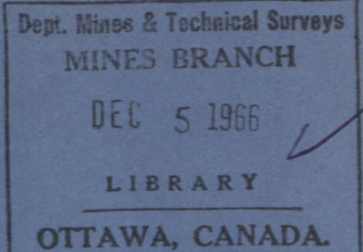




CANADA



DEPARTMENT OF  
ENERGY, MINES AND RESOURCES  
MINES BRANCH  
OTTAWA

*MÉCANIQUE DU SOUTÈNEMENT ET DU  
FOUDROYAGE DANS L'EXPLOITATION  
EN TRANCHE UNIDESCENDANTE  
PAR LONGUE TAILLE*

D. F. COATES et M. GYENGE

FUELS AND MINING PRACTICE DIVISION

French version of paper reprinted from the Proceedings of the  
Fourth Intl. Conference on Strata Control and Rock Mechanics,  
Columbia University, New York, May 1964.



© Crown Copyrights reserved

Available by mail from the Queen's Printer, Ottawa,  
and at the following Canadian Government bookshops:

OTTAWA

*Daly Building, Corner Mackenzie and Rideau*

TORONTO

*Mackenzie Building, 36 Adelaide St. East*

MONTRÉAL

*Aeterna-Vie Building, 1182 St. Catherine St. West*

or through your bookseller

A deposit copy of this publication is also available  
for reference in public libraries across Canada

Price 25 cents      Cat. No. M38 -8 /21

*Price subject to change without notice*

ROGER DUHAMÉL, F.R.S.C.

Queen's Printer and Controller of Stationery  
Ottawa, Canada

1966



# Mécanique du soutènement et du foudroyage dans l'exploitation en tranche unidescendante par longue taille

D. F. COATES et M. GYENGE

Department of Mines and Technical Surveys, Ottawa, Canada

## INTRODUCTION

Les travaux décrits dans cette communication entrent dans le cadre d'un programme de recherches réalisé avec la collaboration d'une compagnie minière qui poursuivait l'étude de diverses méthodes d'exploitation en profondeur. Comme conséquence de la modernisation du matériel de mine, il fut décidé d'expérimenter le découpage en tranches unidescendantes par longue taille.

Le projet consistait à placer un garnissage, formé par un boisage et un treillis de maillons de chaîne, dans une première tranche située directement sous les stériles que des opérations antérieures d'abatage par effondrement continu avaient amenées jusqu'à cette profondeur (figure 1). Des étaçons à frottement supporteraient ce garnissage lors des tranches subséquentes (figure 2).

Des données de base étaient nécessaires afin de connaître la répartition des contraintes à la périphérie du vide créé par l'exploitation ainsi que leurs conséquences sur les charges des étaçons, sur la stabilité du front et de la voie inférieure, ainsi que sur le foudroyage à l'arrière-tranche. On anticipait donc que ces facteurs techniques joueraient sur le rendement de l'exploitation. Il était particulièrement prévu que la manutention des étaçons affecterait les coûts de façon marquée. La mobilité des étaçons légers serait d'un grand apport vis-à-vis la rentabilité de cette méthode d'exploitation. Par ailleurs, la nécessité d'utiliser des étaçons lourds avec leur mobilité réduite rendrait la méthode trop onéreuse pour l'exploitation du minerai de fer. On envisageait également la possibilité que l'accroissement de pression dans le front de taille, résultat d'un effet de voûte au-dessus des vides de chantier,

pourrait entraîner un affaissement dans les trous de tir percés dans ce minerai peu solide. Cette concentration d'efforts pourrait, en se reportant dans le massif inférieur, affecter aussi la stabilité des voies de convoyage situées sous la tranche en cours d'abatage.

## PROGRAMME D'EXPÉRIMENTATION

### Théories du régime des contraintes

On supposait que le coulisement des étaçons provoquerait dans le terrain du toit un effet de voûte, tel que montré à la figure 2(a). Ce phénomène provoquerait un report partiel du poids du terrain sus-jacent vers les zones de culée. Afin de calculer la pression verticale moyenne qui subsisterait en bas de cette zone de subsidence, à la partie formant le toit au-dessus des vides, on s'est rapporté à la théorie établie à l'origine pour le calcul des pressions dans les silos et modifié subséquemment pour l'effet de voûte dans les terrains cohérents.<sup>1</sup> Pour le cas bi-dimensionnel, ou lorsque la largeur de la zone voûtée est faible par rapport à sa longueur, on obtient par cette théorie l'équation suivante

$$\sigma_v = \frac{b[\gamma - 2(c/b)]}{2k \tan \phi} (1 - e^{-k \tan \phi \cdot 2(z/b)}), \quad (1)$$

$\sigma_v$  = pression verticale moyenne qui, dans ce cas, serait appliquée au garnissage placé au-dessus du vide d'exploitation,

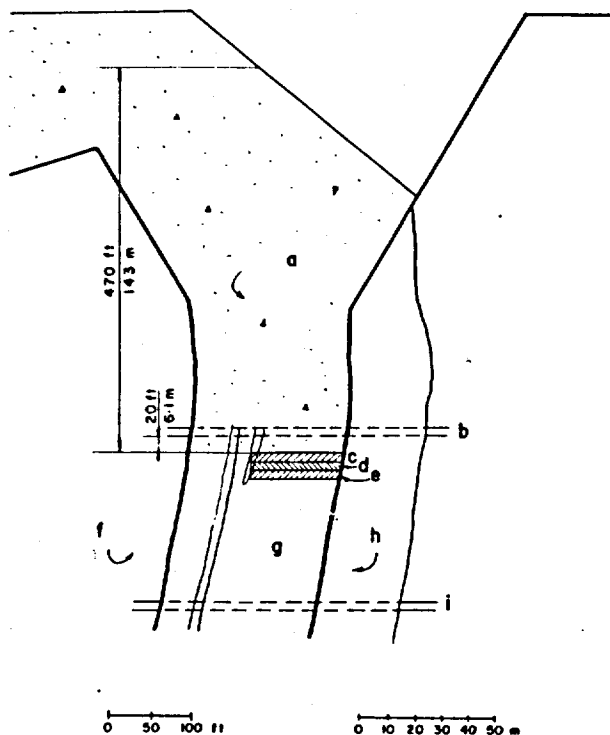
$b$  = portée de la zone d'affaissement,

$\gamma$  = densité du terrain sus-jacent,

$c$  = cohésion du terrain sus-jacent,

$\phi$  = angle de frottement interne du terrain sus-jacent,





#### LÉGENDE

- |                    |                             |
|--------------------|-----------------------------|
| a stériles         | e troisième tranche         |
| b niveau 700       | f cendre volcanique du toit |
| c première tranche | g minerai                   |
| d deuxième tranche | h roche bigarée du mur      |
| i niveau 900       |                             |

FIGURE 1 Coupe de la zone d'exploitation.

$k$  = coefficient de poussée latérale du terrain, agissant aux limites verticales de la zone d'affaissement,

$z$  = profondeur du matériau au-dessus de garnissage,

$e$  = base des logarithmes népériens.

On suppose dans cette théorie que la pression verticale  $\sigma_v$  est uniforme quoiqu'elle sera vraisemblablement plus élevée au centre de la région qu'en ses bords, il n'existe présentement aucune théorie qui permette de prédire le régime des pressions. De plus, on prête une valeur constante au coefficient  $k$  de poussée latérale du terrain agissant sur les côtés de la zone d'affaissement. Des expériences ont cependant établi que la valeur de  $k$  variait le long de la ligne médiane, entre un et un maximum de 1,5, depuis la partie inférieure de la zone d'affaissement

jusqu'en un point dont l'élévation correspondait approximativement à la largeur au-dessus de cette partie inférieure. Il fut donc convenu d'employer la valeur 1. Cette hypothèse ne tient pas compte cependant du fait que la valeur de  $k$  qui s'applique à ces calculs, correspond à la valeur obtenue aux côtés de la zone d'affaissement. Si l'on admet que le début de glissement se produit aux surfaces de ces limites verticales, les auteurs croient que le rapport des contraintes horizontales aux verticales est fixé par l'état des contraintes représentées à la figure 2(b). Il s'ensuit d'après cette théorie que

$$k = \frac{\sigma_v - 2c \tan \phi}{\sigma_v - (1 + 2 \tan^2 \phi)} \quad (2)$$

Cette équation indique qu'une valeur moyenne  $k = 0,5$  est plus appropriée, ce que corroborent des mesures effectuées sur des silos.<sup>2,3</sup>

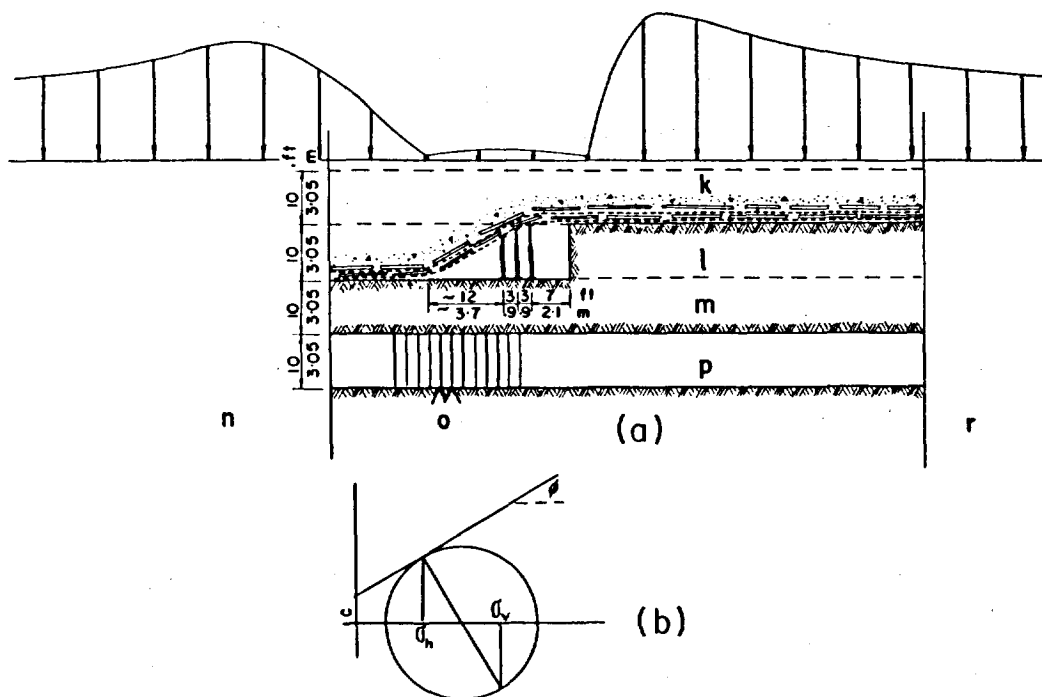
Des essais triaxiaux drainés, effectués en laboratoire sur du minerai et des stériles ayant subi une opération de recomptage, ont permis de déterminer leurs paramètres de résistance; ces valeurs qui servent à calculer les charges des étançons sont les suivantes:  $c = 6$  livres par pouce carré ( $0,4 \text{ kg/cm}^2$ ) et  $\phi = 32$  degrés. Pour ce qui est de la densité moyenne du terrain sus-jacent, des essais de compactage réalisés en laboratoire, ainsi que des essais de densité effectués en chantier même, fixent sa valeur à 150 livres par pied cube ( $2400 \text{ kg/m}^3$ ) sous des conditions d'affaissement. La portée de la zone d'affaissement  $b$  fut évaluée à partir d'observations faites sur le comportement du garnissage à l'extrémité arrière de la première tranche. La zone d'affaissement avait une profondeur approximative de 470 pieds (143 mètres). Ces données permirent de calculer la pression verticale exercée sur le garnissage:

$$\sigma_v = \frac{40(150 - 2 \times 6 \times 144/40)}{2 \times 0.5 \tan 32^\circ}$$

$$(1 - e^{-0.5(\tan 32^\circ)^2 \times 470/40})$$

$$\sigma_v = 6840 \text{ livres par pied cube (33 400 kg/m}^3\text{)}.$$

Il est possible de calculer la charge maximale totale  $P$  que devraient supporter chaque ligne d'étançons rigides; on suppose qu'un écart de 3 pieds (91 cm) sépare chacune des lignes d'étançons perpendiculaires au front, et que la répartition de la charge entre les étançons et les culées est celle d'une poutre simple. Le dessin (figure 2) indique qu'une distance moyenne de 7 pieds (21 mètres) sépare le



### LÉGENDE

- |   |                                   |   |                                    |
|---|-----------------------------------|---|------------------------------------|
| k | première tranche                  | o | dynamomètres hydrauliques          |
| l | deuxième tranche                  | p | voie de convoyage                  |
| m | troisième tranche                 | r | extrémité du garnissage, côté toit |
| n | extrémité de garnissage, côté mur |   |                                    |

FIGURE 2 Section théorique pour analyse. (a) Coupe de la taille dans le massif. (b) Cercles des contraintes existant aux bords de la zone d'affaissement.

front de la première ligne d'étauçons; cette distance variait cependant entre 6 et 8 pieds (18 et 24 mètres). On voit aussi que la distance dégagée à l'arrière du dernier rang d'étauçons est de l'ordre de 12 pieds (36 mètres). Notons cependant que la distance susceptible de créer une pression significative entre le garnissage et le sol dépasse de beaucoup le chiffre de 12 pieds (36 mètres), mais une valeur caractéristique serait 26 pieds (78 mètres). On peut donc calculer la charge maximale totale  $P$  si la distance à l'avant des étauçons de tête est 8 pieds (24 mètres), et celle à l'arrière, 26 pieds (78 mètres)

$$P = 3 \times 6840 (8/2 + 6 + 26/2)$$

$$= 471\,000 \text{ livres (213\,500 kg).}$$

Si chaque ligne contient 3 étauçons, la charge moyenne par étauçon serait alors

$$P = 470\,000/3 = 157\,000 \text{ livres}$$

$$= 78,5 T (71,2 \text{ tonnes métriques}).$$

Il est probable que la pression réelle agissant sur le garnissage soit minimale à la culée du front de la longue taille, et maximale au voisinage de la dernière ligne d'étauçons. La répartition des charges des étauçons révèle un comportement identique dans l'exploitation par longue taille, sous des toits en couches relativement solides. En appliquant les rapports moyens déterminés pour des mines de charbon, entre charge supportée par étauçon et charge totale, on calcule les charges maximale et minimale exercées sur un étauçon

$$P_{\text{max}} = 3 \times 78,5 \times 3/6$$

$$= 118 T (108 \text{ tonnes métriques}) \text{ et}$$

$$P_{\min} = 3 \times 78,5 \times 1/6$$

$$= 39 T \text{ (35 tonnes métriques).}$$

Des calculs approximatifs furent aussi effectués afin de déterminer les efforts maximaux qui pourraient naître au front la voie inférieure et en affecter la stabilité; à cause de données théoriques insuffisantes, les valeurs calculées n'apparaissent pas dans cette étude. D'ailleurs, la variation de la résistance du minerai non perturbé rendrait bien difficile toute prédiction de rupture même avec le calcul exact des contraintes.

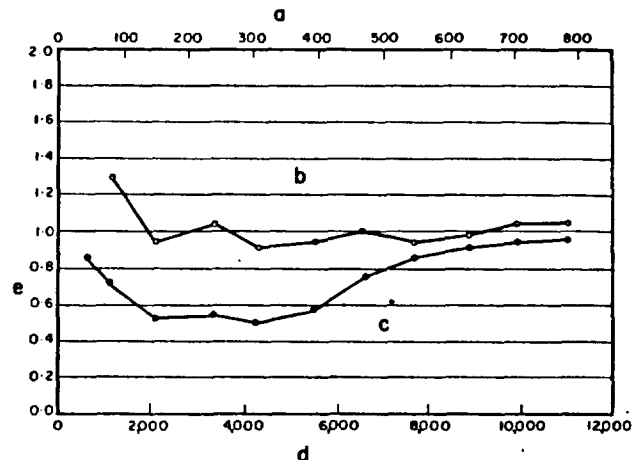
L'effet des pressions de stériles agissant sur le garnissage, représente un autre aspect qui se prêterait à l'analyse théorique et pour lequel, l'obtention de données empiriques confirmerait ou modifierait la théorie. En espaçant d'environ 3 pieds (91 cm) les étançons d'une ligne et chaque ligne également de 3 pieds (91 cm), il en résulterait probablement un fléchissement dans les deux directions du garnissage. On suppose qu'une voûte locale se forme dans le remblai, dans la zone située entre les têtes d'étançons, et aussi qu'elle s'étale dans les deux directions, et double les valeurs des pressions que donne (1) dérivée pour le cas bi-dimensionnel. On suppose avec une certaine réserve que la valeur de  $c$  est nulle,  $c = 0$ , car le terrain situé immédiatement au-dessus du garnissage a été soumis à un "travail" considérable ainsi qu'à un assèchement. Avec une portée libre,  $b = 2$  pieds (61 cm), et en admettant que l'exposant du terme  $e$  est assez grand négatif pour que la quantité placée entre parenthèses dans (1) soit égale à 1, on calcule la pression suivante:

$$\sigma = (2 \times 150)/(2 \times 0,5 \tan 32)$$

$$= 480 \text{ livres par pied carré (2345 kg/m}^2\text{)}$$

La charge totale que soutient une bande du garnissage suspendu entre deux étançons serait alors:  $W = 480 \times 4 = 1920$  livres (870 kg).

Pour connaître le résultat qu'entraîne cette charge sur le garnissage, on considère qu'elle est supportée par une seule couche du treillis à maillons de chaîne. Ce treillis présente une aire de section égale à pouces carrés 0,174 (1,12 cm<sup>2</sup>) par pied linéaire, par l'intermédiaire de fils d'acier. On suppose aussi qu'une bande du treillis s'étend sur une largeur d'un pied, entre les têtes de deux étançons, et qu'elle résiste à la charge entière telle que calculée précédemment. Une autre hypothèse prête à la flèche une forme parabolique, dont la valeur atteint 0,5 pieds (15 cm).



#### LÉGENDE

- a contrainte dans l'étançon (kg/cm<sup>2</sup>)
- b contrainte moyenne déterminée par Photostress
- c contrainte moyenne transmise par le vérin
- c charge indiquée par le dynamomètre
- d charge indiquée par le vérin
- d contrainte dans l'étançon (livres par pouce carré)
- e rapport

FIGURE 3 Comparaison des résultats obtenus par méthode "photostress" et par dynamomètre à fil résistant.

L'étude de l'équilibre statique d'une membrane parabolique, soumise à une charge uniforme, conduit à l'équation suivante:

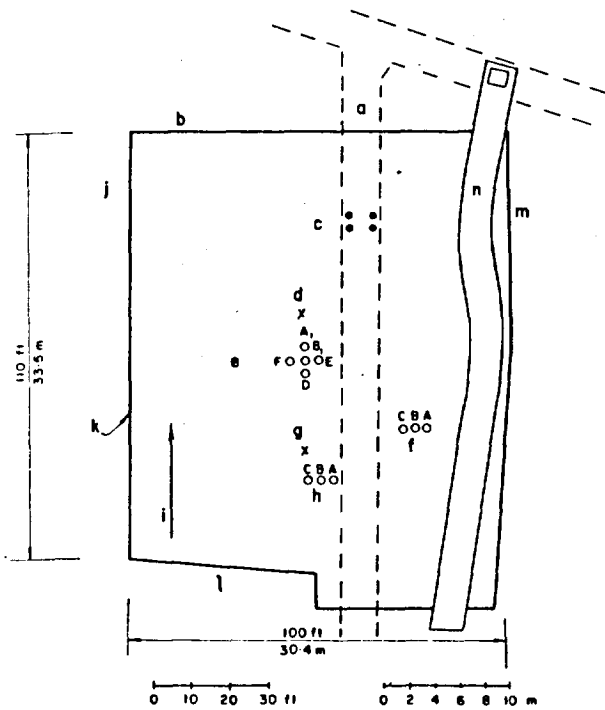
$$T = \frac{W}{2} \left[ 1 + \frac{1}{16} (B/D)^2 \right]^{1/2}$$

$T$  représente l'effort dans la membrane,  $W$ , la charge totale qui y est appliquée,  $B$  est la portée de la membrane, et  $D$ , la flèche telle que mesurée en son centre. Sur la base des hypothèses décrites et en divisant l'équation par l'aire par pied linéaire de treillis, l'effort,  $\sigma$ , exercé dans cette couche active du garnissage est le suivant:

$$\sigma = \frac{1920}{2} \left[ 1 + \frac{1}{16} \left( \frac{2}{0,5} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$= 7820 \text{ livres par pouce carré (550 kg/cm}^2\text{)}.$$

Pourvu que les hypothèses suggérées soient plausibles, il est évident que l'ensemble du garnissage n'aura pas à soutenir des efforts élevés lorsqu'il supporte le terrain sus-jacent. L'existence de mouvements différentiels entre les étançons et les



#### LÉGENDE

a	voie de convoyage	i	sens de marche de l'abatage dans la troisième tranche
b	mur	j	est
c	dynamomètres hydrauliques	k	limite du garnissage
d	dynamomètre "A"	l	toit
e	Station III	m	ouest
f	Station II	n	voie latérale
g	dynamomètre "B"		
h	Station I		

FIGURE 4 Plan de l'installation expérimentale.

efforts de cisaillement créés au droit des têtes d'étauçons conduirait toutefois à la création de conditions beaucoup plus graves que celles envisagées dans le calcul précédent.

#### Charges des étauçons

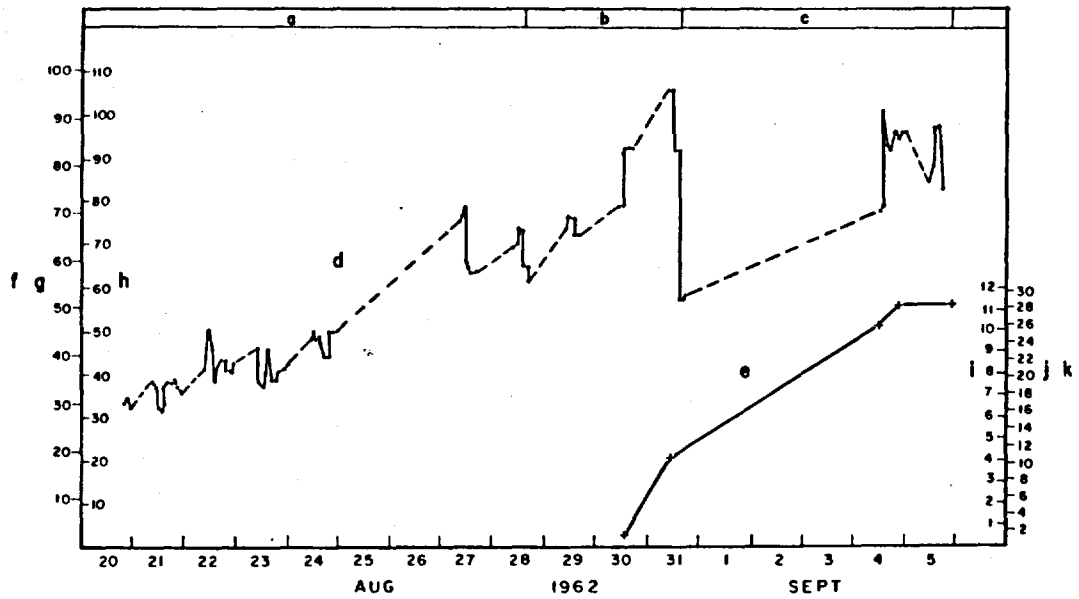
Deux techniques différentes furent étudiées pour la détermination éventuelle des charges agissant sur les étauçons; ces expériences préliminaires ont porté sur le dynamomètre à jauge à fil résistant<sup>5</sup> ainsi que sur des Jauges Uno-Directionnelles de Photoélasticité Photostress, (Budd Instruments Ltd.). Le graphique de la figure 3 illustre les résultats ob-

tenus avec ces deux techniques et ils y sont comparés aux efforts indiqués par le vérin utilisé pour l'application de la charge extérieure. Exception faite de l'intervalle des faibles charges, on voit la très bonne corrélation fournie par la technique de photoélasticité, entre les valeurs mesurées et calculées. En plus des essais précédents sur les techniques de mesure, d'autres ont été exécutés en laboratoire en vue d'étudier l'influence du temps. Des essais souterrains ont aussi été réalisés pour étudier les conséquences des conditions d'exploitation. Tous ces essais amenèrent le choix de la photoélasticité.

Il convient de mentionner que les conditions souterraines de température basse (50°F, 10°C) et d'humidité élevée, affectèrent la prise des divers ciments avec lesquels on expérimenta afin d'appliquer à l'acier la technique Photostress. Ainsi, les poses et prises des jauges réalisées en laboratoire et suivies du transport de l'étauçon sous terre, entraînèrent une distorsion des franges. La marche à suivre finalement adoptée comprenait les étapes suivantes: pose des jauges effectuée sous terre et suivie d'une période d'attente de début de prise, puis transport des étauçons au laboratoire pour que se termine la prise, et finalement retour des étauçons sous terre pour réaliser le programme des mesures. Le plan de la figure 4 montre la zone d'expérimentation par tranche unidescendante ainsi que les divers emplacements des étauçons étudiés. On avait prévu que la charge totale exercée sur les étauçons serait influencée par leur position relativement aux limites de la tranche, et un certain nombre de stations furent prévues afin de déterminer quantitativement l'influence de ces limites. Ainsi la Station I permettrait de connaître l'influence de la limite du toit du gisement, la Station II l'effet de la voie latérale sur les charges des étauçons, et finalement, la Station III permettrait de mesurer les charges maximales des étauçons en l'absence de l'influence des limites. Les lectures des jauges furent prises d'heure en heure pendant deux postes de travail des ouvriers, le troisième poste n'étant pas inclus.

#### Pression des arrière-tailles

La mesure des concentrations d'efforts existant dans les culées des excavations soumises à l'effet de voûte, c'est-à-dire dans les zones frontale et arrière, fut réalisée au moyen de dynamomètres d'étauçons<sup>5</sup> placés entre deux plaques d'acier de forme circulaire



**LÉGENDE**

- |   |                       |   |                           |
|---|-----------------------|---|---------------------------|
| a | avant                 | g | tonnes métriques          |
| b | centre                | h | tonnes courtes            |
| c | arrière               | i | pouces                    |
| d | courbe de la charge   | j | centimètres               |
| e | courbe du coulisement | k | coulissement de l'étauçon |
| f | charge de l'étauçon   |   |                           |

FIGURE 5 Variation caractéristique en fonction du temps, de la charge des étauçons et du coulisement.

ayant chacun une épaisseur de 1 pouce (2,54 cm) et un diamètre de 15 pouces (39 cm). Ces cellules furent scellées dans de grands tubes de caoutchouc et placées sous l'extrémité arrière du garnissage, aux positions indiquées sur la figure 4. Les fils conducteurs rejoignaient un poste enregistreur en passant à l'intérieur soit d'une voie verticale, soit d'un trou foré jusqu'à la voie inférieure.

Au début ces appareils mesuraient l'accroissement de la pression à l'extrémité arrière du treillis. Après avoir terminé l'abatage de la tranche qui renfermait ces boîtes dynamométriques, l'opération se poursuivit dans la tranche inférieure voisine. Les appareils mesurèrent ainsi l'accroissement de la pression au fur et à mesure que le front se rapprochait des instruments.

**Charges des cadres**

La coupe de la figure 2(a) montre que le toit du travers-bancs situé au-dessous des tranches se trou-

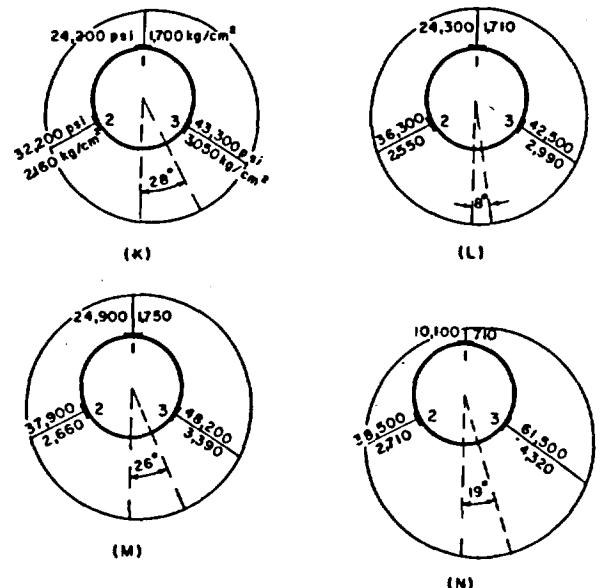
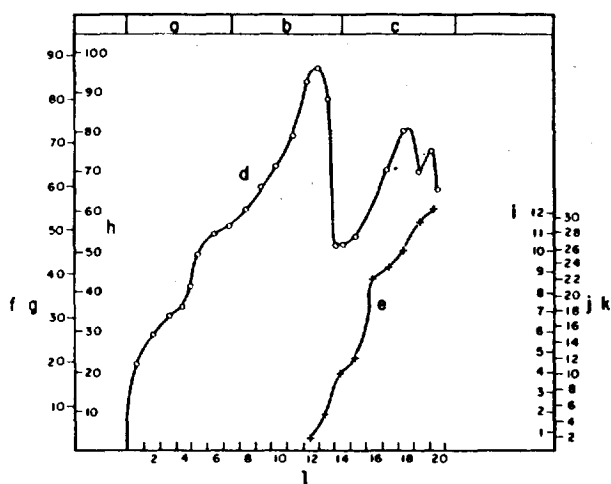


FIGURE 6 Répartition caractéristique des contraintes dans un étauçon.





### LÉGENDE

a	avant	h	tonnes courtes
b	centre	i	pouces
c	arrière	j	centimètres
d	courbe de la charge	k	coulissement moyen de l'étauçon
e	courbe du coulissement	l	périodes de travail des ouvriers
f	charge moyenne de l'étauçon		
g	tonnes métriques		

FIGURE 7 Courbe de la charge moyenne et du coulissement des étauçons de la Station III.

vait à 20 pieds (6 mètres) du sol de la première tranche. On procéda à la mise en place du garnissage lors de l'abatage de cette tranche dont le front se trouvait parallèle à l'axe de la voie. Au fur et à mesure que le front s'approchait de la station située au-dessus de la voie, une augmentation de la pression de terrain se manifestait sur les cadres. Au début on utilisa des cadres rigides, en acier et à large rebord, qui connurent une période de stabilité de huit mois; cependant ils commencèrent à se dérober par flambement lorsque le front de la tranche se trouva à une distance horizontale de 20 pieds (6 mètres). On installa alors dans cette voie des cadres coulissants neufs et quatre dynamomètres hydrauliques<sup>7</sup> furent placés sous deux de ces piles.

Ces appareils indiquèrent un accroissement de la pression du terrain s'exerçant sur les cadres au moment du passage de la tranche unidescendante à l'aplomb de la voie, et un abaissement de la pression à mesure qu'elle s'en éloignait. Ces appareils mesurèrent aussi les effets ressentis par les cadres du

fait qu'ils se trouvaient placés sous les zones de culée appartenant à la tranche subséquente, alors que son front se déplaçait perpendiculairement à l'axe de la voie, tel qu'illustré à la figure 2(a).

### RÉSULTATS

#### Charges des étauçons

Le graphique de la figure 5 montre les courbes respectives de la charge et du coulissement de l'étauçon B<sub>1</sub> situé à la Station III (figure 4). Des graphiques identiques ont été tracés pour chacune des diverses positions d'étauçons indiquées sur la figure 4. Le déplacement enregistré sur la figure 5 représente le glissement dans la serrure à friction des étauçons lors de leur coulissement. Les symboles a, b, et c placés au sommet du graphique correspondent aux termes "avant", "centre" et "arrière" qui définissent la position relative de l'étauçon en essai par rapport au front d'abatage avançant.

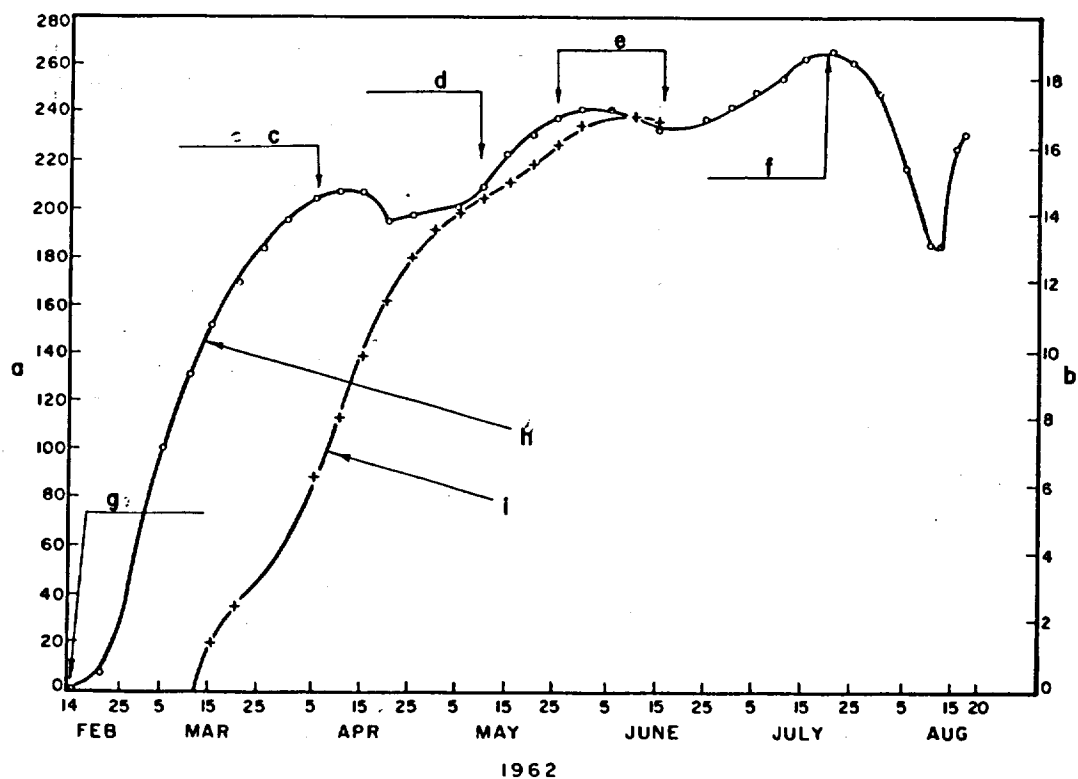
La détermination des charges (figure 5) s'est effectuée au moyen de la technique Photostress. Les lectures obtenues indiquent la quantité de déformation survenue en trois points de la circonférence de l'étauçon. Cette déformation permet de calculer la contrainte, compte tenu de la possibilité d'une déformation permanente produite au-delà de la limite élastique. Le produit de l'effort moyen par l'aire de la section de l'étauçon donne évidemment la charge appliquée à l'étauçon.

La figure 6 illustre graphiquement la grandeur des contraintes créées à la surface de la paroi de l'étauçon, pour les trois points circonférentiels étudiés par la méthode Photostress. Ces contraintes sont apparues dans l'étauçon D situé à la Station III, en des périodes de temps différentes; les graphiques (K) et (L) se rapportent à la position "centre" alors que (M) et (N) correspondent à la position "arrière" de l'étauçon. La valeur de l'angle indique la direction de la contrainte maximum développée à la paroi de l'étauçon.

Le graphique (figure 7) montre la charge moyenne résistée par les étauçons de la Station III ainsi que leur courbe de coulissement. Ces moyennes définissent le comportement des trois étauçons après leur mise en place, pendant chaque période de travail des ouvriers, après leur installation.

#### Pression des arrière-tailles

La figure 8 reproduit les résultats des lectures sur les deux dynamomètres qui étaient placés sous



### LÉGENDE

- |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>a pression en livres par pouce carré</p> <p>b pression en kg/cm<sup>2</sup></p> <p>c au terme de la deuxième tranche, distance du front au dynamomètre "A", 60 livres par pouce carré (18 mètres), et au dynamomètre "B", 30 livres par pouce carré (9 mètres)</p> <p>d au début de la troisième tranche, le front se trouve à 60 livres par pouce carré (18 mètres) du dynamomètre "A" vers lequel il se dirige, et à 30 livres par pouce carré (9 mètres) du dynamomètre "B"</p> | <p>e arrêt du front</p> <p>f distance du front au dynamomètre "A", 16 livres par pouce carré (5 mètres)</p> <p>g le front s'éloigne se trouvant à 20 livres par pouce carré (6 mètres) du dynamomètre "A"</p> <p>h dynamomètre "A"</p> <p>i dynamomètre "B"</p> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

FIGURE 8 Variation avec le temps de la pression de remblai.

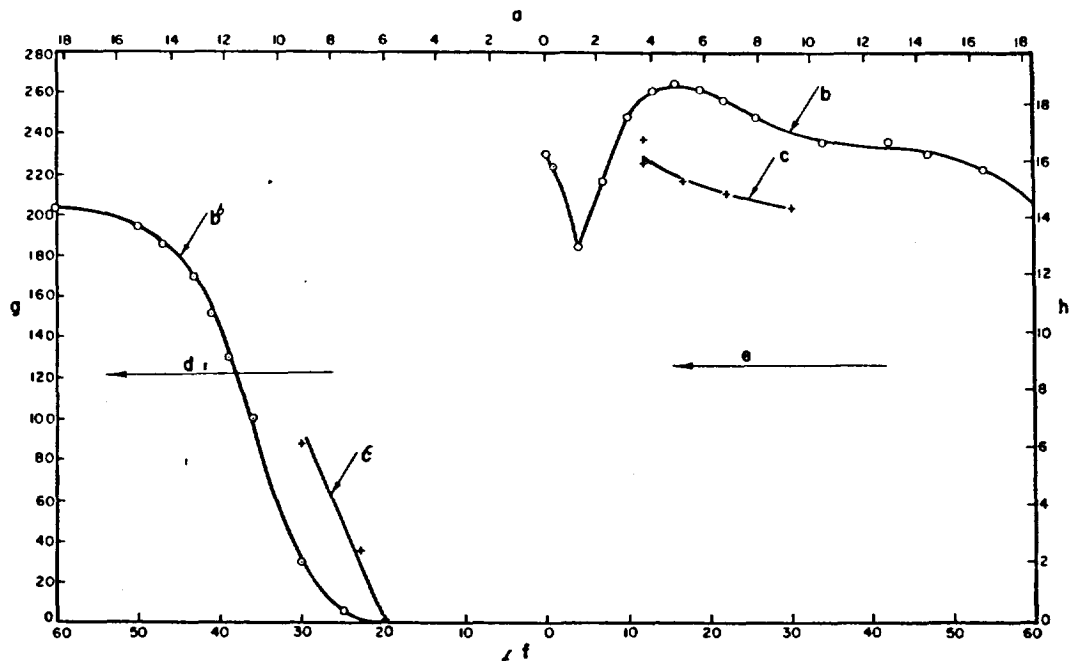
l'extrémité arrière du garnissage. Tel qu'expliqué précédemment, ces appareils mesuraient les pressions qui se manifestèrent à l'arrière pendant l'affaissement des stérils. Ils mesuraient aussi les pressions d'arrière-taille lors de l'approche du front pendant que s'effectuait l'abatage de la tranche inférieure suivante.

Il est difficile de présenter les renseignements accumulés sur un graphique à deux dimensions car les pressions varient à la fois avec le temps et la distance au front. La figure 8 montre donc la relation pression centre temps alors que la figure 9 emploie en abscisse, la distance entre le front et les

dynamomètres, ce qui permet de montrer les zones de pression en relation avec le front.

Il a déjà été mentionné que les dynamomètres de mesure des pressions de remblai employaient des jauges à fil résistant avec transducteurs. La période de service de ces instruments varia entre quatre et sept mois et elle s'accompagna d'une dérive dans le dynamomètre. La détermination de la dérive totale se fit en enlevant les charges appliquées aux appareils, suivi d'une lecture finale. Il fut alors possible de corriger les lectures en supposant que la dérive résultait d'une réaction visqueuse dont l'amplitude variait proportionnellement au temps et au degré de





### LÉGENDE

- a distance au front en mètres
- b dynamomètre "A"
- c dynamomètre "B"
- d dans la deuxième tranche, le front s'éloignait des dynamomètres

- e dans la troisième tranche, le front se rapprochait des dynamomètres
- f distance au front en pieds
- g pression en livres par pouce carré
- h pression en kg/cm<sup>2</sup>

FIGURE 9 Variation de la pression de remblai en fonction de la distance du front.

déformation. Les valeurs présentées à la figure 8 représentent les lectures originales corrigées d'après cette hypothèse.

### Charges des cadres

La figure 10 montre la variation de la pression telle qu'indiquée par le dynamomètre hydraulique placé sous l'un des cadres. Ces pressions varient aussi selon le temps et la distance au front des tranches supérieures. La pression est tracée en fonction du temps et on y indique la distance au front pour certains points de repère importants.

Les pressions enregistrées par ces dynamomètres furent affectées par l'opération de découpage dans les deux étages situés au-dessus du travers-bancs; la première tranche laissa un pilier de 20 pieds (6 mètres) au-dessus de la voie et la seconde, un pilier de 10 pieds (3 mètres). Qu'il soit répété, en se référant à la figure 4, que le front de la première tranche se déplaçait de l'est vers l'ouest, son sens de

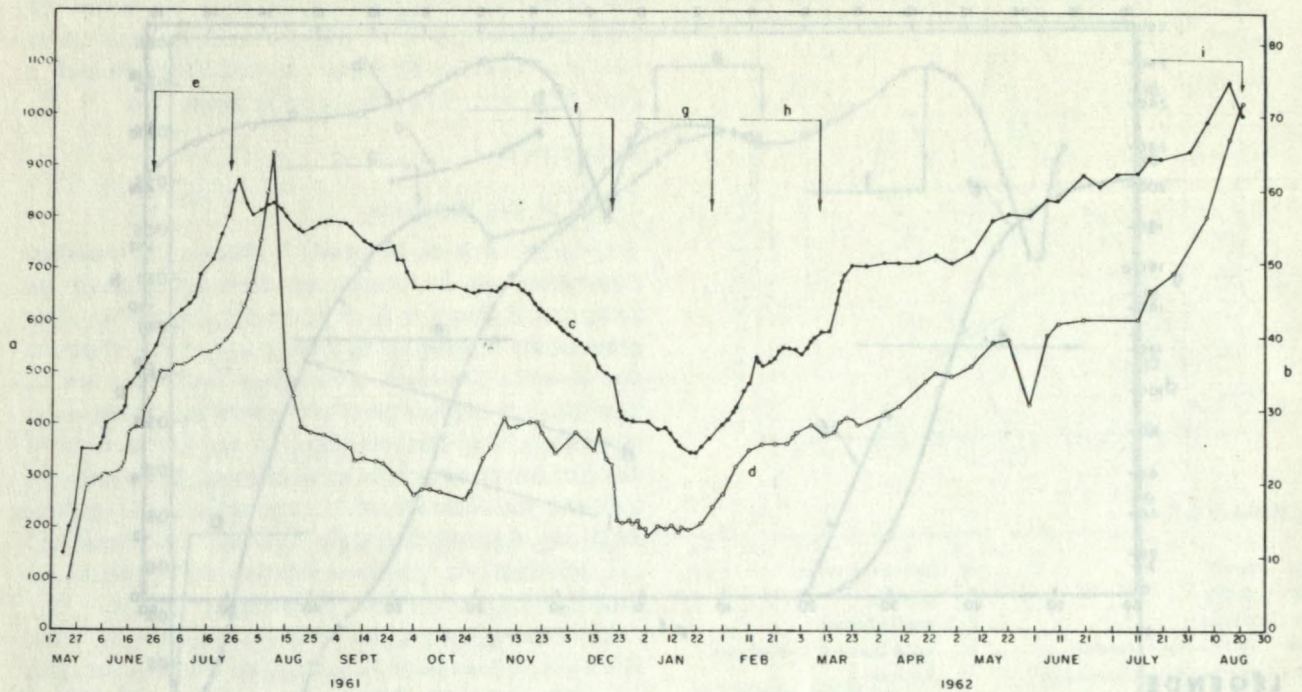
marche étant ainsi parallèle à l'axe de la voie. La deuxième tranche se dirigeait du mur vers le toit du gisement et son front se trouvait donc perpendiculaire à l'axe de la voie.

### DISCUSSION

#### Charges des étaçons

*Charges maximales.* La courbe caractéristique idéale de la fonction charge contre temps (figure 6) devrait montrer, premièrement, une ligne verticale depuis l'origine des axes jusqu'à la charge nécessaire pour amorcer le glissement dans la serrure, soit une charge nominale de 40 tonnes ou 36 tonnes métriques, et deuxièmement, une ligne horizontale au niveau de cette charge de coulissement. La forme de cette courbe idéale découlerait de l'omission du facteur temps sur la transmission des efforts élastiques, c'est-à-dire que la serrure opposerait une résistance d'intensité constante.





#### LÉGENDE

- a pression en livres par pouce carré
- b pression en kg/cm<sup>2</sup>
- c dynamomètre hydraulique no. 2
- d dynamomètre hydraulique no. 1
- e front de la première tranche à l'aplomb de l'axe de la voie
- f front de la deuxième tranche à l'aplomb des dynamomètres hydrauliques
- g étauçons du "centre" à l'aplomb des dynamomètres hydrauliques
- h distance du front de la deuxième tranche au-delà des dynamomètres hydrauliques, 65 livres par pouce carré (20 mètres)
- i distance du front de la troisième tranche aux dynamomètres hydrauliques, 38 livres par pouce carré (12 mètres)

FIGURE 10 Variation avec le temps des charges des cadres placés dans la voie de convoyage.

Si l'on admet que la mobilisation de la résistance plastique du terrain résulte d'un processus relié au facteur temps (quoiqu'il n'existe aucune théorie reliant ces paramètres), ou en d'autres termes un processus nécessitant que le terrain soit soumis à une certaine quantité de "travail", alors, la courbe caractéristique idéale de la charge en fonction du temps comprendrait une droite inclinée à partir de l'origine, indiquant ainsi une mise en charge croissant de façon uniforme pendant un intervalle de temps fini, jusqu'à ce que soit atteinte la charge de coulissement la courbe formant alors un plafond. La courbe de coulissement de l'étauçon en fonction du temps aurait donc son origine en ce temps où la charge provoque le coulissement.

Les courbes caractéristiques réelles dévient largement de la description précédente. Cette déviation dépend de l'influence du préserrage sur la charge de

l'étauçon, de la variation dans le temps de la charge de coulissement et ce pour chaque étauçon, ainsi que des effets produits sur cette charge de coulissement par la flexion et la déformation des étauçons, et finalement des propriétés imparfaites du terrain.

L'effet d'une charge excentrée appliquée sur la tête d'un étauçon joue probablement un rôle prédominant sur les charges d'étauçons. Cette excentricité des charges entraîne le blocage de la serrure à friction empêchant ainsi le coulissement dont le rôle est de prévenir un accroissement excessif de pression. La photographie (figure 11) montre des étauçons à frottement qui supportent le garnissage et il est évidemment improbable que les charges seront transmises verticalement suivant l'axe de l'étauçon. Les photographies (figure 12) montrent des étauçons endommagés par l'action de charges excentrées. Il s'agit d'un étauçon Stahlunion



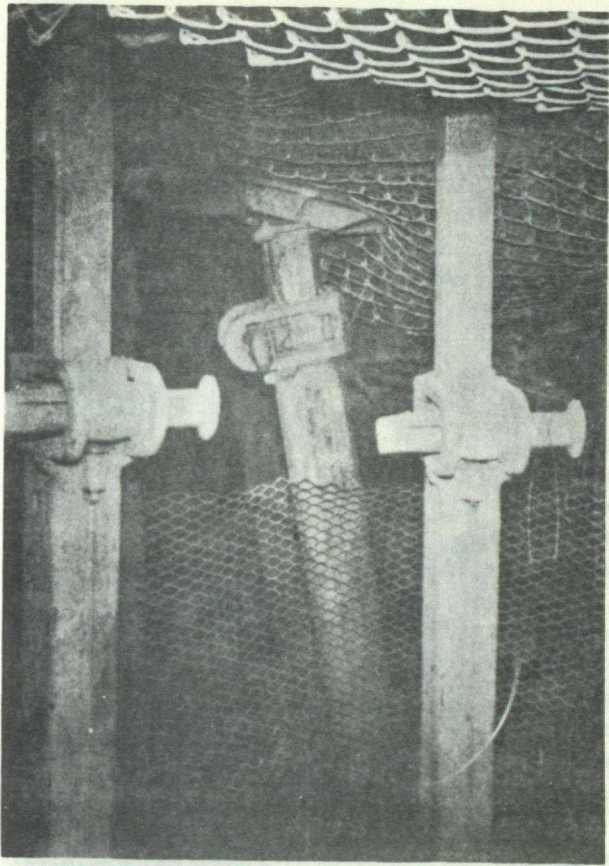


FIGURE 11 Photographie d'étauçons supportant le garnissage.

(figure 12a) dont la section inférieure a subi un flambage, et d'un étauçon Huwood (figure 12b) montrant une flexion permanente.

Dans plusieurs cas il ne se produisit aucun coulisement dans l'étauçon, ce qui permit de calculer les charges maximales que supporteraient des étauçons rigides et de les comparer aux charges calculées théoriquement pour de tels étauçons. L'examen des courbes obtenues, du type caractérisé par celle de la figure 5, pour les périodes exemptes de coulisement, indiquent des charges maximales de l'ordre de 75 tonnes (68 tonnes métriques). La charge moyenne calculée de 78,5 tonnes (71 tonnes métriques) suggère que la théorie de l'effet de voûte, telle que modifiée par les auteurs, reflète bien la véritable réaction du terrain.

Les ordres de grandeur des charges maximales mesurées aux Stations I et II étaient inférieures à celle de la Station III. Ce résultat n'est pas inattendu

à cause de la proximité de la limite où les efforts de cisaillement reporteraient vers les culées la majeure partie de la charge verticale créée dans la zone de la tranche adjacente. La théorie ne pouvait décrire ces positions car on n'y envisageait que le seul cas bi-dimensionnel, c'est-à-dire que les effets aux limites étaient exclus.

On pourrait aussi anticiper l'influence du mouvement des étauçons adjacents sur les charges maximales. La confrontation du programme de déplacement des étauçons avec les données de charges des étauçons d'essai ne suggère qu'un rôle mineur. Il semble tout au plus qu'une diminution des charges mesurées ait accompagné le déplacement, à la ligne avant, des étauçons adjacents de la ligne arrière. Le tir au front pourrait aussi affecter la valeur des charges maximales mesurées. Cet effet résulterait soit de l'augmentation de la portée en voie de formation, soit de l'effet des secousses dans le terrain arrière qui entraînerait la nécessité d'une déformation supplémentaire pour assurer la consolidation interne du remblai. L'étude du programme de tir réalisé au voisinage des stations de mesure n'indiqua que de faibles effets sur les charges d'étauçons. Conséquemment, tout effet de vibrations sur le terrain susjacent semble être négligeable et l'effet d'un accroissement de la portée pourrait ne se manifester qu'après une période de plusieurs jours, ce qui tendrait à brouiller toute relation possible entre le tir et les charges.

Aux Stations I et II, les charges des étauçons de tête étaient inférieures à la charge nominale de coulisement (40 tonnes, 36 tonnes métriques). Par contre, les étauçons placés au centre et à l'arrière de ces mêmes Stations furent soumis au coulisement, les charges étant fonction du degré et du taux de coulisement ainsi que du facteur temps. Malgré la présence de plusieurs variables, il semble qu'en ces Stations les charges maximales des étauçons placés au centre et à l'arrière excéderaient celles de la position avant.

Les charges des étauçons de tête de la Station III excédèrent généralement la charge nominale de coulisement. Les charges mesurées après le début de coulisement seraient normalement fonction de la quantité de coulisement, le taux de coulisement, et la période de temps disponible pour que la charge croisse. Il est difficile conséquemment de tirer des conclusions définitives sur les charges relatives entre les trois positions avant, centre, et arrière. Les différences observées entre les positions avant et



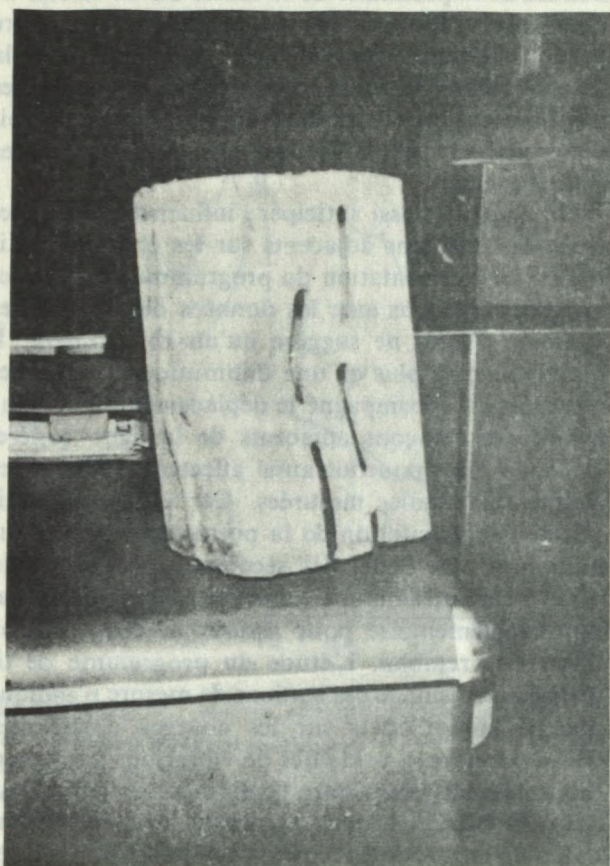


FIGURE 12 Étançons déformés: (a) Stahlunion. (b) Huwood.

centre peuvent dépendre du temps plutôt que de la position. La courbe (figure 7) suggère qu'indépendamment des causes, les charges des étançons aux positions centre et arrière devraient être supérieures à celles de la ligne avant, comme on l'a établi dans le case des Stations I et II. Des mesures effectuées dans des mines de charbon, sous des toits stratifiés et non affaîssés, confirment que ces charges augmentent de l'avant vers l'arrière.<sup>4</sup>

*Effets du temps.* L'étude des périodes auxquelles correspond un arrêt du front permet d'obtenir des renseignements sur la possibilité de fluage dans l'arrière-taille. En omettant les phénomènes d'oscillation, l'étude de huit courbes montre une augmentation de la charge en fonction du temps, mais neuf autres courbes indiquent un effet en sens contraire. Ces observations permettent de conclure que les stériles ne possèdent pas de propriétés visqueuses ou de fluage. Des essais de laboratoire effectués en ce

sens donnèrent des résultats confirmant cette conclusion.

Ces variations positive et négative de la charge dans le temps, tous les autres facteurs demeurant identiques, doivent être attribuées au "travail" du matériau du toit. A mesure que le front progresse, il modifie les contraintes dans le matériau du toit, cette modification nécessitant un certain temps avant que le toit retrouve une configuration stable. La fluctuation même de la charge durant ces périodes d'accalmie correspond à ce mécanisme.

La connaissance de la période de temps requise pour que le matériau du toit atteigne sa configuration stable présenterait un certain intérêt. L'action de nombreuses variables sur les charges d'éтанçons rend difficile l'étude explicite de ce facteur. Une courbe de charge suggérerait que le développement des charges maximales s'effectuait en une seule journée mais l'allure caractéristique qui émerge d'un



certain nombre de courbes indique une période maximale de dix jours, la période de sept jours étant la plus fréquente.

On peut assimiler cet effet du temps à une réduction des paramètres de contraintes (cohésion et frottement interne) en fonction de la durée d'application des contraintes. Si de tels paramètres de contraintes, ayant des valeurs supérieures, conditionnaient les charges résultantes qui agiraient sur les étauçons pendant des périodes ne devant pas excéder sept jours, et ce pour quelle configuration que ce fût, on peut dire qu'il y aurait avantage alors, à modifier dans la mesure du possible, les conditions d'exploitation pour que puissent s'appliquer ces paramètres de contraintes supérieurs ou ces charges résultantes inférieures. Il existait effectivement une très bonne possibilité de réduire la période d'un cycle des opérations sous des conditions normales d'exploitation de la mine.

*Effets de la déformation.* D'une part, l'accroissement du coulisement des étauçons devrait entraîner un abaissement des charges mesurées, si l'on conçoit que l'étauçon se libère alors de sa charge. D'autre part, on pourrait envisager que la charge se maintiendrait au niveau de la charge de coulisement même si celui-ci devait se poursuivre.

L'action simultanée d'autres variables complique la corrélation à nouveau. La charge de coulisement des étauçons semblait varier, omission faite des effets de blocage provoqué par des charges excentrées. Ainsi les charges de coulisement variaient entre 25 et 40 tonnes (23 et 36 tonnes métriques) en l'absence d'excentricité. Pour ces cas où l'excentricité était évidente, il ne survint aucun coulisement avant que la charge n'atteignit une valeur de 75 tonnes (68 tonnes métriques).

L'examen de chaque cas révéla que l'accroissement du coulisement n'entraîna pas un abaissement de la charge, ce qui porte à croire que le mécanisme inhibait l'augmentation de la charge. Une corrélation grossière semblait exister entre la charge et le coulisement total du fait que ces deux quantités croissaient avec le facteur temps. Cette augmentation de la charge de l'étauçon s'expliquerait normalement par l'effet du temps sur l'augmentation de la probabilité qu'un blocage survienne dans la serrure à friction, ce qui correspondrait effectivement à une augmentation de la charge de coulisement.

*Excentricité de la charge.* Le degré et l'orientation de l'excentricité de la charge variaient selon le

mouvement du garnissage. Ce mouvement avait une composante irrégulière causée par l'affaissement des stériles situées au-dessus du garnissage. Le mouvement avait aussi une composante régulière reliée à la cinématique du mouvement vertical du garnissage qu'avaient engendré le coulisement des étauçons et l'affaissement du garnissage vers le sol de l'extrémité arrière. La photographie (figure 11) illustre un exemple d'étauçons qui se font écartés de la verticale. L'analyse des efforts par la méthode Photostress (figure 6) révéla que l'angle d'inclinaison formé avec la face où s'exerçait l'effort maximal, variait dans le même sens que l'inclinaison visible de l'étauçon.

### Pression des arrière-tailles

L'examen des courbes (figure 8) suggère l'existence d'une zone de surpression (figure 2a), à l'avant du front, qui s'étend sur une distance d'environ 70 pieds (21 mètres). La zone arrière développe aussi une zone de surpression que prévoyait d'ailleurs la théorie de l'effet de voûte; cette zone atteint une longueur de plus de 90 pieds (27 mètres) à partir du front, ou de plus de 70 pieds (21 mètres) à partir du point où se rejoignent le sol et le garnissage.

L'intensité des pressions mesurées permet de calculer que la surpression du front augmente la pression normale de l'arrière-taille d'un maximum de 90 pour-cent. La zone de surpression de l'arrière-taille semble accroître la pression normale d'au plus 50 pour-cent.

L'origine de la zone de surpression se trouve à l'intérieur du massif, soit à plusieurs pieds du front même. Ceci indique pour le matériau du front soit une détente, soit une cassure, avant qu'il ne subisse une opération de forage et de dynamitage. Un certain affaissement se manifesta dans des trous de tir de cette zone, corroborant ainsi ce postulat.

Les lectures des dynamomètres donnent à la pression d'arrière-taille normale une valeur moyenne de 174 livres par pouce carré (12,2 kg/cm<sup>2</sup>). Par ailleurs le calcul d'après l'équation (1) permet de prévoir une pression moyenne de 148 livres par pouce carré (10,4 kg/cm<sup>2</sup>). Cette différence ne semble pas avoir une grande signification si l'on tient compte des diverses causes d'erreurs inhérentes aux dynamomètres: effets thermiques, influence de la longueur des fils conducteurs, humidité de l'air, durée d'exposition de l'indicateur de déformation, dérive dans les jauges à fil résistant.



Aucun indice ne laissait croire que le treillis métallique de garnissage ait été surchargé. Ce résultat doit être attribué au rôle de support rempli par le boisage du garnissage plutôt qu'être considéré comme la preuve de la validité de la contrainte prédite. Le treillis subit des cassures en certains endroits par suite du tir dans le front.

### Charges des cadres

Le flambement des cadres initiales à large rebord, placés dans la voie inférieure, alors que le front de la première tranche se rapprochait de la station de cette voie, fournit la preuve immédiate de la présence d'une surpression importante au front et que cette surpression fut en majeure partie transmise par le pilier horizontal de 20 pieds (6 mètres) situé entre la tranche et la voie.

Le graphique (figure 10) indique clairement que la pression sur les cadres subit une détente au moment du passage du front de la première tranche à l'aplomb de la voie, soit pour la période du 27 juillet au 10 août. De plus, le fait que le dynamomètre hydraulique no. 2 révèle cette relaxation avant la cellule no. 1 correspond avec le mouvement du front qui se dirige de la boîte no. 2 vers la boîte no. 1.

Alors que la zone arrière s'affaisse sur le garnissage au terme de la première tranche, le courbement des stériles devrait se produire au-dessus de la zone excavée (100 × 110 pieds, 30 × 33 mètres) pour ainsi amener une réduction de la pression verticale par rapport à la pression régnant dans la zone de minerai non perturbée à cette profondeur. Dans la seconde tranche, la concentration d'efforts du front serait une concentration de cette pression verticale réduite. Il en découle que les effets de la transmission de cette concentration d'efforts vers les parois de la voie inférieure, seraient beaucoup moins significatifs que la concentration d'efforts dans le front de la première tranche.

Cette analyse du régime des pressions de terrain est confirmée par l'absence de toute hausse apparente des charges telles que mesurées par les dynamomètres hydrauliques antérieurement au passage du front à l'aplomb de la station de mesures, lors de la deuxième tranche. On devrait aussi faire remarquer que les boîtes hydrauliques ne révèlent les effets de telles concentrations d'efforts que si l'effort est d'une intensité suffisante soit pour comprimer d'une manière significative le terrain entourant la voie, soit pour y provoquer une cassure. La

grandeur des efforts était suffisamment élevée pour entraîner une cassure du terrain lors de la première tranche; comme la grandeur des efforts était inférieure dans le second cas, la résistance du terrain avoisinant lui était vraisemblablement supérieure.

Lors du passage du front de la deuxième tranche au-delà de la station où se trouvaient les dynamomètres hydrauliques, ceux-ci indiquèrent une chute de pression (20 décembre, figure 10). La pression verticale des cadres se remit à croître lorsque le front se retrouva à 33 pieds (10 mètres) au-delà de la station de mesures, soit au moment où le garnissage entraînait en contact avec le sol, et selon les prévisions, les cellules les plus éloignées du front furent les premières à le signaler. La prise des lectures continua pendant l'abatage de la première moitié de la troisième tranche. Elle fut suspendue lorsque le front se trouvait encore à une distance de 37 pieds (11 mètres) environ de la station de mesures car l'élévation du sol de la tranche rejoignait celle de l'arrière de la voie. Il fut donc impossible d'obtenir des données additionnelles relativement aux pressions frontales au moyen de ces dynamomètres hydrauliques. L'augmentation continue des lectures faites sur les boîtes, depuis le moment où la deuxième tranche fut terminée jusqu'à celui où l'on enleva ces boîtes, peut être imputée au "travail" de l'arrière-taille avec l'assistance possible de pluies relativement abondantes.

### CONCLUSIONS

Les résultats obtenus lors de ce programme de recherches ont conduit à une meilleure compréhension de la mécanique des roches associée à l'abatage par tranche unidescendante.

- 1 Ces nouvelles connaissances devraient permettre d'élaborer, avec une meilleure compréhension des réactions probables du terrain, tant les futures opérations par tranche unidescendante que celles d'autres méthodes d'exploitation, tout particulièrement dans le cas de la propriété qui a fait l'objet de cette étude.
- 2 Il ressort que les essais de laboratoire pratiqués sur le matériau du toit permettent de prévoir l'ordre de grandeur des charges que supporteraient, en l'absence de coulissement, des étaçons utilisés en tranche supérieure. On ne doit pas ignorer cependant que la capacité de charge des étaçons sera réduite par suite d'une flexion sous l'effet de l'excentricité des charges que peut provoquer l'affaissement, à l'arrière de la tranche. Ainsi la capacité des étaçons était inférieure aux charges maximales observées dans le cadre de cette étude.



- 3 La méthode Photostress présente plusieurs caractéristiques favorables à la détermination des charges d'étauçons: coût modique, facilité de pose et bonne régularité de fonctionnement. Elle comporte aussi certains désavantages: le même observateur doit prendre toutes les lectures afin d'éliminer le facteur personnel dans l'identification des franges; des erreurs sont possibles lors de l'interprétation des franges d'ordre supérieur, de couleur identique. Le calcul de la déformation à partir des lectures est laborieux et les jauges sont sensibles aux variations de température.
- 4 Le dynamomètre à jauge à fil résistant ne donna pas entière satisfaction dans la détermination des pressions d'arrière-taille à cause de la variation des lectures sous les changements de température, l'influence de l'humidité ambiante, les changements de longueur des fils conducteurs, ainsi que la dérive sous l'effet de la charge et du temps.
- 5 Les dynamomètres hydrauliques employés dans cette campagne donnent une performance très satisfaisante pour mesurer les charges des cadres durant une période d'un an au moins.
- 6 On peut définir les exigences imposées au garnissage afin qu'il puisse résister à la pression d'arrière-taille pourvu que l'analyse tienne compte de l'effet de voûte locale qui se forme entre les têtes des étauçons. On trouve ainsi que les exigences structurales sont plutôt faibles mais l'analyse ne considère pas tous les facteurs d'importance. Il en résulte que la structure, nécessite un facteur de sécurité important afin de compenser pour des phénomènes tels les mouvements différentiels entre les têtes d'étauçons, le cisaillement autour des têtes d'étauçons, et le tir.
- 7 La possibilité de cassure dans les parois des voies inférieures, en tranche unidescendante, résulte de la concentration de contraintes dans le front de la taille; elle dépend de la dimension du bloc exploité et la

profondeur du travers-bancs sous la tranche. Une cassure engendre une augmentation de la charge des cadres. Il est possible de prédire le moment où se produira un tel accroissement.

#### REMERCIEMENTS

Les auteurs expriment leur reconnaissance aux personnes qui ont largement contribué à la réalisation de cette campagne de travaux, soit le personnel de la firme Steep Rock Iron Mines Ltd., et celui du Laboratoire de Mécanique des Roches, à Ottawa, ainsi que Messieurs J. R. Helliwell et K. L. McRorie.

#### RÉFÉRENCES

- 1 TERZAGHI, K. *Theoretical Soil Mechanics*. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1943.
- 2 JACOBSON, B. Sur la pression en silos. *Proceedings of the Brussels Conference on Earth Pressure Problems 1958*. Vol. 1.
- 3 MOSS, E. Le dessin d'un silo de sucre cru. *Inst. Civil Engrs. Conference on the Correlation Between Calculated and Observed Stresses and Displacements in Structures 1955*. Prelim. vol.; papier no. 11, groupe 2. P. 177-196.
- 4 SCHWARTZ, B. La mesure de la pression de terrains et des mouvements aux longues tailles dans les houillères françaises. *Trans. Can. Inst. Mining Met.* (1954) 57: 259.
- 5 TYTE, L. et WYNNE, A. Le travail de l'Etablissement de Recherches Minières. *Trans. Inst. Min. Eng.* (1956) 116, pt 2: 158.
- 6 ZANDMAN, F. *Photostress*. Soc. Nondestructive Testing Handbook. New York: Ronald Press Co., 1959.
- 7 PRICE, N. et MAY, N. L'emploi des capsules dynamométriques. *Colliery Eng.* (Sep. 1960). 37: 379-382.