

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.

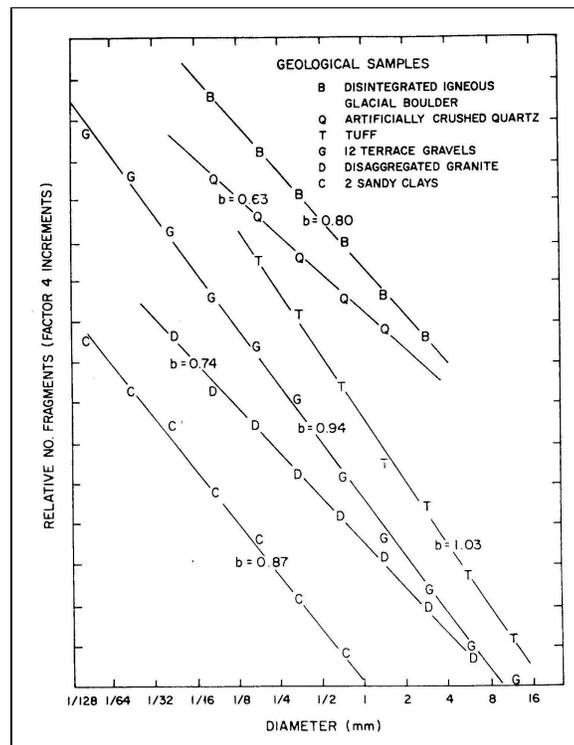


Figure 2.1.2.a.

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.

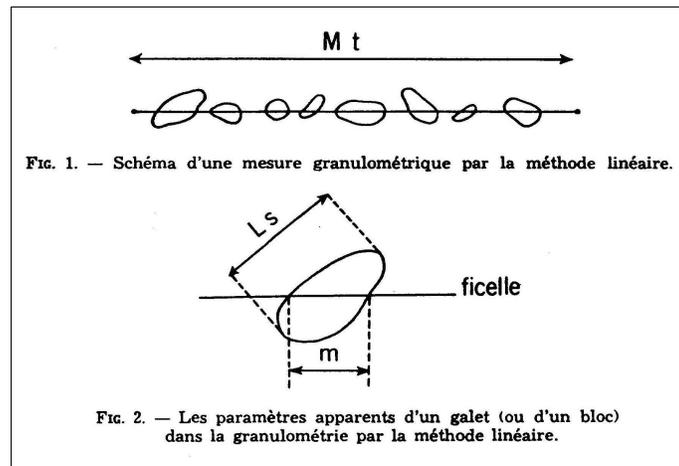


Figure 2.1.3.a.

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.

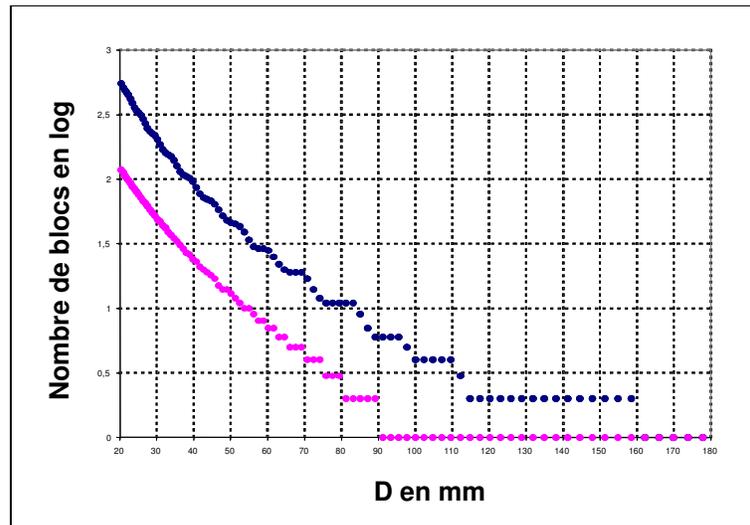


Figure 2.3.1.a.

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.

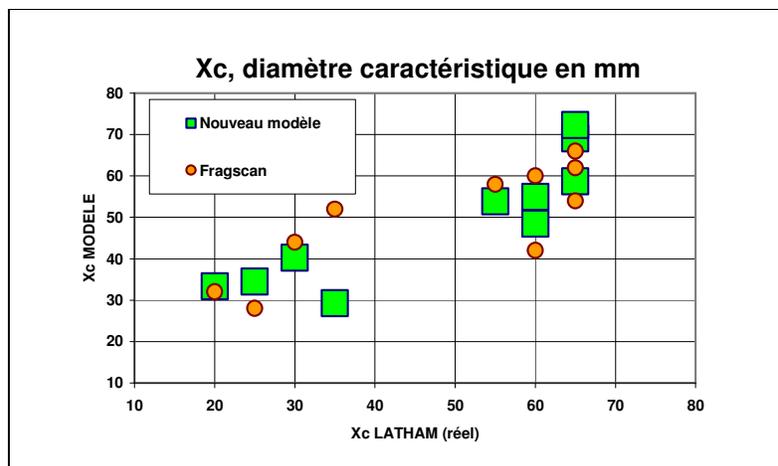


Figure 2.3.1.b.

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.

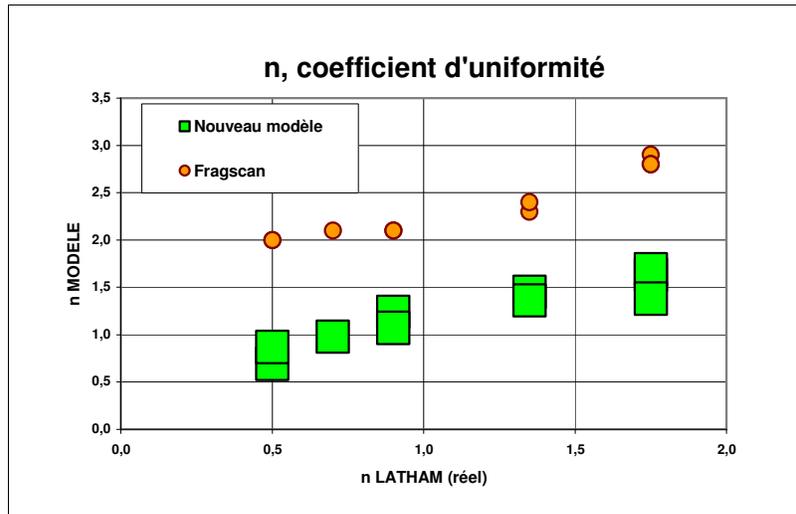


Figure 2.3.1.c.

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.

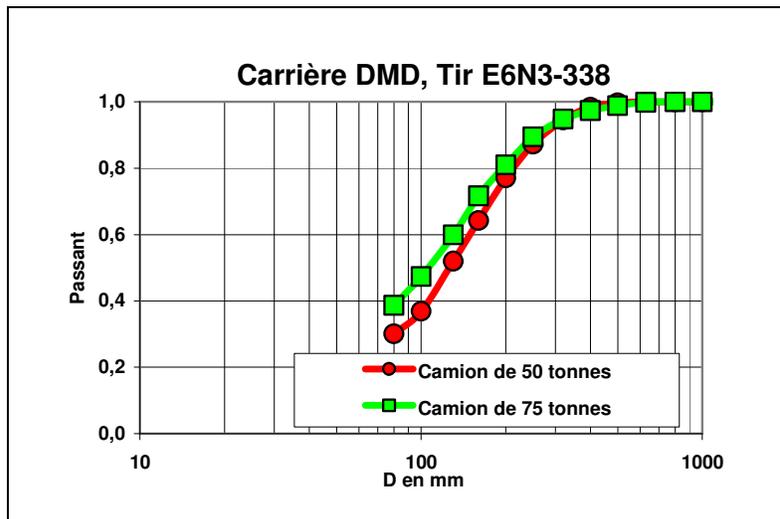


Figure 2.3.2.a.

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.

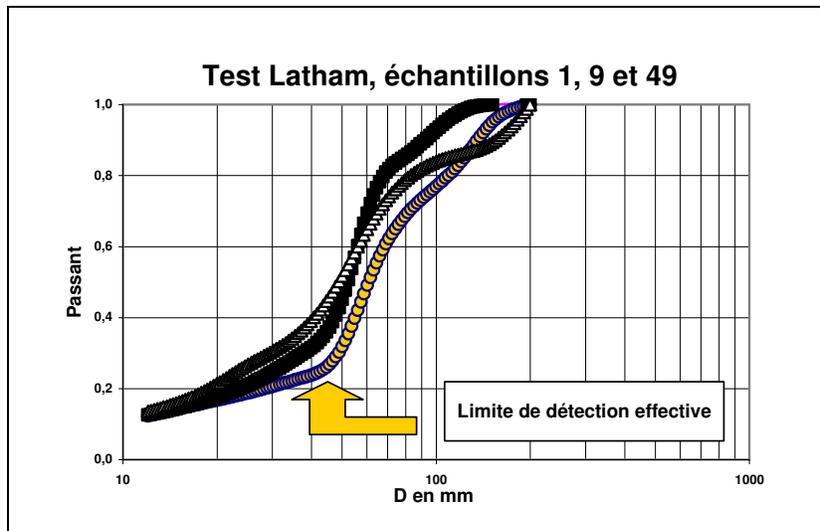


Figure 2.3.2.b.

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.

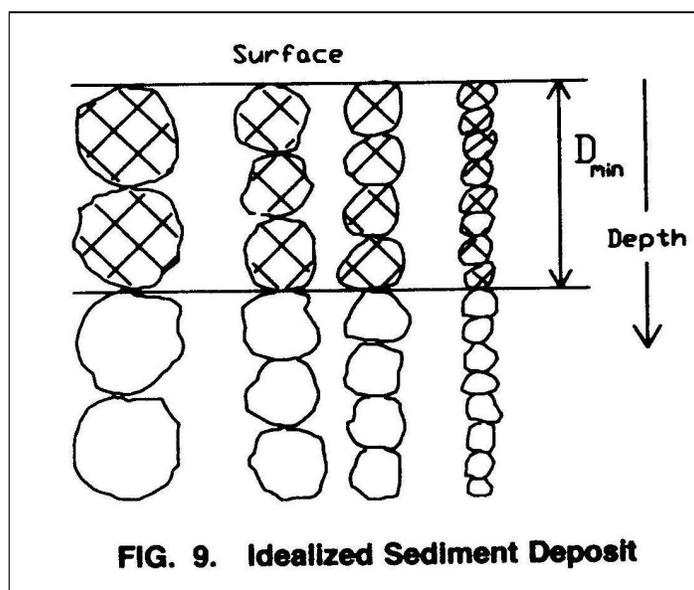


Figure 2.3.3.a.

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.

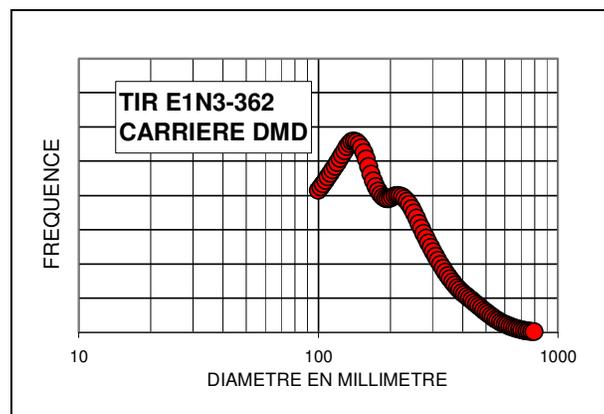


Figure 2.4.2.a.

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.

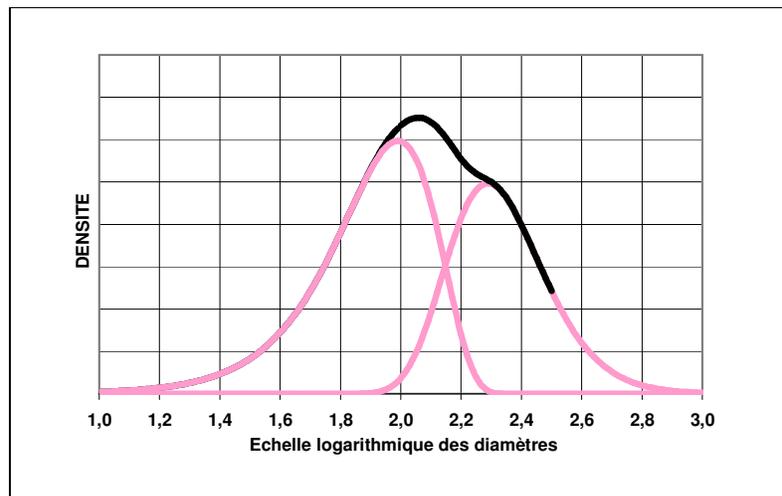


Figure 2.4.2.b.

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.

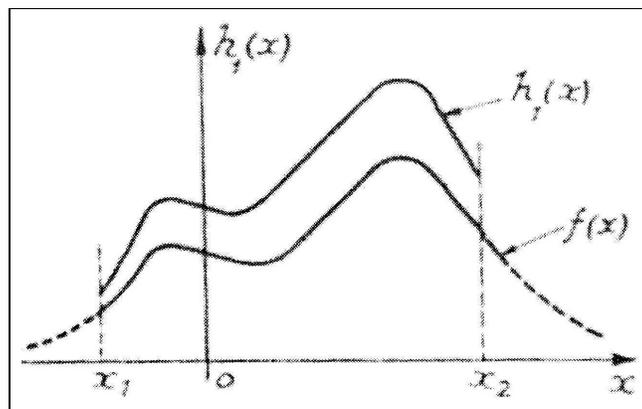


Figure 2.4.2.c.

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.

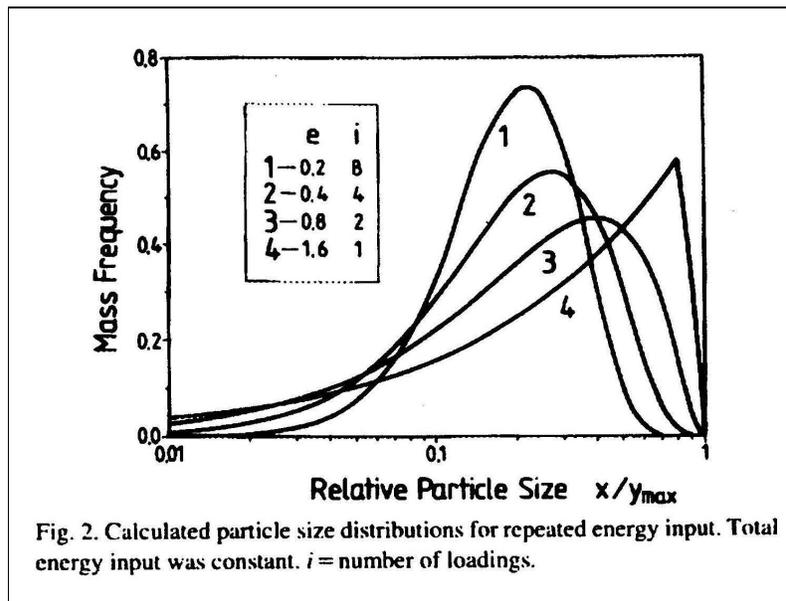


Figure 2.4.2.d.

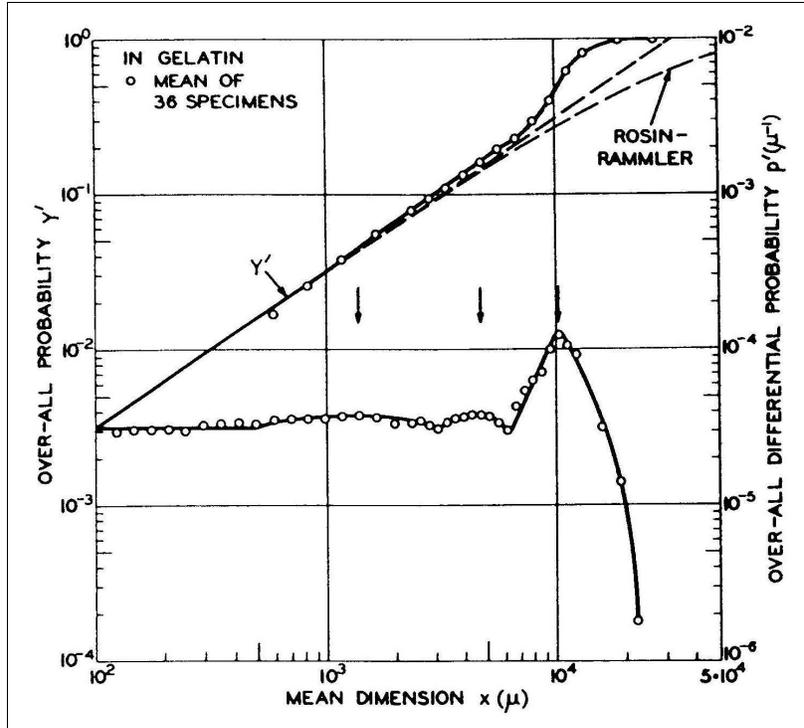


Figure 2.4.2.e.

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.

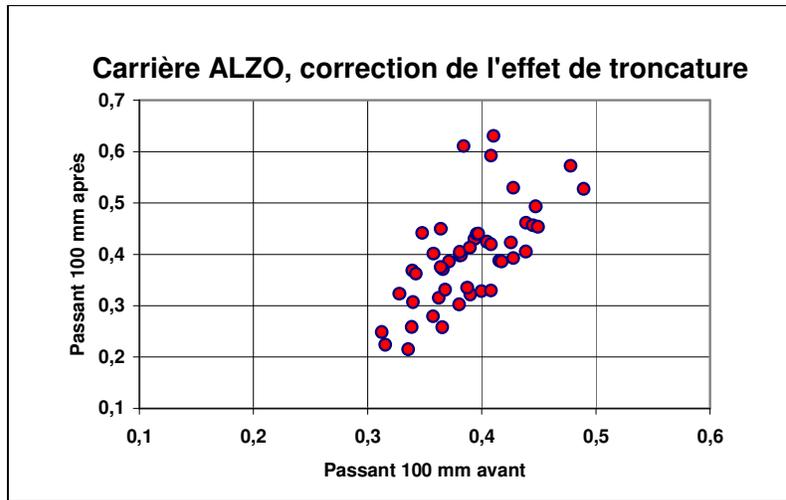


Figure 2.5.1.a.

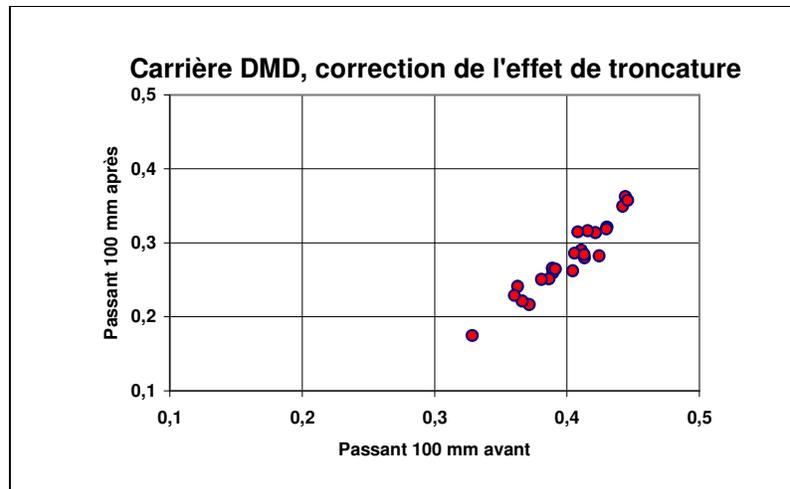


Figure 2.5.1.b.

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.

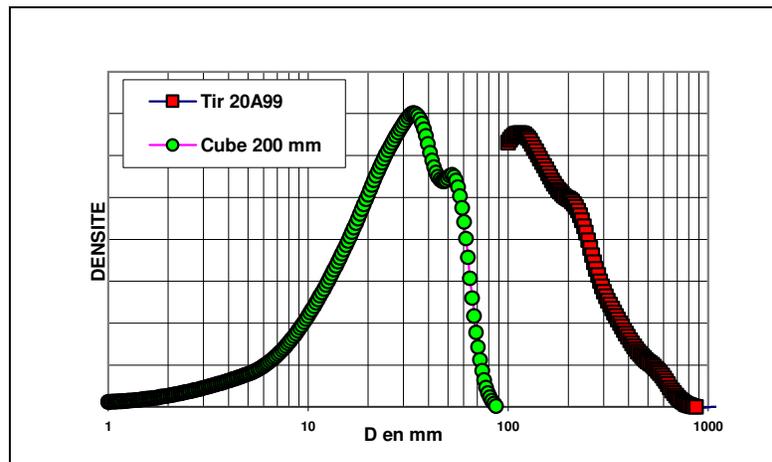


Figure 2.5.2.a.

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.

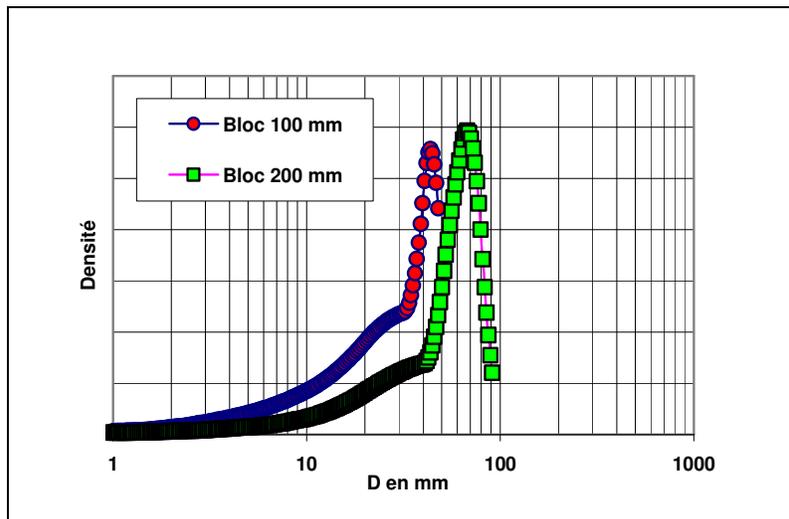


Figure 2.5.2.b.

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.

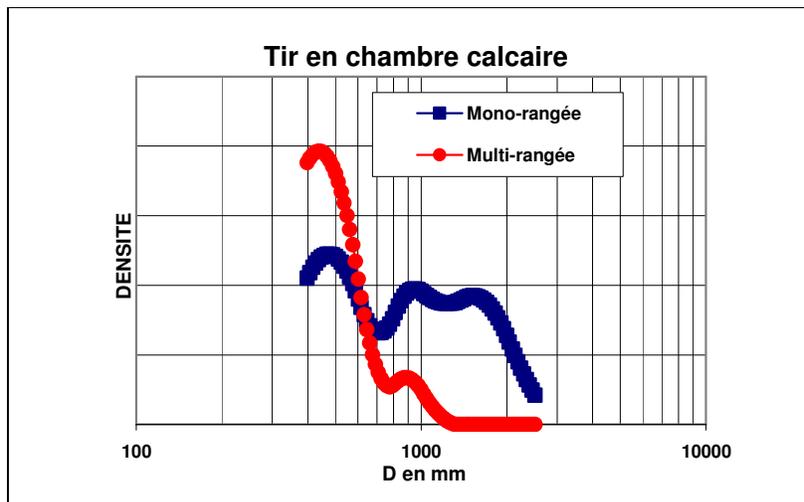


Figure 2.5.3.a.

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.

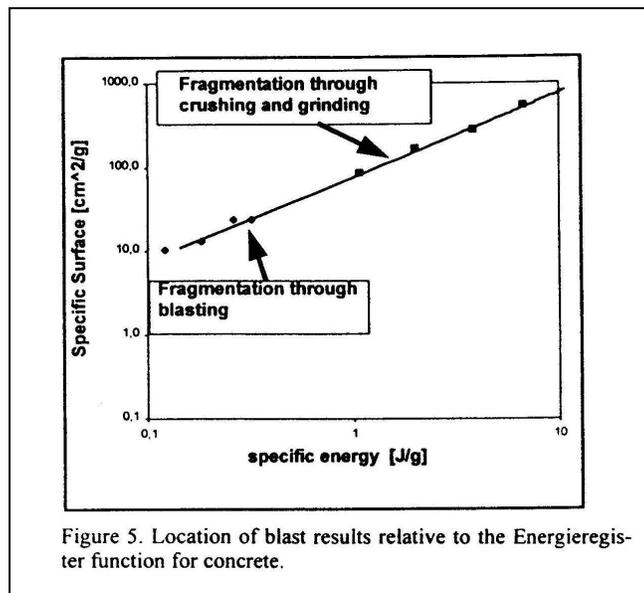


Figure 2.6.a.

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.

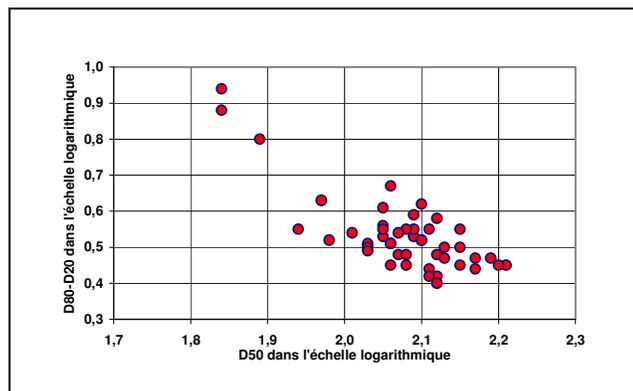


Figure 2.7.1.a.

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.

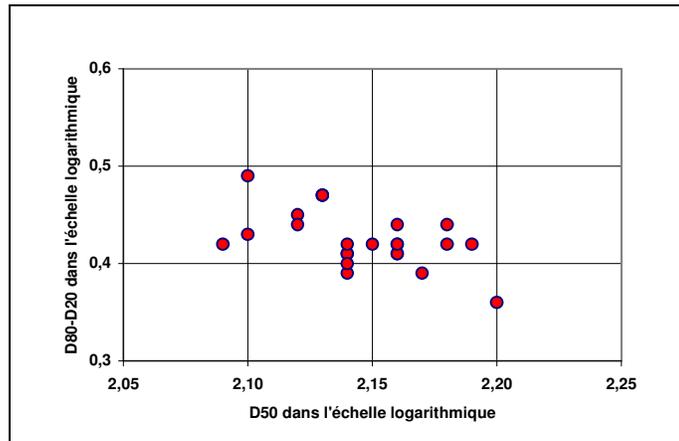


Figure 2.7.2.a.

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.

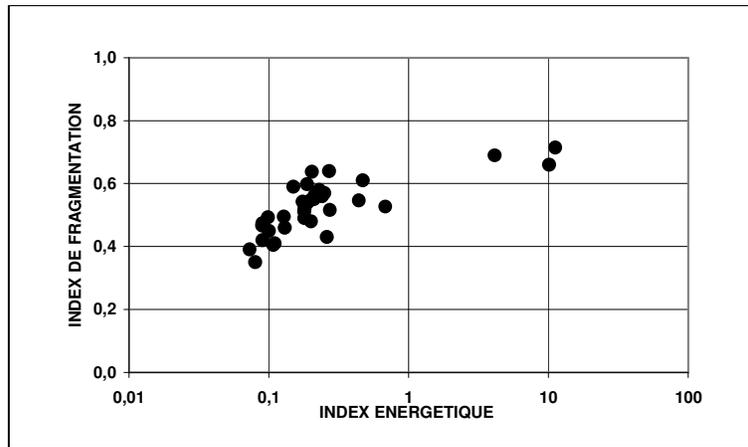


Figure 2.8.1.a.

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.

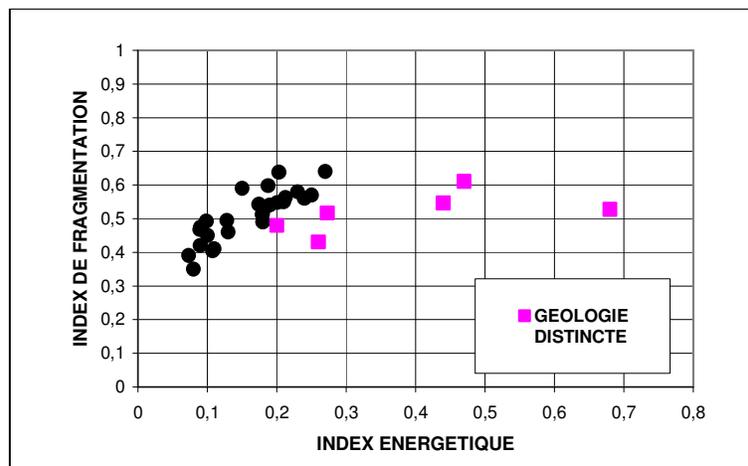


Figure 2.8.1.b.

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.

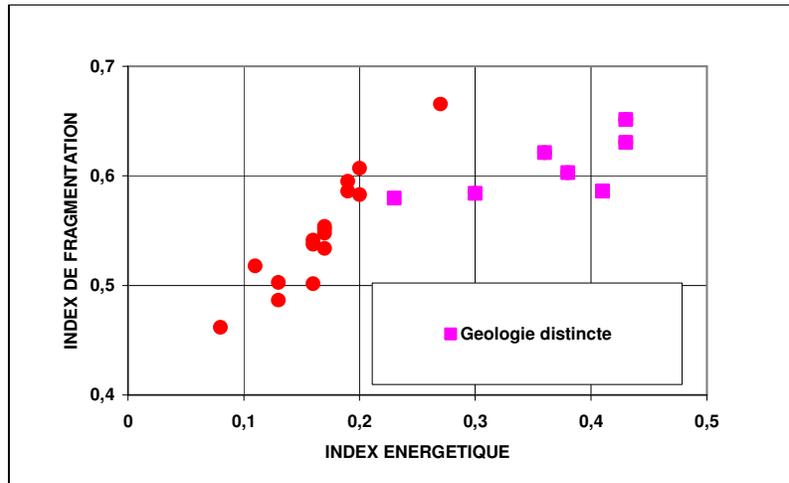


Figure 2.8.2.a.

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.