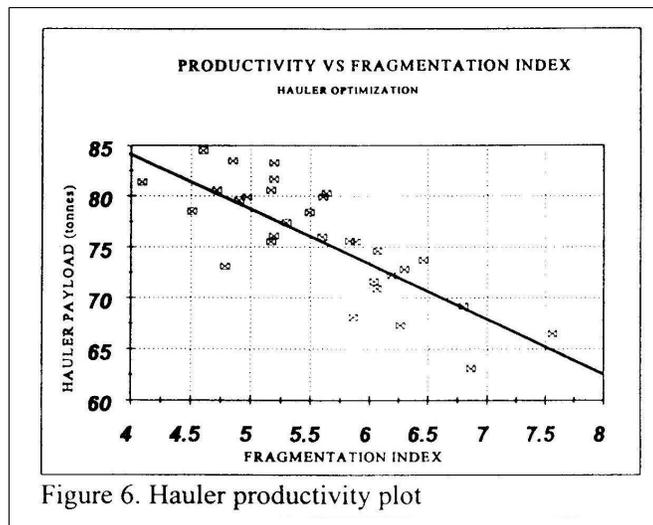


Figure 6. Hauler productivity plot

Figure 3.3.1.b.

Le concassage primaire: Là aussi, peu d'auteurs se sont risqués à quantifier l'influence de la granulométrie sur le coût du concassage primaire. Tout d'abord les coûts fixes, amortissement du matériel et fonctionnement à vide, sont tels qu'ils sont à eux seuls la part principale du coût du concassage primaire. Toutefois il n'est pas inintéressant de regarder l'influence de la granulométrie sur la consommation électrique. L'article de Moodley (C.08), figure 3.3.1.c, montre que l'augmentation de la proportion de blocs génère une consommation électrique plus importante.

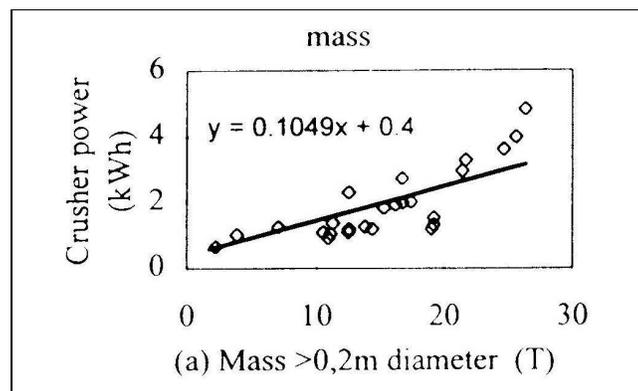


Figure 3.3.1.c.

3.3.2. CARRIERE ALZO.

Deux types de données concernant le cycle de Chargement + Transport + Concassage primaire ont été recueillis sur cette carrière.

Des données moyennées par tir et sélectionnées sur des plages de temps d'une durée de un poste. Le critère de sélection a été l'exhaustivité des pointages camions vérifiés en recoupant les arrivées camions et les variations de remplissage de la trémie. Sur ces données on peut noter que l'organisation du cycle de Chargement + Transport + Concassage est rarement constante sur la durée d'un poste. 17 tirs ont pu être sélectionnés.

Des données recueillies sur des plages de temps plus réduites mais où l'organisation est constante. En plus de la vérification de l'exhaustivité des pointages de camions ceci a nécessité de vérifier que les durées de cycle de transport sont sensiblement constantes. Deux étapes sont nécessaires pour cela :

Sélection automatique des plages de temps ou cinq cycles de transport consécutifs d'un même camion au minimum ont une durée constante.

Vérification manuelle que l'organisation est constante.

114 séquences ont pu être sélectionnées pour 13 tirs.

Nous allons commencer l'étude par les données globales tir par tir pour essayer d'éclairer les modes d'organisation, les ordres de grandeur des coûts, puis nous passerons à l'étude des séquences temporelles plus courtes qui nous permettront d'extraire des résultats quantifiés de l'influence de tels ou tels paramètres sur les flux et les coûts de production.

3.3.2.1. DONNEES GLOBALES TIR PAR TIR.

Le diagramme Flux - Coût - Valeur ajoutée, figure 3.3.2.1.a, nous indique très nettement une corrélation entre flux de chargement et coût total ce qui est, somme toute, assez prévisible.

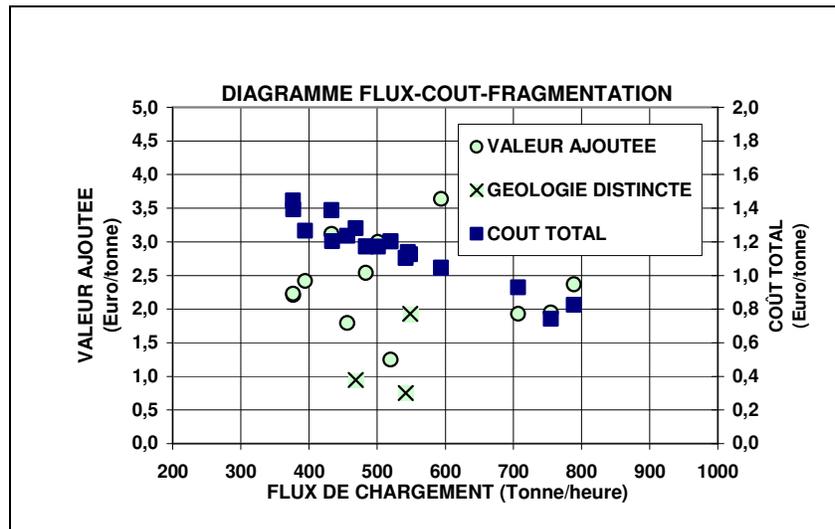


Figure 3.3.2.1.a.

Par contre, il n'y a aucun lien entre valeur ajoutée, coût total ou flux de chargement : ce qui est aussi prévisible étant donné l'importance sans doute relativement faible de la fragmentation sur les flux et les coûts en comparaison avec les facteurs de distance ou d'organisation par exemple.

On remarque sur la figure 3.3.2.1.b, l'influence de la distance sur les flux de transport bien qu'au-delà de 1000 mètres les flux soient pratiquement constants. Sur la figure 3.3.2.1.c, on voit qu'à des distances équivalentes les flux de chargement peuvent être très variables, 400 à 600 tonnes/heures à 1500 mètres par exemple, ce qui est le signe d'une organisation différente.

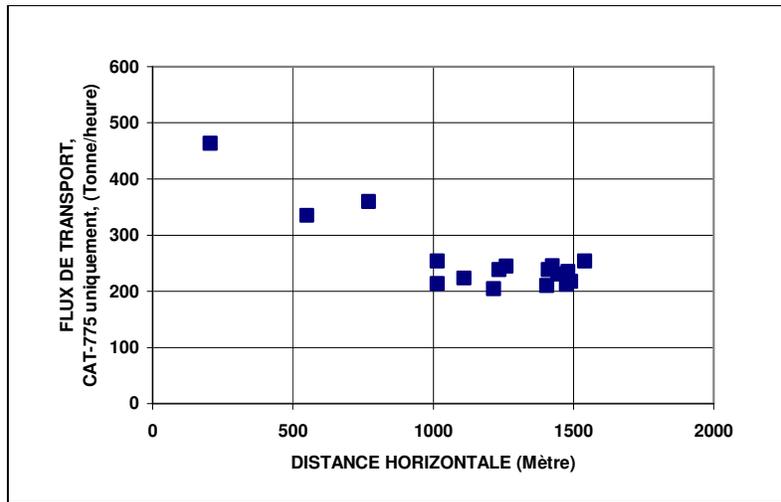


Figure 3.3.2.1.b.

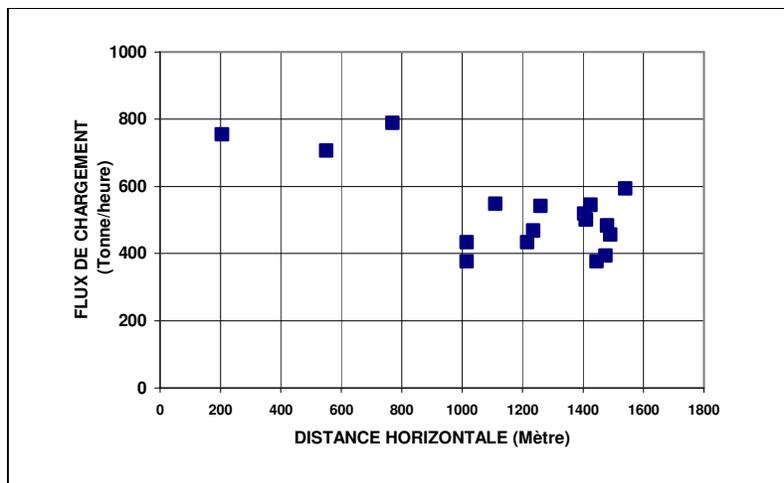


Figure 3.3.2.1.c.

Calculons maintenant un facteur d'organisation, Flux de chargement/ Flux de transport (Cat 775 uniquement), on note sur la figure 3.3.2.1.d qu'il n'y a pas de volonté d'optimisation de l'échelon de transport en fonction de la distance à parcourir.

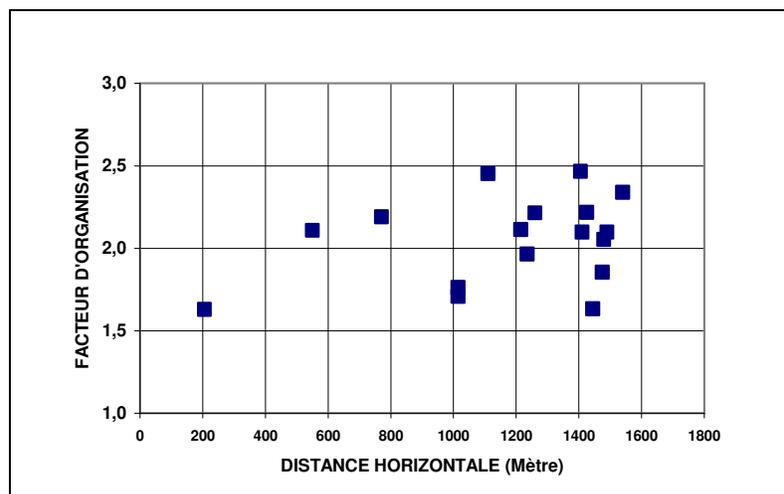


Figure 3.3.2.1.d.

Si l'on classe les tirs en fonction de la distance à parcourir, figure 3.3.2.1.e, hormis pour les trois tirs proches du concasseur, on ne note pas de relation entre distance et coût total du cycle de Chargement + Transport + Concassage primaire. Les coûts sur cette carrière oscillent autour de 1,20 Euro/tonne.

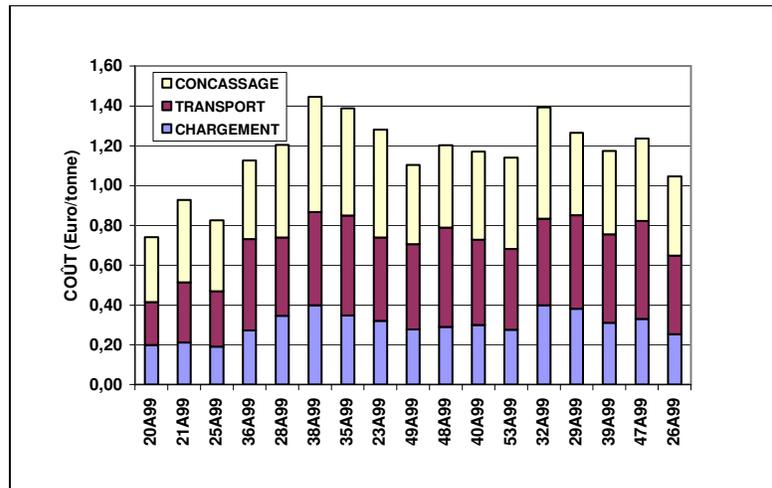


Figure 3.3.2.1.e.

3.3.2.2. UTILISATION D'UN RESEAU DE NEURONES.

Il est proposé d'utiliser un réseau de neurone pour essayer de comprendre et prévoir les résultats économiques de la carrière. Cette étude a été réalisée après l'utilisation satisfaisante des réseaux de neurones sur les résultats « granulométriques » des tirs à l'explosif, chapitre 4.

Dans une approche par un modèle explicite nous aurions été amenés à effectuer un calage sur les données expérimentales. Hors le système d'acquisition mis en place, basé sur les temps d'arrivée des tombereaux dans l'aire de déchargement, ne nous apporte pas suffisamment d'élément d'information sur le cycle de chargement, c'est le flux de chargement global que nous souhaitons étudier. En effet on ne peut pas différencier les temps de chargement, les temps de tri des blocs, les temps d'attente... Le modèle explicite comporterait donc de trop nombreuses inconnues et il serait difficile d'apprécier, dans les performances, celles liées à la distance, à l'organisation ou à la granulométrie.

L'approche par réseau de neurones, modèle implicite, ne cherche pas à comprendre le fonctionnement du cycle de chargement, transport et concassage primaire mais elle permet de réaliser une interpolation, plus ou moins souple, dans un nuage de données expérimentales. En fonction des informations concernant l'organisation, la distance de transport et la granulométrie, elle va chercher pendant sa phase d'apprentissage à pondérer l'influence de tel ou tel paramètre pour rendre au mieux les mesures de flux de chargement réalisées sur le terrain.

Une fois l'apprentissage réalisé, un modèle implicite est donc disponible et l'on peut étudier les différentes configurations d'organisation, de distance de transport et de granulométrie. Il est alors possible d'évaluer l'influence de la granulométrie sur le cycle de chargement, transport et concassage primaire.

L'utilisation de ce modèle implicite demeure tout de même délicate. N'a t'on pas donné trop de souplesse ou de raideur à l'interpolation ? Ne s'éloigne t'on pas trop des données expérimentales ? C'est au concepteur du réseau de neurones de contrôler les résultats obtenus en fonction de son expérience de terrain et de limiter ses évaluations à un domaine restreint pour les données d'entrée du réseau de neurones (organisation, distance et granulométrie).

Le modèle neurométique choisi pour cette étude est un réseau multicouche et le mode d'apprentissage est la rétro-propagation (back propagation). Il n'existe pas de méthode « calculatoire » pour déterminer le nombre de couche et le nombre de neurones du réseau. Cette détermination procède plus de l'expertise ou de l'intuition que d'un procédé déterministe. Le nombre de variable d'entrée est fonction de l'organisation de la carrière, il n'est pas utile de prendre en compte les données qui ne varient pas sur un site. Pour plus de détails sur les réseaux de neurones, se reporter au chapitre 4 et à la bibliographie.

3.3.2.3. LE RESEAU DE NEURONE POUR LA CARRIERE ALZO.

Sur cette carrière, il y a quatre tombereaux : trois tombereaux Caterpillar 775 et un tombereau Caterpillar 769. Il y a deux chargeuses Caterpillar 988. Les tombereaux alimentent un concasseur de grande capacité (>1000 t/h). Les conditions d'organisation sont très variables par modification du nombre d'engins mis en route et par variation de la distance de transport. Il faut noter également que les chargeuses, lorsqu'elles travaillent en même temps, ne travaillent pas sur le même tir.

Les conditions d'organisation ont donc été déterminées pour des périodes de temps où elles étaient constantes. On va chercher à comprendre ce qui fait varier le flux de chargement.

Les paramètres d'entrées seront les suivants:

La distance horizontale et le dénivelé entre le tir et le concasseur primaire.

Le nombre de CAT 775 affecté au tir (1 à 3).

Le nombre de CAT 769 affecté au tir (0 ou 1).

Le nombre d'équivalent CAT 775 affecté à un autre tir.

Le nombre d'équivalent CAT 769 affecté à un autre tir.

Ces équivalents étant calculés par comparaison des durées de cycle de transport. Si par exemple la durée d'un cycle correspondant à un autre tir est double, alors on considèrera qu'il y a un demi-équivalent.

La fragmentation: Passant à 100 mm (avant concassage primaire).

La période de l'année: Mois par mois.

Le paramètre de sortie est le flux de chargement.

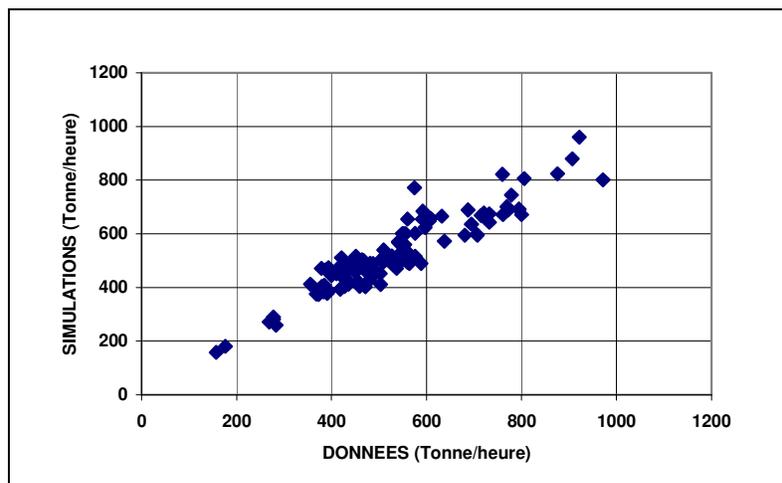


Figure 3.3.2.3.a.

Le réseau a deux niveaux de neurones intermédiaires avec six et trois neurones. Les résultats sont significatifs, figure 3.3.2.3.a, avec une bonne corrélation entre données et simulations (150 000 cycles d'apprentissage).

3.3.2.4. SIMULATIONS POUR LA CARRIERE ALZO.

Pour ces simulations, trois paramètres vont évoluer :

La distance de transport.

Le nombre de tombereaux mis en route.

La fragmentation.

Rappelons que le flux de chargement étudié est un flux global incluant les temps de chargement, les temps de tri des blocs, les temps d'attente ... et qu'il ne faut donc pas comparer ces simulations à des résultats expérimentaux ne concernant que les temps de chargement du godet de la chargeuse.

La distance de transport: Les autres paramètres restant fixes, nous faisons varier la distance horizontale de transport de 100 à 2000 mètres. Le dénivelé étant lui proportionnel à la distance horizontale (30 m pour 500 m). L'organisation choisie est de trois tombereaux CAT 775 et un tombereau CAT 769. La fragmentation a été choisie égale à 44 % de passant à 100 mm. Le mois choisi est le mois de juillet.

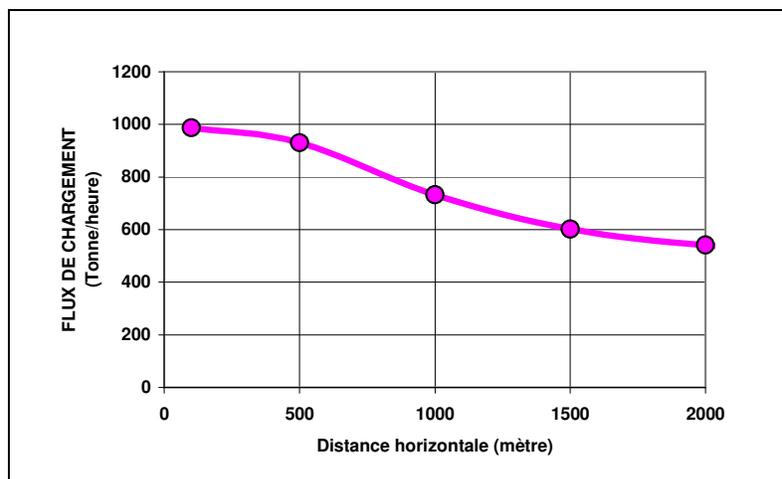


Figure 3.3.2.4.a.

La figure 3.3.2.4.a nous montre une variation des flux de chargement de 400 t/h entre 100 et 2000 mètres. On note aussi qu'au-dessous de 500 mètres le flux varie peu et de même au-dessus de 2000 mètres.

Si on se place maintenant dans un diagramme Flux - Coût, figure 3.3.2.4.b, on voit que les coûts varient du simple au double - 0,8 Euro/tonne à 1,6 Euro/tonne - ce qui montre bien l'importance d'un positionnement adéquat du concasseur primaire dans une carrière.

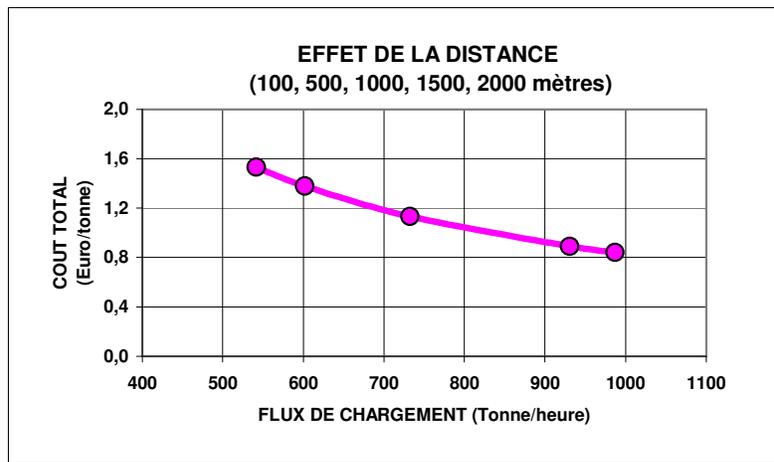


Figure 3.3.2.4.b.

L'organisation de l'échelon de transport: Trois distances de transport ont été choisies, 500, 1000 et 1500 mètres, avec un dénivelé proportionnel de 30 m pour 500 m. Le passant à 100 mm est choisi égal à 44 % et le mois est juillet. Les organisations sont les suivantes: 1, 2 ou 3 tombereaux CAT 775 sans tombereau CAT 769; 1, 2 ou 3 tombereaux CAT 775 et un tombereau CAT 769.

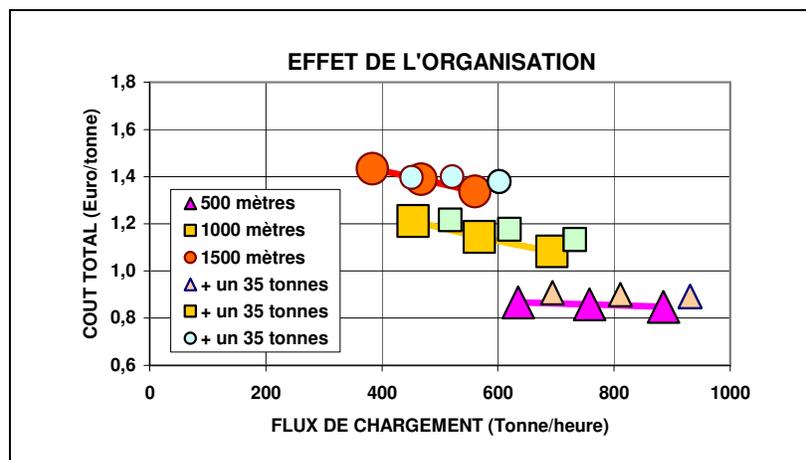


Figure 3.3.2.4.c.

La figure 3.3.2.4.c, diagramme Flux - Coût, nous montre que le flux de chargement n'est pas du tout proportionnel au nombre de camions mis en route. Par exemple, pour 1000 mètres on passe de 450 tonnes/heures à 700 tonnes/heure quand on passe de 1 à 3 tombereaux CAT 775, sans doute y a t'il saturation de l'engin de chargement. L'apport d'un CAT 769 supplémentaire est faible de l'ordre de 50 tonnes/heures. On voit également que la configuration 3 tombereaux CAT 775 + 1 tombereau CAT 769 génère un surcoût significatif avec un faible gain en terme de flux. Pour une distance de 500 mètres, l'augmentation du nombre de CAT 775 ne conduit pas à une diminution des coûts mais seulement à une augmentation des flux (d'où l'intérêt du diagramme Flux - Coût).

Dans presque tous les cas, il est toujours souhaitable de préférer une organisation uniquement avec des tombereaux de même type ce qui permet une augmentation des flux mais aussi une diminution des coûts.

La fragmentation: L'indicateur de fragmentation choisi est le pourcentage de passant à 100 mm. Sur les données disponibles celui ci varie de 25 à 60 % - au-delà de 50 % il s'agit de secteur de la carrière que l'on peut distinguer d'un point de vue géologique. Pour les simulations nous

ferons varier cet indicateur de 10 à 70 %. L'organisation est constante, 3 tombereaux CAT 775 + 1 tombereau CAT 769, les distances horizontales de 500, 1000 et 1500 mètres avec un dénivelé proportionnel (30 m pour 500 m).

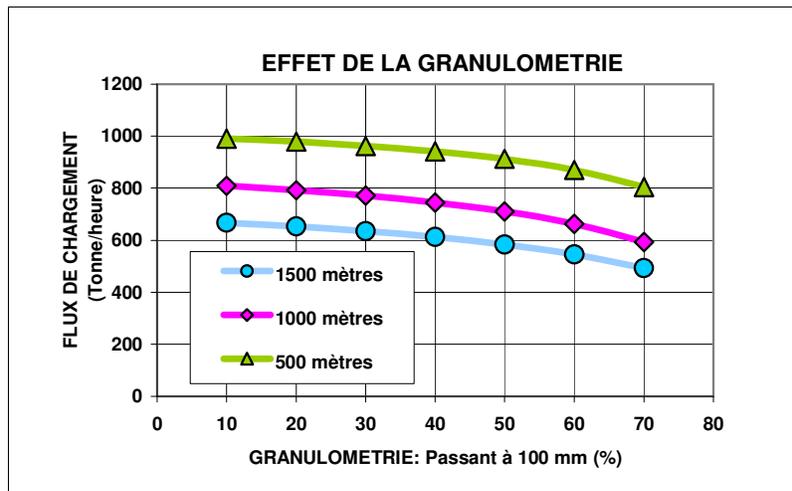


Figure 3.3.2.4.d.

Sur la figure 3.3.2.4.d, L'impact de la granulométrie est significatif et il ne peut s'agir d'un artefact. On trouve une amélioration des flux de 200 tonnes/heures pour une variation de 10 à 70 % du passant à 100 mm, ou plus de 100 tonnes/heure pour une variation de 20 à 50 % (variation réaliste au niveau de l'abattage à l'explosif).

L'influence de la granulométrie sur les flux est donc montrée. Toutefois on peut émettre une réserve à ce résultat si encourageant. Contrairement à Michaud (C.09) qui a choisi de calculer les flux à partir des masses transportées par cycle, nous avons fait le choix de travailler à partir des durées de cycle en supposant les masses transportées par camion constantes. Le flux étant un rapport entre masse et durée, si l'on suppose que la masse est constante alors une augmentation des flux passent par une diminution de la durée du cycle de transport. Si au contraire, on suppose la durée du cycle de transport comme constante alors une augmentation des flux passe par une augmentation des masses transportées.

Soit deux tombereaux identiques chargés pour l'un avec des blocs et pour l'autre avec un matériau plus hétérogène. Ils sont chargés d'un même volume de matériau. Pourtant le chargement de bloc aura une densité de 1,9 environ alors que le matériau hétérogène aura une densité de 2,05 environ. Si on prend comme hypothèse un volume identique de 27 m³ alors l'un transportera 51,3 tonnes alors que l'autre transportera 55,35 tonnes. On peut donc supposer que le tombereau ayant une charge inférieure ira plus vite et donc que la durée du cycle de transport sera plus courte.

En faisant deux hypothèses différentes on arrive à deux conclusions opposées. La densité du matériau est probablement corrélée avec les index granulométriques choisis et donc lorsque la courbe granulométrique est plus « étalée », la densité augmente, la masse transportée augmente et le tombereau ralentit. Au contraire lorsque le matériau est moins fragmenté, la courbe granulométrique est moins « étalée », la densité diminue, la masse transportée diminue et le tombereau accélère. L'opinion communément admise d'une amélioration des flux pour des matériaux plus fins doit donc être largement nuancée.

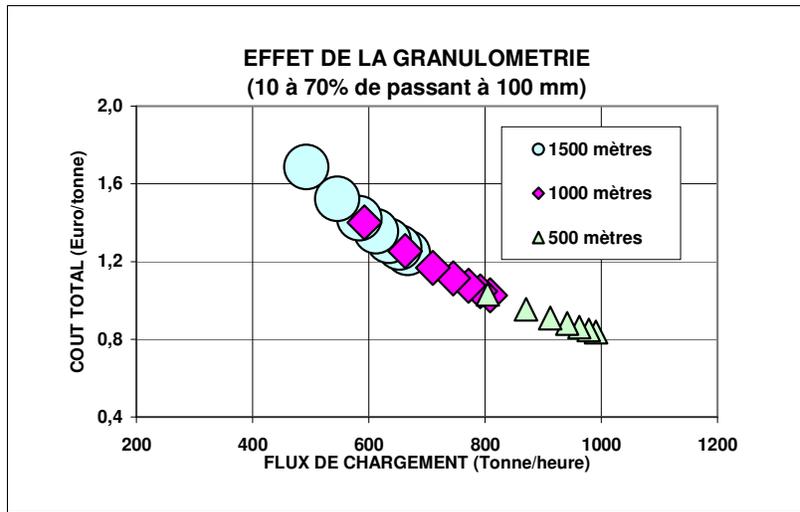


Figure 3.3.2.4.e.

Si on se place maintenant dans un diagramme Flux - Coût, figure 3.3.2.4.e, on peut donc voir des variations de coûts de l'ordre de 0,4 Euro/tonne pour des variations de granulométrie de 10 à 70 % et environ 0,2 Euro/tonne de 20 à 50 % ce qui est la plage de variation de granulométrie que l'on peut attendre du tir à l'explosif. Sans même parler de valeur ajoutée, on peut donc envisager des surcoûts de l'ordre de 0,2 Euro/tonne dans le minage qui seraient absorbés par une amélioration de la productivité du cycle Chargement + Transport + Concassage primaire.

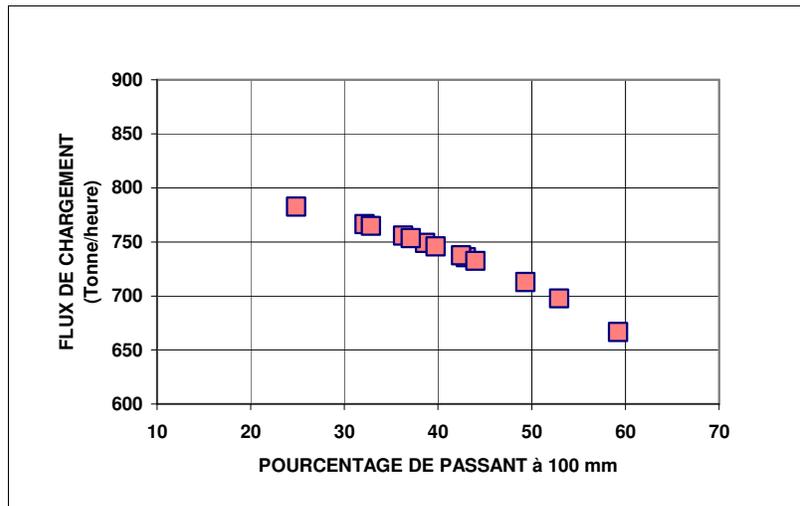


Figure 3.3.2.4.f.

Intéressons nous maintenant au cas des 13 tirs sélectionnés, figure 3.3.2.4.f, nous voyons donc que le flux de chargement est fortement corrélé avec la granulométrie (Distance de 1000 mètres, organisation 3 dumpers CAT 775 + un dumper CAT 769). De plus, figure 3.3.2.4.g, l'évolution de la valeur ajoutée est également positivement influencée par la granulométrie. D'où l'intérêt de l'amélioration de la granulométrie des tirs pour accroître les flux et diminuer les coûts de production.

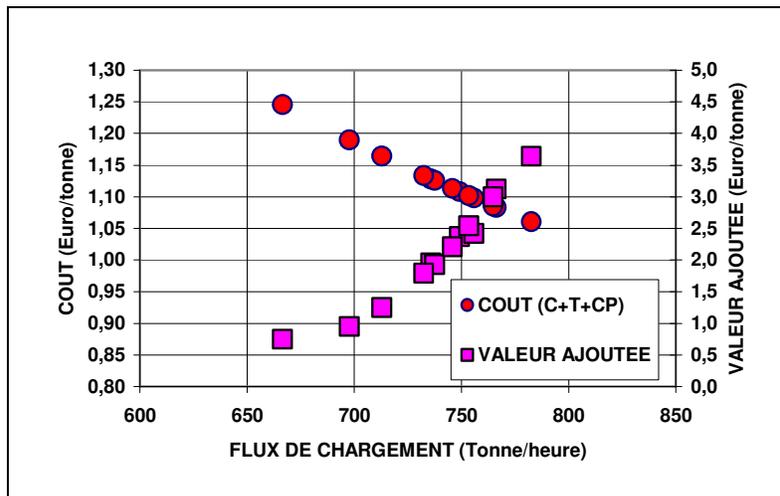


Figure 3.3.2.4.g.

3.3.3. CARRIERE DMD.

Les données disponibles pour cette étude ont été recueillies au cours de l'été 1999. Ce sont des données moyennées par tir et recueillies de manière exhaustive sur la période considérée. Le pointage des camions est un pointage manuel ce qui ne permet pas de travailler sur la durée d'un cycle de transport en particulier mais uniquement sur une moyenne par tir. 17 tirs ont pu être sélectionnés (24 hors concassage primaire).

Nous allons commencer par regarder les données brutes ce qui permettra de se fixer des ordres de grandeur, puis à l'aide d'un réseau de neurones nous tenterons d'extraire les points les plus significatifs contenus dans ces données.

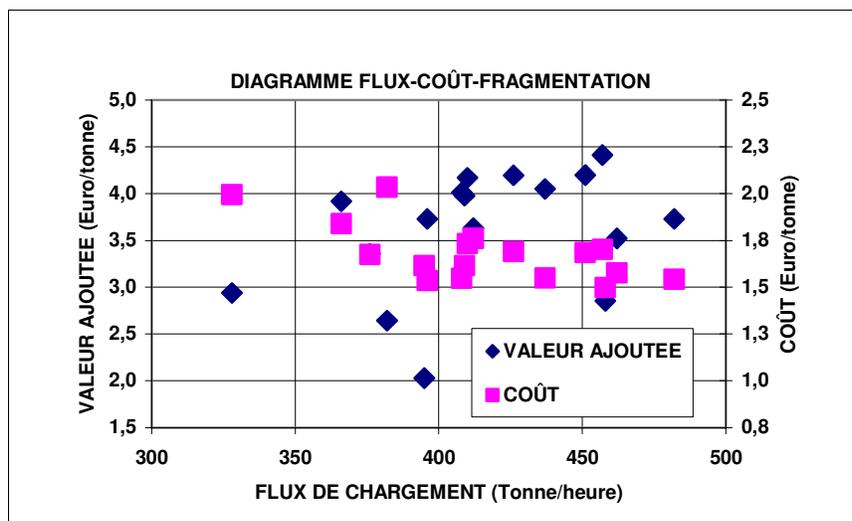


Figure 3.3.3.1.a.

3.3.3.1. LES DONNEES BRUTES.

Le diagramme Flux - Coût - Fragmentation, figure 3.3.3.1.a, nous indique une corrélation sensible entre coût total et flux de chargement par contre il n'y a pas de lien visible entre coût et valeur ajoutée.

Sur la figure 3.3.3.1.b, on note que les flux de transport (75 tonnes uniquement) sont en rapport avec la distance de transport. Par contre, figure 3.3.3.1.c, on ne remarque pas de lien entre flux de chargement et distance de transport.

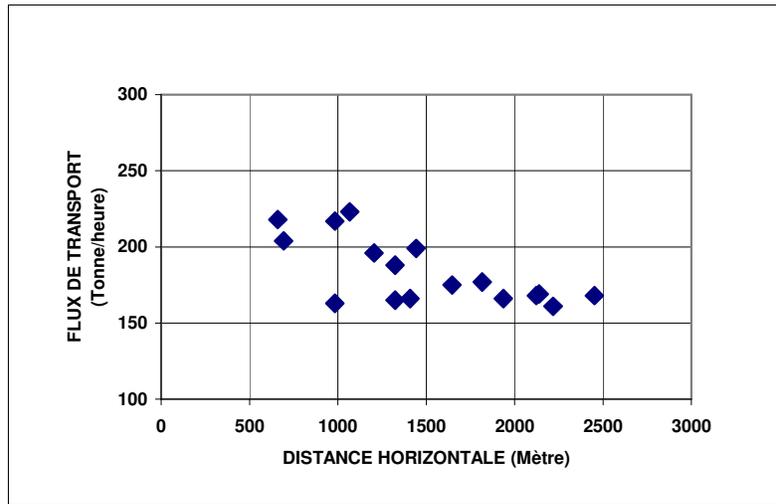


Figure 3.3.3.1.b.

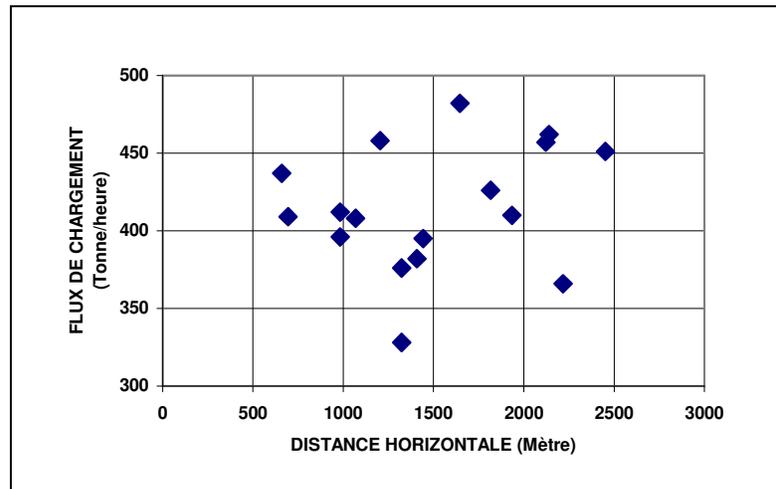


Figure 3.3.3.1.c.

Si on calcule le facteur d'organisation suivant, flux de chargement / flux de transport (Haulpack 75 tonnes uniquement) on note une volonté d'optimiser l'échelon de transport en fonction de la distance à parcourir, figure 3.3.3.1.d. Ceci explique en partie l'absence de corrélation entre parcours et flux de chargement.

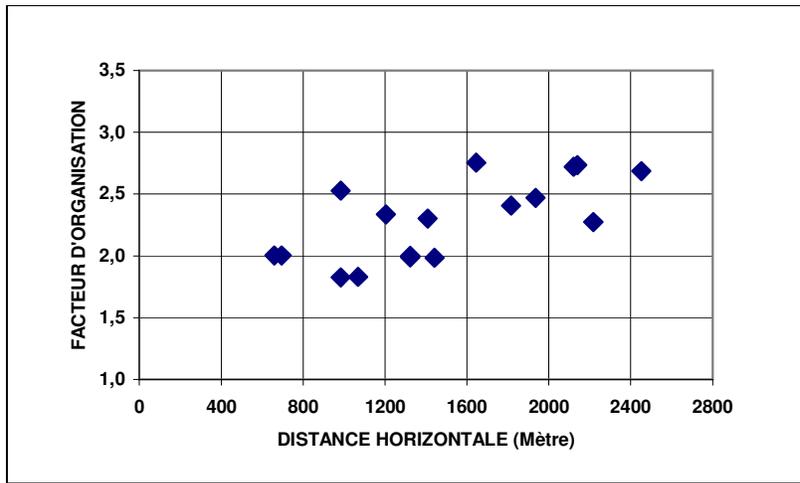


Figure 3.3.3.1.d.

On doit noter également la faible variabilité des flux de chargement qu'il faut sans doute attribuer aux capacités limitées de l'installation de concassage primaire qui ne peut guère aller au-delà. A noter également, figure 3.3.3.1.e, l'absence de corrélation entre coût de concassage primaire et fragmentation, représentée ici par le pourcentage de passant à 100 mm. On peut donc supposer une grande variabilité des caractéristiques mécaniques de la roche sur cette carrière.

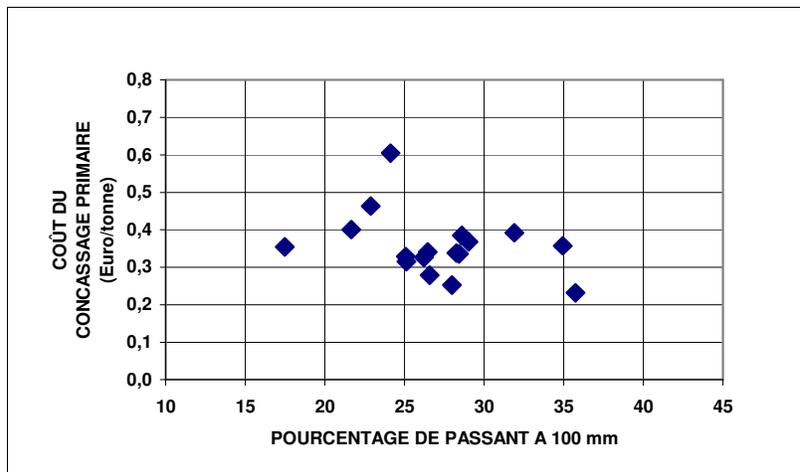


Figure 3.3.3.1.e.

Si l'on classe maintenant les tirs en fonction de la distance à parcourir, figure 3.3.3.1.f, on ne note pas de relation entre distance et coût total du cycle de Chargement + Transport + Concassage primaire. Les coûts totaux oscillent autour de 1,50 Euro/tonne.

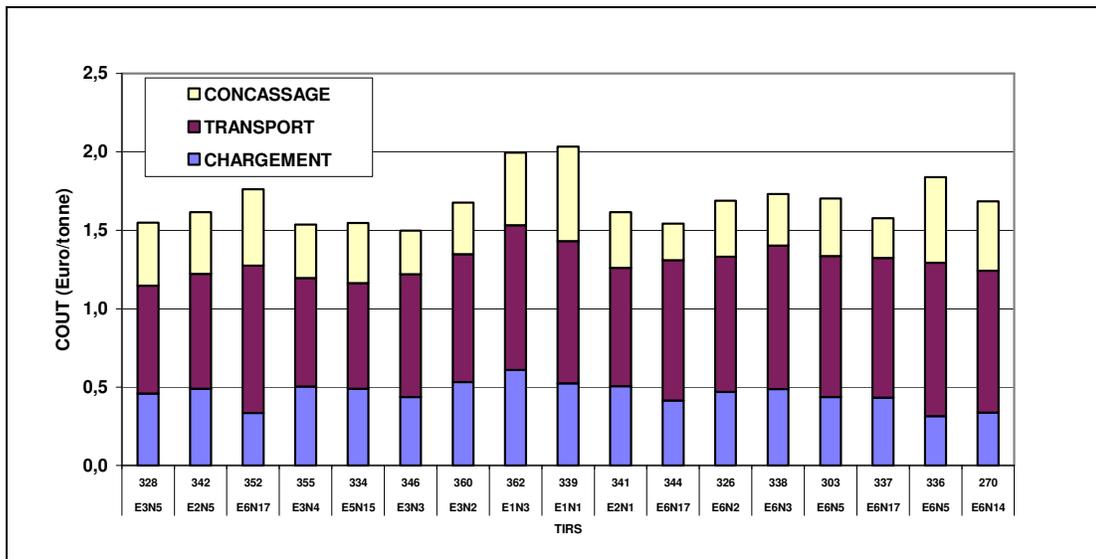


Figure 3.3.3.1.f.

3.3.3.2. LE RESEAU DE NEURONE POUR LA CARRIERE DMD.

L'information disponible pour la carrière DMD étant différente de celle de la carrière ALZO, le réseau de neurones est sensiblement différent. Les données sont calculées en moyenne sur un tir. Il n'y a qu'un seul tir (et une seule chargeuse) qui alimente le concasseur primaire en même temps. Les interférences potentielles liées à d'autres activités sur la carrière n'ont pas été recueillies. Les tombereaux utilisés sont des Haulpack de 75 tonnes, 50 tonnes et 35 tonnes.

Les paramètres d'entrées sont les suivants:

- La distance horizontale et le dénivelé entre le tir et le concasseur primaire.
- Le nombre de tombereaux Haulpack 75 tonnes.
- Le nombre de tombereaux Haulpack 50 tonnes.
- Le nombre de tombereaux Haulpack 35 tonnes
- La fragmentation: Pourcentage de passant à 100 mm.

L'ensemble des données ayant été recueilli en été, il n'y aura pas de facteur saisonnier.

Le paramètre de sortie est le flux de chargement.

Le réseau aura deux niveaux de neurones intermédiaires avec six et trois neurones.

Les résultats sont significatifs, figure 3.3.3.2.a, avec une bonne corrélation entre données et simulations (300 000 cycles d'apprentissage).

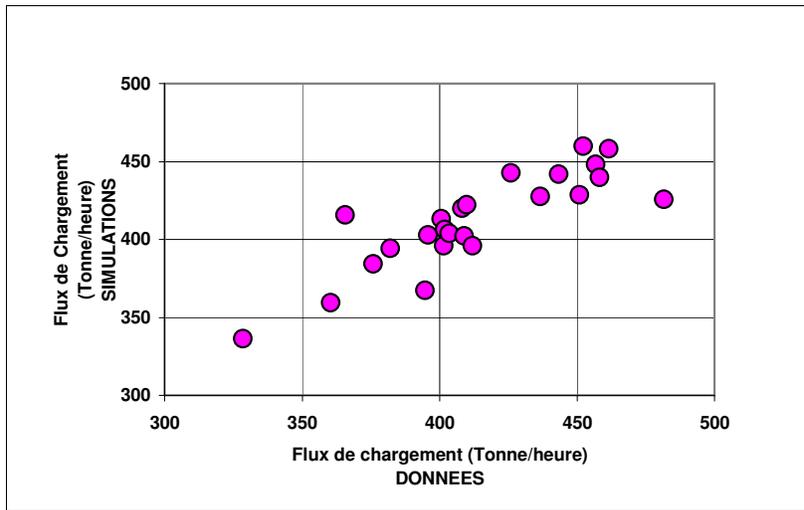


Figure 3.3.3.2.a.

3.3.3.3. SIMULATION POUR LA CARRIERE DMD.

Pour ces simulations, nous allons retenir un itinéraire courant sur la carrière et voir l'influence sur ce parcours de l'organisation de l'échelon de transport et de la granulométrie.

Rappelons que le flux de chargement étudié est un flux global incluant les temps de chargement, les temps de tri des blocs, les temps d'attente ... et qu'il ne faut donc pas comparer ces simulations à des résultats expérimentaux ne concernant que les temps de chargement du godet de la chargeuse.

La granulométrie: Deux valeurs extrêmes ont été choisies, 15 et 35 % de passant à 100 mm (après vérification de la linéarité de l'influence de la granulométrie) et l'on regarde la variabilité des flux de chargement sur le parcours choisi. On note, figure 3.3.3.3.a, une faible incidence de la fragmentation sur les flux quelles que soient les distances et les modes d'organisation de l'échelon de transport. L'amélioration des flux pour une granulométrie plus grossière est si ténue qu'il est plus sage de considérer que sur cette carrière, l'influence de la granulométrie sur les flux de chargement est nulle.

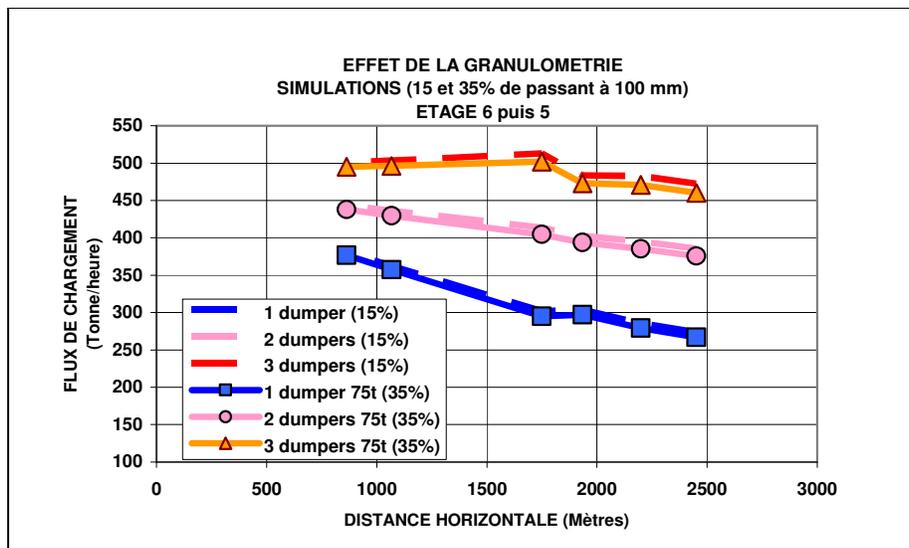


Figure 3.3.3.3.a.

Organisation de l'échelon de transport: Six configurations ont été retenues avec 1 à 3 tombereaux de 75 tonnes et 0 à 1 tombereau de 50 tonnes (les données concernant les

tombereaux de 35 tonnes étant trop peu nombreuses). La figure 3.3.3.3.b est un peu surprenante, en effet elle montre que l'ajout d'un tombereau de 50 tonnes sur un échelon de transport homogène n'améliore pas le flux de chargement. C'est à dire que le flux de chargement avec 1, 2 ou 3 dumpers de 75 tonnes est identique au flux de chargement avec un tombereau de 50 tonnes supplémentaire. L'impact de l'ajout d'un tombereau de 50 tonnes est donc strictement nul en terme de flux et bien sûr négatif en terme de coût. A mon avis, l'échelon de transport n'arrive pas à se cadencer lorsqu'il n'est pas homogène, les temps de chargement et déchargement du petit tombereau étant différent. La vitesse moindre de ce tombereau est peut être aussi à prendre en compte, celle-ci ralentissant la vitesse moyenne de l'échelon de transport où les dépassements sont impossibles.

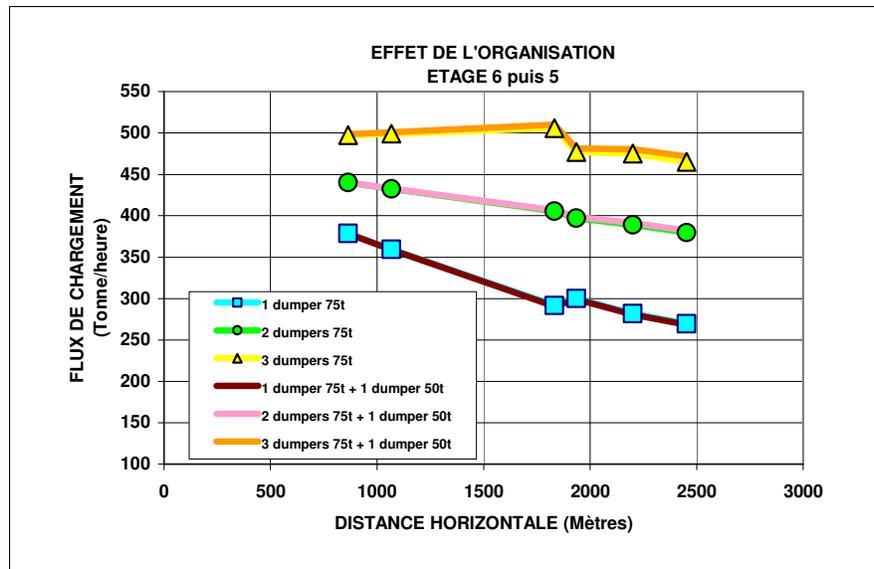


Figure 3.3.3.3.b.

Lorsque 3 tombereaux de 75 tonnes sont mis en route, on note que le flux de chargement est plafonné à 500 tonnes/heure ce qui est probablement la limite de capacité du concasseur primaire. Le petit raidillon qui marque le passage de l'étage 6 à l'étage 5, pour une configuration de 3 tombereaux, induit une baisse du flux de chargement significative de 25 tonnes/heure. Si l'on se place maintenant dans un diagramme flux coût pour ce même parcours, figure 3.3.3.3.c, on voit bien que l'influence du choix de l'échelon de transport sur les coûts est primordiale. Si l'on prend les valeurs extrêmes de coûts à même distance (environ 850 m), pour une amélioration de 125 Tonnes/heure ceci entraîne une augmentation de coût de presque 0,4 Euro/tonne.

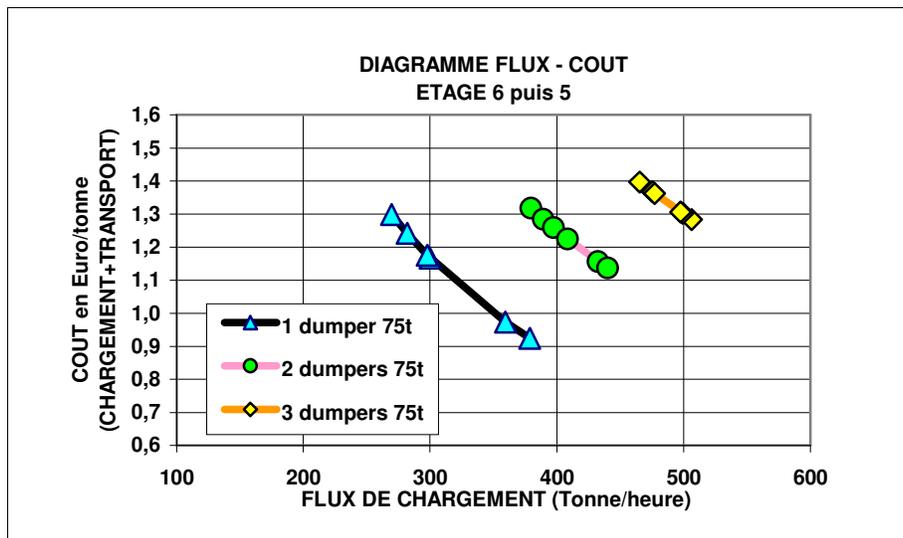


Figure 3.3.3.3.c.

Sur cette carrière où l'on travaille sur deux postes de chargement + transport et trois postes de concassage (alimentation de nuit par une chargeuse à partir d'un stock tampon) le plus important n'est pas nécessairement l'amélioration des coûts mais plutôt le maintien des flux à un niveau maximum. On fait le choix de saturer le concasseur primaire plutôt que le transport ou le chargement. Un changement de concasseur primaire n'est pas envisagé car l'ensemble de l'installation de traitement des matériaux est dimensionné pour ce flux maximum et l'investissement pour son remplacement est considéré comme trop important. Une autre voie d'amélioration des coûts de production est la réduction des distances de transport. Par exemple la position de la sortie de l'étage 6 implique le passage d'un raidillon et un trajet supplémentaire d'environ 1000 mètres ce qui aurait pu être évité par un meilleur positionnement de la sortie de l'étage 6. En dernier lieu on peut proposer à l'industriel la suppression des pauses à l'intérieur des postes, ce qui se traduit par une non-alimentation du concasseur primaire pendant plus de 30 minutes et un décadencement de l'échelon de transport, avec par exemple l'adoption d'un système de trois postes de 6 heures sans pause au lieu de deux postes de huit heures avec une pause.

3.4. BIBLIOGRAPHIE.

- C.01. Blanchier, Mai 1994. *Blocométrie et productivité du chargement.* Revue de l'Industrie Minérale « Mines et Carrières », pp 58-60.**
- C.02. Hustrulid, 1999. *The fragmentation system concept.* Blasting principles for open pit mining: General design concepts, Balkema, pp 24-61.**
- C.03. Kanchibotla., 2001. *Optimum blasting? Is it minimum cost per broken rock or maximum value per broken rock?* Proceedings of Explo Conference on Blasting, Australian Institute of Mining and Metallurgy : Hunter Valley, pp 35-40.**
- C.04. Nielsen, Kristiansen, 1996. *Blasting-crushing-grinding: Optimisation of an integrated comminution system.* Proceeding of the 5th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Balkema : Montréal, pp 269-277.**
- C.05. Hagan, 1983. *The influence of controllable blast parameters on fragmentation and mining costs.* Proceeding of the 1st International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Balkema : Lulea, pp 31-51.**
- C.06. Peck, Hendricks, 1995. *Total Minig System: An intelligent management, production control and planning facility.* Proceeding of the 4th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, Balkema : Calgary, pp 611-618.**
- C.07. Kumar, 1995. *Study and analysis of problems and disturbances caused by oversize boulders in a mine production system: a case study.* Proceeding of the 4th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, Balkema : Calgary, pp 121-125.**
- C.08. Moodley, Cunningham, Lourens, 1996. *Measuring the effect of blasting fragmentation on hard rock quarrying operations.* Proceeding of the 5th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Balkema : Montréal, pp 353-360.**
- C.09. Michaud, Blanchet, 1996. *Establishing a quantitative relation between post blast fragmentation and mine productivity: a case study.* Proceeding of the 5th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Balkema : Montréal, pp 389-396.**
- C.10. Jodouin, 1994. *Les réseaux neurométiques.* Hermès.**
- C.11. Freeman, Skapura, 1992. *Neural Networks: Algorithms, applications and programming techniques.* Editions Addison-Wesley,**

4. 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:

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

D₅₀ diamètre correspondant à 50% de passant.

A variant de 7 à 13 suivant la roche.

Q la charge en équivalent TNT (en kg).

V le volume par trou (en m³)

C'est un peu court à mon avis pour caractériser la nature des roches (ou la traduire en équation). Kristiansen (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 notablement 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.

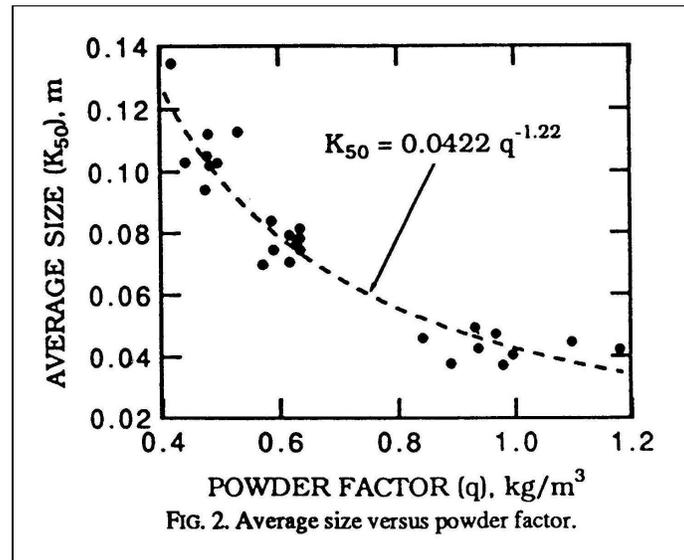


Figure 4.2.1.a.

En Kg/m³ 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 D₅₀ d'un tir. Il est évident pour tous qu'en augmentant la charge spécifique on diminue le D₅₀, 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.

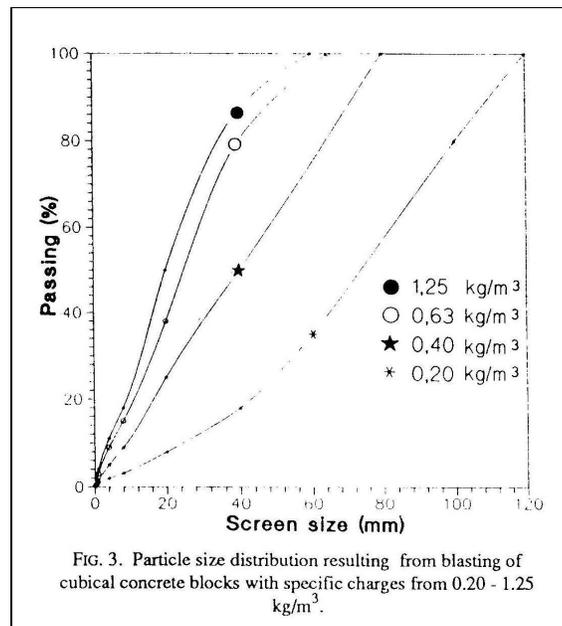


Figure 4.2.1.b.

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).

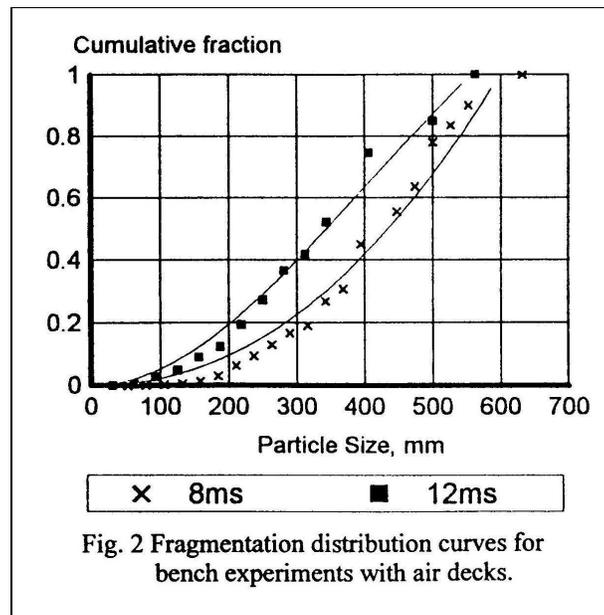


Figure 4.2.3.a.

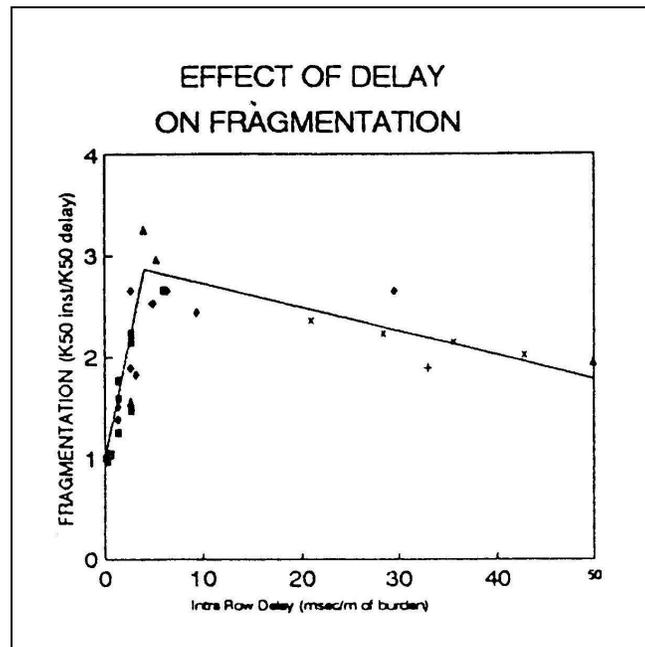


Figure 4.2.3.b.

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/m³, 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/M³ 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, μ .

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 μ 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 * $\{(V_f * \mu) - E / 3\} / (2 * E / 3)$.

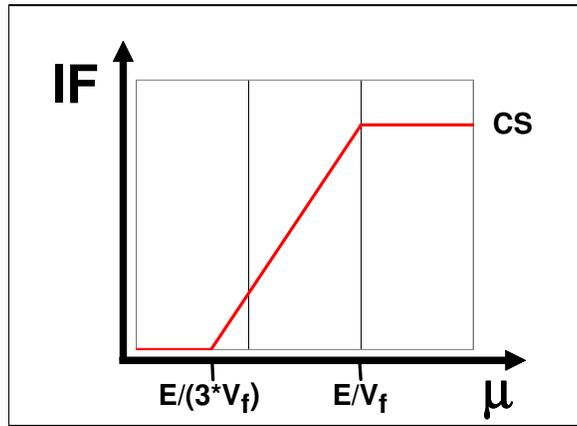


Figure 4.3.1.2.a.

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

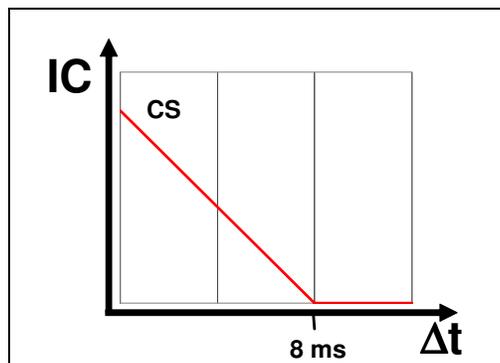


Figure 4.3.1.3.b.

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

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

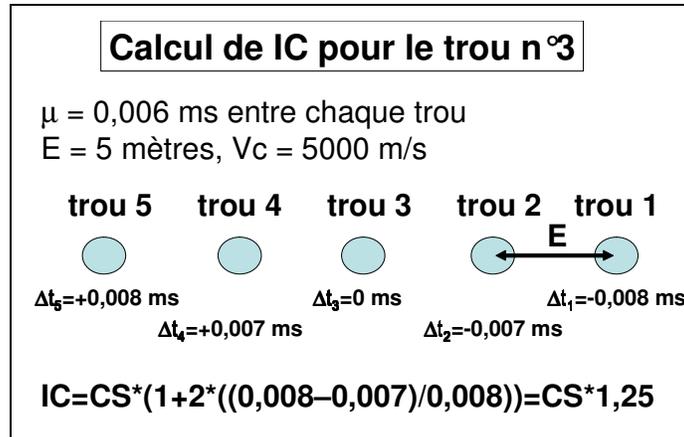


Figure 4.3.1.3.c.

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.

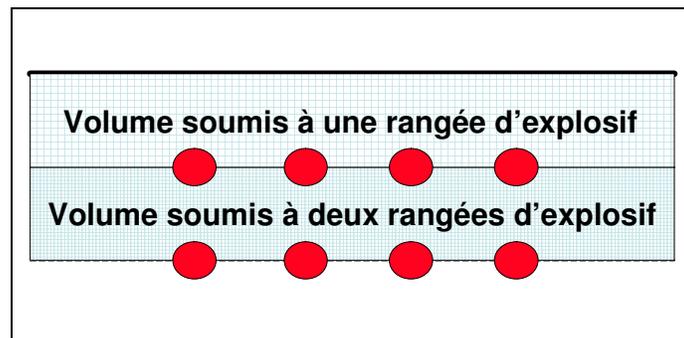


Figure 4.3.1.4.a.

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:

$$IR = (E * E) / (E * B) = E / B$$

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.

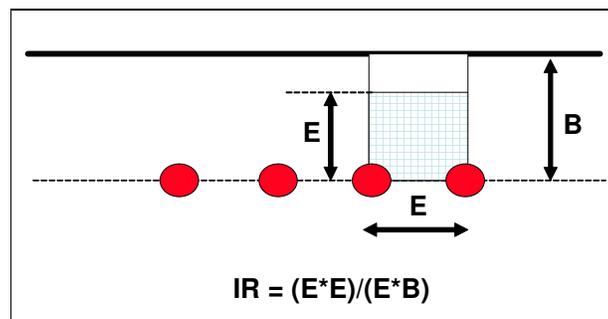


Figure 4.3.1.7.

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.

α angle formé par les deux vecteurs.

Pour la carrière DMD, il y aura deux index géologiques, IG₁ et IG₂.

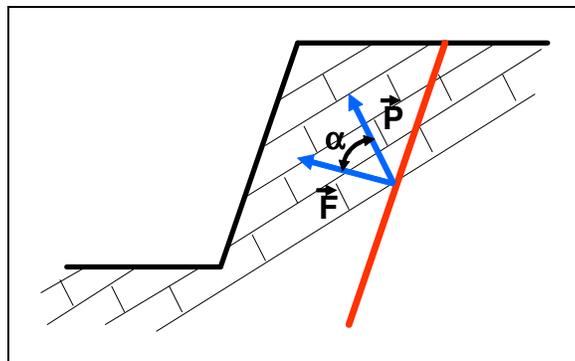


Figure 4.3.2.a.

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.

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

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

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

ϕ 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.

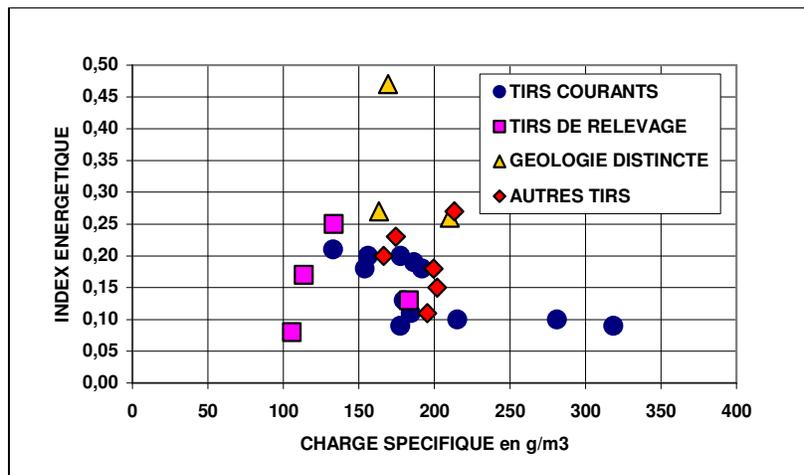


Figure 4.5.1.1.a.

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 μ on va pouvoir ajuster les paramètres α_{ij} et β_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.

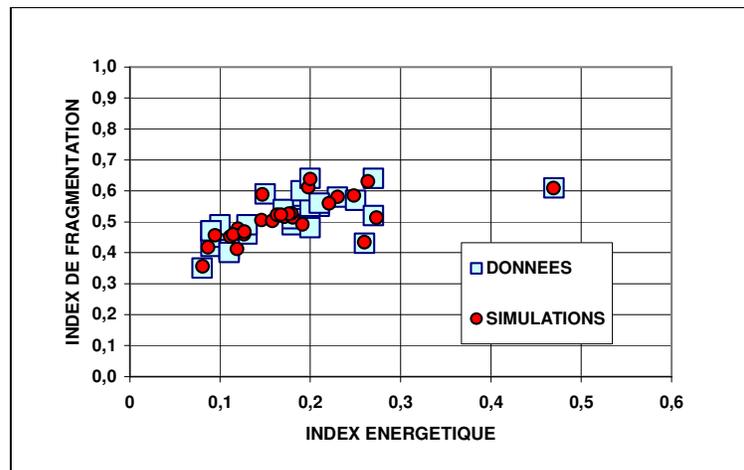


Figure 4.5.1.2.a.

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.

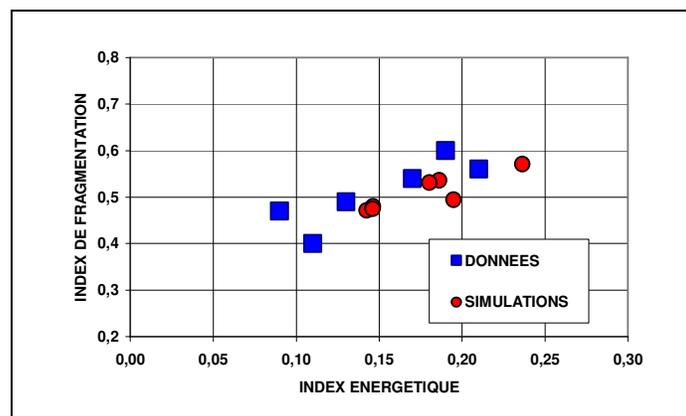


Figure 4.5.1.3.a.

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.

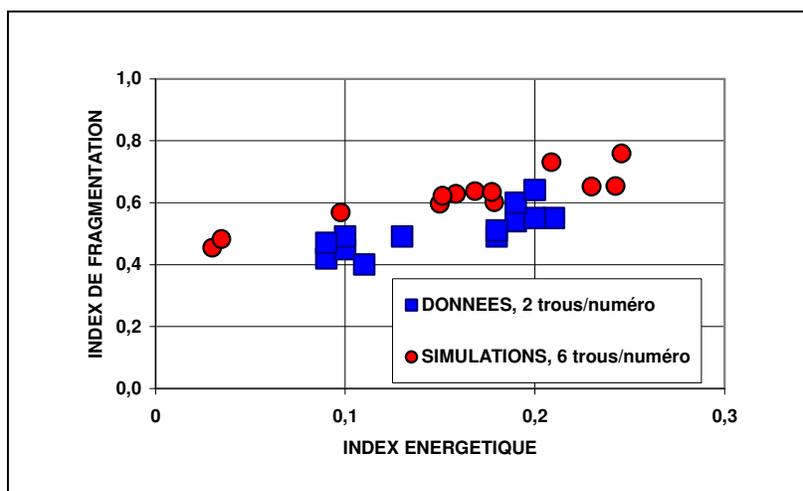


Figure 4.5.1.4.1.a.

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.

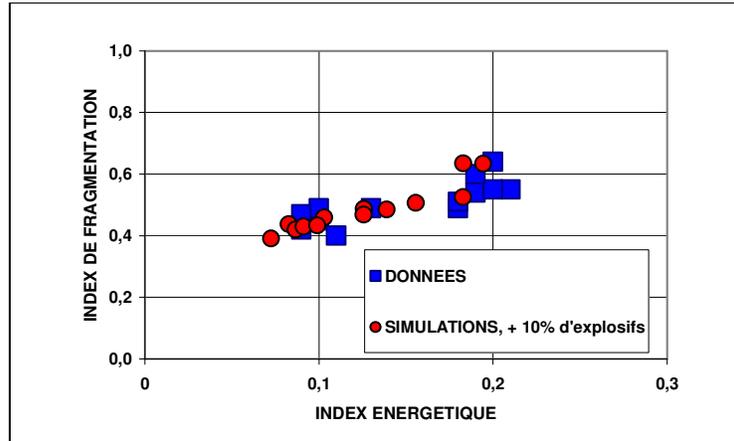


Figure 4.5.1.4.2.a.

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/m³. 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/m³. Au-delà il est probable que l'on retrouve un comportement plus classique de l'explosif (en deçà de 180g/m³ 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.

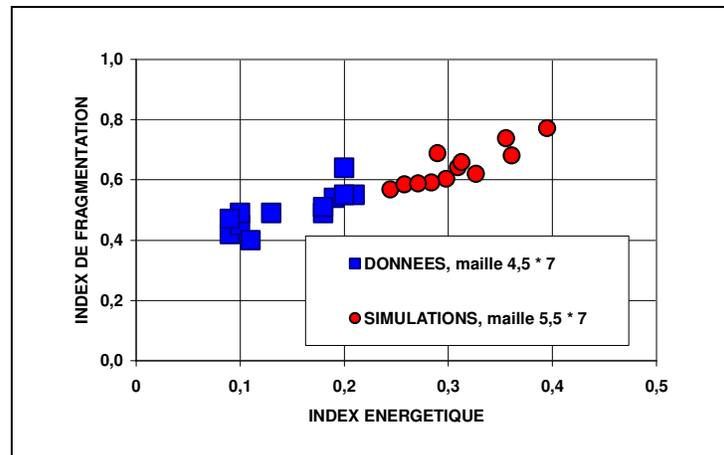


Figure 4.5.1.4.3.a.

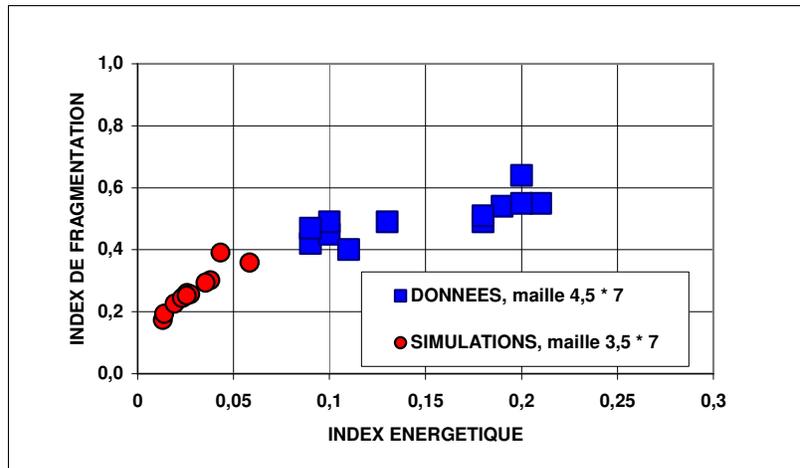


Figure 4.5.1.4.3.b.

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.

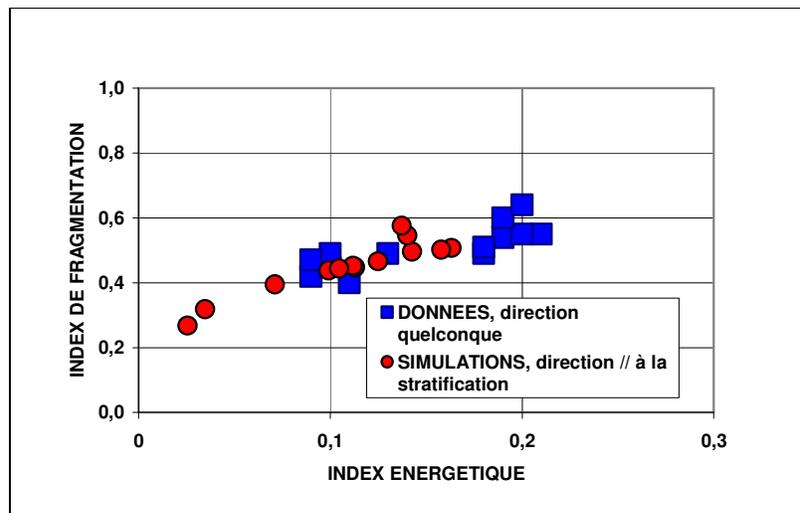


Figure 4.5.1.4.4.a.

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.

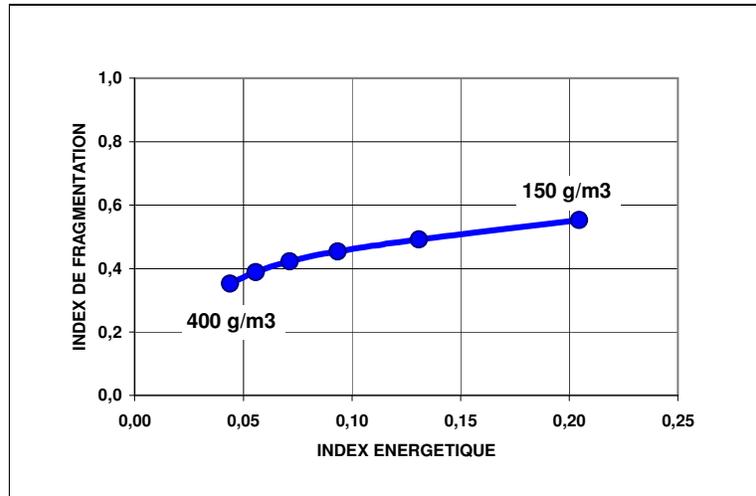


Figure 4.5.1.4.5.a.

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.

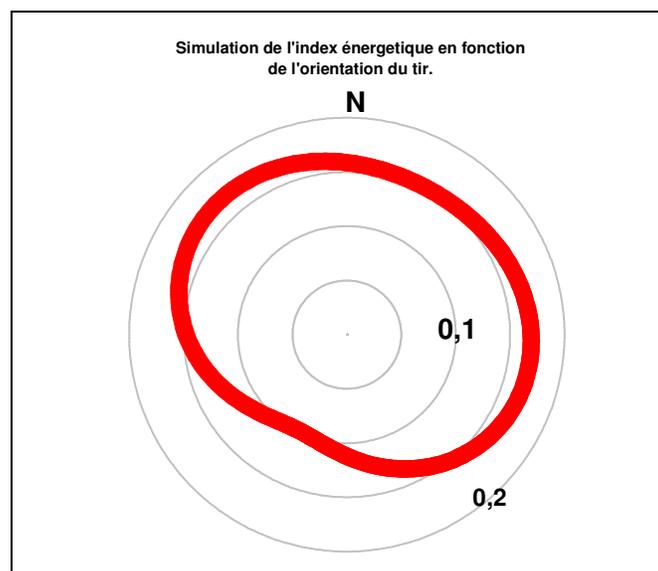


Figure 4.5.1.4.5.b.

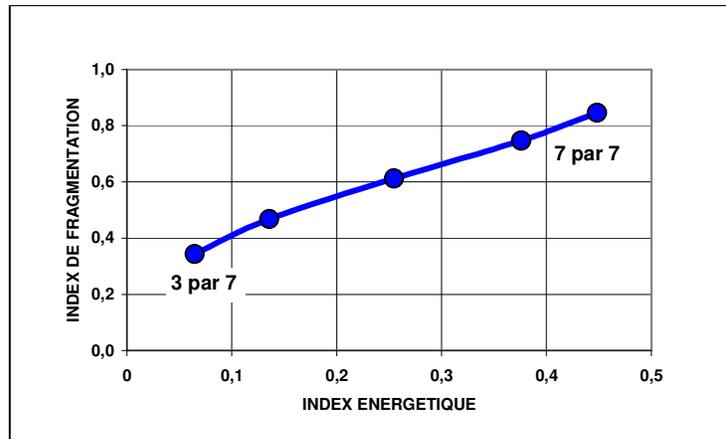


Figure 4.5.1.4.5.c.

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/m³.

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/m³ ; 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.

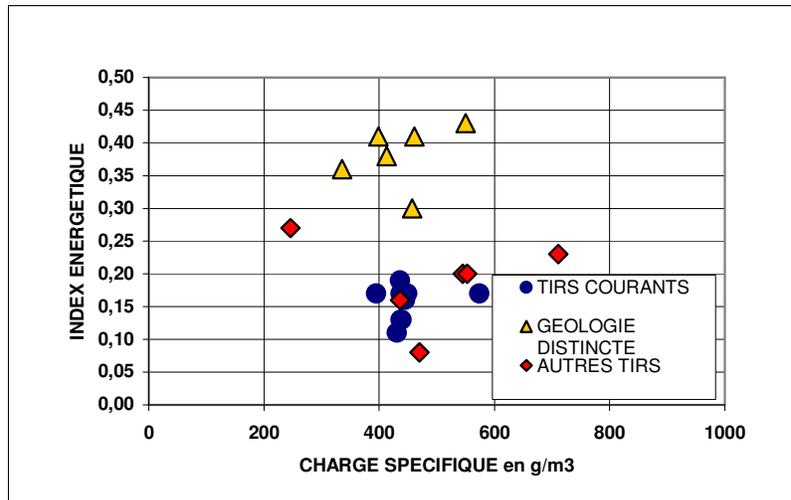


Figure 4.5.2.1.a.

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.

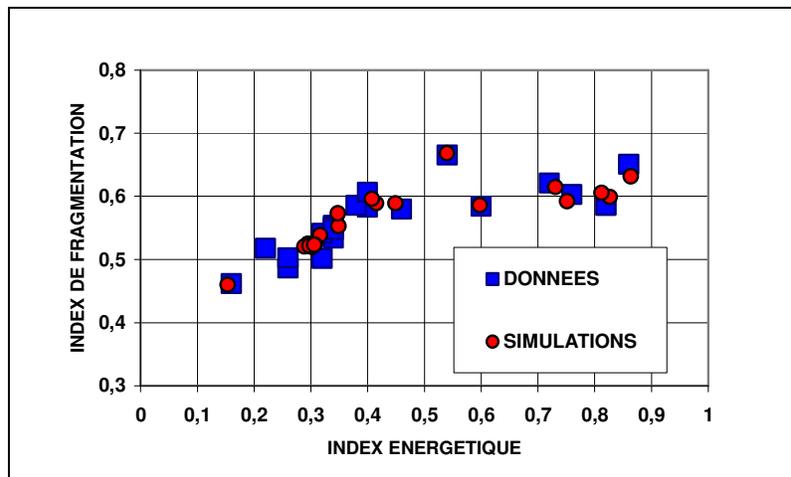


Figure 4.5.2.2.a.

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.

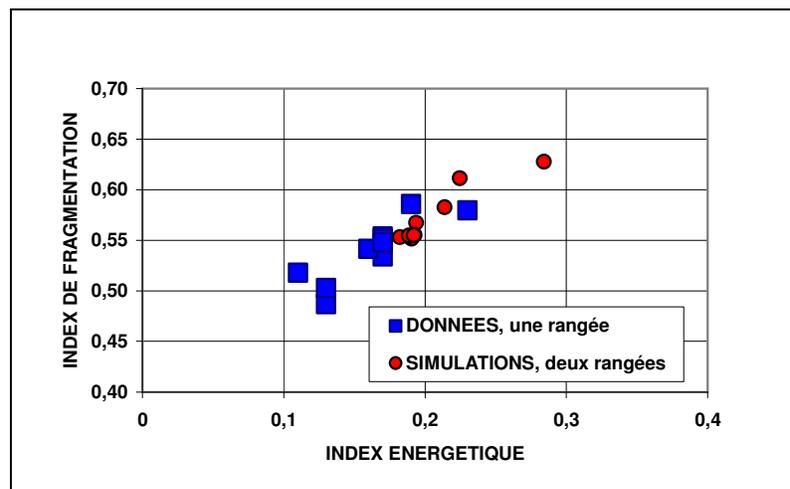


Figure 4.5.2.4.a.

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.

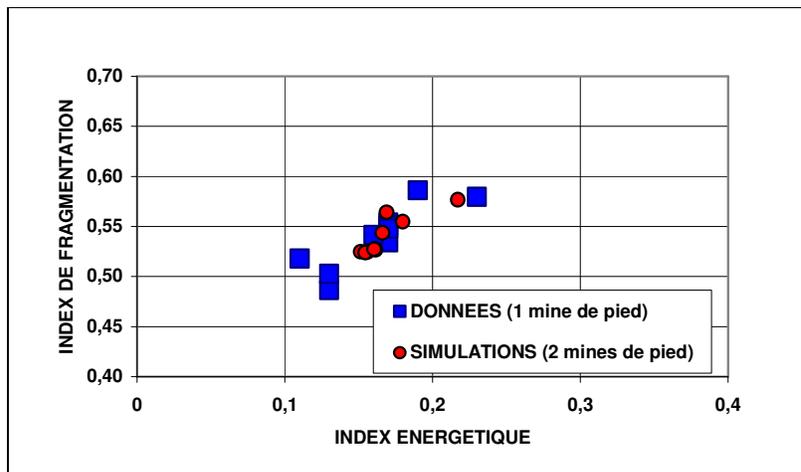


Figure 4.5.2.5.a.

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 ».

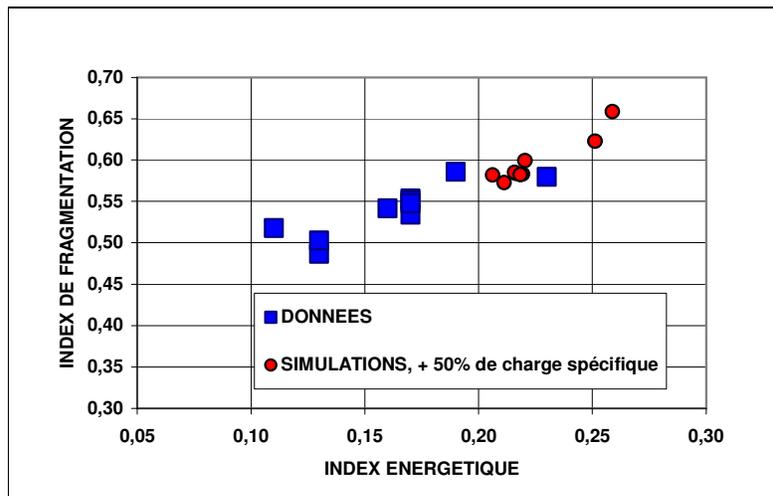


Figure 4.5.2.6.a.

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.

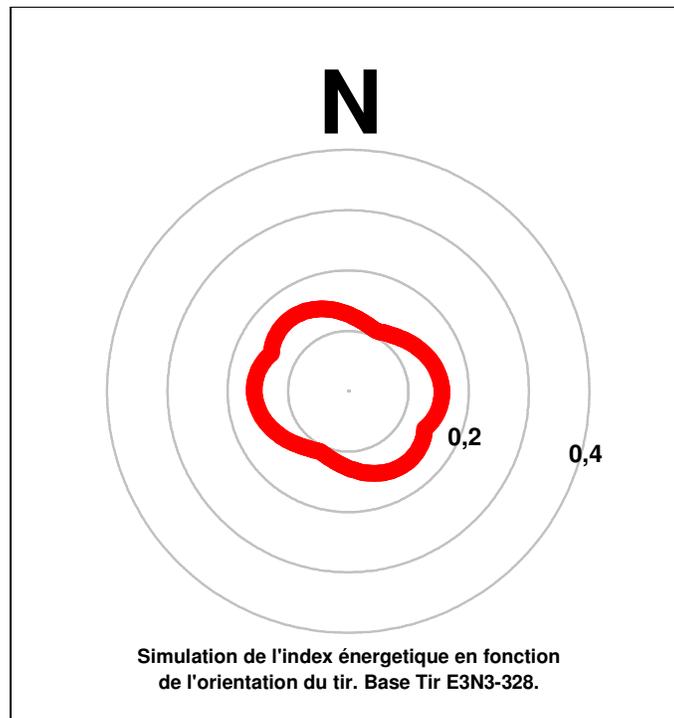


Figure 4.5.2.7.a.

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 .

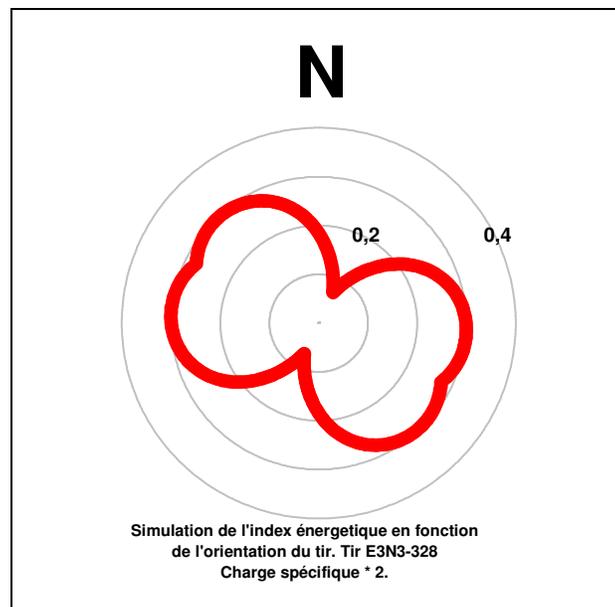


Figure 4.5.2.7.b.

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.

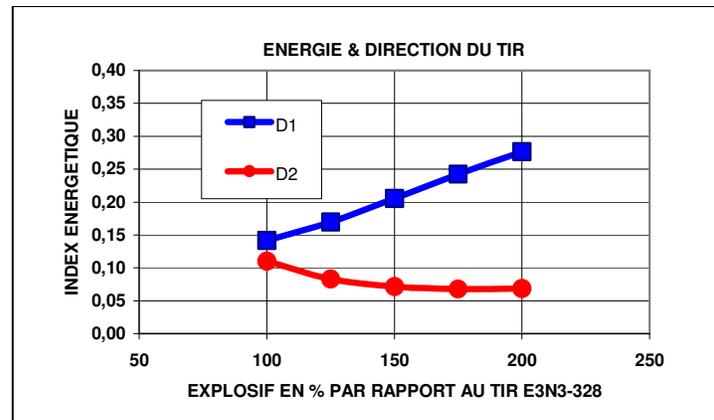


Figure 4.5.2.7.c.

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 1st 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 1st 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 1st 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 1st 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 1st 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 1st 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 1st World Conference on Explosives and Blasting Technique, Balkema : Munich, pp 171-178.

5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.

5.1. LA DEMARCHE.

Globalement la démarche adoptée dans ce travail a été de se servir de cas concrets, carrières ALZO et DMD, pour construire une méthode, généralisable à la plupart des carrières, d'évaluation des performances économiques et techniques en fonction de la granulométrie résultant des tirs d'abattage à l'explosif.

Ceci s'articule donc autour de trois pôles :

L'estimation de la granulométrie.

La mesure des flux.

Les paramètres de tir.

Les données collectées sur le terrain n'ont pas nécessité d'investissements particuliers pour les carriers hormis la mise en place d'une collecte en continu des mesures ordinairement réalisées par les capteurs de production :

Bascules dynamiques sur bandes transporteuses.

Capteur de mesure de niveau dans la trémie d'alimentation.

Capteur d'intensité du concasseur primaire.

Capteur de présence de camion dans l'aire de déchargement.

Le système Fragscan - Camion a été installé, en plus, sur les deux carrières pour permettre les mesures de granulométrie.

On voit donc qu'il n'y a pas, sur ce projet, de volonté de contraindre l'exploitation pour un suivi plus rigoureux des flux mais plutôt, une volonté de s'adapter à l'existant et d'en tirer parti au mieux.

A partir d'un traitement semi-automatique des données collectées sur le terrain, incluant un contrôle qualité, nous avons obtenu les flux, la granulométrie, les paramètres de tir et cela sur un mode tir par tir.

L'étape essentielle dans la mesure des flux étant la détermination de séquences de production, définies sur des plages de temps continues pour lesquelles l'unité de production et la configuration du travail ne varient pas.

L'estimation de la granulométrie résultant des tirs d'abattage à l'explosif à partir des images collectées par le système Fragscan - Camion a nécessité la mise au point d'un nouveau modèle. La distribution granulométrique résultant d'un tir est considérée comme la somme de plusieurs populations de fragments.

La proportion de fragments invisibles à cause de la ségrégation ou triés avant la prise de vue, étant calculée automatiquement à l'aide d'un paramètre de troncature.

Pour faire le lien entre granulométrie et flux et entre paramètres de tir et granulométrie, une méthode d'analyse par réseaux de neurones a été retenue. Ces « boîtes noires » calculent une « interpolation » des données à analyser et permettent d'évaluer l'influence de tel ou tel paramètre d'entrée sur les paramètres de sortie des réseaux de neurones. Avec ces réseaux de neurones, il est aussi possible de réaliser des simulations dont le but est d'aider les praticiens dans leurs choix techniques.

5.2. LES RESULTATS.

Les résultats obtenus concernent les carrières ALZO et DMD. Ces conclusions ne sont, par construction, pas généralisables à d'autres cas. En effet, l'analyse des données obtenues ne se fonde pas sur des modèles de comportement ou de fonctionnement théorique mais sur une analyse « statistique ».

Les « interpolations » réalisées mettent tout de même en évidence que le consensus généralement admis dans la bibliographie sur les relations entre paramètres de tir et granulométrie ou granulométrie et flux sur une carrière, peut être contredit sur des cas concrets isolés.

5.2.1. LA CARRIERE ALZO.

Les résultats concernant le tir d'abattage à l'explosif sur cette carrière sont les suivants :

La dissymétrie de la maille (espacement << banquette) semble être un facteur d'augmentation du D50, diamètre moyen.

Les granulométries obtenues pour les tirs de relevage sont proches de l'optimum, D50 élevé.

La direction de tir a une influence « prépondérante » sur le résultat du tir.

Lorsque la charge spécifique augmente, le D50 augmente.

Les trois premiers points sont assez classiques et l'on retrouve des conclusions identiques dans la bibliographie et en particulier dans les articles traitant des tirs à haut rendement de blocs (ou tirs de post - découpage). La forme de la maille influençant de manière très nette la proportion de blocs obtenue.

Le quatrième point est plus intéressant. Dans le plan de tir classique de la carrière ALZO, on peut trouver deux éléments qui pourraient expliquer ce comportement atypique :

La charge explosive est sur-confinée, et donc une augmentation de celle-ci réduit l'énergie effectivement transmise au massif.

L'espacement relativement faible et l'amorçage simultané de trous voisins font que ce mode de tir peut être qualifié de tir de post - découpage, ou tir à haut rendement de blocs, lorsque la charge spécifique est suffisante.

Les flux sur cette carrière semblent être significativement influencés par la granulométrie résultant du tir. Néanmoins la méthode d'investigation utilisée ne permet pas de déterminer avec certitude le point sur lequel cette influence est prépondérante :

Le temps de chargement et de tri des blocs.

Le temps de parcours, avec une charge transportée plus ou moins importante suivant la densité et la granulométrie du matériau.

Le temps de concassage.

Personnellement je pense tout de même que l'explication doit être trouvée dans les variations de densité du matériau.

En ce qui concerne l'organisation de cette carrière, on peut dire que l'on ne sature pas l'unité de concassage. Par contre, le flux de chargement est loin d'être proportionnel au nombre de camions mis en route : ce qui laisserait supposer qu'il y a parfois saturation de la chargeuse.

L'utilisation d'un tombereau dépareillé par rapport aux autres tombereaux ne semble pas ralentir l'échelon de transport. Par contre, le coût à la tonne transportée peut en être sensiblement augmenté.

5.2.2. LA CARRIERE DMD.

Les résultats du tir d'abattage à l'explosif sur cette carrière me laissent totalement dubitatif. Comme si il n'existait pas de lien entre conception et résultat du tir !

On pourra à mon avis rechercher une explication à cela dans le positionnement des trous de forage par rapport aux différentes diaclases ouvertes présentes. Leur rôle de réflecteur des ondes de choc mais aussi leur rôle dans le déconfinement des charges explosives sont probables.

Une meilleure répartition spatiale de l'énergie pourrait être un facteur de diminution du diamètre moyen, D50, ce qui est le souhait de l'exploitant. On pourra en particulier songer à réaliser des tirs multi-rangées dans la direction de tir la plus favorable avec une réduction de la hauteur des fronts et de la maille. Mais le résultat n'est pas garanti.

Sur cette carrière, les flux ne sont pas significativement influencés par la granulométrie résultant du tir. Ceci s'explique probablement par la saturation du concasseur primaire qui masque tout autre phénomène.

Pourtant sur le terrain, on peut voir que le chargement est rendu difficile par le nombre de blocs à trier. Mais ce travail est réalisé le plus souvent en temps masqué lorsqu'il n'y a pas de tombereau à charger.

En ce qui concerne l'organisation de l'échelon de transport, il faut noter l'influence négative d'un tombereau dépareillé, plus petit, qui ralentit significativement les autres tombereaux.

5.3. PERSPECTIVES.

Après nous être intéressé aux données fournies par le système Fragscan-Camion et, comme nous l'avons indiqué au chapitre 2, dans une plage restreinte sur l'axe des diamètres, il nous faut maintenant nous intéresser à des données exemptes de tout biais, qui nous permettront de jeter des bases plus solides aux idées qui ont été avancées lors de ce travail de thèse, chapitre 2.

Pour cela il est indispensable de disposer d'informations issues d'un travail de tamisage manuel, long et fastidieux, mais indiscutable quant à la précision des mesures de tamisage. Nous allons donc nous servir de deux sources de données issues des travaux de thèse de Gerhard Reichholf, MUL, et Roland Ortiz, CGES, l'ensemble des résultats expérimentaux ayant été collecté au sein de MUL.

Nous nous intéresserons d'abord à une série de tests qui ont consisté en la fragmentation de cubes de différentes roches de 200 mm de côté avec une charge spécifique approximativement constante. Puis nous reprendrons les expérimentations de Roland Ortiz (D.01) d'un point de vue granulométrique uniquement. Celles-ci consistent en la fragmentation à l'explosif de cylindre de béton, 235, 300 et 380 mm de diamètre, avec une charge explosive constante et donc une charge spécifique croissante avec la décroissance des diamètres des cylindres.

5.3.1. VERS UN MODELE GRANULOMETRIQUE MULTIMODALE.

Les échantillons sélectionnés sont extraits d'une campagne de mesure plus importante mais ceux-ci imagent clairement le propos qui va suivre. Quatre blocs de roches, un gypse, un calcaire (récifal), une dolomie, un grès, sont conditionnés de la manière suivante: façonnés pour

devenir des cubes de 200 mm de coté, percé en leur milieu d'un trou de 5 mm environ, celui-ci étant rempli de PETN, les blocs sont explosés, les fragments recueillis et tamisés par le jeu de tamis suivant: 100 μm , 250 μm , 500 μm , 1 mm, 5 mm, 10 mm, 14 mm, 20 mm, 31.5 mm, 40 mm, 50 mm, 63 mm, 80 mm, 100 mm, 125 mm.

C'est à partir de ces données brutes que notre travail commence. Il s'agit de procéder à la transformation d'un vecteur décrivant la fonction de répartition du passant en fonction du diamètre des tamis à une courbe (discrétisée) décrivant la densité en fonction du diamètre des fragments.

La méthode de dérivation décrite au chapitre 2 est utilisée, ce qui nous permet d'obtenir les courbes présentées en figures 5.3.1.a à 5.3.1.d pour les quatre roches choisies.

Le caractère multi-modal des différentes densités est évident.

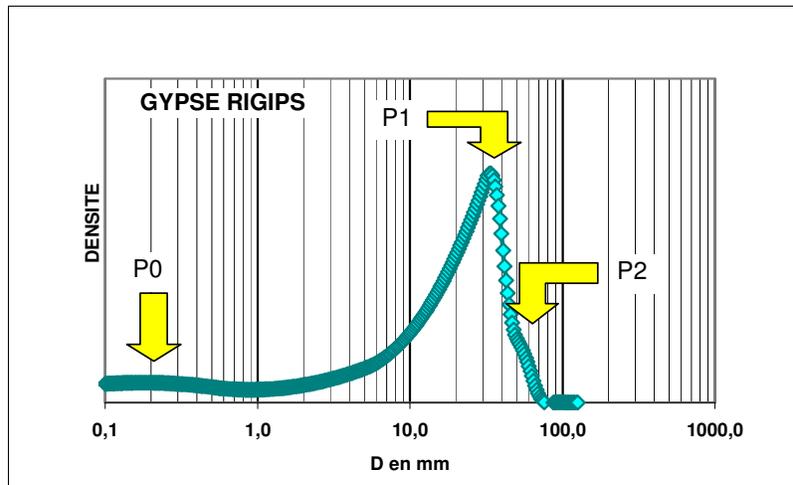


Figure 5.3.1.a.

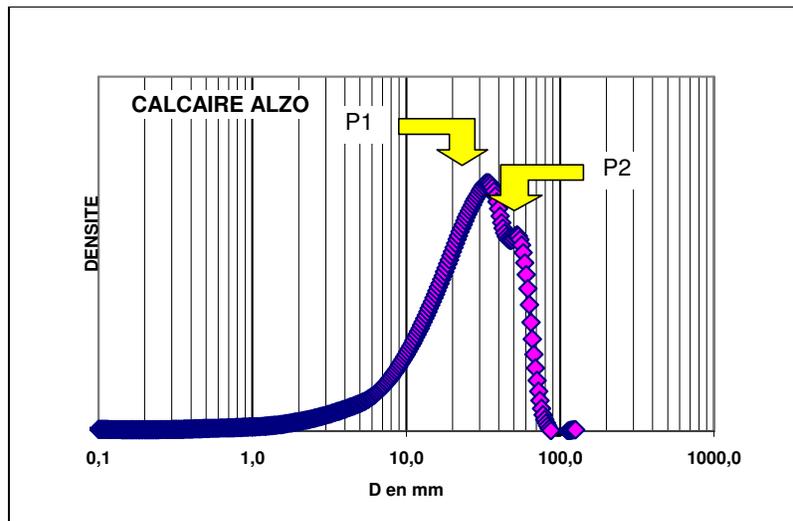


Figure 5.3.1.b.

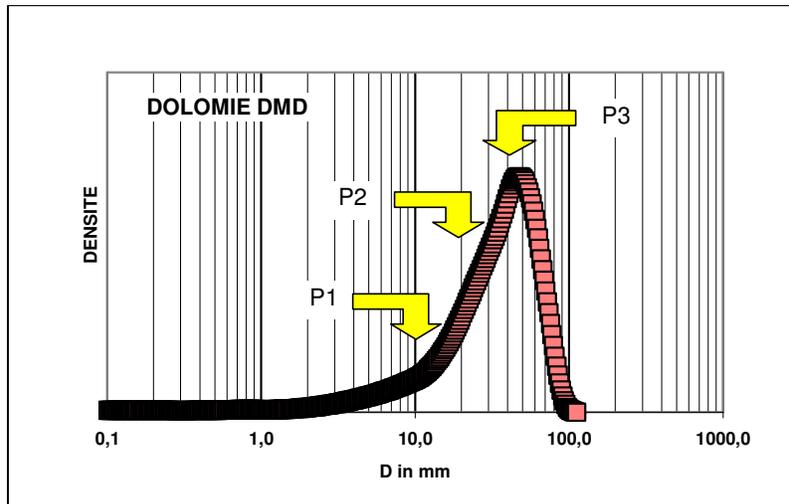


Figure 5.3.1.c.

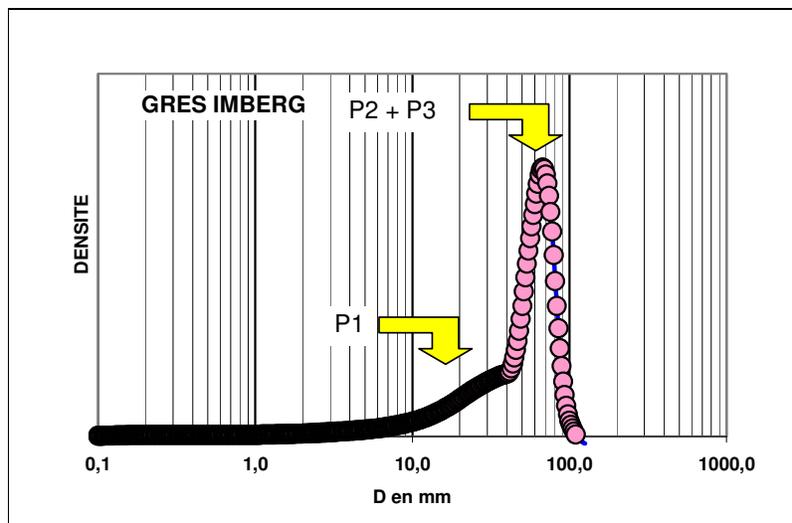


Figure 5.3.1.d.

A la lecture de ces figures, il apparaît clairement que la fragmentation à l'explosif conduit à la production de différentes populations de fragments qui ne peuvent s'expliquer que par la nature des roches et le mode de fragmentation.

Reprenons maintenant la bibliographie sur le sujet. Djordjevic (B.23) propose un modèle bi-modal utilisant les fonctions de Rosin-Rammler, pour expliquer un « renflement » de la courbe granulométrique dans le domaine des fines. On retrouve également ce type de courbe dans les travaux de Roland Ortiz (D.01). Passons maintenant à une référence plus ancienne, Charles (B.25) nous montre que chaque roche possède une « cohésion » différente ce qui se traduit par une pente constante de la fonction de répartition dans un diagramme Log-Log. Si on se replace dans le domaine des densités, on retrouve des fonctions ayant une allure de fonction Log-Normal inversé. La constance de la pente se traduisant alors par un « écart type » constant pour les fonctions Log-Normal inverses pour chaque type de roche.

La figure 5.3.1.e. (E.01), nous montre que la forme des courbes granulométriques est aussi influencée par le mode de rupture. Deux points de vue sont donc à considérer simultanément, la nature de la roche et la nature du concassage.

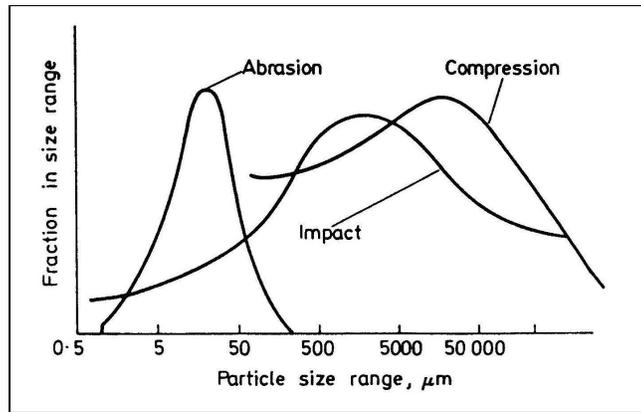


Figure 5.3.1.e.

5.3.2. UTILISATION DES CARACTERISTIQUES INTRINSEQUES DES ROCHES.

Nous allons maintenant nous intéresser au comportement d'une roche en fonction de la charge spécifique et pour cela reprenons les travaux de Roland Ortiz sur le béton (D.01). L'expérience consiste à la fragmentation à l'explosif (PETN) de trois cylindres de béton de diamètres 235, 300 et 380 mm.

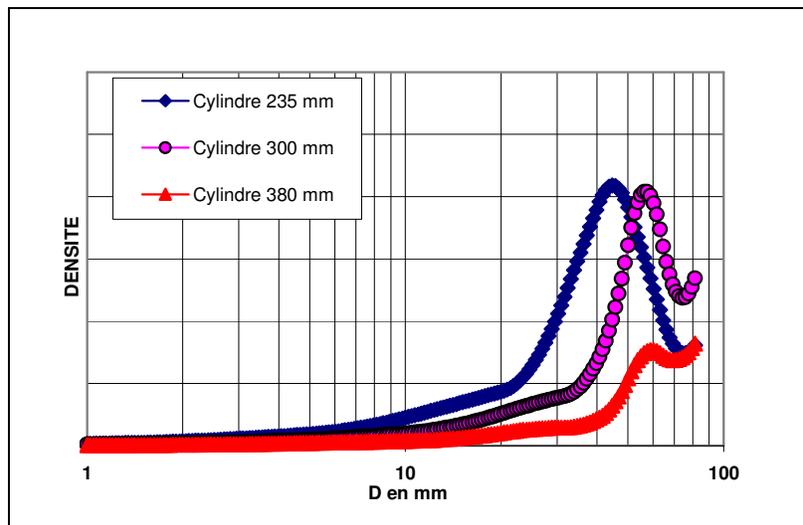


Figure 5.3.2.a.

L'explosif est mis en place dans le cylindre dans un tube de verre prévu avant le coulage du béton. La charge spécifique est décroissante en fonction du diamètre du cylindre. Les fragments recueillis sont tamisés avec les tamis suivants:

100 μm , 250 μm , 500 μm , 1 mm, 5 mm, 10 mm, 14 mm, 20 mm, 31.5 mm, 40 mm, 50 mm, 63 mm, 80 mm, 100 mm, 125 mm.

Utilisons la encore la méthode de dérivation des fonctions de répartitions proposée au chapitre 2, nous obtenons 3 densités, incomplètes pour les diamètres 300 et 380 mm, figure 5.3.2.a.

A l'examen des trois courbes, figure 5.3.2.a, on peut voir qu'un modèle tri-modal, P1, P2 et P3 est nécessaire pour modéliser ces trois densités, figure 5.3.2.b. Dans la bibliographie, la fonction P1 est toujours retrouvée avec un « écart type » constant pour un même matériau; donc nous devons le vérifier et construire un modèle compatible.

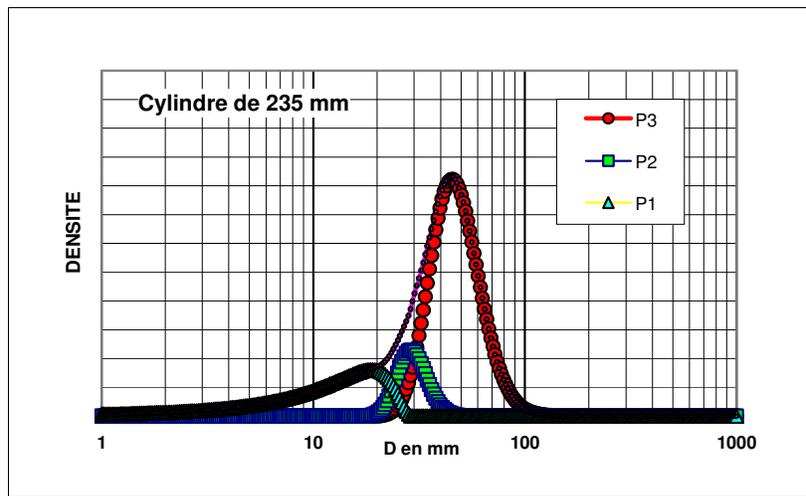


Figure 5.3.2.b.

La figure 5.3.2.c. montre qu'effectivement les densités P1 présentent un « écart type » constant, ce qui se traduit par une pente constante de la fonction de répartition dans un diagramme Log-Log. Ceci rejoint ce que l'on trouve dans la bibliographie.

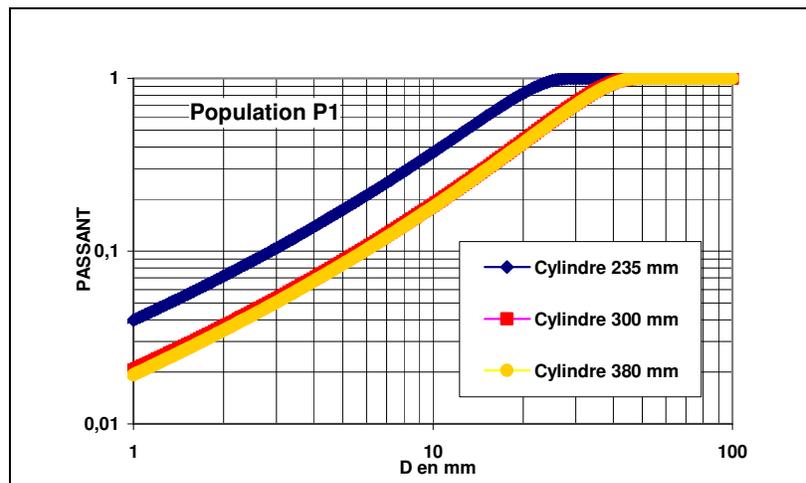


Figure 5.3.2.c.

Grâce à ces modèles, nous pouvons maintenant estimer l'énergie ayant engendré les populations P1. Nous pouvons supposer que la configuration du tir a une incidence sur la transformation de l'énergie explosive en variation d'énergie potentielle : la création de surface spécifique est assimilable à la diminution d'une énergie potentielle. Cet éclairage nouveau permettra, on peut le penser, d'affiner les modèles de fragmentation dynamique et de les replacer dans le contexte plus général de la fragmentation des roches.

5.3.3. PERSPECTIVES GENERALES.

L'examen de la courbe granulométrique d'un matériau ayant subi une fragmentation apporte des informations sur le processus de fragmentation et son efficacité. On peut mettre en relation les conditions de tir et le résultat granulométrique. Cette approche empirique et intuitive pourra être complétée par un travail théorique sur les énergies absorbées par les procédés de fragmentation. La notion d'énergie de cohésion d'un matériau pourra être développée. Ce travail est tout à fait essentiel, il concerne aussi bien la fragmentation à l'explosif que les autres modes de fragmentation des matériaux (concassage, broyage). Les enjeux sont à la mesure du gouffre

énergétique que sont les procédés de fragmentation. En décrivant mieux les processus de fragmentation, on pourra mieux appréhender les réglages des procédés.

La mesure de la productivité et l'évaluation des performances pour les opérations de chargement, transport et concassage primaire dans une carrière sont aussi un axe intéressant de recherche. L'importance des interférences liées à la distance de transport, à l'organisation avait un effet dissuasif pour entreprendre une démarche objective et quantitative. C'est une erreur car les méthodes d'analyses tel que les réseaux de neurones permettent de « s'affranchir » de tels obstacles. Ce sujet de recherche est aussi transposable au domaine de la logistique.

5.4. BIBLIOGRAPHIE.

E.01. Lowrison, 1974. *The size and shape of comminuted particules.* Crushing and grinding: The size reduction of solid materials, pp 67-99.

E.02. Tarasenko, 1996. *Controlling the patterns of fragmentation in blasting and mechanical crushing operations.* Rock Fragmentation by blasting, Proceedings of the Workshop on Measurement of Blast Fragmentation, Balkema : Montréal, pp 293-296.