

19e Session d'étude sur les techniques de sautage
Les 31 octobre et 1er novembre 1996

*Étude de la fragmentation après-tir affectant les résultats
des activités de chargement et de concassage dans l'exploitation
d'une carrière d'agréats*

*Pierre Michaud; ICI Explosifs Canada
et Denys Lacouline; Lafarge Canada Inc.*

**ÉTUDE DE LA FRAGMENTATION
APRÈS-TIR AFFECTANT LES RÉSULTATS
DES ACTIVITÉS DE CHARGEMENT ET DE
CONCASSAGE DANS L' EXPLOITATION
D'UNE CARRIÈRE D'AGRÉGATS**

par:

Pierre Michaud, ing.
Ingénieur en recherche minière
ICI EXPLOSIFS CANADA

Denys Lacouline, ing.
Directeur des Opérations
Carrière Montréal-Est
LAFARGE CANADA INC.

RÉSUMÉ

Il y a plus d'une trentaine d'années, Alan S. MacKenzie définissait le "tir optimum" dans une exploitation minière comme étant celui dont le coût à la tonne était le plus bas à l'issue du concasseur primaire. La teneur de son article, publié dans le Mining Congress Journal (mai 1966), a été utilisé abondamment au cours des ans comme base pour quantifier les effets des résultats après-tir sur certains éléments du cycle minier. Malheureusement, jusqu'à ce jour personne n'a pu réussir à quantifier l'effet des variations de fragmentation sur les coûts individuels et en total d'une exploitation minière. La raison pour laquelle les courbes de coûts unitaires des opérations retrouvées dans l'article ne sont pas apparues comme outils de contrôle pendant ce temps s'explique par la question suivante: "en quoi consiste la fragmentation" ? En

guise d'une définition de la fragmentation et du modèle de productivité s'y rapportant, un projet mené dans l'exploitation minière à ciel ouvert de LAB Chrysotile inc. nous a permis de définir la fragmentation par le biais d'un *index de fragmentation* et de définir des fonctions de productivité de camionnages basées sur cet index. Dans le but continu d'identifier et d'établir un rapport entre tous les coûts individuels d'exploitation minière et le niveau de fragmentation, un second projet fut entrepris à la carrière Montréal-Est de Lafarge Canada Inc. pour se pencher vers l'élément de concassage primaire dans le cycle minier.

L'analyse des résultats n'a pas permis de définir des fonctions spécifiques sur l'effet de l'emport du chargeur-avant sur le cycle de temps requis pour le transport des produits du tir jusqu'à la recette du concasseur. Même si ce ne fut pas confirmé par des mesures actuelles, on a pu se rendre compte au cours de l'exercice que le cycle de creusage du chargeur est très sensible à l'état des produits du tir par opposition à la fragmentation même. L'ameublissement des produits du tir semble être le facteur dominant du contrôle de la productivité globale du chargeur. Le tracé du débit (t / h) du concasseur primaire en fonction de l'*index de fragmentation* indique tel que prévu, qu'une fragmentation plus menue de l'alimentation du concasseur primaire en augmente son débit.

INDEX

INTRODUCTION

FORAGE ET TIR

CHARGEMENT ET TRANSPORT

CONCASSAGE

CONTROLE DE MASSE

ANALYSE DE LA FRAGMENTATION

RÉSULTATS

ANALYSE STATISTIQUE ET INTERPRÉTATION DES DONNÉES

1. TEMPS DE CYCLE ET PRODUCTIVITÉ

1.1 Étude temporelle de cycle du chargeur

1.1.1 Analyse de l'étude temporelle du chargeur et de la masse

1.1.2 Analyse de l'étude temporelle du chargeur et fragmentation

1.2 Étude temporelle du débit du concasseur

1.3 Compatibilité du chargeur et du concasseur

2. FRAGMENTATION ET PRODUCTIVITÉ

2.1 Index de Fragmentation

2.2 Analyse de l'emport du chargeur et de la fragmentation

2.3 Mesures de la productivité du concasseur

2.3.1 Analyse de masse de la trémie du concasseur et de la fragmentation

2.3.2 Analyse du temps de broyage et de la fragmentation

2.3.3 Analyse du débit et de la fragmentation

DISCUSSION

CONCLUSIONS

RECOMMANDATIONS

POINTS D'APPRENTISSAGE DU PROJET ET CONSIDÉRATIONS

RÉFÉRENCES

TABLEAUX 1- 2

FIGURES 1- 11

INTRODUCTION

L'étude suivante est conçue en continuité des travaux visant à obtenir une définition de la fragmentation après-tir et l'utilisation de celle-ci comme outil de contrôle pour quantifier les effets en aval suscités par des changements dans le plan de tir. Le projet mené dans l'exploitation à ciel ouvert de LAB Chrysotile inc.(réf. 2) a conduit au développement d'un *index de fragmentation* et, par conséquent, une fonction de la productivité du transport de déblais. L'étude du concasseur de Lafarge fait donc suite à nos activités en vue d'établir les moyens et les méthodes de mesurer les éléments individuels du cycle minier afin de réaliser le plus bas "coût total d'exploitation minière" en fonction des déblais de tir, ie. la fragmentation (figure 1). L'objectif du projet du concasseur de Lafarge a été conçu pour établir une relation entre le débit du concasseur et les produits d'après-tir. Les efforts subséquents à la réussite d'un tel projet serviraient à intégrer les caractéristiques de forage et de tir comme facteurs de contrôle pour déterminer les coûts d'exploitation minière en termes du chargement, du transport et du concassage. La carrière d'agrégats de Lafarge à Montréal-Est est exploitée dans un environnement urbain très restreint et régie par des règlements municipaux très stricts. Chaque tir dans la carrière est assujéti à des limites, à la fois pour la poussière et pour les vibrations. Cette carrière est en effet la dernière carrière d'agrégats existante sur l'île de Montréal, par suite de la fermeture des carrières Miron et Francon dans les années 1980. L'exploitation annuelle du calcaire Trenton se situe à environ 1 300 000 tonnes pour une capacité établie à 2 500 000 t/a. La hauteur moyenne du front de taille est de 15 mètres et les sautages sont pratiqués sur deux niveaux. Sur chaque niveau, il y a un concasseur mobile et un chargeur; des camions ne sont pas requis puisque la combinaison "concasseurs mobiles / chargeurs sur roues" en éliminent la tâche. Le débit des deux concasseurs est transporté par convoyeurs à une station de pesage commune duquel le mélange est transporté par un système de convoyeurs jusqu'à l'usine de traitement d'agrégats. Environ 50% de la production de l'usine est d'une granulométrie de 0-20 mm. L'horaire de production est basé sur deux tours d'équipe de 10 heures, 5 jours par semaine. Le forage et le tir sont exécutés à contrat par l'entrepreneur Dyfo-Tech. Le forage est effectué à l'aide d'une foreuse hydraulique Atlas Copco ROC 812HCS affûtée de taillants à boutons de 90mm. Les deux chargeurs-avant sont de marque Caterpillar 992C et les deux concasseurs primaires mobiles sont des Nordberg VB1109 (36" x 45")¹ réglés à une ouverture de 150 mm. La carrière est exploitée 8 mois par année, d'avril à novembre.

FORAGE ET TIR

Initialement, le projet devait comprendre le contrôle de trois sautages individuels avec paramètres identiques du forage et du tir, sauf pour les diamètres des trous de forage. Afin d'incorporer l'effet du facteur de chargement sur la productivité et sur la fragmentation, les plans de tir comportaient des trous de diamètres de 3, 3 ½ et 4 pouces. Le facteur de chargement (bas, actuel et élevé) serait ainsi lié à la fragmentation après-tir. Cependant, dès le premier sautage, les limites de vibrations établies par la CUM (Communauté urbaine de Montréal) furent dépassées et

¹ La carrière Lafarge utilise les unités de mesures britanniques pour spécifier la plupart des paramètres de leur exploitation.

les plans de tir furent modifiés pour respecter ces limites. Les données recueillies s'accordent donc aux paramètres du plan de tir original de la carrière avec trous de 3 ½ po. Les paramètres de forage et de tir pour le sautage #2006B furent recueillis pendant le forage et en fin de chargement. Les intervalles entre les trous et leurs fardeaux, les profondeurs des trous, du bourrage, etc. furent mesurés sur place. Le plan de forage et la séquence de tir ont été documentés à l'aide du logiciel ICI, ShotPlus™ (figure 2). Les mesures de la vitesse de détonation (VOD) dans le trou, de la distance de déplacement du front de taille et du profil des déblais du tir furent prises pour insertion future dans le programme SABREX. Des échantillons représentatifs de la roche ont été analysés et les résultats sont indiqués au tableau 1. Le tableau 2 indique les propriétés des explosifs utilisés dans chaque trou ainsi que le système d'amorçage. Typiquement, un sautage standard consiste en deux rangées de 10 à 12 trous forés en patron rectangulaire de 11 pi. x 13 pi. Les trous sont en moyenne de 53 pi. de profondeur, incluant 2 pi. en dessous du niveau du front de taille. L'explosif utilisé était l'ANFO contenu en sac (Amex II) distribué en trois sections par trou. Des copeaux de forage étaient utilisées pour séparer d'environ 3 pi. entre elles les colonnes d'explosifs, et de la pierre concassée servait comme bourrage supérieur (pierre concassée de ½ po. sur une longueur de 6 ½ à 7 pi. jusqu'à l'orifice). L'amorçage à l'aide d'unités HANDIDET 25/500 fut utilisé entre les colonnes de chaque trou et d'un trou à l'autre. Chacune des deux colonnes en fond de trou fut amorcée à l'aide d'une cartouche de Magnafrac 300, (50 mm x 200 mm) tandis que la colonne supérieure était amorcée avec une cartouche de Powermax 120, (40 mm x 200 mm). Après assèchement des trous trempés, on y introduisit, si nécessaire, des manchons en polyéthylène.

CHARGEMENT ET TRANSPORT

Le chargement et le transport à partir des déblais du tir jusqu'au concasseur fut effectué par chargeur sur roues Caterpillar 992C aménagé d'une benne de 10 m³. La figure 3 illustre le chargeur à divers stades des cycles de chargement, de transport et de déversement. Le concept d'exploitation à l'aide d'un concasseur mobile que l'on peut déplacer aisément et à proximité du chantier même élimine le bruit d'arrière plan et la poussière que l'on associe au roulement des camions lourds hors-route. La distance de transport entre la pile des déblais du tir et le concasseur variait entre 60 et 80 mètres. Une vue en plan du périmètre de transport arpenté à l'aide du CPPS-1 Laser Profiler est illustré à la figure 4.

CONCASSAGE

Le concasseur à mâchoire primaire VB1109 Bergeaud (Nordberg France) est aménagé d'un alimentateur vibrant standard 45 po. x 14 pi. comprenant un plateau solide suivi de deux sections de grizzly. Le volume d'alimentation est télécommandé par l'opérateur du concasseur. Les ouvertures du grizzly sont fixées à 6 po. de centre à centre. Typiquement, les fragments de moins de 5 po. passent à travers le grizzly, évitant d'en réduire encore la dimension à travers le concasseur. À une ouverture de 6 po., ce concasseur particulier est classé à un débit de 300-350 t/h pour le type de roche et la granulométrie d'alimentation en question. Ce classement dépend de l'humidité et de la teneur en argile de l'alimentation et ne tient pas compte d'un pontage quelconque. Une vue de côté du concasseur Bergeaud et une vue qu'aurait l'opérateur à l'intérieur de la cabine de la plate-forme sont illustrées à la figure 5. Un casse-pierre hydraulique

a été utilisé pour réduire les blocs trop gros sur le grizzly vibrant avant d'entrer dans la gueule du concasseur. Ceci est effectué sur l'alimentateur vibrant alors qu'a lieu le concassage et ainsi aucun ajustement additionnel du taux d'alimentation n'est requis. De cette façon, le casse-pierre devient partie intégrante du procédé de concassage continue, lequel exige évidemment un opérateur compétent bien entraîné. Il n'est survenu aucun changement au poste d'opérateur au cours de la prise de données reliant la fragmentation au débit du concasseur.

CONTRÔLE DE MASSE

Le contrôle de masse du débit de concassage a été rendu possible par le réaménagement du chargeur-avant Caterpillar 992 C à l'aide d'un système commercial de pesée de charge de marque Loadrite LR 810. Le système a été installé par un détaillant de Teledyne (RAMTEK EQUIPMENT LTD) et il fallut utiliser la bascule de la carrière et des blocs de béton pour le calibrer. La figure 6 illustre deux séquences du procédé de calibration. Une fiche d'information technique ainsi que des photographies prises durant l'installation du matériel sur le chargeur Caterpillar 992C de Lafarge est inclus à l'annexe B. Il est à noter que le système fonctionna exceptionnellement bien et n'a entraîné aucun ajustement ni entretien pendant la période complète de prise de données. Les données enregistrées furent transférées de la capsule mobile d'enregistrement de données à bord du chargeur à un ordinateur portatif muni de l'interface et du logiciel approprié. Les données brutes recueillies dans la capsule Data Memory Capsule furent formatées par fichier délimité ASCII en DOS avec indicatif LOGDATA.TXT. Le fichier pouvait alors être facilement capté sur tableur électronique tel que Lotus ou QuattroPro. Le système de pesée Loadrite a donc servi à la fois pour mesurer les poids individuels de la benne du chargeur pour chaque cycle et pour donner les poids cumulatifs de bennes (3 bennes) représentant un "trajet" au concasseur. Le débit du concasseur fut mesuré en enregistrant le temps requis pour traiter trois pleines charges de benne du chargeur dans la trémie du concasseur à compter de la position de départ. Chaque trajet exigeait que l'opérateur vide la trémie et le concasseur en entier, qu'il fasse décharger 3 bennes pleines dans la trémie et enfin qu'il recommence le concassage jusqu'à ce que le système soit de nouveau à vide. Le temps écoulé pour effectuer ce dernier processus était enregistré comme "temps de broyage".

ANALYSE DE LA FRAGMENTATION

L'état de la fragmentation a été recueilli et analysé à partir des images numériques et des photographies de 35 mm prises individuellement, à la fois à l'endroit des déblais du tir et de la trémie du concasseur. Au front de taille, un gabarit de 5'x 5' fut placé sur les déblais du tir et une photographie prise avant le creusage, et au concasseur, chaque charge déversée dans la trémie fut photographiée avec des jalons fixés au concasseur servant d'étalon pour le dimensionnement. L'analyse numérique de la fragmentation fut traitée par le système AutoCad "frag" utilisé auparavant pour le projet de LAB Chrysotile. Le système PowerSieve™ d'ICI n'était pas disponible à ce temps-là. Pour plus amples détails sur le système "frag", se référer à la réf. 2. La figure 7 illustre les images numériques des "mêmes" fragments pris au front de taille, à la benne du chargeur et au concasseur. À remarquer que les résultats diffèrent entre eux ! La différence s'explique par la méthode utilisée pour la prise de photos, la nature tridimensionnelle

des fragments de roche sous considération et par le revêtement superficiel sous considération, lequel, malheureusement, n'est souvent pas représentatif de la totalité.

RÉSULTATS

Toutes les données recueillies au cours de l'exercice furent utilisées dans leur ensemble. Il n'y avait pas lieu de soupçonner une inconséquence quelconque et/ou des problèmes de calibration avec le système de contrôle Loadrite utilisé pour les mesures de masse à bord du chargeur. Les données accumulées par le système Loadrite furent transférées aux feuilles de travail LOTUS et finalement traitées pour analyse subséquente avec un logiciel statistique compatible. Des études temporelles séparées ont été faites sur le débit du concasseur et sur l'export du chargeur afin d'établir la productivité moyenne pour celle-ci. Ce dernier excluait la fragmentation et considérait seulement les paramètres de masse et de temps.

ANALYSE STATISTIQUE DES DONNÉES

1. CYCLE TEMPOREL ET PRODUCTIVITÉ

1.1 Étude temporelle du cycle du chargeur

Une étude temporelle du chargeur sur roues Caterpillar 992C fut effectué pour mesurer sa compatibilité avec le débit du concasseur primaire et pour mesurer sa productivité pour la configuration de transport présentée à la figure 4. Les sessions de contrôle furent faites au cours de trois postes de jour différents. La portion transport fut divisée en deux sections, dont l'une était considérée plus ou moins indépendante de la position variable du chargeur à mesure que celui-ci progressait à travers les déblais du tir et à ses extrémités. Les deux portions de transport furent identifiées par l'alignement de deux jalons jaunes positionnés dans la voie de transport. L'équation suivante peut servir de modèle.

$$BCT = DIG + C1 + C2 + DMP + CR \quad (1)$$

où :

BCT	=	Base de cycle temporel
DIG	=	Temps de creusage
C1	=	Cycle temporel 1 (du front de taille au jalon)
C2	=	Cycle temporel 2 (du jalon au concasseur)
DMP	=	Temps du déversement
CR	=	Cycle de retour (du concasseur au front de taille)

Le temps de creusage fut calculé à partir du moment où la benne s'engage dans le tas des déblais jusqu'au moment où elle s'en libère. Le modèle ne comprend pas le temps supplémentaire requis pour enregistrer la masse soulevée (la benne devait être soulevée au dessus d'un capteur magnétique fixe afin d'enregistrer le poids). On n'essaya aucunement de faire la corrélation entre

les variables du modèle telles que définies ci-dessus. Même avec la portion-transport sectionnée en deux sentiers séparés, il devint évident au cours de l'exercice de contrôle que même la portion identifiée C2 (cycle de transport entre le jalon et le concasseur) dépendait trop des idées qu'a l'opérateur du chargeur pendant le creusage et le transport. Parfois l'opérateur reculait du tas de déblais jusqu'à la rampe de chargement du concasseur et, alors seulement il se retournait pour enfin déverser sa charge dans la trémie du concasseur. La productivité du chargeur fut donc le seul paramètre qui fut retenu pour cette étude temporelle. De plus, le chemin le plus court entre le tas des déblais et le concasseur n'était pas toujours employé, parfois en compensation de la pente et de la distance. Pour une Disponibilité Physique calculée de 88 % (Disponibilité opérationnelle totale, qui inclut le temps d'attente au concasseur) la productivité du chargeur a atteint 555 t/h. Une perte de production de 75 t/h, ou environ 750 tonnes pour un poste de 10 heures, peut être attribuée au concasseur primaire, si la disponibilité mécanique du chargeur est de 100 %.

1.1.1 Analyse de l'étude temporelle du chargeur et de la masse

Le temps de creusage a été mesuré par rapport à la masse chargée par la benne du chargeur. Le remplissage volumétrique de la benne du chargeur fut gardé constant au cours de l'exercice de contrôle afin de se rendre compte des changements de densité occasionnés par la gradation dans les fragments. La régression linéaire dans les "Résultats 1" ci-dessous indique qu'il n'y a pas de corrélation significative entre la masse de la matière pelletée par la benne et le temps de creusage requis pour la remplir. Tel qu'on remarqua pour l'étude à LAB Chrysotile (réf.2), il faudra s'appliquer à plus d'effort pour développer un moyen de mesurer le 'creusage' en termes de la condition du tas des déblais du tir selon les paramètres de soulèvement et d'expulsion.

Résultat 1

DEP VAR:MASS_BKT N: 141 MULTIPLE R: 0.220 SQUARED MULTIPLE R: 0.048
ADJUSTED SQUARED MULTIPLE R: .041 STANDARD ERROR OF ESTIMATE: 1406.303

VARIABLE	COEFFICIENT	STD ERROR	STD COEF	TOLERANCE	T	P(2 TAIL)
CONSTANT	19682.800	456.564	0.000	.	43.111	0.000
DIG	69.531	26.203	0.220	1.000	2.654	0.009

ANALYSIS OF VARIANCE

SOURCE	SUM-OF-SQUARES	DF	MEAN-SQUARE	F-RATIO	P
REGRESSION	.139253E+08	1	.139253E+08	7.041	0.009
RESIDUAL	.274899E+09	139	1977687.421		

La meilleure corrélation que l'on a obtenu des paramètres définis à l'équation 1 par rapport à l'emport du chargeur (masse volumétrique contenue dans la benne) est indiquée au "Résultat 2" ci-dessous. Un tracé graphique de la régression linéaire représentée par la masse de benne

(BKT_M) contre le cycle temporel de base (BCT) est illustré à la figure 8. La pente de la droite de régression indique qu'une augmentation de l'emport du chargeur augmente le cycle temporel de base ou plus spécifiquement, une augmentation d'une tonne dans l'emport volumétrique du chargeur, correspond à une augmentation d'environ 3 secondes dans le cycle temporel de base. La sortie statistique indique que le multiple R^2 est 0,152 et nous fait savoir que seulement 15 % de la variabilité observée dans le cycle temporel de base peut s'expliquer par la masse de la benne. Quoique la corrélation soit faible, le rapport est statistiquement significatif en ce que le paramètre associé à la mesure de masse de benne diffère significativement de zéro ($t_{141}=4.998$, $p<0.0001$). La faible corrélation provient du fait que les distances des trajets de transport et leur pente n'ont pas été prises en considération dans le calcul. Les distances de transport du chargeur et les pentes variaient significativement au cours de la prise de données même si le chargeur se trouvait confiné au périmètre de transport illustré à la figure 4. En raison de cette lacune, aucune autre analyse se rapportant à la productivité du chargeur ne fut effectuée.

Résultat 2

DEP VAR: BCT N: 141 MULTIPLE R: 0.390 SQUARED MULTIPLE R: 0.152
ADJUSTED SQUARED MULTIPLE R: .146 STANDARD ERROR OF ESTIMATE: 8.901

VARIABLE	COEFFICIENT	STD ERROR	STD COEF TOLERANCE	T	P(2 TAIL)
CONSTANT	65.396	10.947	0.000	5.974	0.000
MASS_BKT	0.003	0.001	0.390	4.998	0.000

ANALYSIS OF VARIANCE

SOURCE	SUM-OF-SQUARES	DF	MEAN-SQUARE	F-RATIO	P
REGRESSION	1979.267	1	1979.267	24.984	0.000
RESIDUAL	11011.843	139	79.222		

1.1.2 Analyse de l'étude temporelle du chargeur et de la fragmentation

Basé sur les résultats obtenus dans la section 1.1.1, aucune recherche supplémentaire ne fut poursuivie utilisant la fragmentation comme variable: la corrélation de la masse avec la fragmentation ayant déjà démontrée par expérience comme étant très difficile à reproduire. En raison de cette constatation, on ne pratiqua pas d'analyse de la fragmentation des charges de bennes dans l'étude temporelle courante.

1.2 Étude temporelle du débit du concasseur

De concert avec l'étude temporelle du chargeur, un exercice préliminaire de repères fut effectué sur le concasseur primaire Bergeaud VB1109 afin d'établir son débit normal de fonctionnement. L'exercice n'a aucunement nuit ou affecté la pleine exploitation de la carrière. Le débit fut calculé en divisant les déversements cumulatifs de bennes dans le concasseur par le temps requis pour les broyer et les traiter. L'exercice prit en considération tous les genres de retards (pauses,

repas, entretien, pontage, etc.). L'exercice fut répété sur deux jours différents. Le rapport est inclus à l'annexe C. Les jours combinés ont démontré une disponibilité physique (temps perdu pour une raison quelconque) de 70% à un débit moyen de 352 t/h. La majeure partie du temps perdu était attribuée à de gros blocs de pierre. Le classement spécifié par Nordberg pour ce concasseur VB 1109 semble adéquat puisque le poids enregistré par le système de pesée Loadrite comprend la sousverse traversant le grizzly de l'alimentateur tandis que le classement de Nordberg ne l'inclut pas.

1.3 Compatibilité du chargeur et du concasseur

Le calcul sur la productivité du chargeur et sur la mesure du débit du concasseur, indique que le concasseur constitue le bouchon de l'exploitation. Cependant, à mesure que la carrière s'étend et que les fronts de taille sont plus éloignés de l'installation de concassage, il arrive un point où se rencontrent le débit du concasseur et la productivité du chargeur. Pour ce qui existait au cours de l'exercice de contrôle, avec disponibilité de machine indiquée précédemment, la productivité du chargeur a surpassé le débit du concasseur par 58 % ou 203 t/h. Avec une disponibilité de machine de 100 %, les nombres deviennent respectivement 26 % et 129 t/h.

2. FRAGMENTATION ET PRODUCTIVITÉ

2.1 Index de fragmentation

L'*index de fragmentation* développé durant l'étude a LAB Chrysotile a été utilisé dans l'étude Lafarge comme dénominateur commun pour relier à la fois la productivité du chargeur et le débit du concasseur avec la fragmentation après-tir. L'*index de fragmentation* est calculé d'après les valeurs obtenues de fragmentation dérivées des images raster des fragments en considération. La courbe de fragmentation est obtenue en considérant les surfaces de chaque fragment capté dans l'image. La figure 9 illustre trois indices de fragmentation pris au front de taille en utilisant un gabarit de 5' x 5' comme référence. L'*index de fragmentation* pour le sautage en entier a été déterminé comme étant 6,2 et 5,8 au front de taille et au concasseur respectivement. Les variations du FRNDX étaient très serrées (5,1 à 7,3 au front de taille), indiquant une uniformité élevée dans la fragmentation du mélange après-tir.

2.2 Analyse de l'emport du chargeur et de la fragmentation

L'*index de fragmentation* de chaque benne de chargeur fut calculé et mis en tableau avec le débit massique du système de pesage Loadrite. Le modèle sous considération est de la forme:

$$y = a + bx \quad (2)$$

$$BKTMASS = \beta_0 + \beta_1 FRNDX \quad (3)$$

BKTMASS représente la masse de chaque charge de benne remplie enregistrée par le système de pesée Loadrite en kg et FRNDX représente l'*index de fragmentation* tel que défini précédemment. Pour chaque poids enregistré de la benne, il existe deux valeurs d'*index de fragmentation*: l'une formulée d'après les images prises au front de taille et l'autre d'après les photos numérique prises au concasseur (se référer à la figure 7, photos 1 et 3). Une régression linéaire fut produite pour vérifier le modèle sous considération avec les valeurs recueillies durant l'essai et elles sont présentées ci-dessous.

Résultat 1 (Fragmentation prise au front de taille)

DEP VAR: BKTMASS N: 119 MULTIPLE R: 0.150 SQUARED MULTIPLE R: 0.023
ADJUSTED SQUARED MULTIPLE R: .014 STANDARD ERROR OF ESTIMATE: 1492.759

VARIABLE	COEFFICIENT	STD ERROR	STD COEF	TOLERANCE	T	P(2 TAIL)
CONSTANT	23433.000	1761.815	0.000	.	13.300	0.000
FRNDXF	-462.258	281.470	-0.150	1.000	-1.642	0.103

ANALYSIS OF VARIANCE

SOURCE	SUM-OF-SQUARES	DF	MEAN-SQUARE	F-RATIO	P
REGRESSION	6010109.650	1	6010109.650	2.697	0.103
RESIDUAL	260715E+09	117	2228329.523		

Résultat 2 (Fragmentation prise au concasseur)

DEP VAR: BKTMASS N: 120 MULTIPLE R: 0.162 SQUARED MULTIPLE R: 0.026
ADJUSTED SQUARED MULTIPLE R: .018 STANDARD ERROR OF ESTIMATE: 1509.011

VARIABLE	COEFFICIENT	STD ERROR	STD COEF	TOLERANCE	T	P(2 TAIL)
CONSTANT	23587.086	1693.197	0.000	.	3.931	0.000
FRNDXC	-518.978	290.648	-0.162	1.000	-1.786	0.077

ANALYSIS OF VARIANCE

SOURCE	SUM-OF-SQUARES	DF	MEAN-SQUARE	F-RATIO	P
REGRESSION	7260208.798	1	7260208.798	3.188	0.077
RESIDUAL	268700E+09	118	2277115.286		

Les analyses statistiques du modèle présentées aux résultats 1 et 2 ci-dessus indiquent aucune corrélation dans un cas ou l'autre et donc ne supportent pas le modèle proposé. Basée sur ces résultats révélateurs aucune tentative n'a été considérée pour poursuivre l'investigation.

2.3 Mesures de la productivité du concasseur

En tout, 44 "séquences" de concassage on fait l'objet du projet de concassage à la carrière Lafarge de Montréal-Est. Chaque passe au concasseur représente trois charges de bennes. De plus, tel que mentionné précédemment, l'*index de fragmentation* fut pris individuellement à la fois au front de taille et au concasseur pour fin de comparaison.

2.3.1 Analyse de masse de la trémie du concasseur et de la fragmentation

Une analyse de la régression linéaire de masse de la trémie du concasseur (trois bennes du chargeur) avec l'index correspondant de fragmentation présenté aux résultats 1 et 2 n'ont pas fourni de données utiles pour le projet sauf de se questionner sur l'effet de fréquence d'échantillonnage sur les résultats en dernier lieu, c.-à-d. y a-t-il assez d'information sur la fragmentation dans la trémie pour la relier à la masse?

Résultat 1 (fragmentation prise au front de taille)

DEP VAR: CRMASS N: 40 MULTIPLE R: 0.367 SQUARED MULTIPLE R: 0.135
ADJUSTED SQUARED MULTIPLE R: .112 STANDARD ERROR OF ESTIMATE: 2516.621

VARIABLE	COEFFICIENT	STD ERROR	STD COEF	TOLERANCE	T	P(2 TAIL)
CONSTANT	76073.287	5911.867	0.000	.	12.868	0.000
FRNDXF	-2278.245	936.323	-0.367	1.000	-2.433	0.020

ANALYSIS OF VARIANCE

SOURCE	SUM-OF-SQUARES	DF	MEAN-SQUARE	F-RATIO	P
REGRESSION	.374960E+08	1	.374960E+08	5.920	0.020
RESIDUAL	.240668E+09	38	6333379.352		

Résultat 2 (fragmentation prise au concasseur)

DEP VAR: CRMASS N: 40 MULTIPLE R: 0.195 SQUARED MULTIPLE R: 0.038
ADJUSTED SQUARED MULTIPLE R: .013 STANDARD ERROR OF ESTIMATE: 2653.795

VARIABLE	COEFFICIENT	STD ERROR	STD COEF	TOLERANCE	T	P(2 TAIL)
CONSTANT	70134.521	6888.535	0.000		10.181	0.000
FRNDXC	-1432.004	1170.305	-0.195	1.000	-1.224	0.229

ANALYSIS OF VARIANCE

SOURCE	SUM-OF-SQUARES	DF	MEAN-SQUARE	F-RATIO	P
REGRESSION	.105445E+08	1	.105445E+08	1.497	0.229
RESIDUAL	.267620E+09	38	7042630.299		

2.3.2 Analyse du temps de broyage et fragmentation

L'effet de la granulométrie des fragments pour un type donné de roche sur la productivité du concasseur est bien établi, même s'il y a divergence de vues comment l'énergie requise pour le concassage est formulée. Les données recueillies au cours du projet Lafarge portaient sur le temps requis pour traiter un volume fixe des produits du tir dans le concasseur primaire: trois volumes égaux des déblais du tir déversés d'une benne de 10 m³ dans la trémie du concasseur. L'équation suivante a été utilisée comme modèle pour relier le "temps de broyage" à l'*index de fragmentation*.

$$\text{CRTIME} = \beta_0 + \beta_1 \text{FRNDX} \quad (6)$$

Alors que CRTIME représente le temps requis pour traiter le contenu de la trémie du concasseur à partir de la position de départ jusqu'au moment où la chambre du concasseur est vide. Les résultats 1 et 2 ci-dessous indiquent l'analyse de régression du modèle et la figure 10 illustre les tracés graphiques du "temps de broyage" contre l'*index de fragmentation* pris au front de taille et au concasseur.

Résultat 1 (fragmentation prise au front de taille)

DEP VAR: CRTIME N: 40 MULTIPLE R: 0.552 SQUARED MULTIPLE R: 0.305
ADJUSTED SQUARED MULTIPLE R: .286 STANDARD ERROR OF ESTIMATE: 0.783

VARIABLE	COEFFICIENT	STD ERROR	STD COEF	TOLERANCE	T	P(2 TAIL)
CONSTANT	-1.130	1.840	0.000	.	-0.614	0.543
FRNDXF	1.189	0.291	0.552	1.000	4.079	0.000

ANALYSIS OF VARIANCE

SOURCE	SUM-OF-SQUARES	DF	MEAN-SQUARE	F-RATIO	P
REGRESSION	10.208	1	10.208	16.641	0.000
RESIDUAL	23.311	38	0.613		

Résultat 2 (fragmentation prise au concasseur)

DEP VAR: CRTIME N: 40 MULTIPLE R: 0.730 SQUARED MULTIPLE R: 0.533
ADJUSTED SQUARED MULTIPLE R: .520 STANDARD ERROR OF ESTIMATE: 0.642

VARIABLE	COEFFICIENT	STD ERROR	STD COEF	TOLERANCE	T	P(2 TAIL)
CONSTANT	-4.590	1.666	0.000	.	-2.755	0.009
FRNDXC	1.864	0.283	0.730	1.000	6.582	0.000

ANALYSIS OF VARIANCE

SOURCE	SUM-OF-SQUARES	DF	MEAN-SQUARE	F-RATIO	P
REGRESSION	17.858	1	17.858	43.329	0.000
RESIDUAL	15.662	38	0.412		

Le résultat 2 indiquent une meilleure corrélation (*index de fragmentation* calculé d'après les photos numériques pris au concasseur). La pente de la ligne de régression indique que le temps de broyage augmente en fonction de la granulométrie des fragments. L'augmentation d'une unité dans l'*index de fragmentation* augmentera le temps de broyage par presque 2 minutes. Les statistiques générées indiquent que le multiple R^2 est 0,533 et fait savoir qu'environ 53 % de la variation dans le temps de broyage peut s'expliquer par l'*index de fragmentation*. La relation est statistiquement significative en ce que le paramètre associé à la mesure de l'*index de fragmentation* (FRNDXC) diffère significativement de zéro ($t_{40}=5.582$, $p<0.0001$). L'équation (2) deviendrait alors:

$$\text{CRTIME} = -4.59 + 1.86 \cdot \text{FRNDXC} \quad (7)$$

2.3.3 Analyse du débit et de la fragmentation

Au temps de broyage dans le débit du concasseur s'ajoute l'élément de masse. Les résultats 1 et 2 ci-dessous et la figure 11 indiquent l'ajustement de régression et l'analyse du débit du concasseur contre l'*index de fragmentation*. Les résultats sont un peu meilleurs que l'analyse faite du temps de broyage seulement indiquant peut-être que la variante indépendante CRMASS présentée dans la régression précédente de la section 2.3.1 offre donc un effet bénéfique sur la corrélation finale. Assurément, le multiple R^2 s'est amélioré dans le cas au front de taille et s'est amélioré un peu dans le cas au concasseur. Avec l'*index de fragmentation* mesuré au concasseur, le multiple R^2 est 0,54. La pente de la droite de régression indique que le débit augmente à mesure que décroît la granulométrie des fragments. Une réduction d'une unité dans l'*index de fragmentation* augmentera le débit du concasseur d'environ 190 t/h. Le débit statistique indique que le multiple R^2 est 0,540 et fait savoir qu'environ 54 % de la variance dans le débit du concasseur peut s'expliquer par l'*index de fragmentation*. La relation est statistiquement significative du fait que le paramètre associé à la mesure de l'*index de fragmentation* (FRNDXC) diffère significativement de zéro ($t_{40}=-6.673$, $p<0.0001$). Le modèle linéaire est représenté par l'équation

$$\text{TRUPUT} = 1717.57 - 191.08 \cdot \text{FRNDXC} \quad (8)$$

Résultat 1 (fragmentation prise au front de taille)

DEP VAR: TRUPUT N: 40 MULTIPLE R: 0.633 SQUARED MULTIPLE R: 0.401
ADJUSTED SQUARED MULTIPLE R: .385 STANDARD ERROR OF ESTIMATE: 74.075

VARIABLE	COEFFICIENT	STD ERROR	STD COEF	TOLERANCE	T	P(2 TAIL)
CONSTANT	1470.205	174.011	0.000	.	8.449	0.000
FRNDXF	-138.934	27.560	-0.633	1.000	-5.041	0.000

ANALYSIS OF VARIANCE

SOURCE	SUM-OF-SQUARES	DF	MEAN-SQUARE	F-RATIO	P
REGRESSION	139444.844	1	139444.844	25.413	0.000
RESIDUAL	208509.139	38	5487.083		

Résultat 2 (fragmentation prise au concasseur)

DEP VAR: TRUPUT N: 40 MULTIPLE R: 0.735 SQUARED MULTIPLE R: 0.540
ADJUSTED SQUARED MULTIPLE R: .527 STANDARD ERROR OF ESTIMATE: 64.933

VARIABLE	COEFFICIENT	STD ERROR	STD COEF	TOLERANCE	T	P(2 TAIL)
CONSTANT	1717.574	168.548	0.000	.	10.190	0.000
FRNDXC	-191.075	28.635	-0.735	1.000	-6.673	0.000

ANALYSIS OF VARIANCE

SOURCE	SUM-OF-SQUARES	DF	MEAN-SQUARE	F-RATIO	P
REGRESSION	187734.824	1	187734.824	44.526	0.000
RESIDUAL	160219.159	38	4216.294		

Une étude temporelle séparée présentée dans la section 1.2 de ce rapport indiquait un débit moyen du concasseur de 352 t/h avec disponibilité de 70 %, soit 503 t/h à une disponibilité de 100 %. L'*index de fragmentation* calculé pour le sautage Lafarge a été 5,8 pris au concasseur. En introduisant cette valeur d'index dans l'équation (8), le débit calculé du concasseur est de 609 t/h à une disponibilité physique de 100 %. Pour une disponibilité de 70 % le débit deviendrait 426 t/h.

DISCUSSION

L'analyse des données recueillies en chantier à la carrière Lafarge ont servi à valider les conclusions tirées de l'étude à LAB Chrysotile auquel fut ajouté le concassage comme élément quantifiable du cycle minier. Sauf pour le projet de LAB Chrysotile, on n'a pas pu trouver, dans nos recherches de revues bibliographique, d'autres études axées sur l'établissement d'un *index de fragmentation*.

Les temps de creusage du chargeur n'ont pas généré de données utiles qui auraient pu servir à mettre en corrélation la fragmentation et la productivité. Les effets de la fragmentation ainsi que ceux de soulèvement et d'expulsion du tir doivent être étudiés simultanément pour obtenir un modèle réaliste.

Les temps du cycle de transport par chargeur par rapport à l'emport indiquent que les charges les plus lourdes augmentaient le temps de cycle de base du chargeur. La corrélation entre l'emport du chargeur et le temps de cycle devient difficile en raison du changement continu de trajet ou de distance. Contrairement aux camions de mine, les distances parcourues entre le point de chargement et le point de déversement étaient courtes et, par la suite, les manœuvres aux extrémités des déblais du tir à mesure que progressait le chargement influaient démesurément sur le rapport entre le temps de parcours et le poids. On devra, dans les études futures à ce sujet, tenir compte des distances et des pentes des trajets d'aller et de retour des lieux de creusage.

La corrélation entre la masse (benne ou trémie) et l'*index de fragmentation* n'a pas pu être établi. Le rapport entre le mouvement de masse et la fragmentation en absence du facteur-temps est difficile à modéliser. La réussite semble être reliée directement à la fréquence d'échantillonnage. Il faudra obtenir plus d'information sur la fragmentation que représente chaque charge de benne. Même avec l'ajout de trois échantillonnages de fragmentation pris dans la trémie du concasseur, les corrélations étaient loin du niveau statistiquement significatif. Il a fallu recueillir dans le projet LAB Chrysotile non moins de 6 charges individuelles de benne dans le plateau du camion pour obtenir une corrélation convenable entre l'emport du transporteur et l'*index de fragmentation*.

L'analyse de régression du "temps de broyage" avec l'*index de fragmentation* a démontré que le temps requis pour traiter un volume fixe d'alimentation (défini par les facteurs de remplissage de benne du chargeur) est très sensible à la granulométrie car une distribution de fragments plus gros abaissera le débit volumétrique du concasseur. L'analyse de régression faite d'après les images de fragmentation prises au concasseur a produit une meilleure corrélation que celle obtenue du front de taille.

De la même façon, le débit du concasseur s'accorde bien à l'*index de fragmentation* du fait qu'une fragmentation plus grossière dans le concasseur réduira son débit. L'ajout de masse au temps de broyage pour les images prises au front de taille a démontré une amélioration de la corrélation par rapport à celles prises au concasseur primaire. On doit noter cependant que le rapport entre le débit et l'*index de fragmentation* a donné de bons résultats surtout parce que l'élément-temps était inclus dans l'équation.

CONCLUSIONS

Aucune corrélation significative n'a été décelée entre l'emport du chargeur et la fragmentation. Les régressions linéaires du débit du concasseur contre l'*index de fragmentation* (figure 11) ont fourni un moyen graphique de quantifier la variation du débit avec les changements dans la fragmentation définie par l'*index de fragmentation*. L'analyse statistique du modèle ne fait pas

distinctions de l'environnement dans lequel a eu lieu l'exercice. Quoique des rapports linéaires ont été établis avec un niveau de confiance peu élevé, le changement différentiel dans le débit produit par les changements unitaires dans l'*index de fragmentation* devient absolu si la pente de la ligne de régression demeure fixe. Le modèle peut certainement être utilisé en termes relatifs pour faire estimer le débit correspondant à un index variable de fragmentation. Néanmoins, des travaux supplémentaires sont requis pour renforcer la signification statistique du modèle. Les travaux futurs devraient se concentrer sur l'augmentation du nombre d'échantillons représentant les lots individuels de chaque ensemble.

RECOMMANDATIONS

Il faut poursuivre les efforts pour justifier le modèle définissant l'*index de fragmentation* dans ce projet spécifique. Il appert qu'une bonne corrélation entre le débit du concasseur et l'*index de fragmentation* dépend, en grande partie, du nombre d'échantillons de fragmentation pris de chaque lot. L'élément temporel, comme le "temps de broyage" dans le concasseur, répond très bien à l'*index de fragmentation*, tandis que le débit du concasseur (masse par unité de temps de concassage) nécessite un degré plus élevé d'échantillonnage et d'analyse de la fragmentation pour obtenir des fonctions de productivité statistiquement significatives. Pour qu'ICI puisse réaliser des progrès dans le domaine du tir optimum, il faudra effectuer un plus grand effort global afin de standardiser un "*index de fragmentation*" qui permettra l'usage de ces fonctions de productivité comme outil de contrôle des initiatives de **Gestion du Sautage**.

REMERCIEMENTS

@Nous offrons nos remerciements au personnel de Lafarge Canada Inc., tout particulièrement au groupe de direction à la carrière de Montréal-Est et aussi à l'entrepreneur de forage et de tir Dyfo-Tech qui nous a fourni les détails de forage et de tir en gradins. Des remerciements sont aussi offerts aux opérateurs du chargeur et du concasseur qui nous ont permis de faire le monitoring des opérations; à M. Benoît Falardeau du Groupe de Technique de Tir qui nous a transmis les mesures de performance de tir et finalement, à M. Hugo Fisette, étudiant en génie géologique de l'Ecole Polytechnique de Montréal, qui nous a assisté à recueillir et analyser les données

POINTS D'APPRENTISSAGE DU PROJET ET CONSIDÉRATIONS

La méthodologie employée pour capter les images de fragmentation avec le logiciel utilisé pour analyser ces images constitue la composante la plus importante de l'exercice d'assemblage de données. On devrait utiliser un appareillage unique pour capter les images pour la durée du projet. Des appareillages différents conduisent inévitablement à des résultats incohérents dus surtout à l'aspect tridimensionnel de la fragmentation. De plus, l'*index de fragmentation* développé est unique au logiciel d'analyse d'image utilisé. Dans le projet Lafarge, les deux appareillages utilisés ont donné des résultats très différents de l'*index de fragmentation* dans l'analyse d'un "même" échantillon.

Le placement des gabarits sur des piles compactes et élevées de roches oblige à porter une attention constante aux éboulis et aux glissements qui se produisent pendant le déblaiement. En plus des Procédures de sécurité établies par Explosifs ICI en ce qui a trait aux opérations de tir en surface, on doit adhérer aux règlements de sécurité de la carrière.

Le système de contrôle de pesée Loadrite qui fut réaménagé à bord du chargeur sur roues Caterpillar 992C fonctionna "à merveille" et on le recommande fortement pour tout projet qui exige des mesures de productivité.

Les études temporelles des cycle de configurations chargeur / concasseur devraient considérer les distances et les pentes des trajets.

Le choix d'un site pour mener un projet spécifique exige premièrement d'avoir un excellent rapport avec le client et/ou l'entrepreneur qui effectue le forage, le tir et parfois le concassage. L'étendue du projet doit être présentée à la personne responsable de la carrière avant de prendre un engagement de part et d'autre et tout problème apte à survenir devrait être considéré à ce moment. Les exploitants de la carrière doivent être impliqués et mis au courant des exigences du projet car ils peuvent apporter des données inestimables pour la mise en oeuvre et l'évolution du projet.

RÉFÉRENCES

- 1) MacKenzie, A.S. 1966. Cost of Explosives-Do You Evaluate it Properly? Mining Congress Journal, mai 1966: 32-41.
- 2) Michaud, P.R., Blanchet, J.Y., 1995. L'Etablissement d'un rapport entre les produits du tir et la productivité minière: Etude de cas. 18 ième Session d'étude sur les techniques de sautage de la Société d'énergie explosive du Québec, Québec, Qc, Canada, 2 et 3 novembre 1995.

FIGURES

FIGURE 1: REPRESENTATION GRAPHIQUE DU TIR OPTIMUM

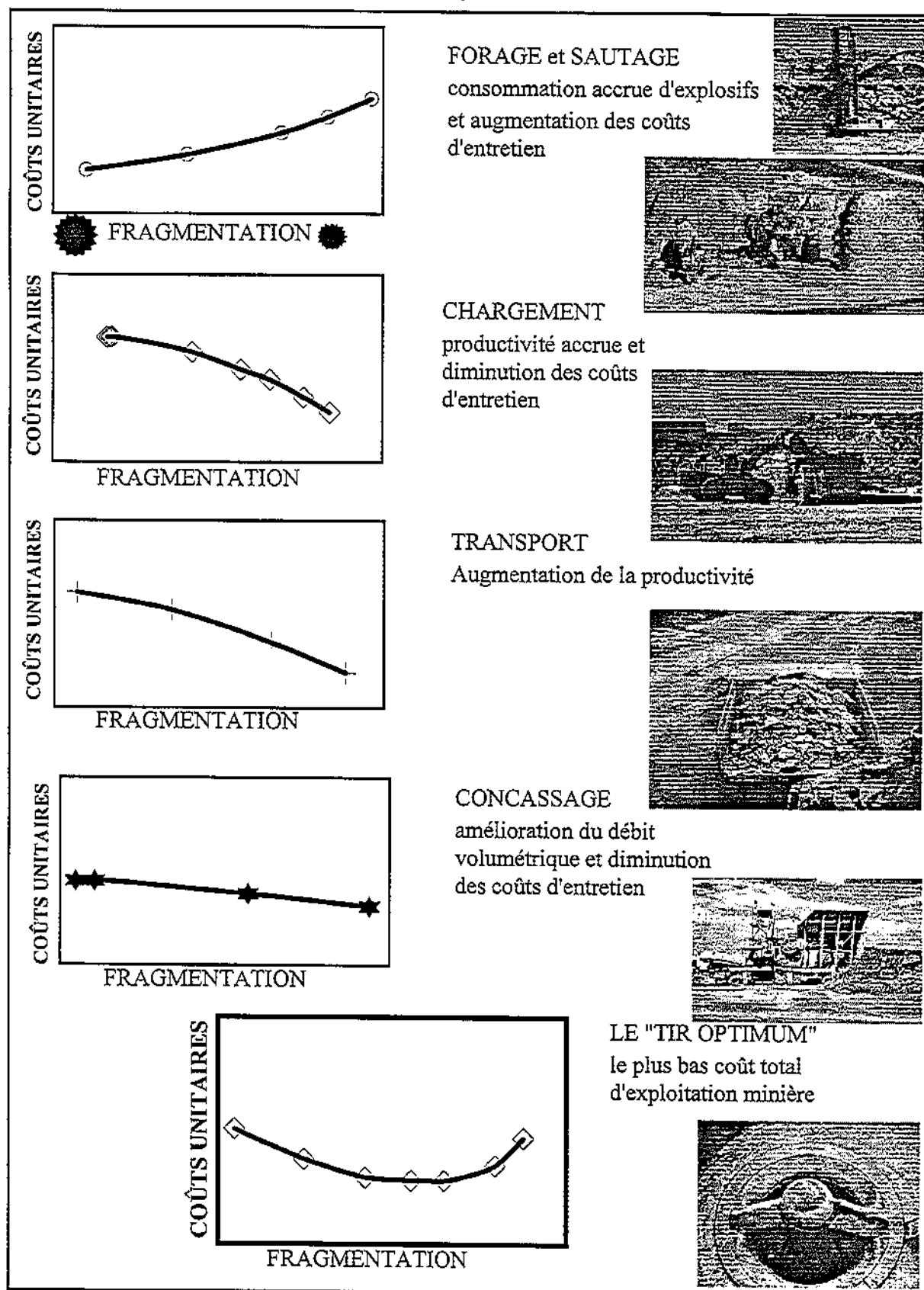


FIGURE 2: SEQUENCES DE TIR UTILISANT LE LOGICIEL SHOTPlus DE ICI

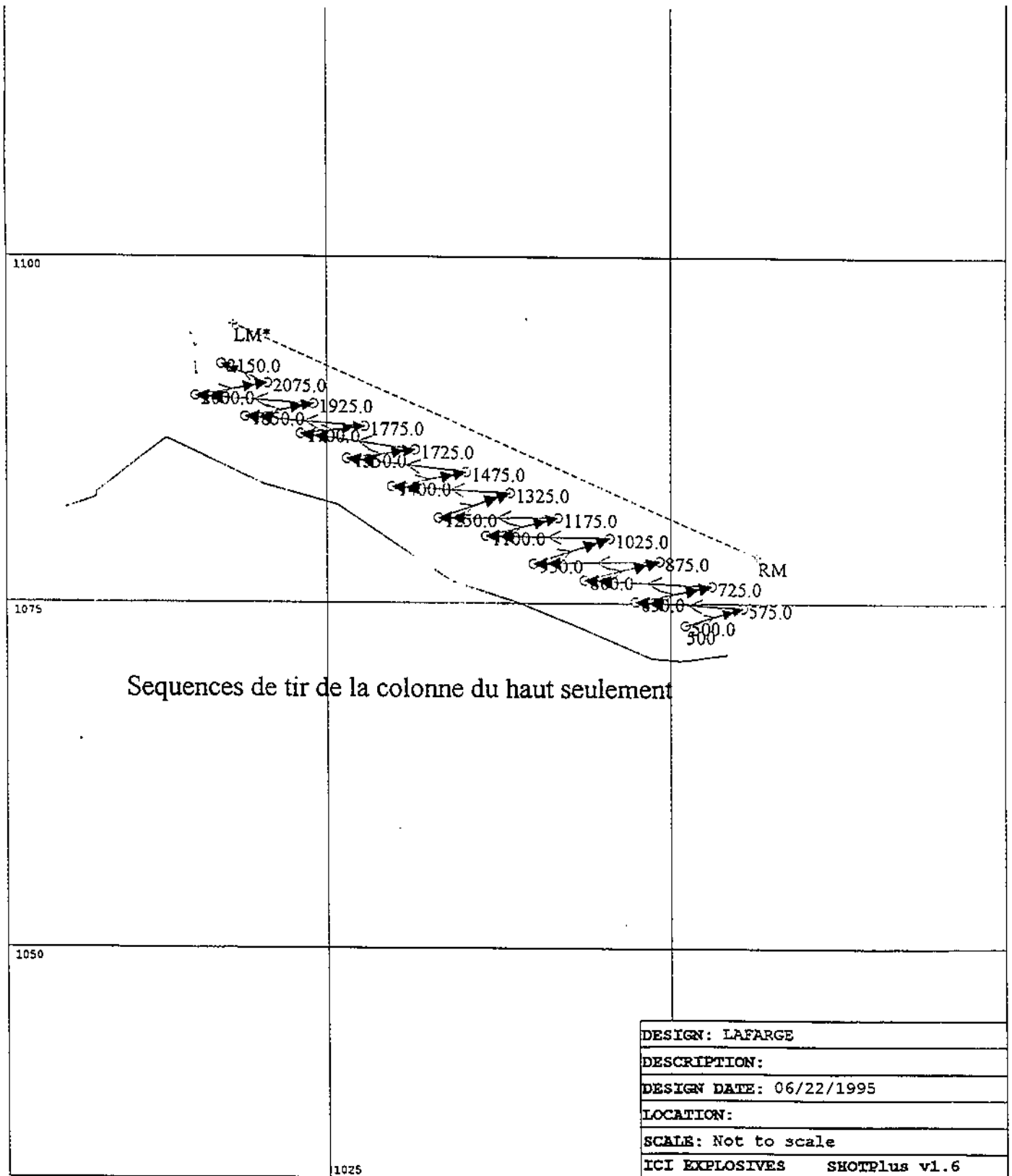


FIGURE 3: CYCLE TEMPORELLE DU CHARGEUR CATERPILLAR 992C

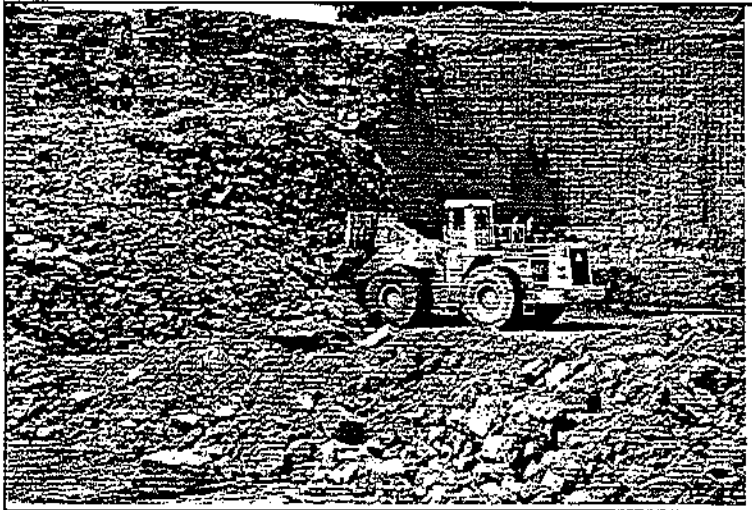


Photo 1: Chargement

Photo 2: Transport

N.B.: jalon jaune servant de point de repère

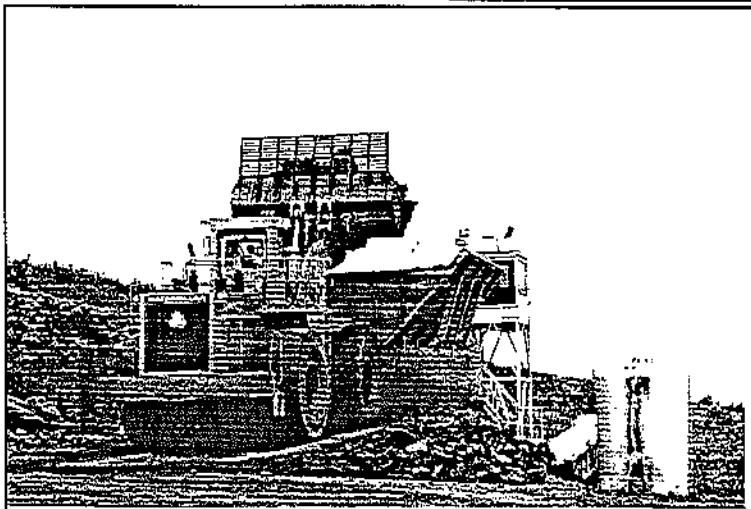
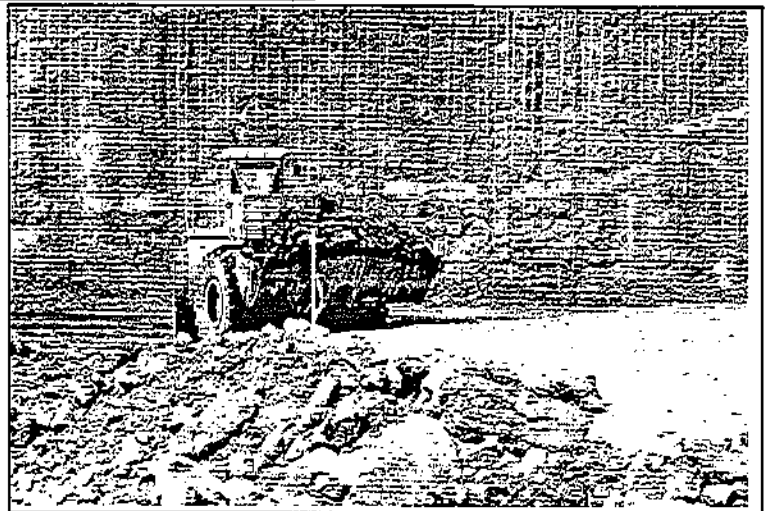


Photo 3: Déversement

FIGURE 4: CONFIGURATION DE TRANSPORT ENTRE LES DEBLAIS ET LE CONCASSEUR

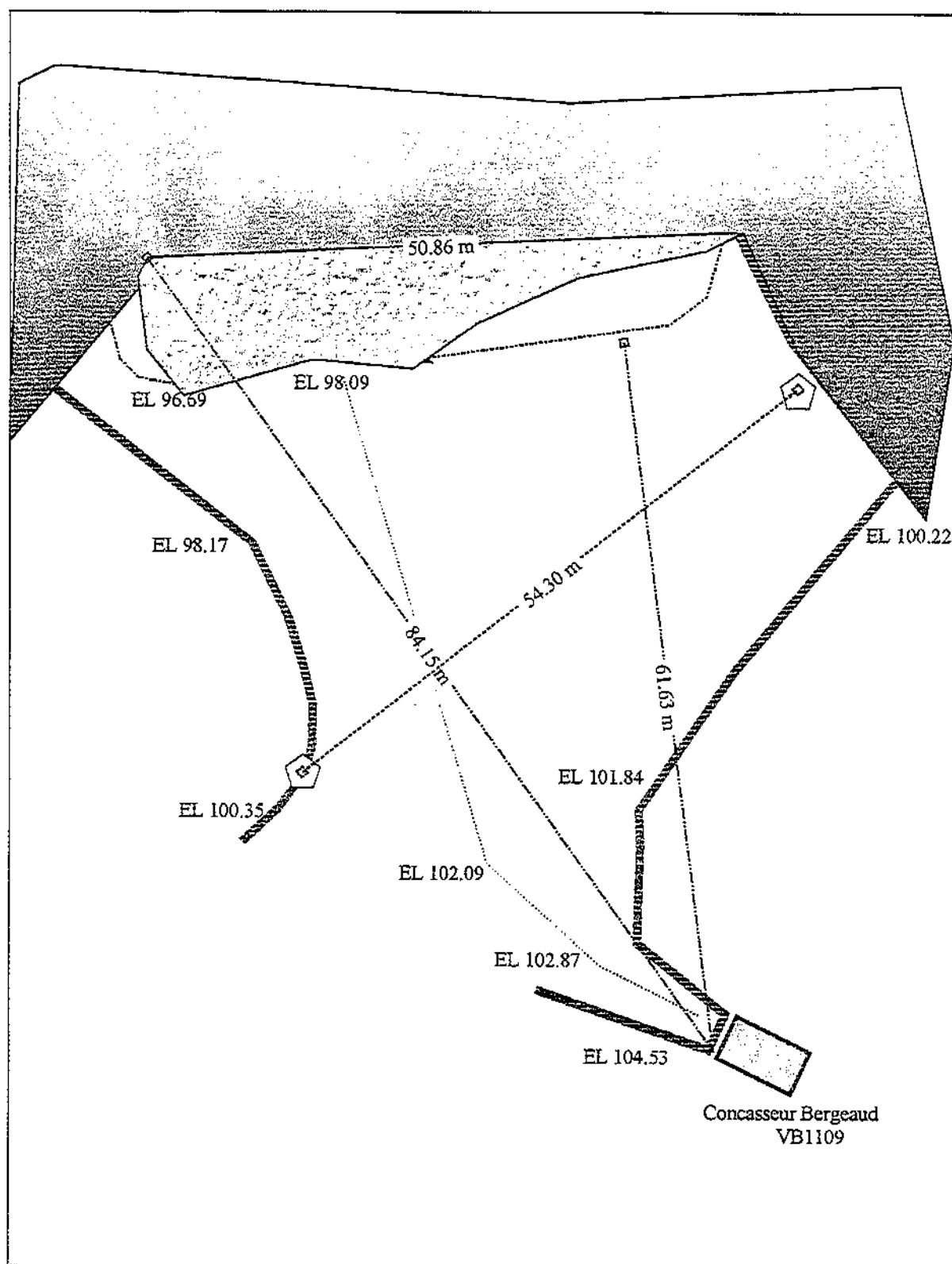


FIGURE 5: CONCASSEUR MOBILE BERGEAUD (NORDBERG) SÉRIE VB 11-09

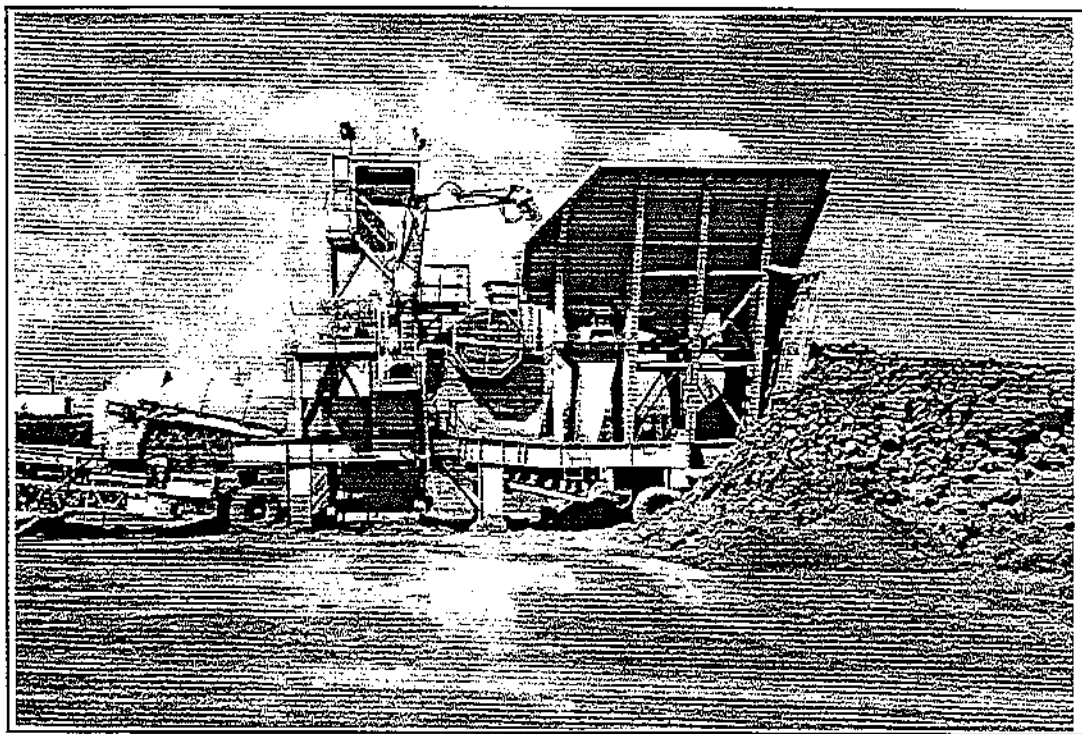


Photo 1

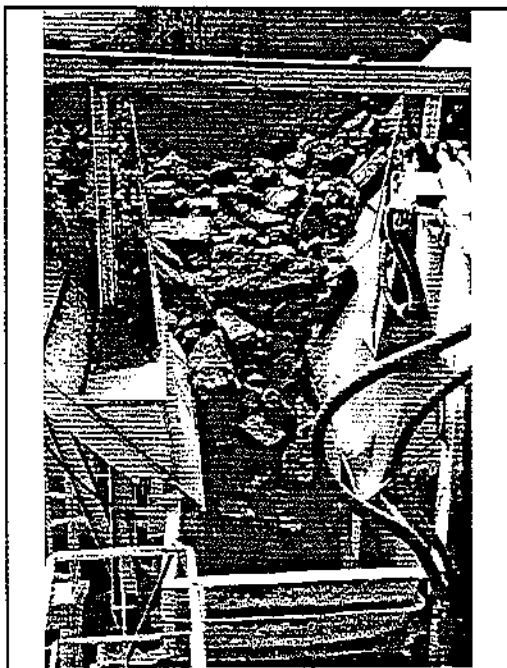


Photo 2

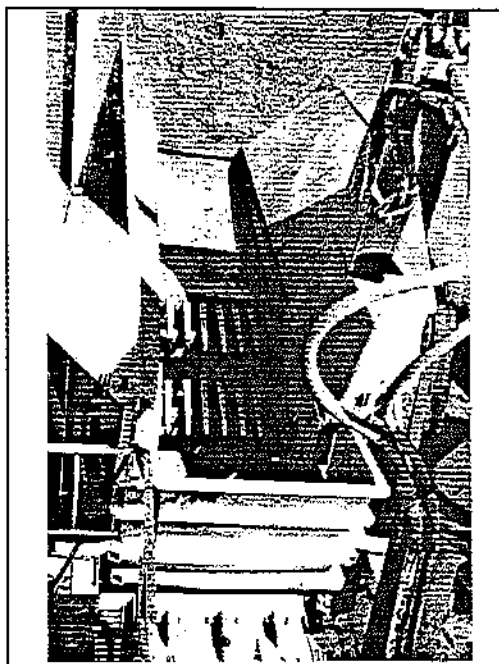


Photo 3

FIGURE 6: SÉQUENCES DE CALIBRATION DU SYSTÈME DE PESÉE LOADRITE

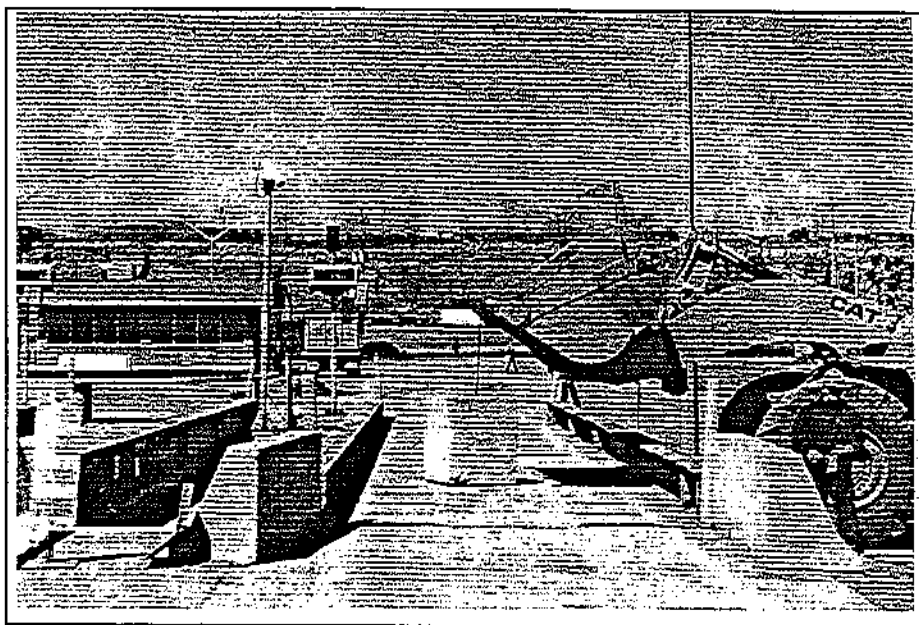


Photo 1: Calibration utilisant blocs de béton sur pont-bascule

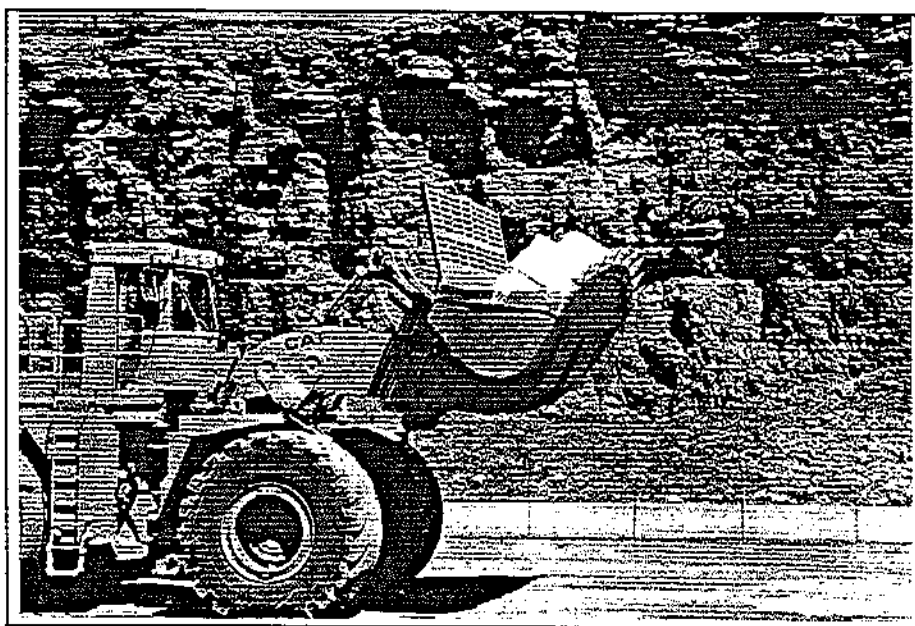


Photo 2: Vérification de calibration par levées de blocs de béton

FIGURE 7: COMPARAISON DE LA FRAGMENTATION POUR LA MÊME MASSE

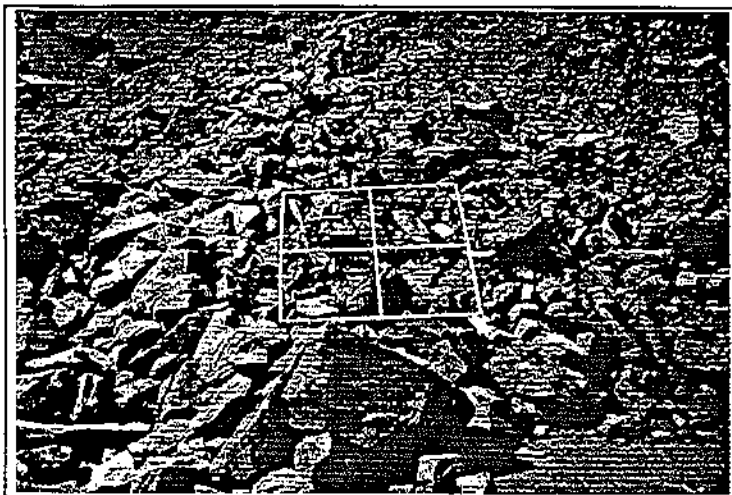


Photo 1: FragNDX = 5.82

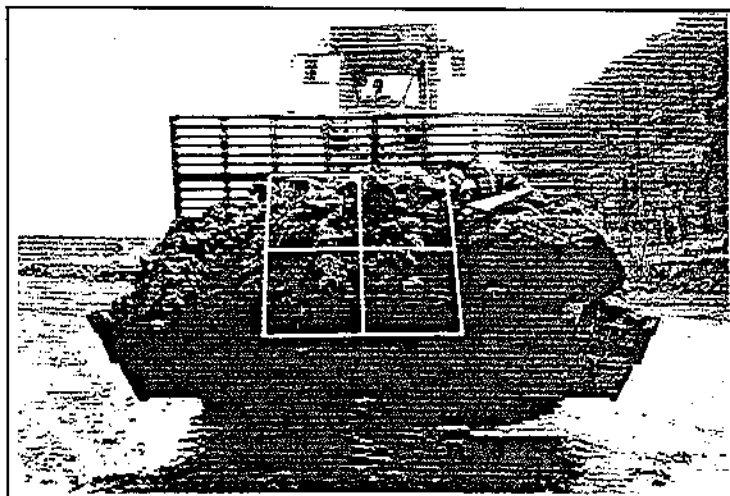


Photo 2: FragNDX = 5.48

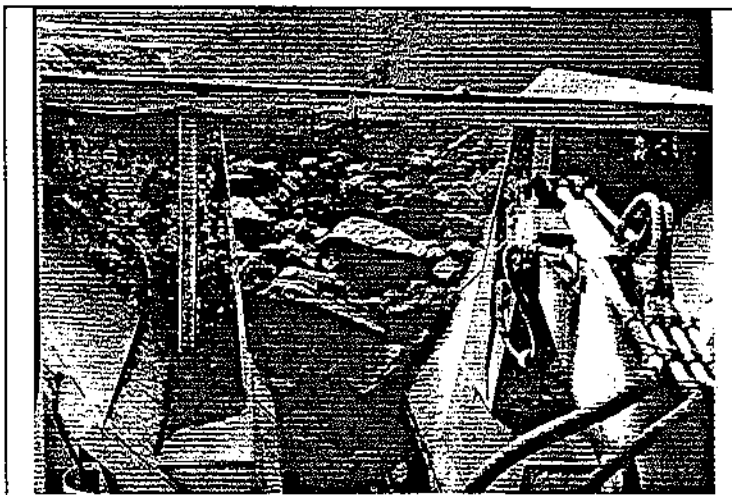


Photo 3: FragNDX = 6.55

FIGURE 8: TRACÉ DE LA MASSE DE BENNE CONTRE LE CYCLE TEMPOREL DE BASE

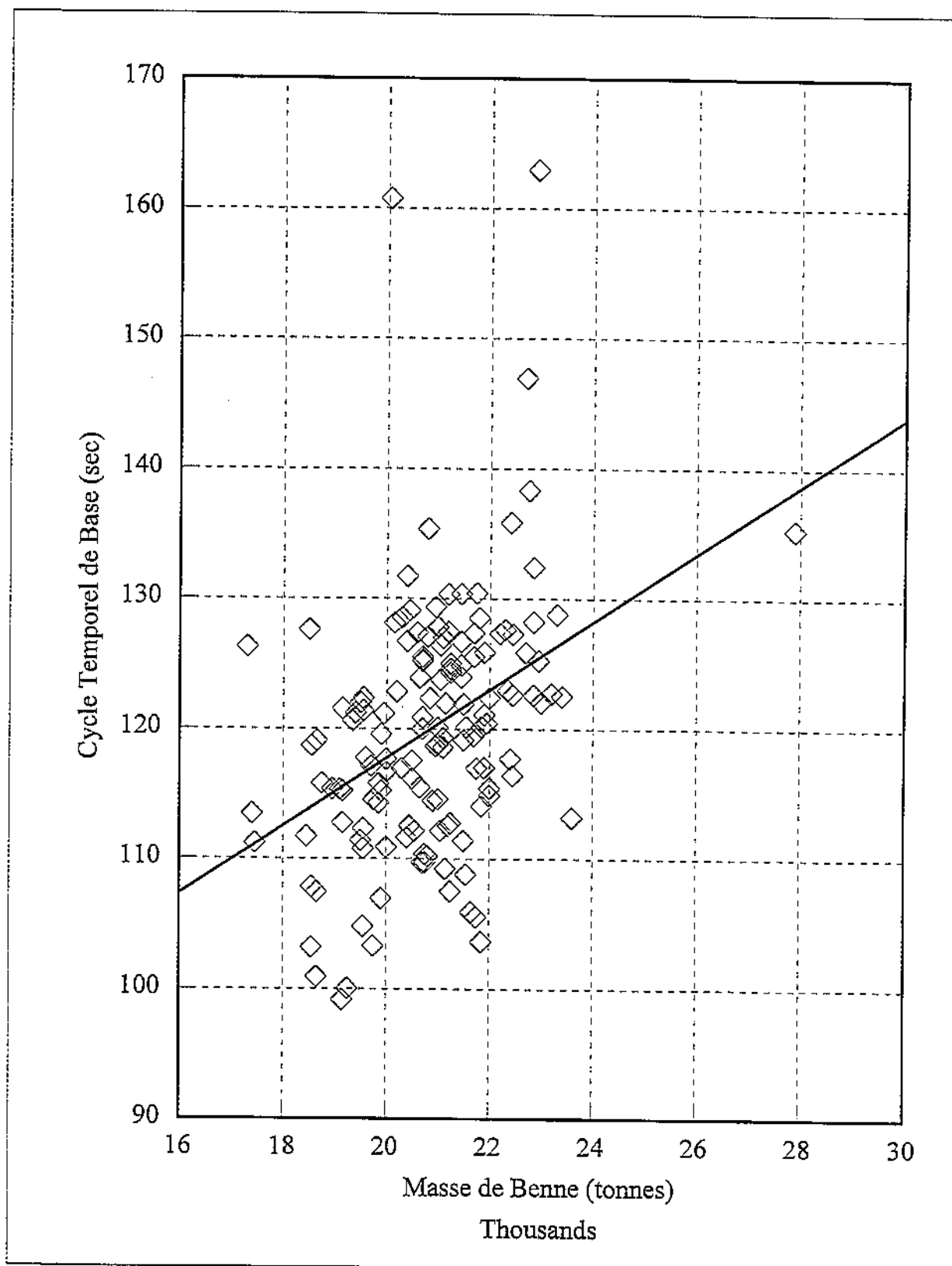


FIGURE 9: IMAGES GRAPHIQUE DE L'INDEX DE FRAGMENTATION

Photo 1: FragNDX = 5.0

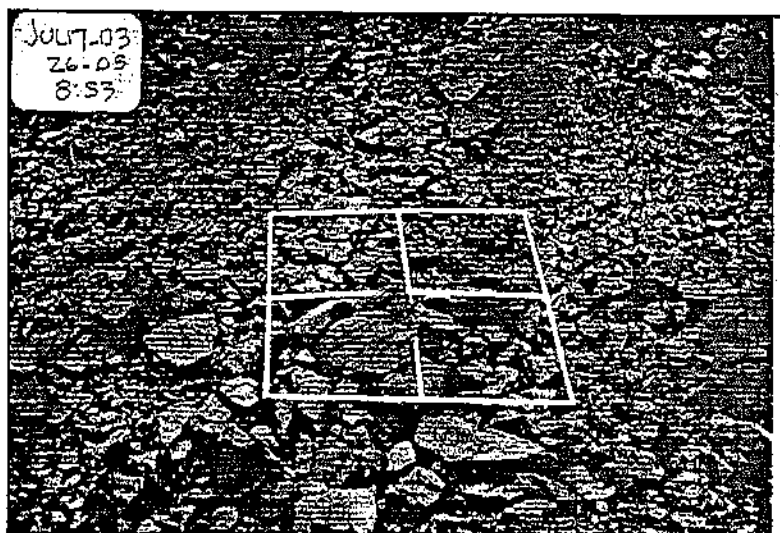


Photo 2: FragNDX = 6.0

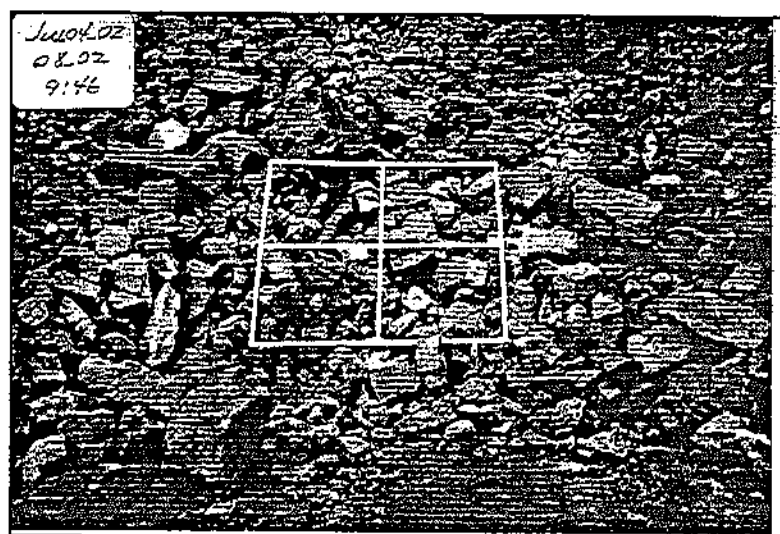


Photo 3: FragNDX = 7.0

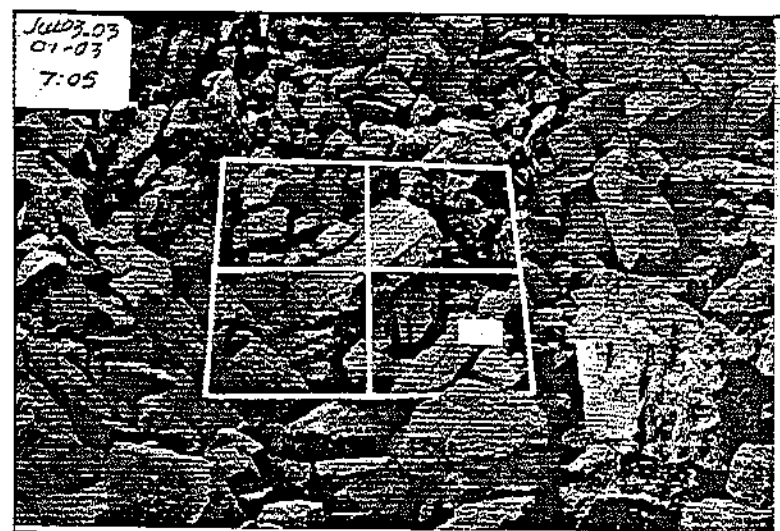


FIGURE 10: TRACÉS GRAPHIQUES DU "TEMPS DE BROYAGE"

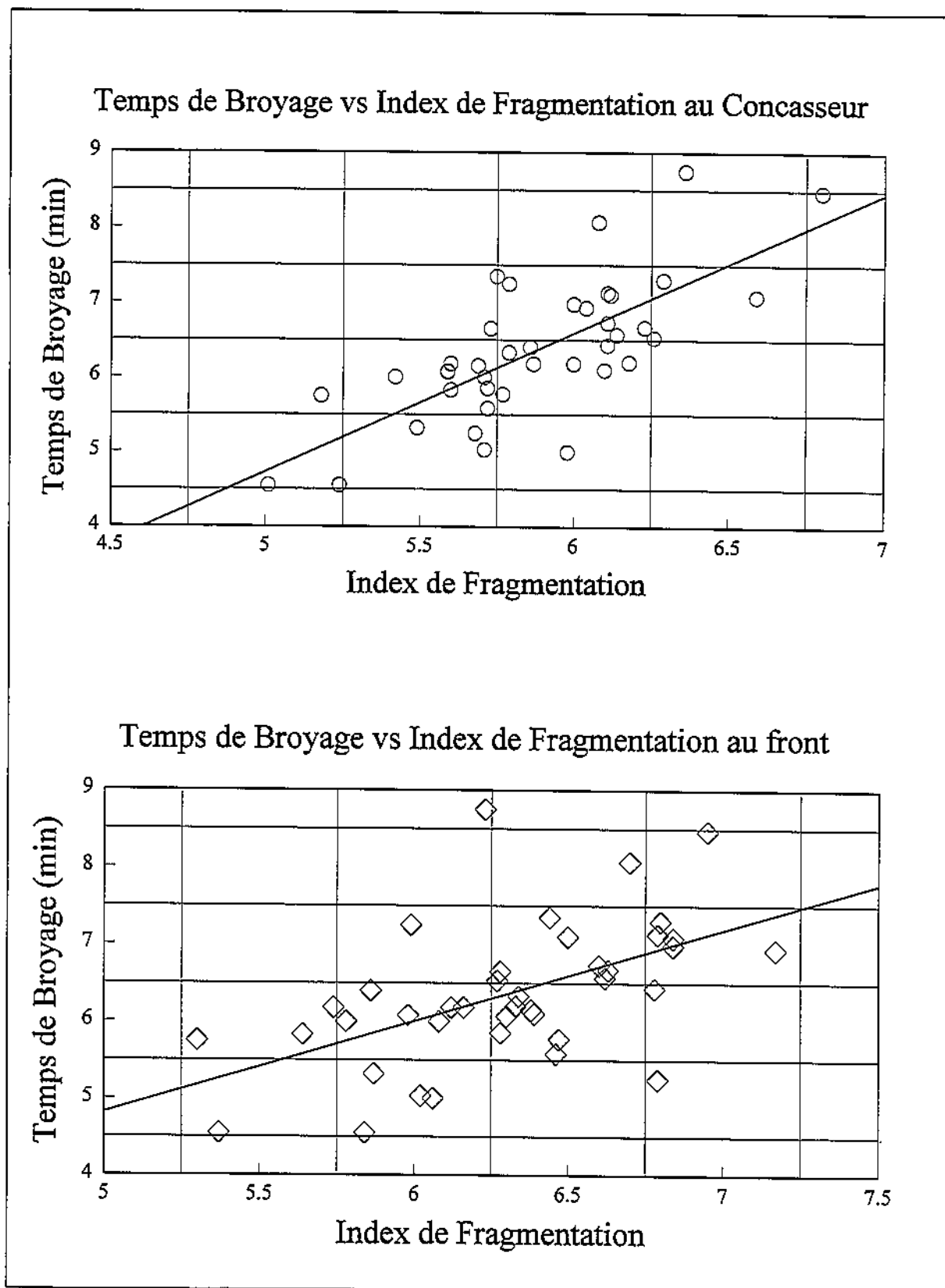
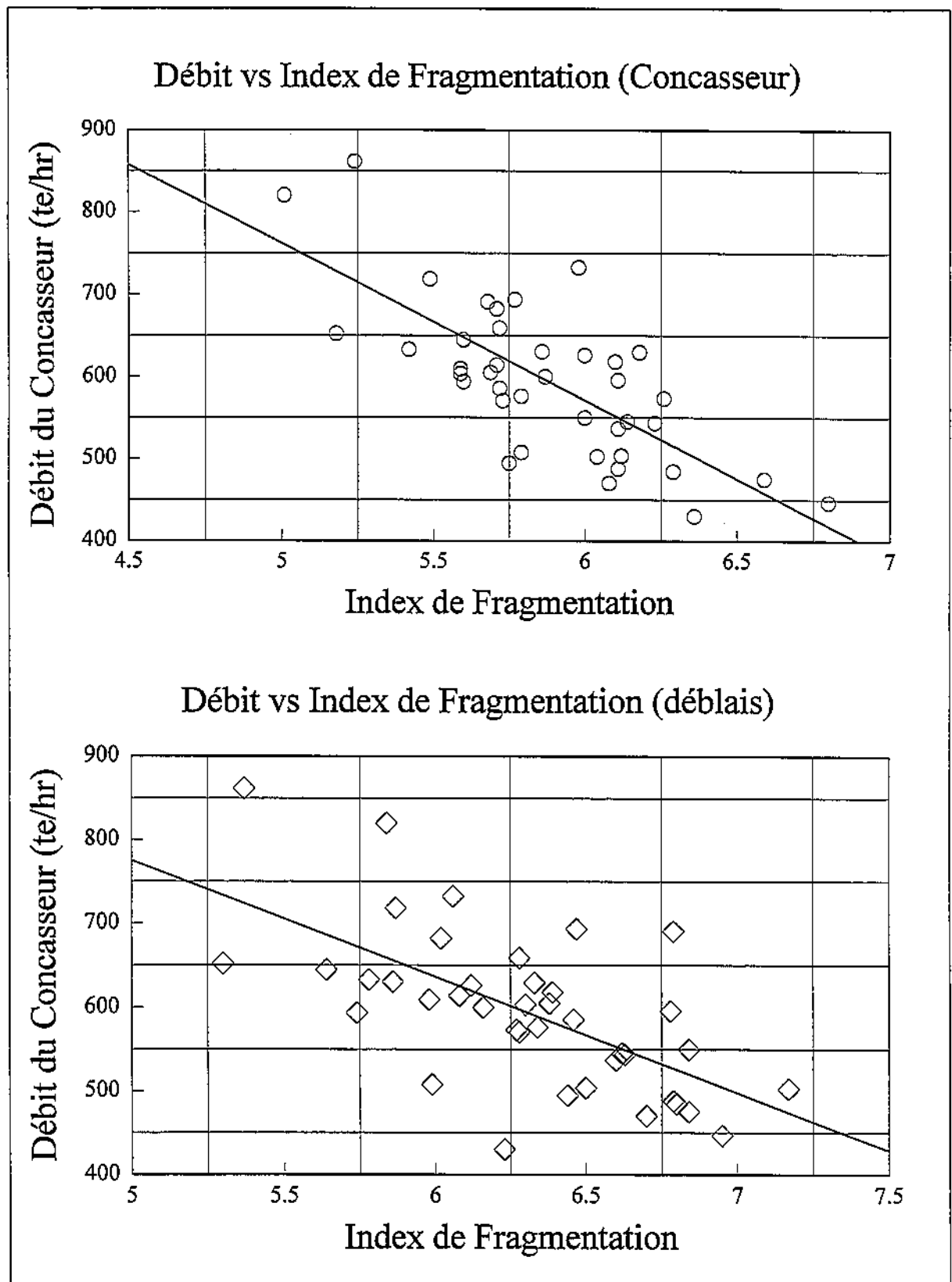


FIGURE 11: TRACÉS GRAPHIQUE DU DÉBIT DU CONCASSEUR



TABLEAUX

TABLEAU 1: PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES ROCHES

Roches	Densité (g cm ⁻³)	Vitesse Onde-P (m s ⁻¹)	Vitesse Onde-S (m s ⁻¹)	Rapport de Poisson	Module de Young (GPa)
Calcaire #1	2.6	5,130	3,080	0.22	60
Calcaire #2	2.63	5,200	3,235	0.18	65.5

TABLEAU 2: PROPRIÉTÉS DES EXPLOSIFS

Explosifs	Dimension (métric)	Densité (g cm ⁻³)	VDD (m s ⁻¹)	RWS	RBS
AMEX II	25 kg bags	0.84	3,700	100	100
Magnafrac 3000	50 x 200	1.13	5,100	93	125
Powermax 300	40 x 200	1.12	4,900	75	100
Handidet 25/500	9 m 12 m 21 m 25 m	colonne du haut, rangée 1&2 colonne du milieu, rangée 1&2 charge de fond, rangée 1 charge de fond, rangée 2			