

4e SESSION D'ETUDE
SUR
LES TECHNIQUES DE SAUTAGE

LA PRODUCTION DE PIERRES DE CARAPACE

par
Denis Dauphinais
CIL Inc.

INTRODUCTION

La pierre de carapace est généralement définie comme un enrochement grossier, irrégulier et durable utilisé comme protection des pentes contre l'érosion causée par l'action continue des vagues. Ce type de pierre est couramment utilisé dans la construction de barrages de retenue, brise-lames, jetées et routes côtières.

La variation dans les dimensions et le poids des enrochements requis est relativement grande et le problème majeur, au point de vue production, est d'obtenir les bonnes dimensions et les quantités requises et, ceci, avec un minimum de perte.

CLASSIFICATION

Les enrochements nécessaires pour contrecarrer l'effet érosif de l'eau peuvent être classifiés selon leur utilisation et leurs exigences.

PIERRE DE CARAPACE ("RIP RAP")

Ce type d'enrochement est employé pour la protection des pentes des routes côtières, canaux, barrages de retenue, etc. Il est disposé sur un filtre de sable et gravier utilisé pour prévenir la fuite du matériel de remplissage durant les périodes de marée descendante. La variation en dimensions et en poids passe du tamis no. 4 à 1 tonne et plus et la gradation devrait être assez régulière. Les dimensions des enrochements et l'épaisseur du filtre dépendent principalement de la hauteur et la vitesse des vagues.

PIERRE DE REMPLISSAGE POUR BARRAGES DE RETENUE

La pierre produite pour fins de remplissage varie d'une dimension minimum égale au tamis no. 4 jusqu'à un maximum de 10 tonnes. Elle est ordinairement jetée sur la partie supérieure du remblai et placée en position finale par déplacement hydraulique (mouvement des eaux). La pierre de remplissage doit permettre l'écoulement, comporter un pourcentage limité d'argile et de particules fines et des pièces rectangulaires sont préférables à des pièces minces et allongées.

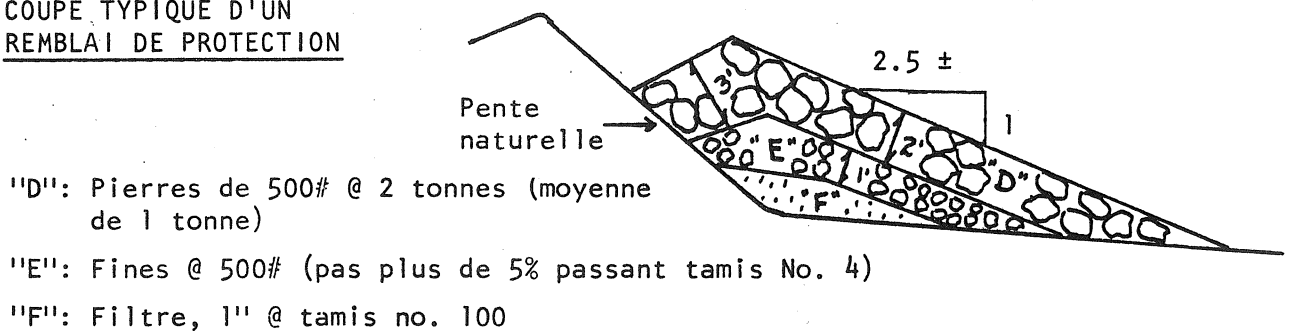
PIERRE DE CHARGE ("DERRICK STONE")

La pierre de charge est suffisamment grosse et, généralement, une grue est requise pour la déplacer. Le poids de ces enrochements peut varier de une demi-tonne jusqu'à plus de 10 tonnes. Ce type de pierre est utilisé aux endroits où la vélocité des eaux est élevée et la dégradation doit être évitée, tels les bassins situés à l'extrémité inférieure des évacuateurs de crues ou les canaux. La pierre doit être dure, de forme rectangulaire et résistante à l'abrasion.

PROTECTION DES PENTES COTIERES ESCARPEES

Les enrochements requis pour protéger les pentes côtières escarpées soumises à l'action érosive des vagues varient en dimensions des particules fines (tout venant) jusqu'à des pierres de 10 tonnes. Les pentes escarpées peuvent de plus subir un recul par des effondrements de terrain et afin de prévenir cette perte, on utilise un filtre de sable et gravier disposé sur la pente sous les enrochements.

COUPE TYPIQUE D'UN REMBLAI DE PROTECTION

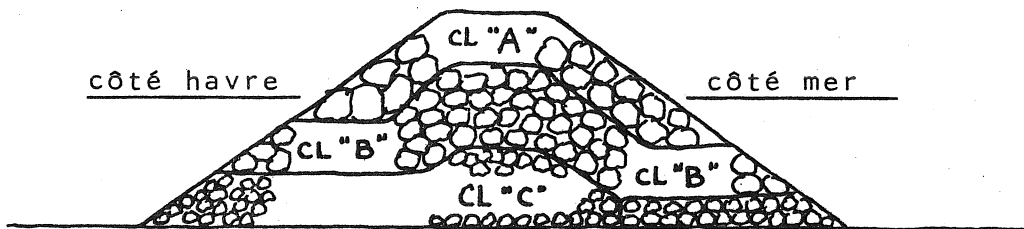


ENROCHEMENTS POUR BRISE-LAMES ET JETÉES

Les pierres de remblai utilisées pour les brise-lames et les jetées sont particulièrement difficiles à produire compte tenu de la quantité et du poids désirés. Ce type de structure comprend ordinairement trois zones ou plus. Le noyau central consiste de pierres de dimension variant du tamis no. 4 jusqu'à 1 tonne, communément désignées comme Classe C. La zone intermédiaire comprend des pierres de 1 à 7 tonnes et plus, i.e. de Classe B. La portion extérieure se compose d'enrochements variant entre 1 et 25 tonnes et comportant un poids moyen global de 12 tonnes. Cette section est classifiée de Classe A. On note que des pierres de 100 tonnes ont déjà été déplacées de 20 pieds et plus jusqu'à la partie supérieure du brise-lame sous l'action d'une mer déchaînée et le design d'une construction de ce type est basé principalement sur le poids requis du matériel de classe A pour résister à l'action soutenue de la "vague type". La dimension des enrochements de classe B et C requis ne doit pas être inférieure à un vingtième de la dimension des pierres formant la couche extérieure. Une pierre de poids spécifique variant entre 2.60 et 2.75 peut être disposée sur des pentes de 1.5:1 et 2:1.

Des pierres de poids inférieur doivent être placées sur des pentes plus faibles d'où une quantité requise supérieure.

COUPE TYPIQUE D'UN BRISE-LAME



Classe "A" : Pierres de 6 tonnes au minimum
Moyenne de 10 tonnes

Classe "B" : 200# minimum dont 50% d'un poids de
1500# et plus

Classe "C" : Fins @ 1000# dont 50% d'un poids de
200# et plus

CHOIX D'UN SITE D'EXPLOITATION

Certains facteurs sont prédominants dans le choix d'un emplacement propice à la production de pierre de carapace.

La sélection demande une évaluation des sites considérés comportant des tests en laboratoire mais surtout quelques sautages pilotes du matériel envisagé.

Les caractéristiques d'un enrochement requis dans les types de construction mentionnés précédemment sont les suivantes:

- 1) Poids spécifique élevé.
- 2) Durabilité et résistance à l'abrasion élevées.
- 3) Résistance à la désagrégation par l'air, l'eau et le gel et dégel.
- 4) Dimensions variant du tamis no. 4 jusqu'à des blocs pesant plus de 25 tonnes. → 3/4"
- 5) La plus petite dimension des blocs fragmentés ne doit être, en aucun cas, inférieure à un tiers (1/3) de la plus grande dimension.

L'exploitation d'une source potentielle débute généralement par la recherche d'une carrière présentement en exploitation ou abandonnée car, habituellement, des données sur le roc en place sont déjà disponibles et de plus, les données recueillies peuvent être utilisées avec succès pour évaluer un roc de caractéristiques similaires situé dans un rayon de plusieurs milles.

Géologiquement, les meilleurs sources d'enrochements sont le roc igné à grains grossiers (granite), massif, le roc igné à grains fins (basalte), le roc métamorphique massif (néphrite) et le roc sédimentaire massif (grès et calcaire). Les fractures inhérentes seront largement espacées et les grains minéraux devront être bien entrecroisés et cimentés. Généralement, on peut qualifier d'inacceptable les schistes, les grès à lits minces, le roc soluble et de poids spécifique faible. De plus, il est évident qu'un roc très fracturé, laminé, à lit mince ou cisailé ne donnera pas les résultats escomptés.

COURBE GRANULOMETRIQUE DE L'ENROCHEMENT

(COUPE TYPE - SAUTAGE NORMAL-)

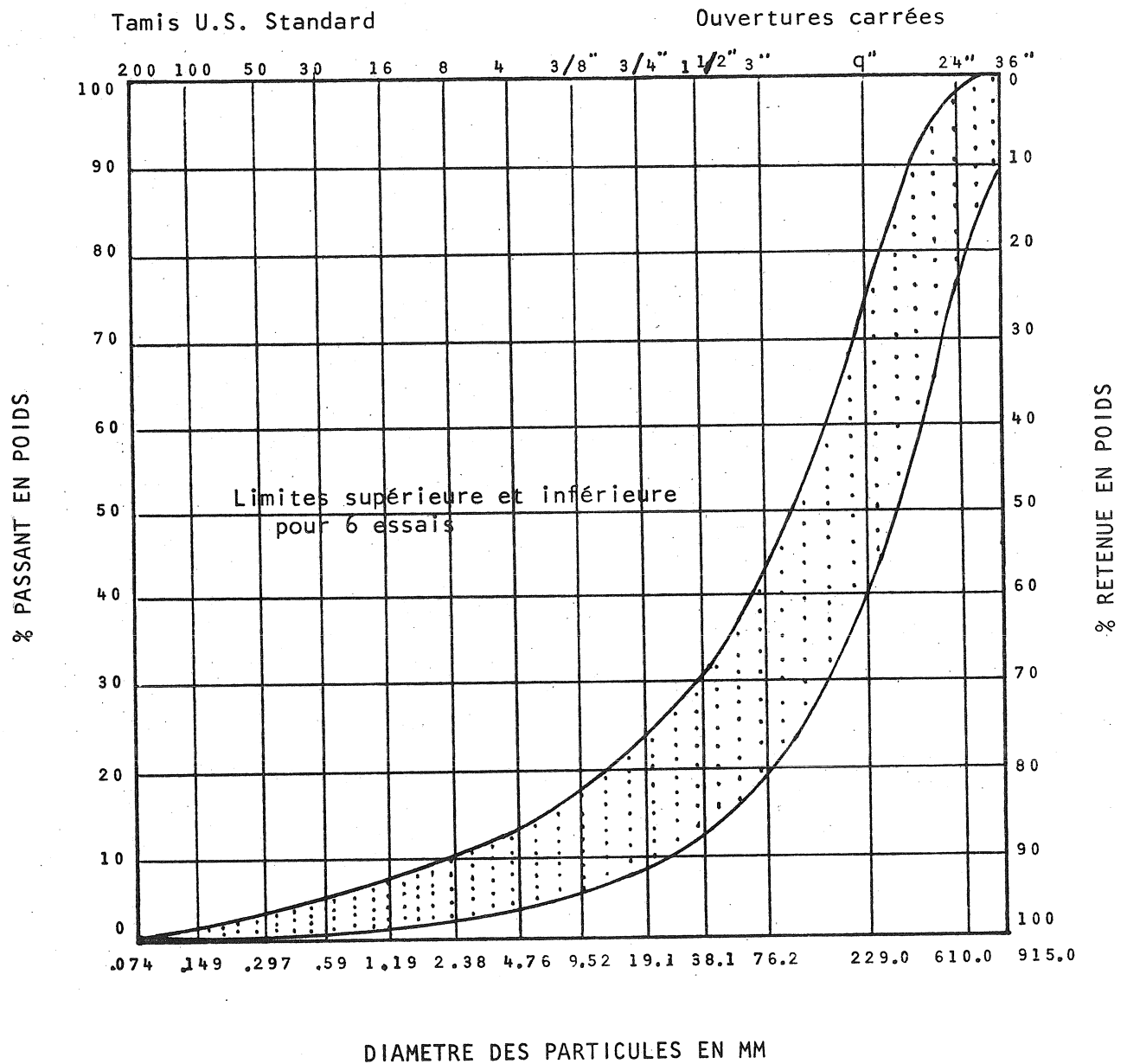
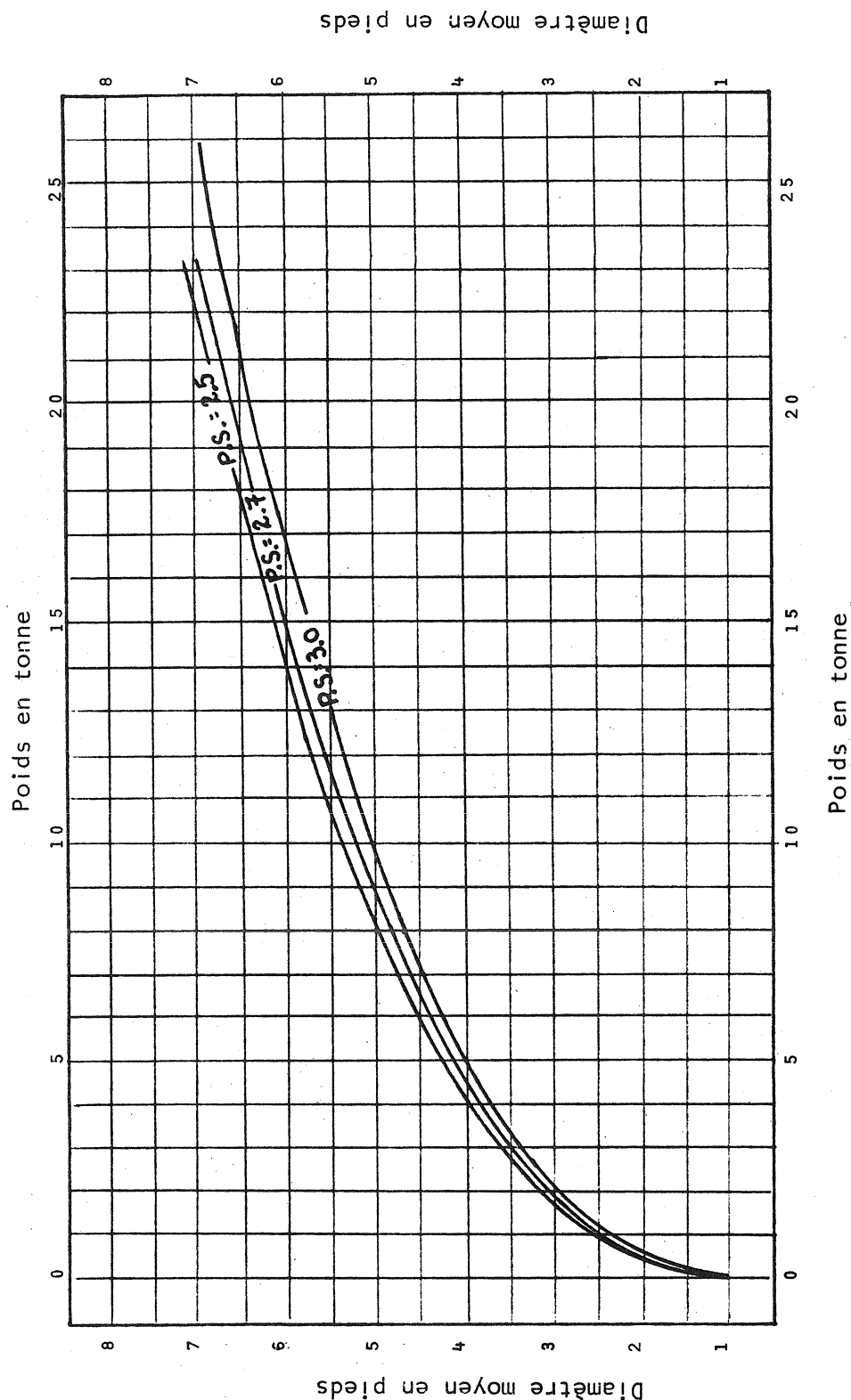


DIAGRAMME COMPARATIF ENTRE DIMENSION ET LE POIDS DE GROS

ENROCHEMENTS BASE SUR LE DIAMETRE DE ROC BRISE



Dimensions et poids de gros enrochements: Le volume est établi à mi-chemin entre un cube et une sphère et est égal à 82% du volume d'un cube.

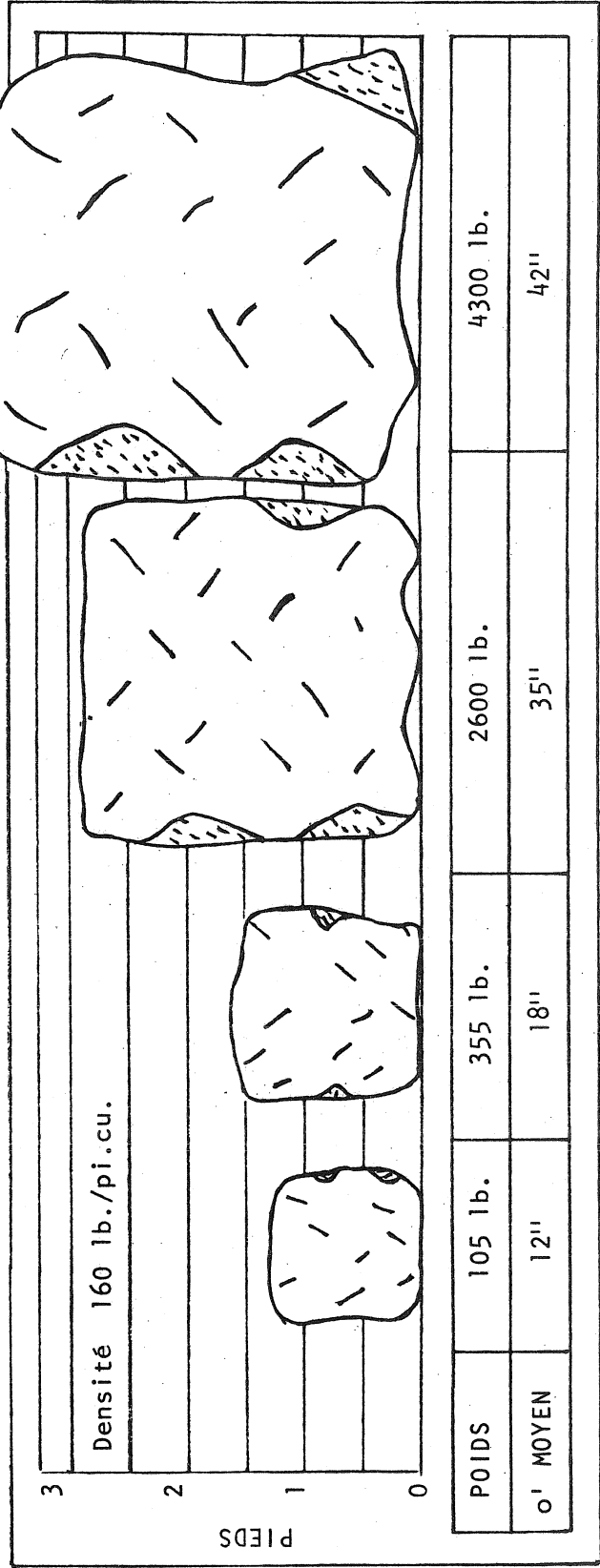
SPECIFICATIONS POUR L'ENROCHEMENT "A" (PIERRE DE CARAPACE) ET L'ENROCHEMENT "B" (TOUT VENANT)

(Tirées d'un devis du Ministère des Transports du Québec)

- 1- Poids spécifique minimum 2.5
- 2- Absorption maximum (en %) 2.0
- 3- Durabilité (pour 5 cycles de $Mg.SO_4$)
 - maximum de perte (en %) 10
 - nombre pétrographique maximum 150
- 4- La plus longue dimension ne doit pas excéder 1.5 fois la moyenne des deux autres dimensions de la pierre.
- 5- Si la pierre est de nature sédimentaire, la présence de microlits de schiste ou autre matériau gélif la rend inacceptable.

DETERMINATION DE LA DIMENSION ET DU POIDS DES GROS BLOCS EN FONCTION DU DIAMETRE DU ROC DYNAMITE

- 12 -



EXPLOITATION

Une connaissance des conditions qui permettront d'obtenir la dimension désirée des enrochements affecte l'organisation et l'aspect économique entier d'un projet d'exploitation.

Certains facteurs prépondérants affectent la fragmentation soit:

- 1) la qualité du roc
- 2) la charge spécifique
- 3) le fardeau
- 4) l'espacement
- 5) la séquence d'initiation
- 6) la distribution de la charge

Le premier problème rencontré entre en relation directe avec la formation rocheuse. Que la formation rocheuse soit favorable ou non, il est pratiquement impossible de déterminer précisément, d'après l'examen géologique préliminaire du terrain, les classes de matériaux et les quantités de chacune qui pourront être produites du type de formation rencontré. Le problème principal du contracteur, au moment

de la soumission, est d'établir la quantité de pertes obtenues selon la méthode d'exploitation envisagée. Bien que l'on puisse produire de certaines carrières propices, possédant la formation rocheuse requise, une quantité plus grande de pierres d'enrochement de grosseur appréciable, il est cependant très rare d'obtenir plus de 20% de pierres de dimension acceptable pour une série de plusieurs dynamitages.

Il devient donc très important de prendre en considération tous les facteurs affectant la fragmentation, mentionnés précédemment et de concevoir des patrons de forage et des modes de chargement adéquats afin d'obtenir un résultat optimum.

PHASE INITIALE : DEVELOPPEMENT

En considérant le site potentiel possédant la qualité de roc ainsi que le volume requis, il faudra procéder au décapage de la zone. Il serait très avantageux d'utiliser tel que mentionné précédemment dans la section "Choix d'un site d'exploitation", un site où une face naturelle existe

déjà afin de réduire au minimum la phase préliminaire de forage et dynamitage pour créer celle-ci.

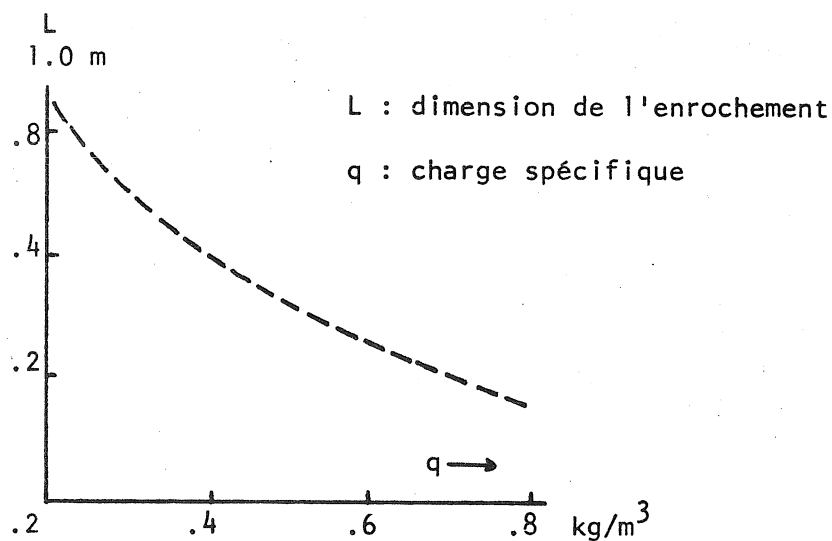
Toutefois, en cas contraire, la préparation du banc d'exploitation est généralement effectuée en utilisant des trous de 2 1/2 ou 3 pouces de diamètre et des méthodes de forage et de chargement conventionnelles. La hauteur du front de taille envisagée dépend cependant principalement du diamètre de trou qui sera utilisé pour les sautages de production donc de l'équipement disponible.

Généralement, si des trous de 2 1/2 ou 3 pouces de diamètre sont utilisés, le front de taille ne devrait pas excéder 40 pieds afin de favoriser une précision de forage optimale. Des trous de 3 1/2 à 5 pouces de diamètre nécessiteront la création d'un front de taille de 40 à 60 pieds de hauteur. Il est à noter que des bancs de hauteur inférieure à 30 pieds sont très défavorables à la production de ce type d'enrochements.

EXPLOITATION DE LA MASSE

Dans la production de pierre de carapace, il s'agit d'obtenir une fragmentation très grossière et de ce fait, les principes de base utilisés dans la production normale d'une carrière se trouvent en quelque sorte inversés.

Le premier facteur à considérer est la charge spécifique qui doit être basse. On peut grossièrement établir une relation entre la charge spécifique et la dimension des enrochements obtenus. En se référant au graphique illustré ci-dessous, on remarque clairement l'influence d'une charge spécifique faible sur la fragmentation obtenue.



DIMENSION DES ENROCHEMENTS EN FONCTION DE LA CHARGE SPECIFIQUE
POUR UN SAUTAGE NORMAL

Le fardeau et l'espacement sont d'autres facteurs prépondérants à considérer. Ces deux éléments doivent être déterminés de façon à obtenir un rapport fardeau/espacement élevé de manière à obtenir un maximum d'enrochements de dimensions requises. Le rapport généralement recommandé varie entre 1.8 et 2.5 et, pour fins de comparaison, on peut se référer aux opérations normales de sautage où ce facteur est toujours inférieur ou égal à 1.0.

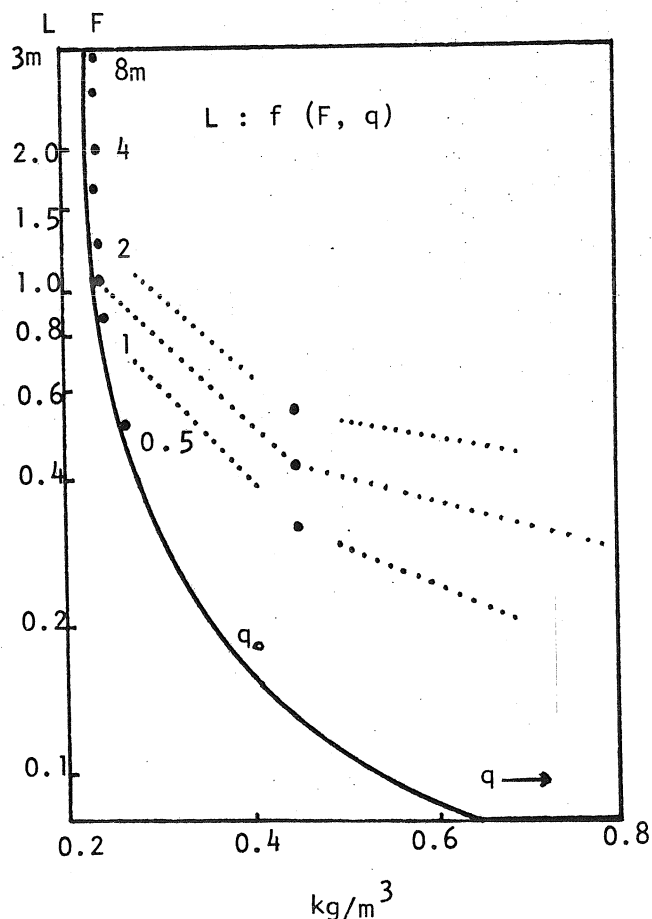
Le graphique illustré ci-dessous illustre la relation entre la dimension moyenne de l'enrochement obtenu et une charge spécifique faible et un fardeau élevé.

DIMENSION MOYENNE DE
L'ENROCHEMENT EN FONCTION
DU FARDEAU ET DE LA CHARGE
SPECIFIQUE

q_0 : charge minimum

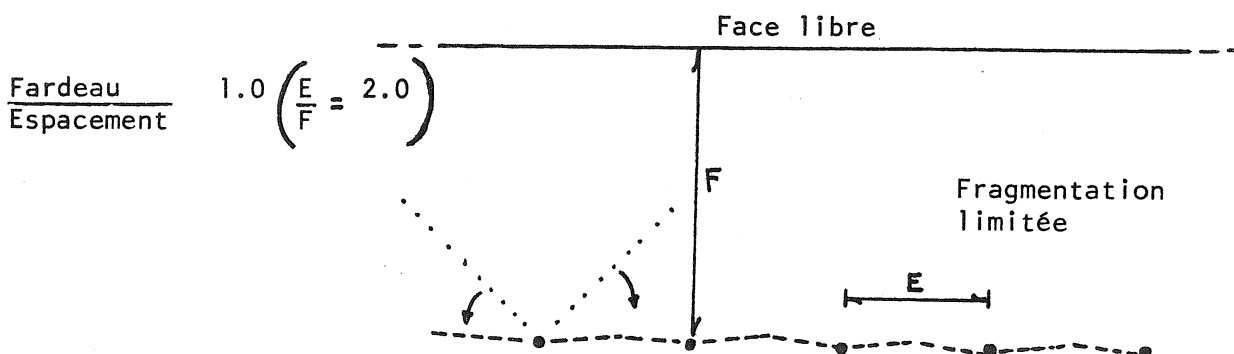
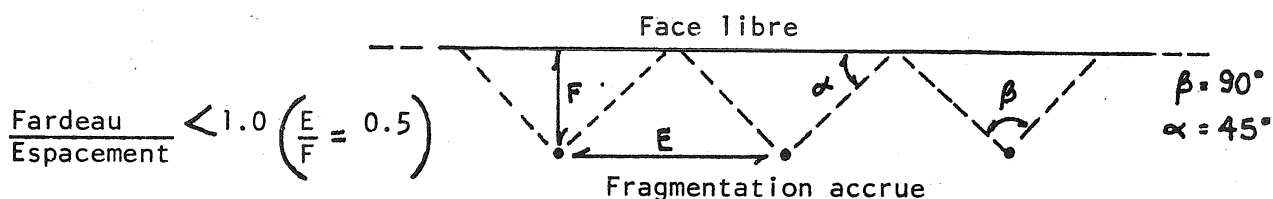
L : dimension moyenne
de l'enrochement

F : fardeau



Le choix de rapport fardeau/espacement supérieur à 1.0 est basé sur l'angle de rupture théorique d'un trou de sautage. Il est établi que cet angle de rupture, pour un rapport fardeau/espacement normal, i.e. inférieur à 1.0, est d'approximativement 45° par rapport au front de taille à partir du trou de sautage. Ceci favorise la fragmentation étant donné l'interaction des lignes de rupture émanant des trous adjacents. En utilisant un fardeau supérieur à l'espacement, les lignes de rupture créées dans le roc s'orienteront dans les directions où les contraintes sont les moins élevées c'est-à-dire vers les trous de sautage adjacents et vers la surface favorisant ainsi un effet de cisaillement. De plus, un espacement rapproché entre les trous de sautage diminue la zone d'influence des lignes de rupture.

DIAGRAMME - LIGNE DE RUPTURE



METHODE D'INITIATION

Dans ce type d'opération, la méthode appropriée consiste à effectuer le sautage d'une seule rangée à la fois instantanément. Cette procédure a pour but d'éliminer les interactions entre les trous causées par les détonations subséquentes, car celles-ci résulteraient en une fragmentation accrue et indésirable. De plus, étant donné l'utilisation d'une faible charge spécifique, le fait de procéder au sautage de plus d'une rangée risquerait de produire des irrégularités au niveau du plancher.

Durant un sautage instantané, la pression des gazs de plusieurs trous faiblement espacés agit uniformément et la face libre se déplace vers l'avant avec un minimum de déformation et des contraintes réduites de cisaillement, de fléchissement et de tension. Evidemment, une grande contrainte sera produite suivant la ligne de trous, cet effet de cisaillement étant initialement recherché. Il est recommandé, de plus, d'utiliser des détonateurs possédant un temps nominal de détonation court et préférentiellement des détonateurs instantanés de manière à favoriser l'uniformité des effets

mentionnés précédemment. Etant donné le facteur d'erreur théorique, fixe à 10%, sur le temps nominal de détonation des détonateurs disponibles sur le marché présentement, le fait d'utiliser des détonateurs possédant un temps nominal élevé risquerait de briser cette uniformité et favoriser l'effet d'interaction et, de ce fait, obtenir une fragmentation accrue donc une quantité excessive de particules fines.

DISTRIBUTION DE LA CHARGE

Le principe de base, dans la production de la pierre de carapace, est de détacher une épaisseur de roc de la masse qui se déplacera vers l'avant et s'effondrera avec un minimum de fragmentation.

Pour arriver à ce résultat, la charge devra être distribuée de façon à obtenir un bon dégagement au niveau du plancher et provoquer un effet de cisaillement entre les trous.

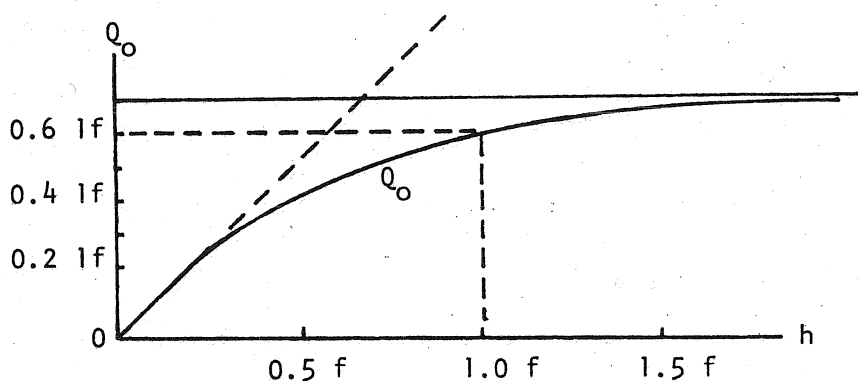
Etant donné le fardeau imposant de chaque trou, une charge de fond puissante est requise afin de bien fracturer le

plancher et provoquer un déplacement adéquat de la masse.

Considérant une hauteur arbitraire du front de taille, la charge de fond devra être établie en relation directe avec le patron de forage et le diamètre de trou sélectionnés. La charge de fond ne devrait normalement pas excéder, en hauteur au dessus du plancher, la dimension du fardeau car l'effet de brisance disponible est alors à son maximum. Une hauteur excessive de la charge de fond aurait comme effet de produire une fragmentation accrue dans la région de la colonne sans augmenter la puissance disponible au fond.

En se référant au graphique illustré ci-dessous, on peut se rendre compte de la relation existant entre la hauteur de la charge de fond et l'effet de brisance. Sur cette courbe, l'effet produit est représenté par Q_0 qui est en relation avec le fardeau ("f") et la concentration linéaire de la charge ("l"). On remarque que lorsque la hauteur

atteint la valeur "f", un accroissement supérieur apporte une augmentation négligeable.



Capacité de brisance de la charge de fond en fonction de la hauteur de la charge (h) et de la concentration de charge (l).

Q_o représente une charge concentrée au fond donnant le même effet qu'une charge étendue lh .

Le sous-forage devrait être normalement égal à un tiers ($1/3$) de la dimension la plus grande du patron de forage, soit le fardeau dans ce cas précis. Toutefois, la dimension du sous-forage peut sensiblement varier selon les conditions particulières du roc rencontré.

En considérant l'ensemble de ces facteurs, la hauteur de la charge de fond devrait être égale à approximativement 1.3 fois la dimension du fardeau. De ce fait, étant donné que la concentration de charge par unité de longueur varie avec le diamètre utilisé, le choix du fardeau maximum est en relation directe avec le diamètre de celui-ci.

Le but principal est d'obtenir un facteur de chargement, au niveau du plancher, assez élevé pour permettre une bonne fracturation et un bon dégagement de la masse. En négligeant cet aspect important, on risque de provoquer un déplacement de la masse sans un effondrement adéquat de celle-ci. On peut se retrouver ainsi devant un front de taille de hauteur appréciable, en condition de grande instabilité, ce qui représente une situation particulièrement insécuritaire.

La charge de fond tend à contribuer à fragmenter le roc dans la région de la colonne. De ce fait, il est préférable de séparer celle-ci de la charge de colonne par une épaisseur de sable de l'ordre de 3 à 4 pieds. Cette procédure aura pour effet de confiner la charge au fond du trou et d'accentuer

l'effet de brisance au niveau du plancher.

Il est relativement facile de fracturer le roc suivant la ligne de trous et une charge légère est requise. Afin d'obtenir de bons résultats, des explosifs de diamètre de l'ordre de la moitié du diamètre du trou sont utilisés et la quantité exacte requise sera déterminée par essais successifs et évaluation des résultats.

L'emploi d'espaceurs dans la colonne donne des résultats satisfaisants. Toutefois, la méthode idéale est de former une colonne continue d'explosifs tout en conservant la charge appropriée. Ceci est possible en diminuant le diamètre de l'explosif utilisé. L'énergie est ainsi distribuée uniformément en tous points de la colonne provoquant un meilleur effet de cisaillement. Une ligne de cordeau détonant peut aussi être insérée dans la colonne afin d'augmenter cet effet.

Il est important de mentionner que l'utilisation d'un agent de sautage n'est pas recommandée comme charge de colonne. Son utilisation, étant donné sa nature libre, crée une

surcharge qui produira une fragmentation indésirable.

Etant donné que nous tentons de cisailer le roc d'un trou à l'autre, la charge de colonne requise peut être basée sur un facteur d'environ 0.10 livre par pied carré.

La longueur du collet requise dépend de la formation rocheuse. Toutefois, une longueur de collet égale à environ 20% de la longueur du trou est applicable. Une dimension accentuée du collet favorisera la production d'enrochements de bonne dimension et réduira la possibilité de projection de roc.

CONCLUSION

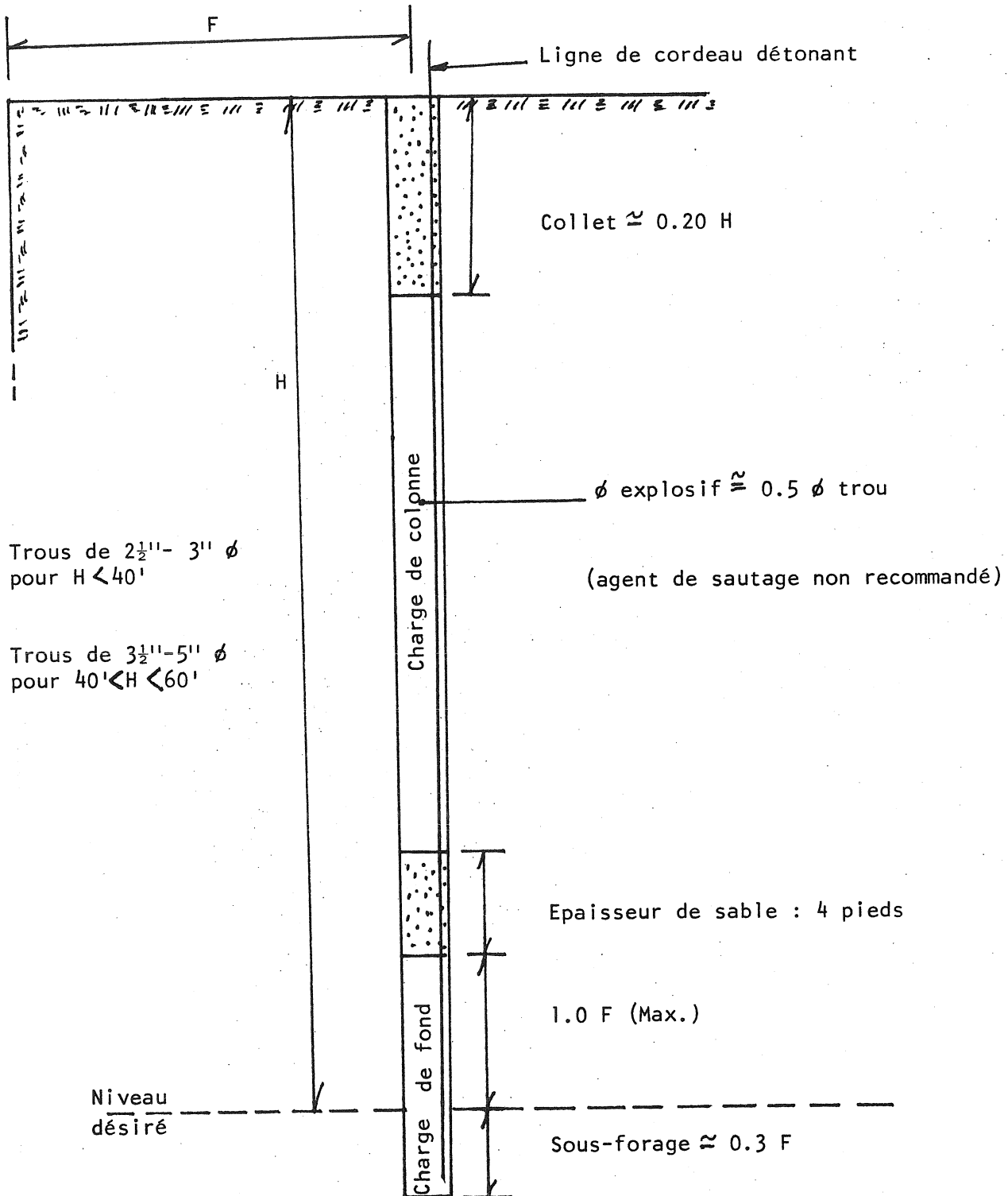
La production de pierre de carapace demande une excellente planification. Il faut considérer plusieurs facteurs importants qui influenceront les résultats obtenus. Toutefois, il faut être conscient que tous ces facteurs réunis ne formeront qu'une base de départ. Le résultat optimum sera obtenu par

essais successifs et évaluation des résultats. Une planification bien établie aura comme conséquence de diminuer avantageusement cette période expérimentale.

DIAGRAMME DE CHARGEMENT

TYPIQUE

PRODUCTION DE PIERRE DE CARAPACE



REFERENCES

- U. Langefors et B. Kihlstrom, "The Modern Technique of Rock Blasting", Second Edition, Suède 1967.
- Ray C. Treasher, "Geologic Investigations for Sources of Large Rubble".
- U. Langefors, "Fragmentation in Rock Blasting". Swedish Detonic Research Foundation.
- Norman S. Smith and Richard L. Ash, "How the blasthole burden, spacing and length affect rock breakage". University of Missouri-Rolla.
- W. Comeau, Documentation Personnelle, Hydro-Québec.
- J.M. Mathieu, Documentation Personnelle, Ministère des Transports du Québec.
- C-I-L Inc., Documentation Technique.