

## **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<sub>i</sub> = nombre d'unité d'œuvre, CU<sub>i</sub> = Coût unitaire, VT<sub>i</sub> = 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 granulats. 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,  $\Phi$  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.

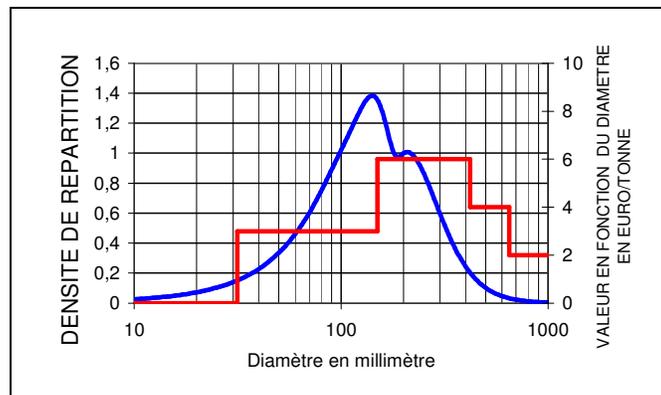


Figure 3.1.3.a.

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.

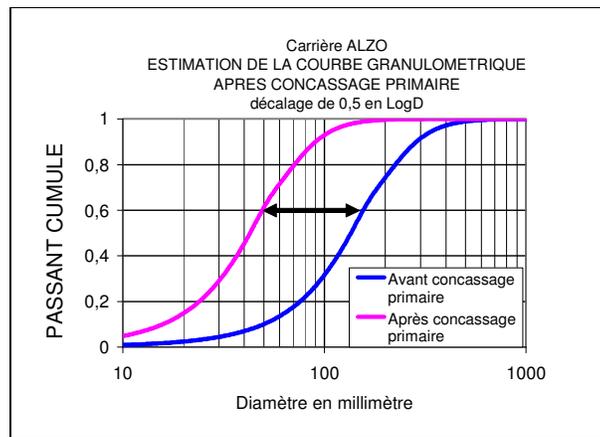


Figure 3.1.3.b.

### 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.

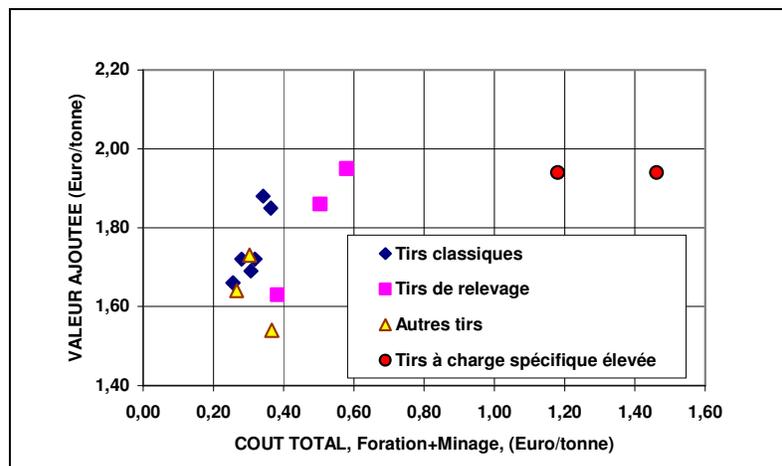


Figure 3.2.2.a.

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.

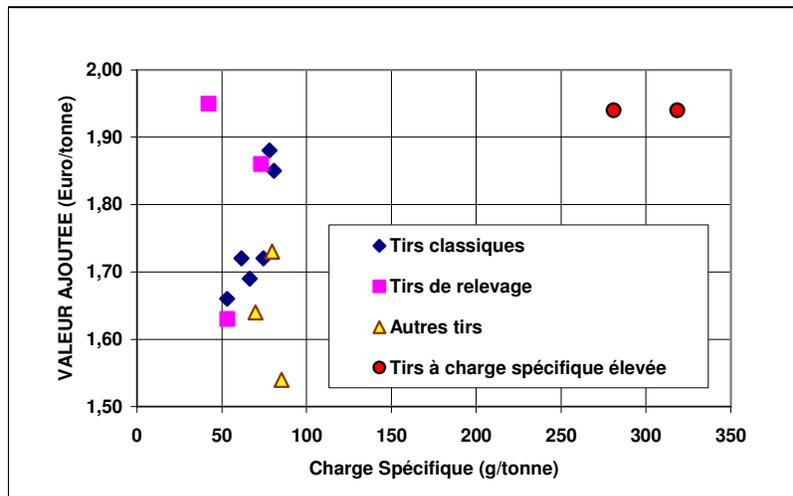


Figure 3.2.2.b.

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.

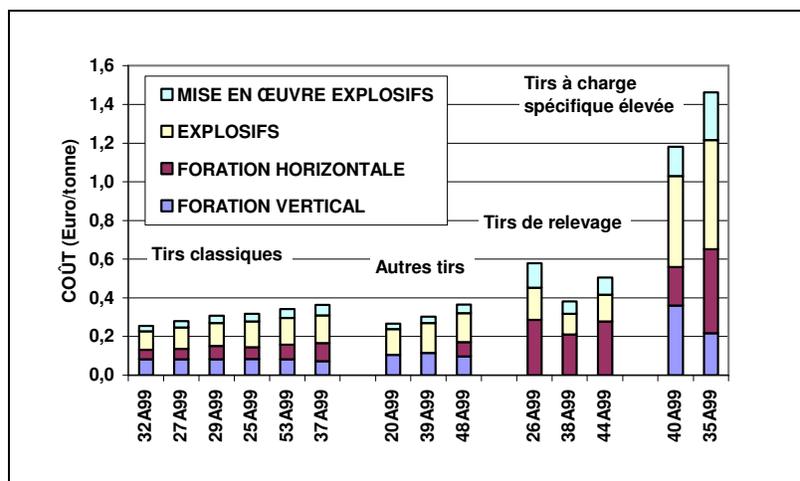


Figure 3.2.2.c.

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.

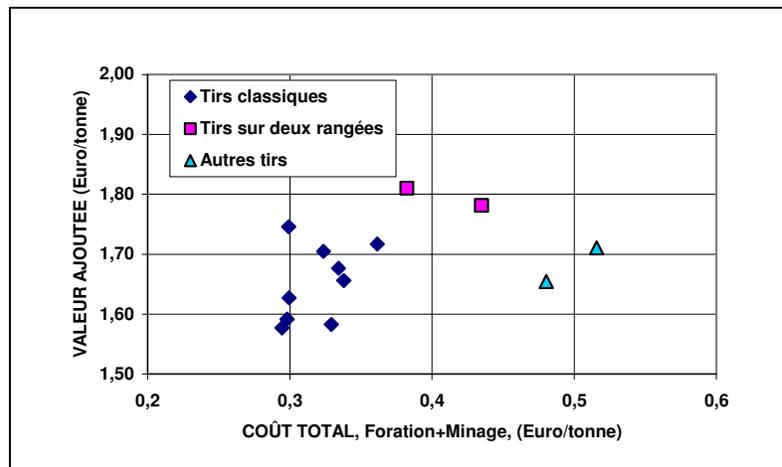


Figure 3.2.3.a.

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.

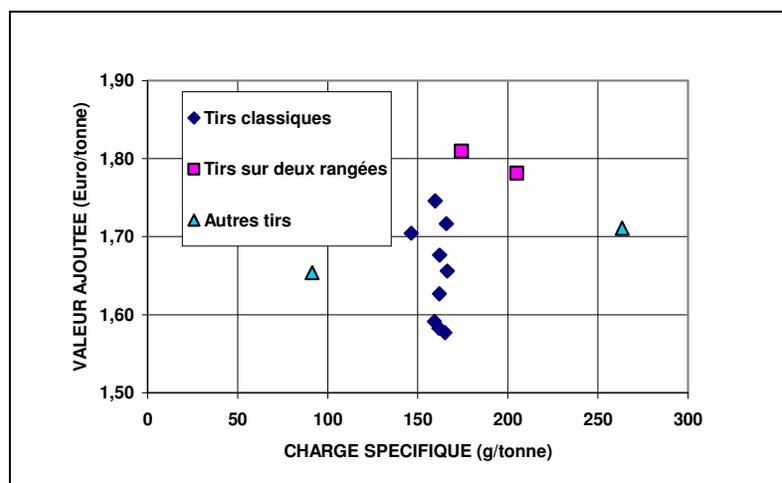


Figure 3.2.3.b.

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.

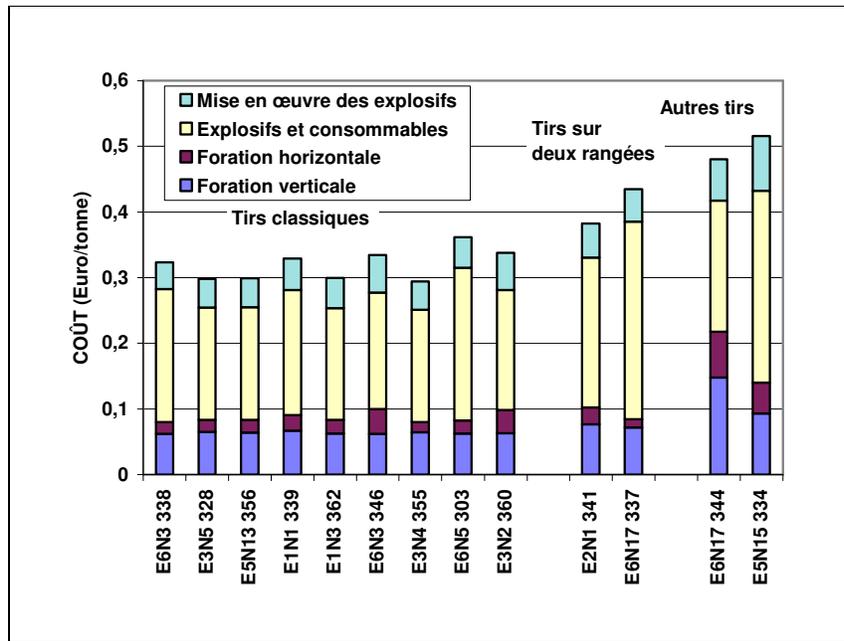


Figure 3.2.3.c.

### 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).

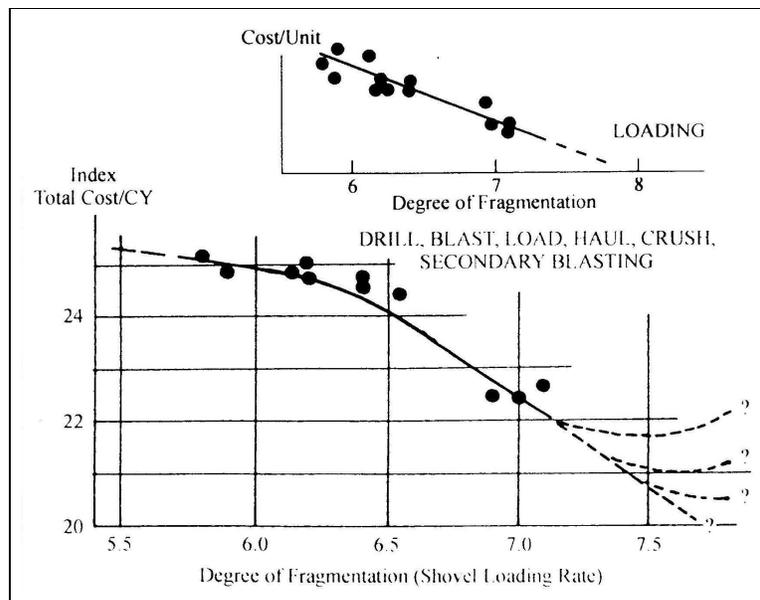


Figure 3.3.1.a.

**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.

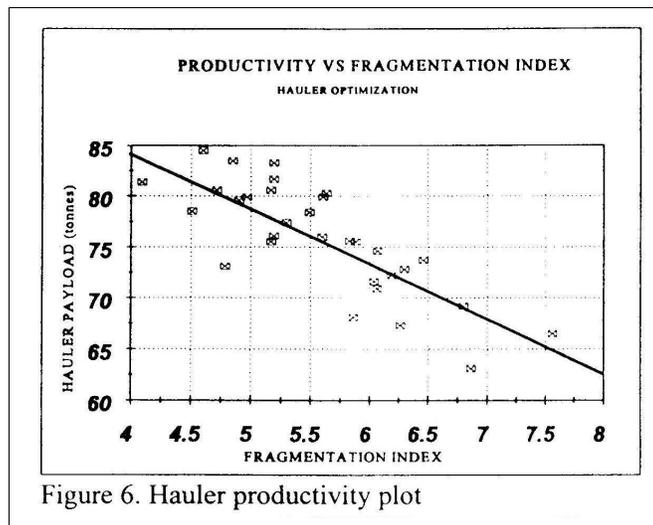


Figure 6. Hauler productivity plot

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.

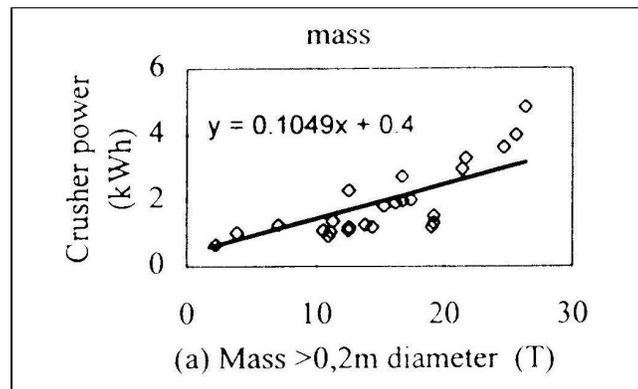


Figure 3.3.1.c.

### 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.

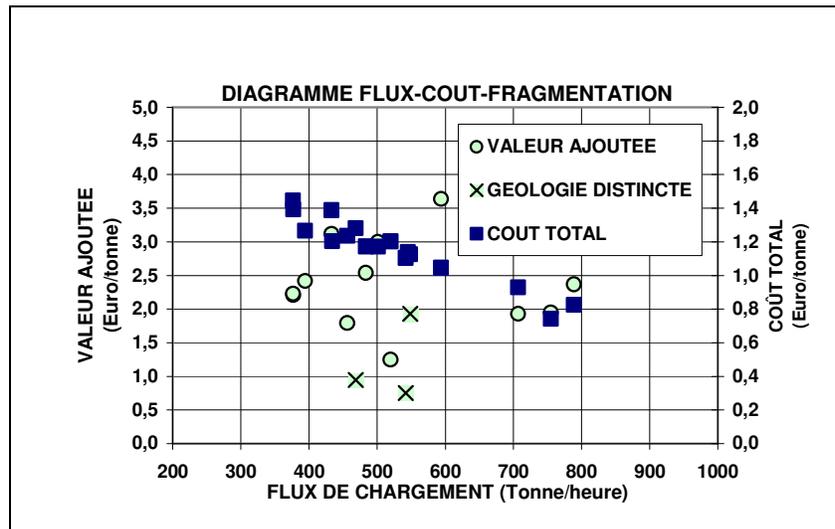


Figure 3.3.2.1.a.

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.

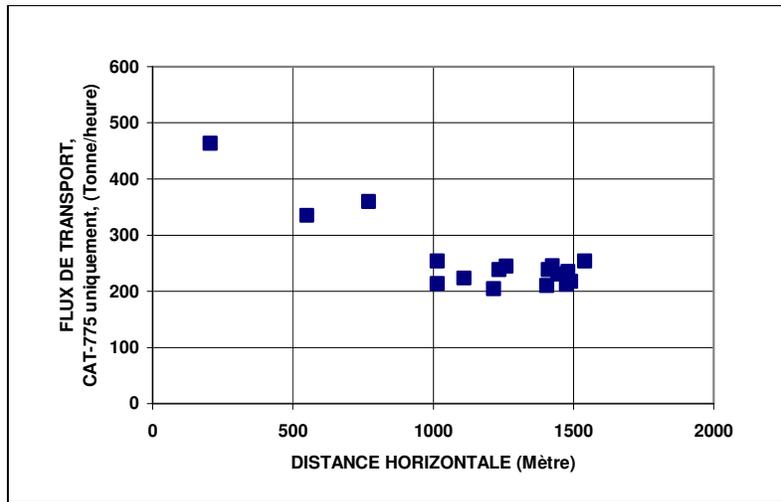


Figure 3.3.2.1.b.

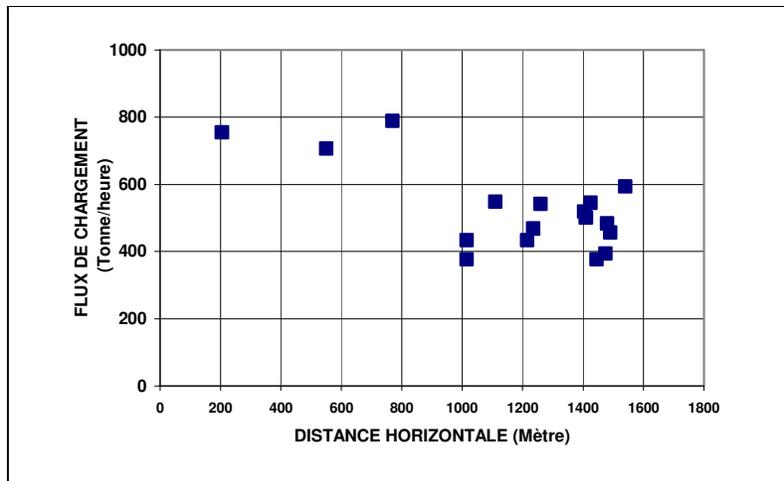


Figure 3.3.2.1.c.

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.

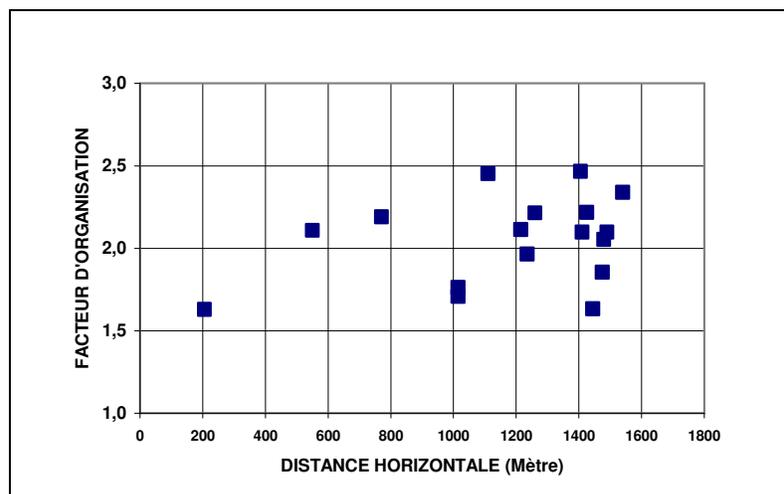


Figure 3.3.2.1.d.

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.

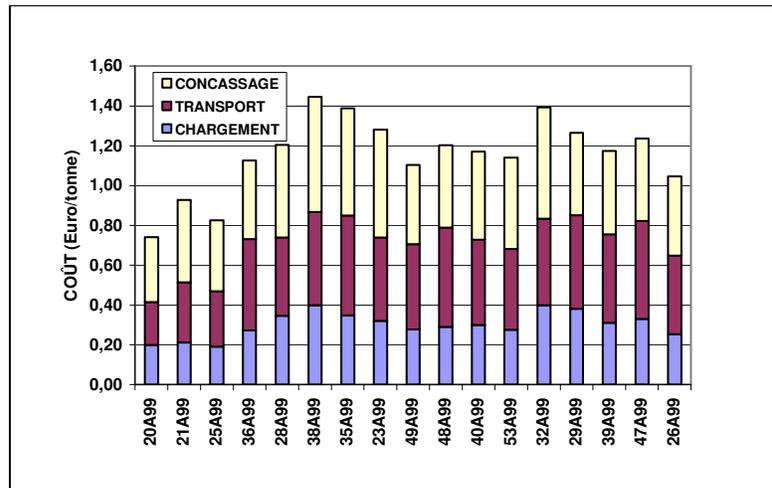


Figure 3.3.2.1.e.

### 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.

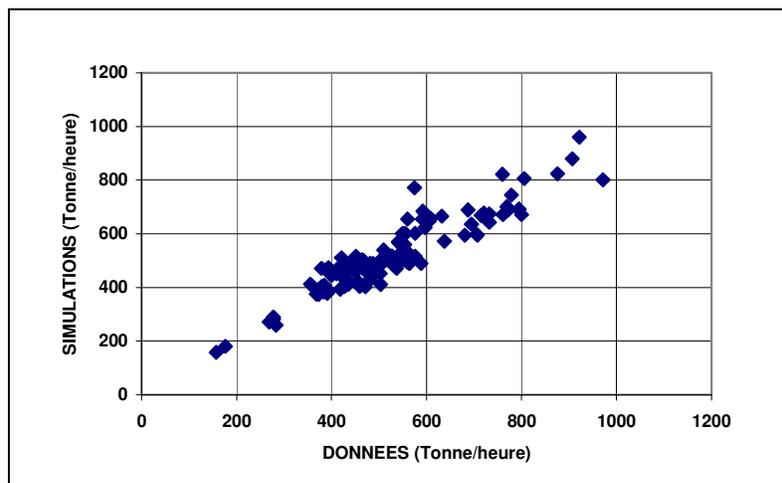


Figure 3.3.2.3.a.

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.

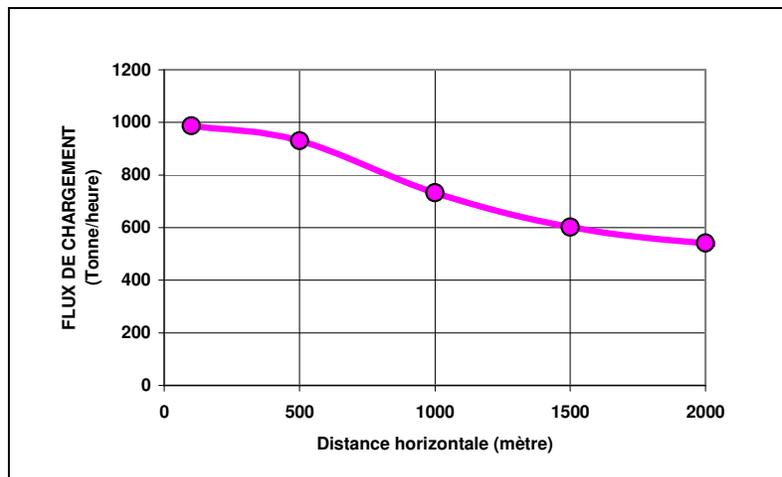


Figure 3.3.2.4.a.

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.

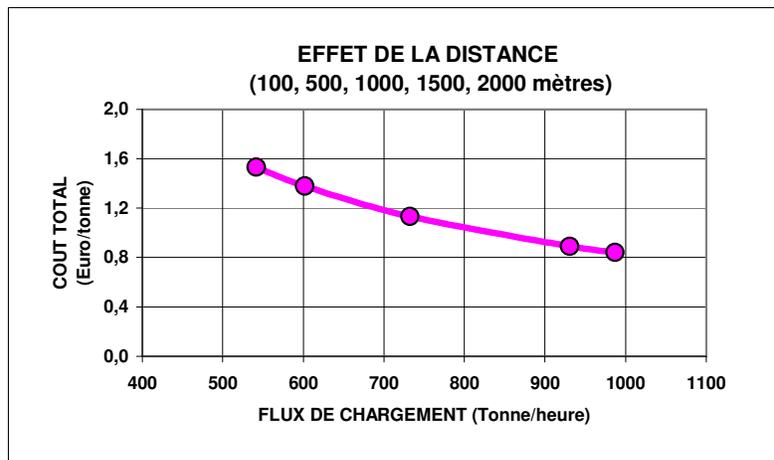


Figure 3.3.2.4.b.

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.

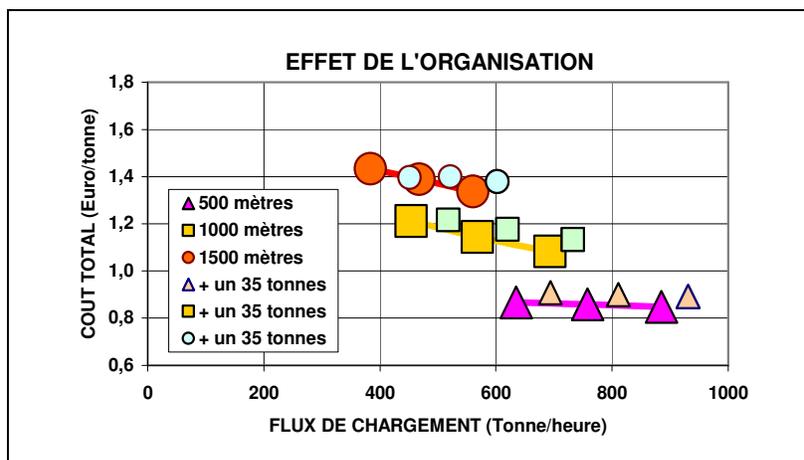


Figure 3.3.2.4.c.

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).

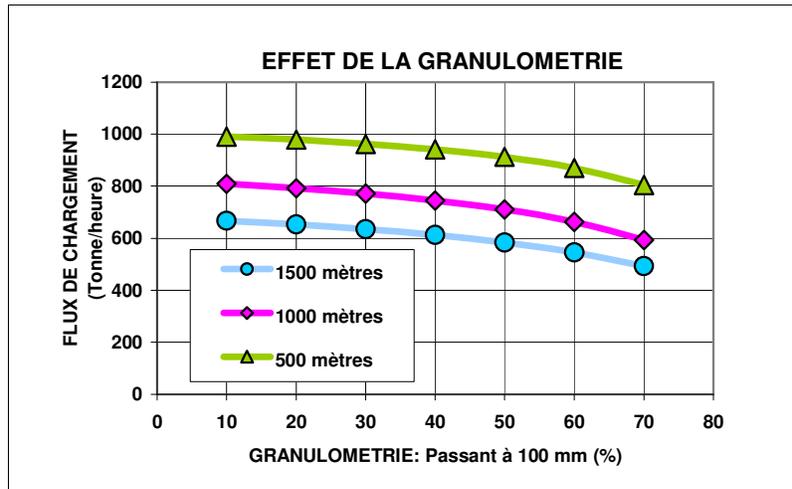


Figure 3.3.2.4.d.

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 m<sup>3</sup> 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.**

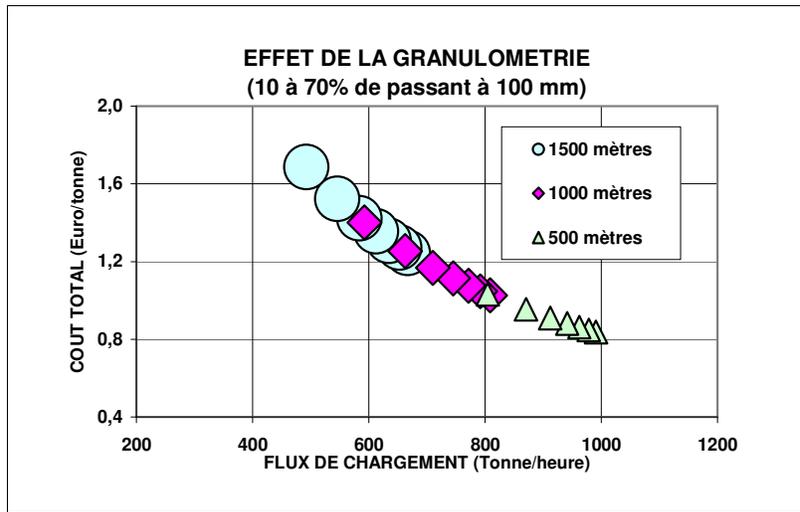


Figure 3.3.2.4.e.

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.

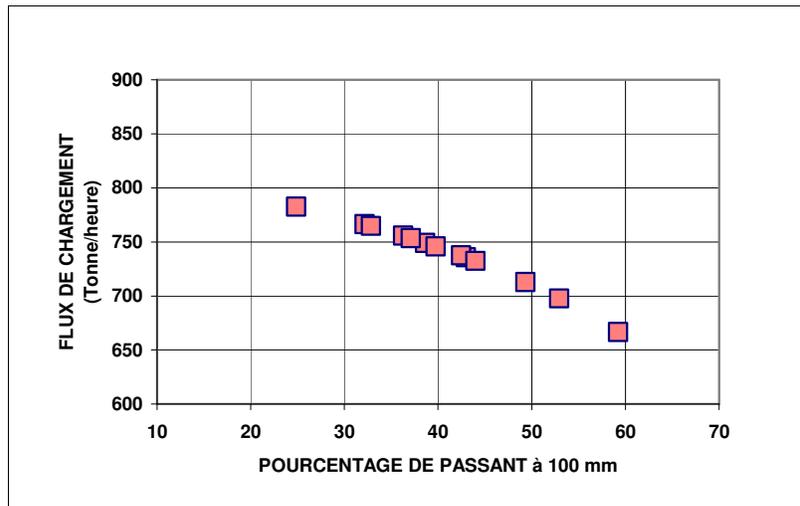


Figure 3.3.2.4.f.

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.

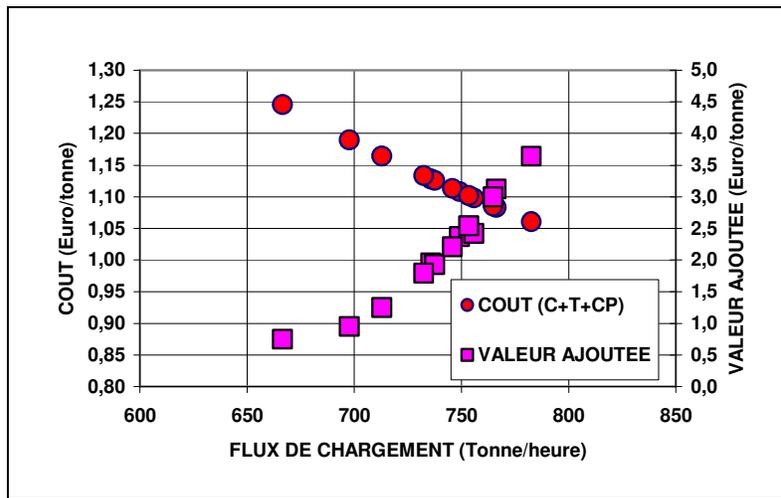


Figure 3.3.2.4.g.

### 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.

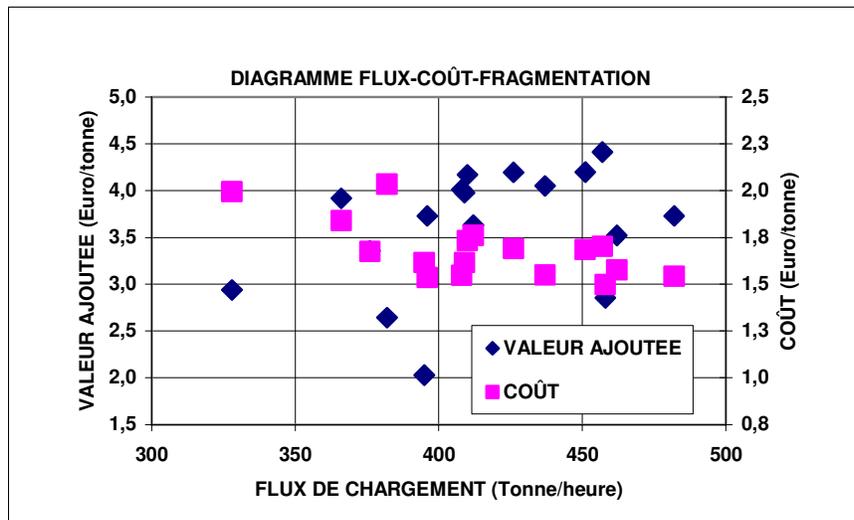


Figure 3.3.3.1.a.

#### 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.

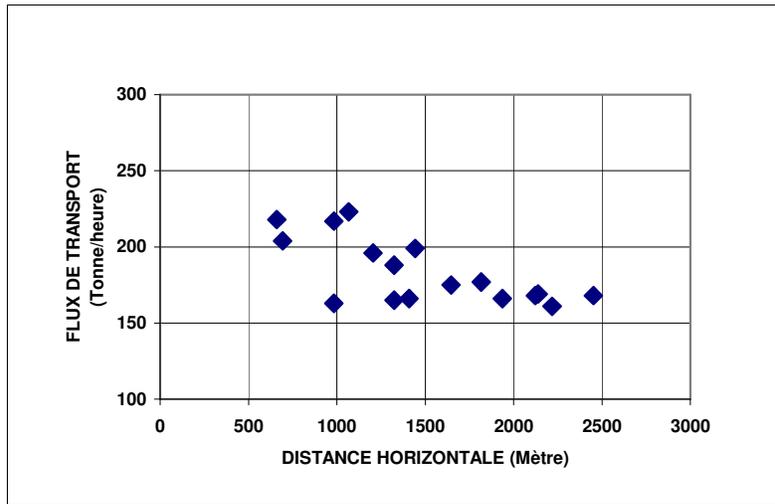


Figure 3.3.3.1.b.

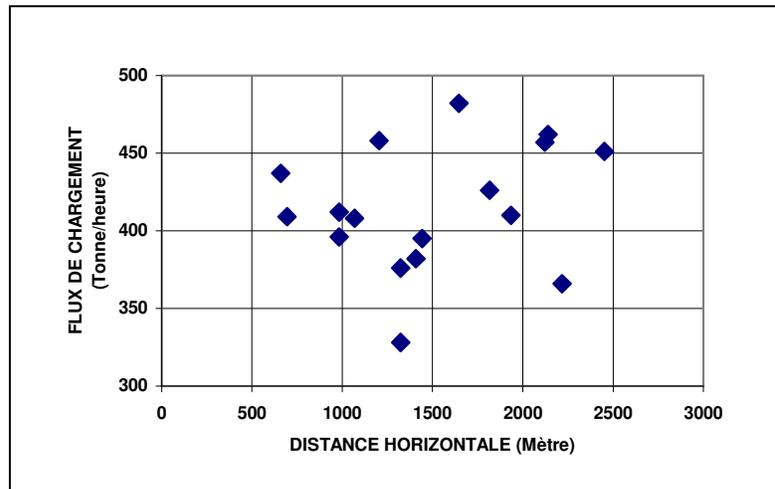


Figure 3.3.3.1.c.

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.

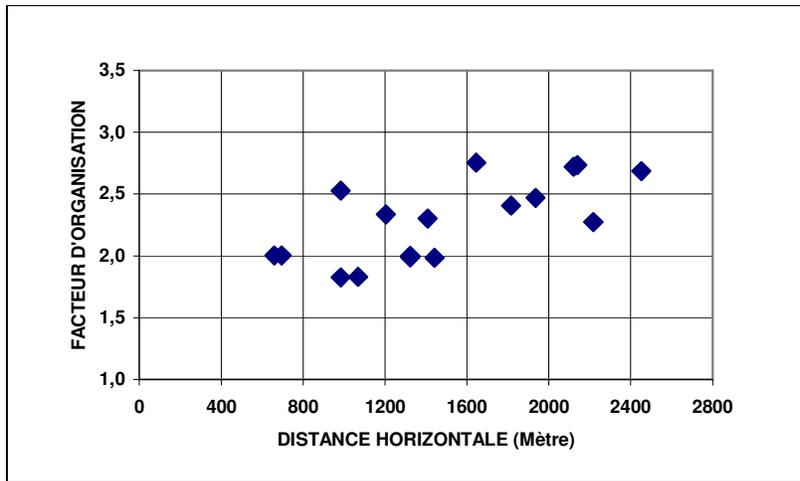


Figure 3.3.3.1.d.

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.

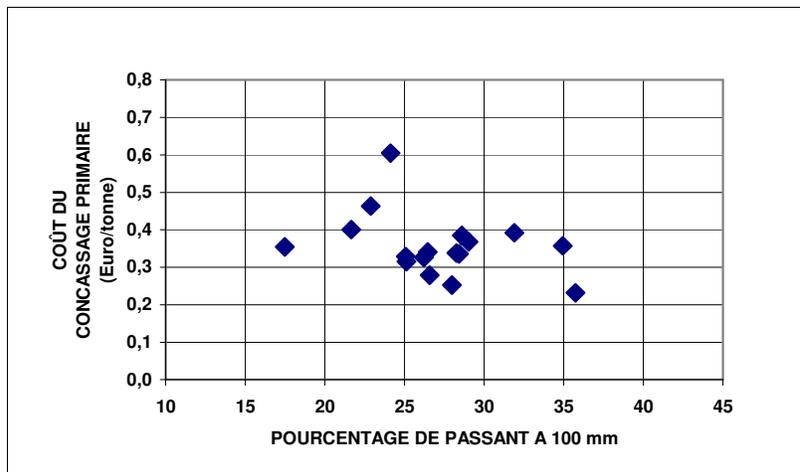


Figure 3.3.3.1.e.

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.

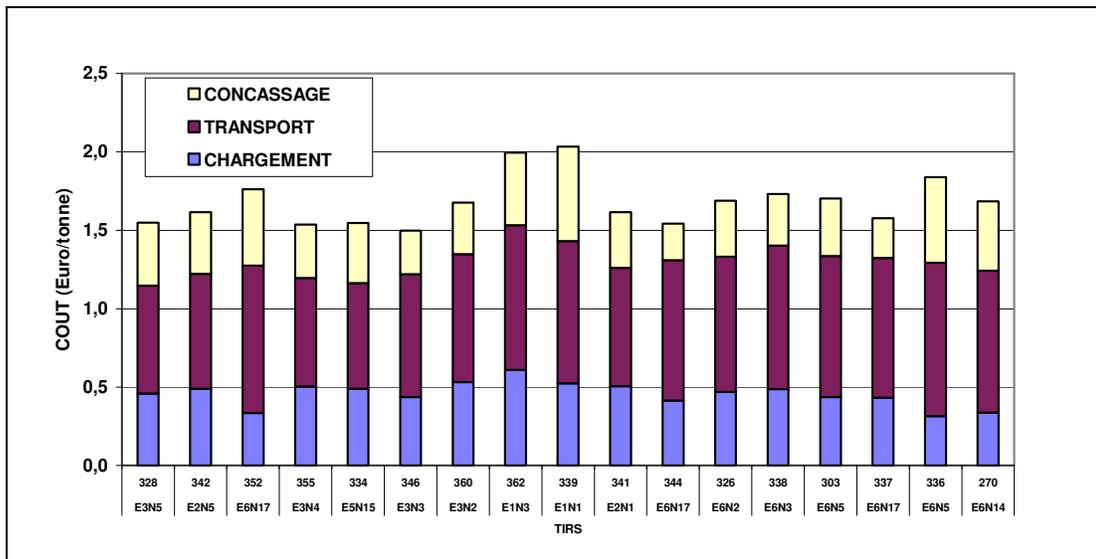


Figure 3.3.3.1.f.

### 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).

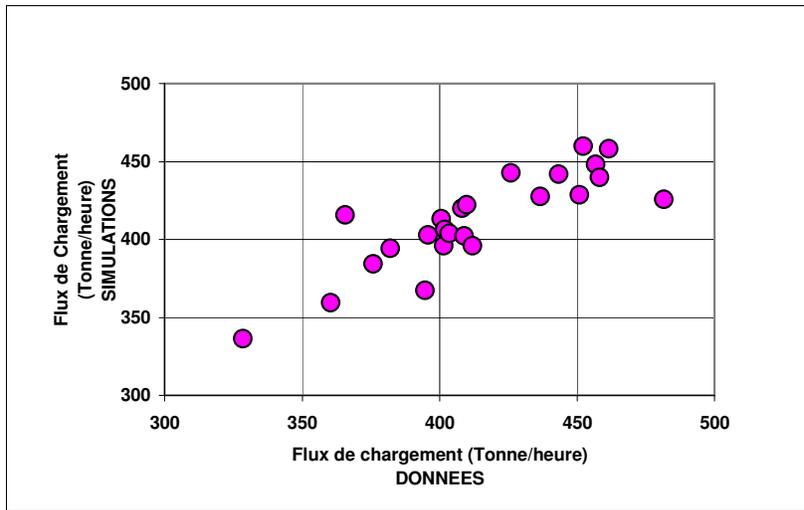


Figure 3.3.3.2.a.

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.

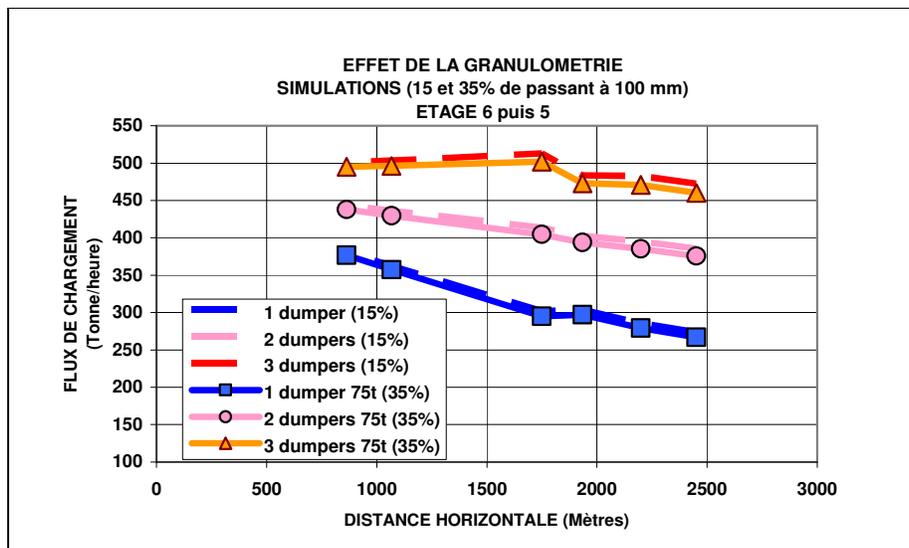


Figure 3.3.3.3.a.

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.

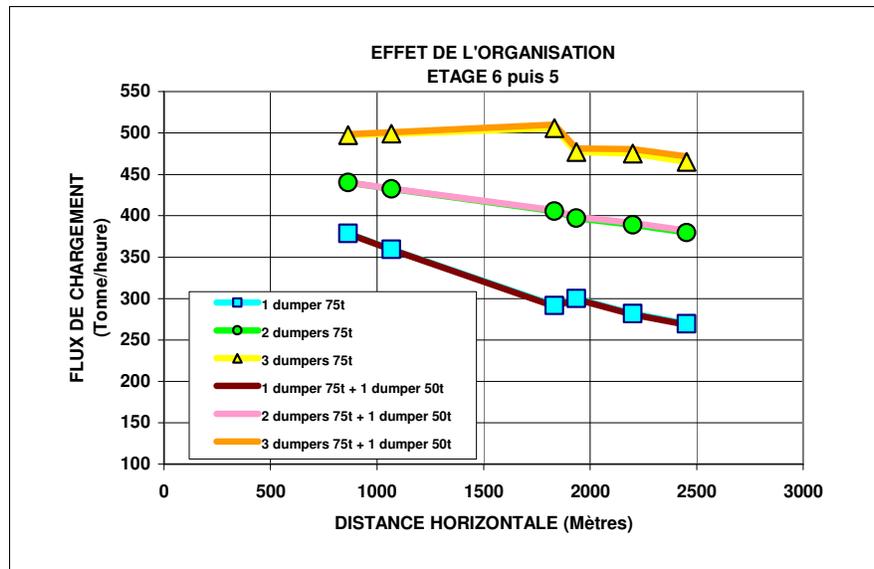


Figure 3.3.3.3.b.

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.

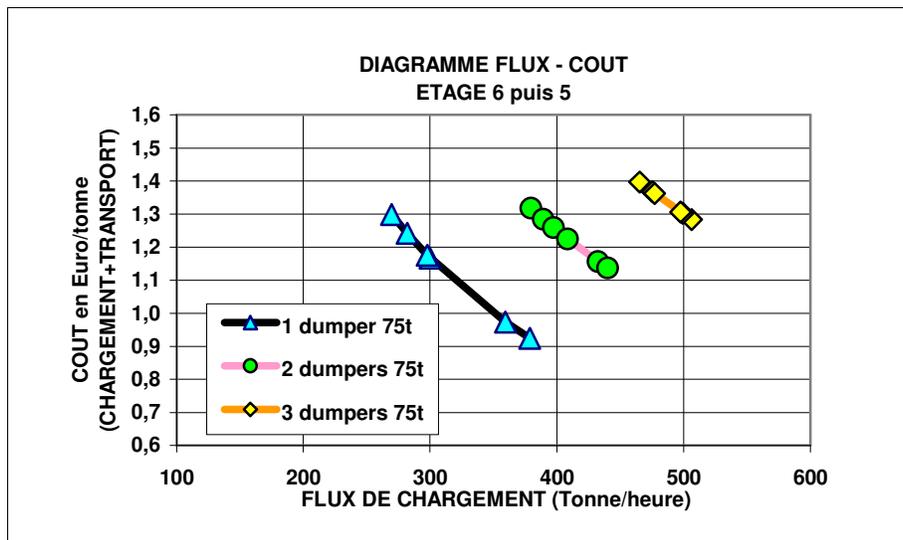


Figure 3.3.3.3.c.

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 5<sup>th</sup> 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 1<sup>st</sup> 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 4<sup>th</sup> 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 4<sup>th</sup> 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 5<sup>th</sup> 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 5<sup>th</sup> 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,**