

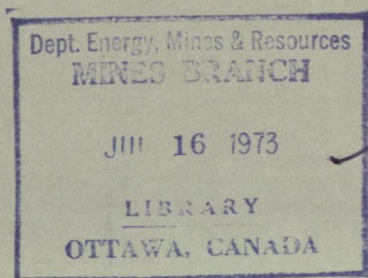
Set 622(21)  
C212 cc  
F.



Library

Ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources

Direction des Mines  
OTTAWA



FONÇAGE MÉCANIQUE DE TUNNELS ET DE MONTÉES

M. D. EVERELL

CENTRE DES RECHERCHES MINIÈRES

MARS 1973

© Droits de la Couronne réservés

En vente chez Information Canada à Ottawa,  
et dans les librairies d'Information Canada :

HALIFAX  
1687, rue Barrington

MONTRÉAL  
640 ouest, rue Ste-Catherine

OTTAWA  
171, rue Slater

TORONTO  
221, rue Yonge

WINNIPEG  
393, avenue Portage

VANCOUVER  
800, rue Granville

ou chez votre libraire.

Prix \$1.00      N° de catalogue M38-3/304F

Prix sujet à changement sans avis préalable

Information Canada  
Ottawa, 1973

## FONCAGE MECANIQUE DE TUNNELS ET DE MONTEES

par

M.D. Everell\*

## RESUME

On présente dans ce rapport une revision des connaissances pratiques actuelles en fonçage mécanique de tunnels et de montées. La présentation se veut relativement complète tout en étant dirigée vers des usagers éventuels de ces machines plutôt que vers des experts dans ces domaines. Elle couvre plusieurs sujets dont les plus importants sont: les méthodes disponibles, l'ingénierie générale des machines, les rendements, les coûts ainsi que les renseignements géologiques nécessaires. L'auteur a également attaché une importance à l'identification des perspectives d'avenir dans ces domaines de pointe en technologie minière.

## ABSTRACT

The report is a review of present practical knowledge in mechanical boring of tunnels and raises. The presentation while being relatively complete is first of all directed towards eventual users of the machines rather than experts in this field. It covers many subjects of which the most important are: the methods available, the general engineering of the machines, the performances, the costs as well as the geological data necessary. The author has also attached a certain importance to future prospects in these domains of new development in mining technology.

- \* Chercheur scientifique, Groupe de recherche sur la fracture des roches, Centre de recherches minières, Direction des mines, Ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources, Québec, Québec, Canada.

## TABLE DES MATIERES

	Page
Résumé, Abstract .....	i
Table des matières .....	ii
Liste des figures .....	iv
Liste des tableaux .....	iv
1. Introduction .....	1
2. Fonçage de tunnels .....	2
2.1 Méthodes de fonçage de tunnels .....	2
2.1.1 Machines à écran protecteur .....	2
2.1.2 Machines pour le fonçage pleine face dans la roche dure .....	3
2.2 Ingénierie générale d'une machine de fonçage pleine face ..	7
2.2.1 La tête de fonçage .....	7
2.2.2 Le corps de la machine .....	9
2.2.3 L'unité de propulsion .....	9
2.2.4 L'unité de direction .....	9
2.2.5 Le système auxiliaire pour le fonçage mécanique ....	11
2.3 Usages .....	11
2.4 Coût des machines de fonçage de tunnel .....	12
2.5 Rendement des machines de fonçage de tunnel "pleine face" .	13
2.6 Coût du fonçage de tunnel par les machines de fonçage "pleine face" .....	16
2.7 Renseignements géologiques .....	19
2.8 Comparaison des rendements et des coûts obtenus avec la méthode mécanique et avec la méthode conventionnelle (forage-sautage) .....	19
2.9 Avantages - désavantages .....	23
2.10 Problèmes lors du forage de tunnel avec des machines de fonçage .....	24
2.11 Perspectives d'avenir .....	25
3. Fonçage de montées .....	26
3.1 Méthodes de fonçage de montées .....	26
3.1.1 Machine à carottage .....	27
3.1.2 Machine de fonçage pleine face avec trou pilote ....	27
3.2 Ingénierie générale d'une machine de fonçage de montée employée dans les mines canadiennes .....	29
3.2.1 La tige de forage .....	33
3.2.2 La foreuse .....	33

	Page
3.2.3 L'unité de déplacement .....	35
3.3 Usages .....	35
3.4 Coût des machines de fonçage de montée .....	36
3.5 Rendement des machines de fonçage de montée par méthode pleine face avec trou pilote .....	37
3.6 Coût du fonçage de montée par des machines de fonçage de montée par méthode pleine face avec trou pilote .....	37
3.7 Renseignements géologiques .....	38
3.8 Comparaison des rendements et des coûts obtenus avec la méthode mécanique et la méthode conventionnelle (forage-sautage) .....	41
3.9 Avantages - désavantages .....	42
3.10 Problèmes .....	43
3.11 Perspectives d'avenir .....	43
4. Bibliographie .....	46

## LISTE DES FIGURES

	Page
1. Machine de fonçage de tunnel à écran protecteur par K.M. Tunnelling Machines Limited .....	4
2. Machine de fonçage de tunnel pleine face par Calweld .....	5
3. Machine de fonçage de tunnel avec tête à taillants fonctionnant par balayage pour usage dans les mines de charbon par Greenside-McAlpine .....	6
4. Catégories de taillants pour machine de fonçage de tunnel ....	8
5. Machine de fonçage de tunnel fonctionnant par la méthode de sous-cavage par Atlas Copco.....	10
6. Principe de fonctionnement de la machine de fonçage de montée par carottage par Salzgitter .....	28
7. Deux méthodes de fonçage de montée par la méthode pleine face avec trou pilote .....	30
8. Forêts tricônes pour usage avec un éventail de dureté de roche	31
9. Alésoir utilisé dans la méthode de fonçage de montée pleine face avec trou pilote .....	32
10. Machine de fonçage de montée pleine face avec trou pilote par Robbins - modèle 61-R .....	34
11. Coût de fonçage de montée par méthode mécanique en fonction de la résistance de la roche .....	39

## LISTE DES TABLEAUX

I Coûts des machines de fonçage de tunnel .....	13
II Sommaire de certaines expériences canadiennes en fonçage de tunnel tel que rapporté par Verity .....	15
III Paramètres pour des projets de fonçage avec des machines "pleine face" .....	17
IV Etudes préalables au fonçage d'un tunnel à l'aide d'une machine pleine face .....	20
V Distribution des coûts - Fonçage d'une montée de ventilation à l'Inco .....	40

## 1. INTRODUCTION

Le fonçage de longues ouvertures par rapport à leurs diamètres se présente souvent dans les travaux de génie civil ainsi que dans les mines souterraines. Même si, encore aujourd'hui, l'on fait beaucoup de fonçage de ces ouvertures suivant la méthode conventionnelle de forage-sautage, on a vu apparaître au cours des vingt dernières années de nombreuses machines sophistiquées pour exécuter ces travaux. L'introduction de ces machines a surtout été conséquente à la nécessité croissante de faire les choses plus rapidement et au manque relatif de personnel qualifié disponible pour faire le fonçage suivant les anciennes méthodes. Toutes les machines ont la particularité qu'elles broient ou taillent la roche en fragments plus ou moins grossiers pour produire l'ouverture par des méthodes mécaniques.

Deux grandes catégories de ce type de fonçage mécanique se rencontrent, soient le fonçage de tunnels relativement horizontaux surtout employé dans les travaux de génie civil et le fonçage de montées relativement verticales surtout employé dans les exploitations minières souterraines. Ces deux types de travaux, tout en ayant certaines similarités, comportent des différences marquées. Pour cette raison, la présentation est divisée en deux sections: la première traite du fonçage de tunnels alors que la deuxième traite du fonçage de montées. Dans les deux sections, on fournit des renseignements provenant d'une étude approfondie de la littérature, d'observations sur place du fonctionnement de certaines machines de fonçage et du Bureau canadien des tunnels. Ce Bureau est un organisme du Ministère de l'Energie, des Mines et des Ressources qui rassemble et distribue gratuitement de la documentation se rattachant au fonçage de tunnels et montées. Il fait partie du Centre de recherches minières et est situé à Ottawa.

Le présent rapport traite dans chacune des deux sections des principes de fonctionnement ainsi que de l'ingénierie des machines de fonçage, une importance particulière étant attachée aux éléments taillants. Puis, on discute des différents usages ainsi que des limites d'utilisation des méthodes mécaniques. Les rendements et les coûts de fonçage par méthode mécanique sont analysés pour un éventail d'ouvrages en insistant sur

l'expérience canadienne. Une partie porte sur les renseignements géologiques nécessaires préalables à l'usage de ces méthodes de fonçage en faisant ressortir l'importance relative de ceux-ci. De brèves comparaisons sont faites avec les rendements et les coûts obtenus en employant les méthodes conventionnelles. Puis, on a résumé les avantages et les désavantages souvent suggérés pour ces nouvelles méthodes. Les zones problèmes lors de travaux sur le terrain sont signalées. Et enfin, on souligne les perspectives d'avenir dans ces domaines d'activités.

## 2. FONCAGE DE TUNNELS

### 2.1 Méthodes de fonçage de tunnels

Les tunnels peuvent être divisés en trois groupes suivant la méthode utilisée pour l'excavation:

- 1) La méthode conventionnelle de fonçage par forage et sautage.
- 2) Le fonçage dans le sol ou dans la roche non solide utilisant des machines à écran protecteur.
- 3) Le fonçage par la méthode pleine face dans des roches de dureté variable.

La méthode conventionnelle sera seulement discutée pour établir des comparaisons.

#### 2.1.1 Machines à écran protecteur

Les machines à écran protecteur sont utilisées dans du matériel mou qui doit être supporté jusqu'à ce qu'un revêtement permanent du tunnel soit installé directement en arrière de la machine. La machine entière est habituellement poussée vers l'avant à l'aide de vérins hydrauliques qui travaillent à partir du dernier segment de revêtement qui a été installé. Le fonçage est donc intermittent avec des arrêts pour l'installation des segments de revêtement qui peuvent être des sections d'acier coulées ou soudées ou bien des blocs de béton avec une longueur d'environ 2 à 4 pi.

Sur le côté de la face, ces machines sont équipées avec des



outils pour briser le matériel à pénétrer et ayant habituellement la forme de bras rotatifs ou oscillants avec des pics comme on peut le constater à la figure 1 où une telle machine est illustrée. La plupart des machines sont également équipées d'un appareillage pour le soulèvement et la mise en place des segments de revêtement. Calweld est sans aucun doute le plus gros fabricant dans ce domaine aux E.U.A. Ils ont développé récemment des machines avec des taillants à disque pour du travail dans du matériel légèrement plus ferme tel que de la craie et des argiles dures. Les machines à écran protecteur ont des diamètres variant entre 7 et 33 pi. Etant donné que l'on discutera très peu de ces machines dans le texte qui suit, on peut dire dès maintenant, à titre d'indication des rendements possibles, que le progrès dans la ligne Victoria du métro de Londres de 14 pi de diamètre fut en moyenne de 410 pi par semaine.

### 2.1.2 Machines pour le fonçage pleine face dans la roche dure

Ce groupe peut être divisé en deux types complètement différents de machines suivant leur méthode de fonctionnement, c'est-à-dire:

- 1) Les machines qui travaillent la face entière en un moment donné tout en avançant continuellement, i.e. ce type que l'on est habitué d'appeler machine de fonçage pleine face comme l'exemple montré à la figure 2.
- 2) Les machines avec une tête à taillants qui est substantiellement plus petite que la section du tunnel. Elles peuvent seulement travailler la face par des mouvements de balayage comme l'exemple apparaissant à la figure 3.

Ces dernières machines ont un avancement discontinu dans la direction longitudinale du tunnel. Ce type de machine fut développé pour le fonçage de galeries de roulage dans les mines de charbon. Elles sont surtout employées en Allemagne, en Angleterre et aux E.U.A. Le fonctionnement et le rendement de ces machines ne sont pas discutés dans le présent rapport.

Le groupe de "vrais" machines de fonçage pleine face peut être à son tour divisé suivant la méthode par laquelle les outils brisent la roche.

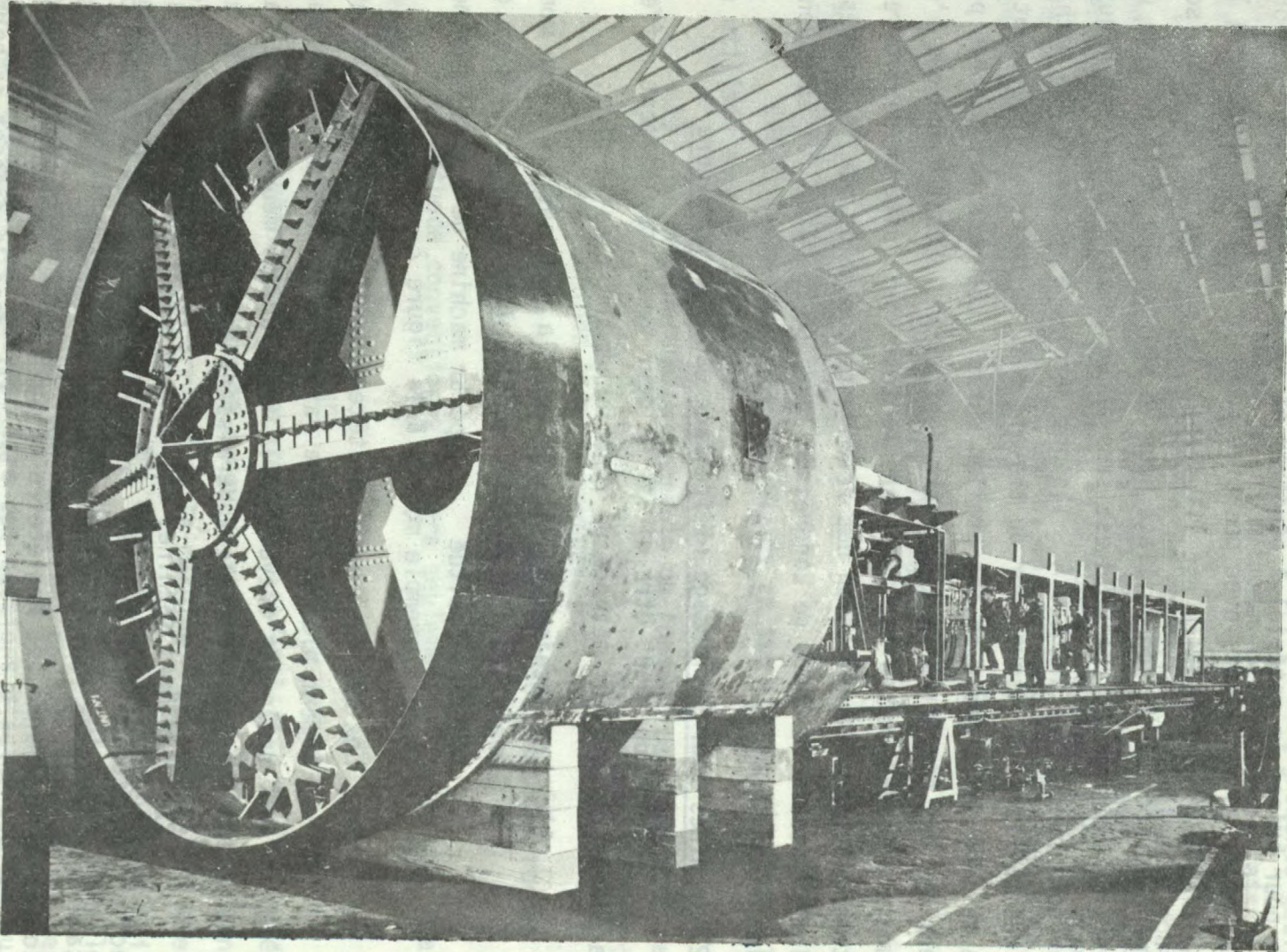


Figure 1 - Machine de fonçage de tunnel à écran protecteur par K.M. Tunnelling Machines Limited.

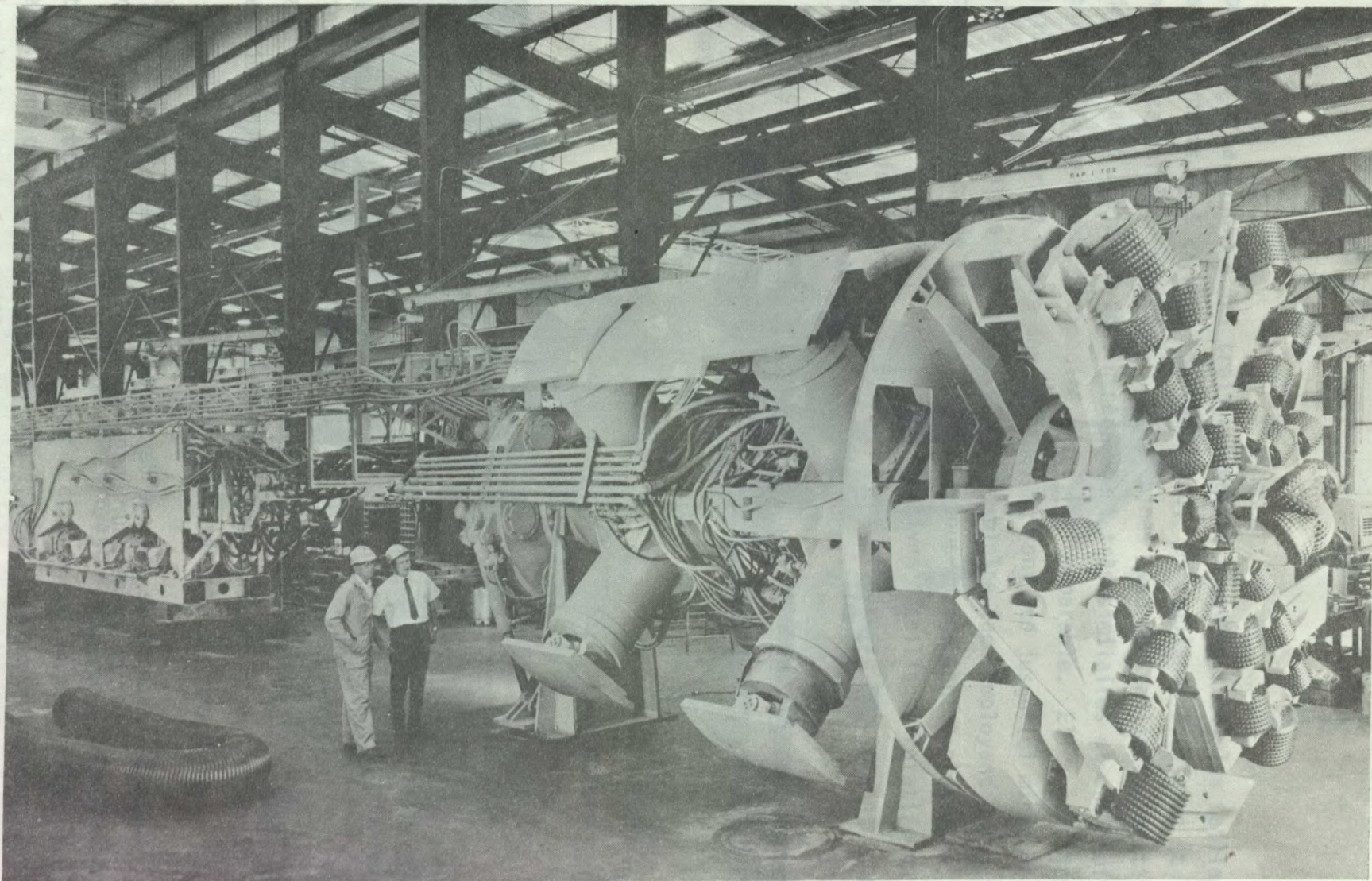


Figure 2 - Machine de fonçage de tunnel pleine face par Caldwell.

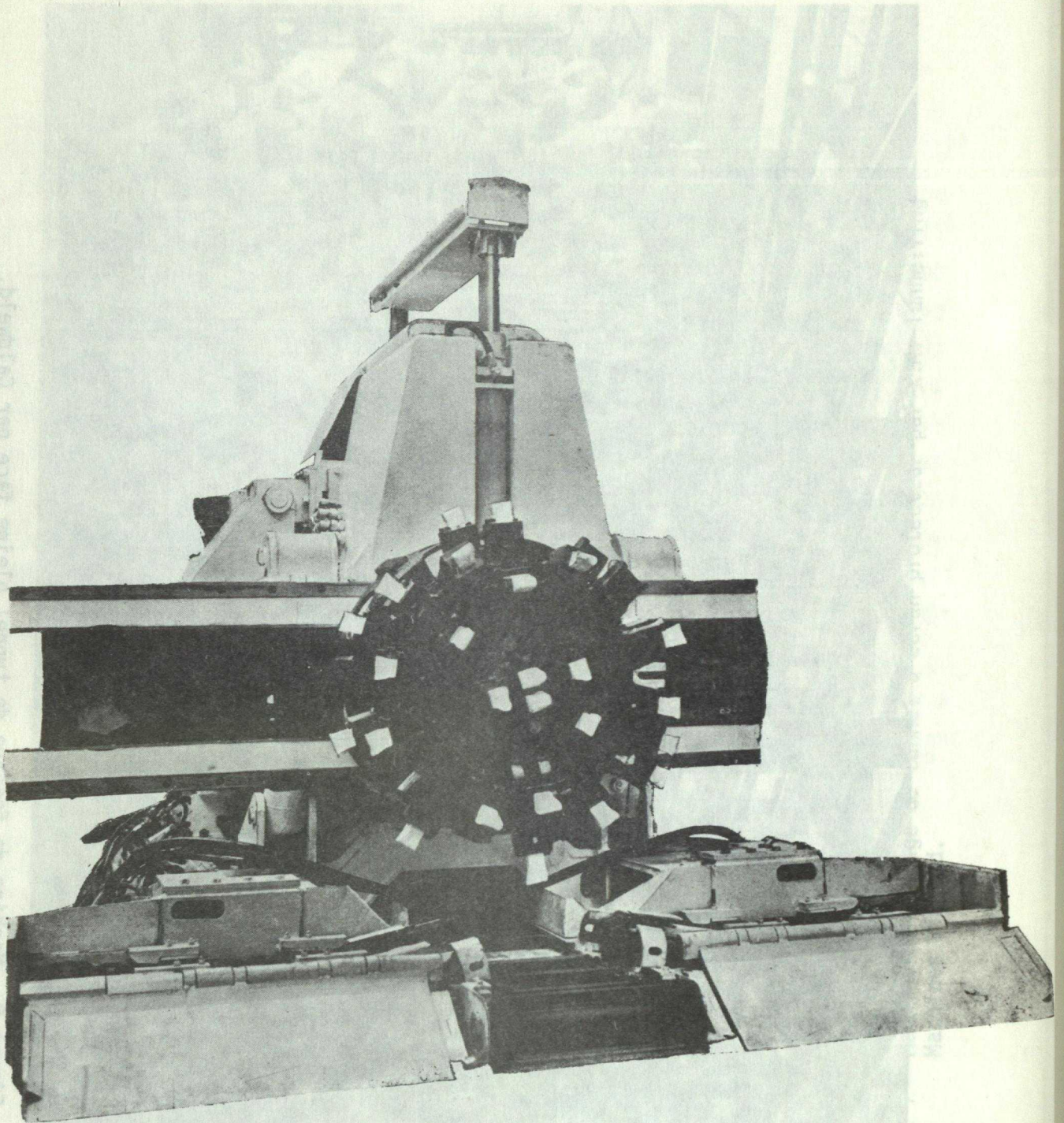


Figure 3 - Machine de fonçage de tunnel avec tête à taillants fonctionnant par balayage pour usage dans les mines de charbon par Greenside-Mc Alpine.

On présente à la figure 4 les trois catégories d'outils, soit les taillants rotatifs à dents ou à carbure de tungstène, les taillants à disques et les pointes de carbure de tungstène. Les machines avec des taillants rotatifs ou des taillants à disques sont généralement très similaires et ont habituellement le même rendement à capacité installée comparable. Elles constituent de loin le plus grand nombre des machines qui ont été jusqu'ici mises en service. Les machines de fonçage de tunnel pleine face employant des pointes en carbure de tungstène et travaillant par sous-cavage sont à plusieurs points de vue différentes des machines rotatives à taillants rotatifs ou à disques. Jusqu'ici, on retrouve seulement ces machines à pointes en Europe, préférablement dans des terrains pas très durs.

## 2.2 Ingénierie générale d'une machine de fonçage pleine face

Toute machine de fonçage pleine face comprend les composantes suivantes:

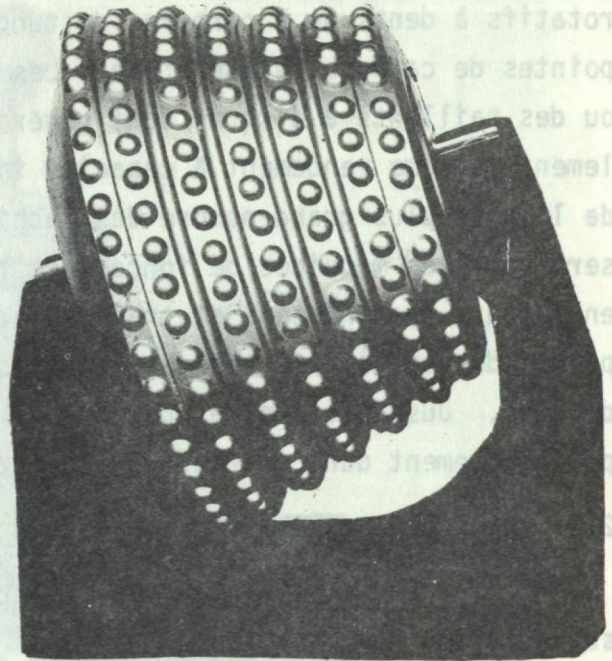
- 1) Une tête de fonçage portant les taillants qui est supportée par
- 2) le corps de la machine qui en retour est connecté à
- 3) l'unité de propulsion. Afin que la machine puisse suivre une course prédéterminée, on doit avoir en plus
- 4) une unité de direction et il est essentiel d'avoir
- 5) un système auxiliaire complet.

Les différents manufacturiers ont utilisé plusieurs approches à l'ingénierie mécanique de chacune des composantes et les moyens, suivant lesquels elles sont interconnectées, varient également. Il est évidemment impossible de décrire les différentes solutions en détail et on va donc se confiner à mentionner certaines caractéristiques spéciales.

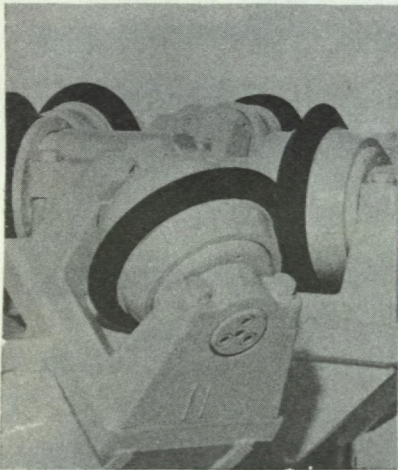
### 2.2.1 La tête de fonçage

Les machines travaillant par broyage, i.e., celles qui utilisent des taillants rotatifs ou des taillants à disques, ont le même principe d'ingénierie. Une construction en acier soudé, dans la plupart des cas en forme d'assiette, porte les taillants rotatifs libres de tourner et celle-ci

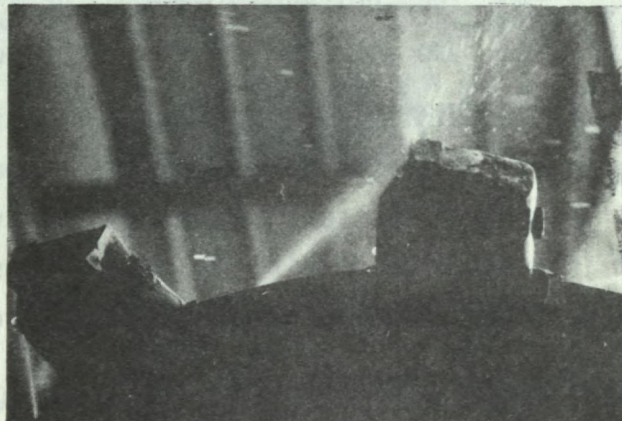
On présente à la figure 4 les trois catégories d'outils, soit les taillants rotatifs à carbure de tungstène, les taillants à disque et les taillants à pointe de carbure de tungstène. Les taillants rotatifs à carbure de tungstène sont des outils à rotation continue. Elles consistent de fait en un ensemble de disques ou de segments de disques qui sont fixés sur un support commun. Les taillants à disque sont des outils à rotation continue. Elles consistent de fait en un ensemble de disques ou de segments de disques qui sont fixés sur un support commun. Les taillants à pointe de carbure de tungstène sont des outils à rotation continue. Elles consistent de fait en un ensemble de disques ou de segments de disques qui sont fixés sur un support commun.



Taillant rotatif à carbure de tungstène.



Taillants à disque.



Pointes de carbure de tungstène.

Figure 4 - Catégories de taillants pour machine de fonçage de tunnel.

est équipée de godets à la périphérie afin de transférer la roche brisée au convoyeur qui est habituellement une courroie longeant le dessus du corps de la machine. La tête est tournée par des moteurs électriques à approximativement 10 tr/mn dans le cas d'une machine de 10 à 13 pi de diamètre. On a déjà montré une machine de ce type à la figure 2. Les machines travaillant par sous-cavage ont une tête qui porte plusieurs unités de coupage qui attaquent la roche radialement au lieu de frontalement. Une machine de ce type est montrée à la figure 5. Pour ces dernières machines, la roche est transportée vers l'arrière par un ensemble de convoyeurs à chaîne passant sous le corps de la machine.

#### 2.2.2 Le corps de la machine

En plus de supporter la tête, le corps de la machine a la tâche de connecter ensemble les principales composantes et de supporter les moteurs d'entraînement, l'autre équipement électrique et hydraulique, l'équipement auxiliaire et l'unité de direction. L'équipement peut aussi être monté sur une remorque d'approvisionnement à l'arrière de la machine.

#### 2.2.3 L'unité de propulsion

A l'exception de la machine allemande Krupp, qui a une propulsion continue à l'aide de chenilles de tracteur et qui est ainsi seulement acceptable pour la roche tendre ne demandant pas beaucoup de poussée, toutes les machines ont un système de propulsion intermittent utilisant des cylindres hydrauliques à deux directions. Ceci avec l'exception de la machine Alkirk qui se tire d'elle-même vers l'avant par l'entremise d'un expasseur coincé dans un trou pilote foré au préalable. Les machines sont ancrées à l'aide d'une unité de cramponnement contre les murs du tunnel.

#### 2.2.4 L'unité de direction

Là où l'unité de direction se combine à l'unité de propulsion, il y a normalement peu de chances de modifier l'alignement de la machine au cours d'une course actuelle de fonçage et une correction de l'alignement peut seulement être faite lorsque l'on réajuste l'unité de propulsion. La plupart des machines utilisent un rayon laser pour les guider. La lecture

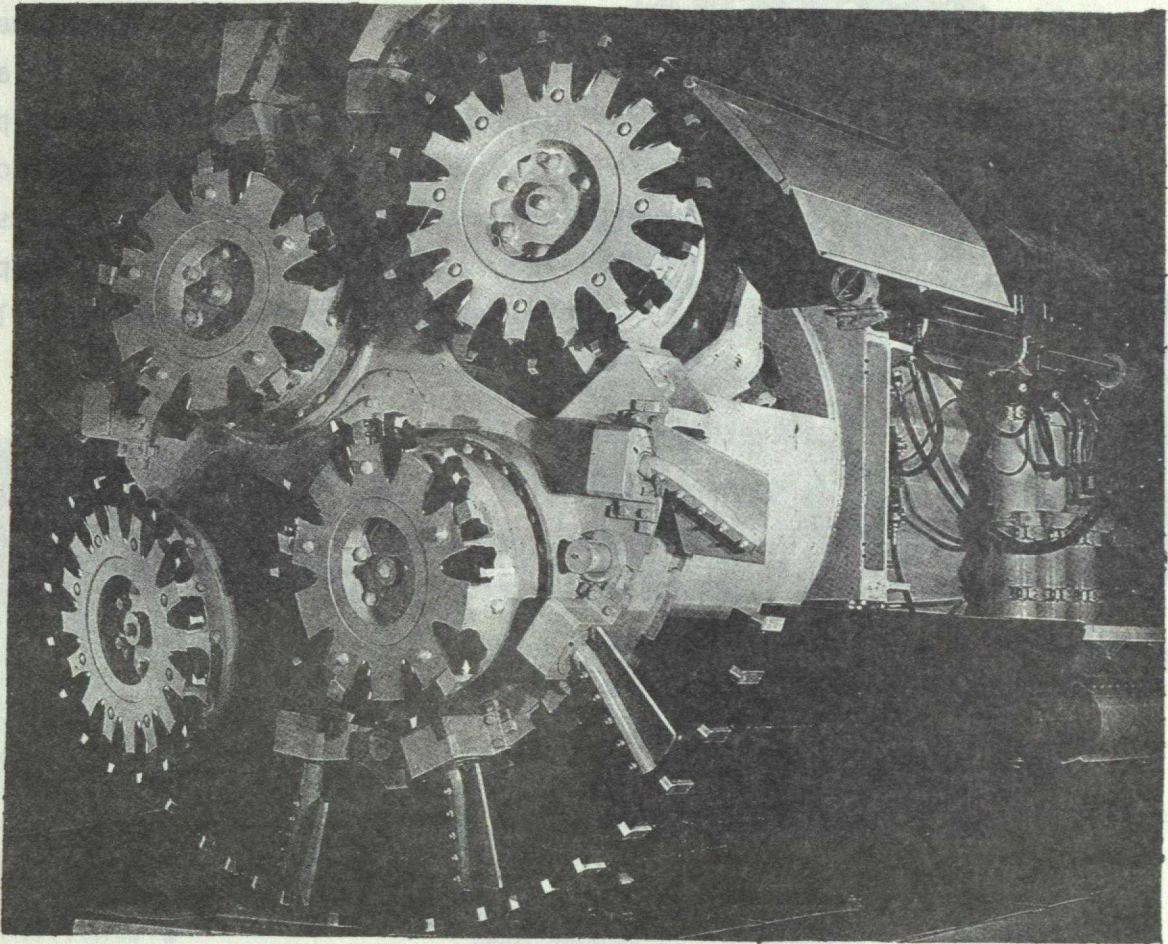


Figure 5 - Machine de fonçage de tunnel fonctionnant par la méthode de sous-cavage par Atlas Copco.



de la cible se fait directement ou par l'entremise d'un circuit fermé de télévision. Une caméra de télévision montée sur le mur du tunnel ou un théodolite ordinaire ont aussi été utilisés pour le réglage de l'alignement au lieu d'un rayon laser.

#### 2.2.5 Le système auxiliaire pour le fonçage mécanique

L'usage de machines de fonçage mécanique demande un système de soutien passablement élaboré. En plus de fournir la source de puissance électrique, on doit également pourvoir la machine d'un système d'évacuation des poussières et d'un système de transport de la roche brisée. Ceci est habituellement fait à l'aide de trains de berlines. Dans certains cas spécifiques, on doit aussi fournir un système de pompage pour débarrasser la face de l'eau de ruissellement.

#### 2.3 Usages

L'augmentation du fonçage par méthode mécanique reflète surtout le besoin pressant de placer plus de services sous la surface à mesure que la densité de la population augmente. De plus en plus de planificateurs de villes regardent vers les tunnels comme étant le moyen le plus commode et le plus économique pour l'alimentation en eau, l'évacuation des égouts, le transport et l'installation de câbles et de pipelines. Dans des pays comme le Japon et quelques pays européens, il y aura des programmes intensifs de fonçage de tunnel qui seront presque exclusivement dans des projets de génie civil.

Le Canada, d'un autre côté, est différent car, tout en ayant 9% du fonçage total pour le globe, la plus grande partie de ceux-ci sont pour les zones minières et sont faits suivant les méthodes conventionnelles. On avait tenté en 1957 d'introduire le fonçage mécanique de tunnel à la mine Steep Rock Iron Mine en Ontario. Toutefois, l'expérience ne s'est pas prolongée trop longtemps. Les mines de potasse au Canada utilisent des machines de fonçage pour l'exploration mais la situation dans ces mines est bien particulière de par la méthode d'exploitation et la dureté de la roche. Encore aujourd'hui, on ne rencontre pas de telles machines dans les mines de sel

canadiennes, la raison principale de ce fait étant la non-uniformité des gisements. Les haveuses servant à l'extraction du charbon dans les mines souterraines sont en quelque sorte des machines de fonçage également sans trop en avoir l'apparence. L'usage des machines de fonçage en travaux de génie civil au Canada s'est limité à moins de dix seulement.

Récemment, on a mis à l'essai des machines de fonçage dans certaines mines à roches dures aux E.U.A. à White Pine au Michigan et à Climax Molybdenum dans l'Ouest. Les résultats de ces expériences ne sont pas encore connus. On peut cependant dire que si le succès avait été évident, on en aurait sûrement entendu parler plus que présentement.

L'usage des machines de fonçage de tunnel dans le monde indique qu'elles peuvent être utilisées avec succès pour les tunnels de génie civil dans des roches allant jusqu'à 25,000 lb/po<sup>2</sup> de résistance en compression. Présentement, on peut généralement dire que si un tunnel peut avoir une section circulaire de moins de 11 mètres de diamètre avec une longueur de plus de deux kilomètres, il y a des chances pour que ce travail soit fonçable économiquement avec une "taupe". Le manque de manoeuvrabilité des machines de fonçage semble être le facteur important qui les exclue encore de la plupart des situations minières.

#### 2.4 Coût des machines de fonçage de tunnel

En 1970, on pouvait estimer le coût, d'une machine de fonçage à \$4,000 x (pi de diamètre)<sup>2</sup> ou environ \$1,000. par c.v. On a reproduit certaines données sur des machines de fonçage de tunnel dans le tableau I.

TABLEAU I

Manufacturier	Modèle	Diamètre (pi)	c.v. total	Coût
Jarva	Mark 8	8	330	\$330,000.
Robbins	81-118	8.5	200	220,000
Jarva	Mark 11	10	440	440,000
Lawrence	HRT-12	12	600	500,000
Robbins	121	13.25	400	400,000
Jarva	Mark 14	13.67	540	540,000
Hughes	Betti I	19.83	1000	1,000,000

Ces données proviennent d'un article de Norman et Stier datant de 1967 et ainsi elles peuvent être considérées que comme des indications des prix en vigueur aujourd'hui.

#### 2.5 Rendement des machines de fonçage de tunnel "pleine face"

Après une expérience mondiale considérable concernant l'emploi de ces machines, on connaît relativement bien le rendement qu'il est possible d'obtenir. Ces rendements se sont améliorés au cours des années grâce à la plus grande sûreté de fonctionnement des machines, à l'expérience acquise ainsi qu'au développement de meilleurs taillants. Sans que l'on soit arrivé au développement de modèles pour la prédiction des rendements, on sait que la nature du terrain traversé avec toutes ses caractéristiques géologiques, hydrologiques et mécaniques a une très grande importance vis-à-vis des rendements obtenus. Les meilleurs rendements sont en général obtenus dans des terrains de dureté moyenne où le tunnel, une fois foncé, peut se supporter de lui-même et pour des tunnels longs de petits diamètres. Dans un terrain très dur, on aura à faire face à des problèmes avec les taillants et dans des terrains mous, le tunnel nécessitera la pose d'un revêtement. Ces deux conditions réduisent plus ou moins les rendements jusqu'à rendre le fonçage mécanique peu attrayant. Il serait trop long de

reprendre ici les rendements obtenus au cours des différents projets dont le nombre devrait se situer aujourd'hui aux environs de deux cents. Plutôt, nous allons traiter de l'expérience canadienne ainsi que de certains rendements obtenus par deux manufacturiers, Jarva et Demag, lors de certains de leurs projets.

Une bonne partie de l'expérience canadienne en fonçage mécanique de tunnel dans les travaux de génie civil a été résumée par Verity du Ministère de l'Energie, des Mines et des Ressources dans un rapport volumineux et détaillé sur le sujet. Il relate les résultats de quatre principaux projets pour lesquels nous avons résumé certaines statistiques au tableau II. Le premier projet fut exécuté à Toronto en 1958-59 pour le fonçage d'un égoût puis a suivi le fonçage de cinq tunnels de détournement par la Prairie Farm Rehabilitation Administration en Saskatchewan en 1961-63. Par la suite, deux projets ont été entrepris en Colombie Britannique, un à Vancouver en 1963-64 et l'autre à Victoria en 1964-66. Seul le projet de Victoria a eu vraiment des résultats désastreux et on a dû compléter la plus grande partie de celui-ci suivant la méthode conventionnelle. Le terrain était trop dur pour la machine et ses taillants. Depuis, d'autres projets ont été entrepris et complétés avec succès dans les villes d'Ottawa pour un égoût et de Toronto pour l'extension de lignes de métro. Des résultats précis ne sont pas encore disponibles pour ces projets. Même si dans certains cas les avantages économiques n'ont pas été très imposants, certains entrepreneurs interrogés ont laissé entendre que beaucoup de temps avait été employé à connaître le fonctionnement des machines et, qu'avec l'expérience acquise, de meilleurs résultats dans des travaux similaires sont à prévoir pour l'avenir.

TABLEAU II

SOMMAIRE DE CERTAINES EXPERIENCES CANADIENNES EN  
FONCAGE DE TUNNEL TEL QUE RAPPORTE PAR VERITY

ITEM	PROJET			
	TORONTO	VANCOUVER	VICTORIA	PFRA
But	Egoût	Egoût	Approvisionnement en eau	Electricité
Diamètre (pieds)	10.75	8 à 11	8.5	25.67
Longueur totale	12700	26700	29000	19700
Période	11/58 à 11/59	7/63 à 9/64	11/64 à 4/66	2/61 à 1/63
Pi/heure	4.8	n.d.	2.5	n.d.
Pi/quart	10.6	n.d.	8.6	15
Roche	Schiste calcaire	Grès/lentilles de schiste	Schiste, lentilles quartz	Schiste mou/concrétion de roche
Dureté (Moh)	2.5 à 5	2.5 à 4	4 à 7	1.5
Résistance de la roche (lb/po <sup>2</sup> )	6000 à 14000	6000 à 12000	12000 à 25000	150 à 400
Coût (\$)/pi	\$105.00	\$110.00	\$98.00	\$415.00
Coût (\$)/vg <sup>3</sup>	\$31.00	\$52.00	\$35.00	\$21.50
% fonçage méc.	77	79	12	93

Jarva Tunneling Machines fait remarquer dans sa publicité que, lors de quatre projets, où l'on a utilisé une machine Jarva Mark 8 pour des tunnels de 8 à 10 pieds de diamètre, dans des roches ayant entre 10000 et 20000 lb/po<sup>2</sup> de résistance en compression, des vitesses de pénétrations d'environ 5 pi/h ont été obtenues ce qui a eu pour effet de produire des rendements par quart d'environ 15 pi. Le coût des taillants s'est élevé à approximativement \$6.50/pi de fonçage. Pour d'autres projets, des vitesses de pénétration extrêmes de 4 et 10 pi/h sont rapportées avec des avances par quart entre 8 et 35 pi et des coûts de taillants entre \$5.00 et \$35.00 par pied. Le coût des taillants croît rapidement avec le diamètre du tunnel; le dernier coût mentionné étant pour un tunnel de 16 pi de diamètre.

Un représentant de Demag a présenté, lors du dernier Symposium canadien sur la mécanique des roches à Toronto, une série de chiffres de rendements lors du fonçage dans différentes formations rocheuses en Europe. Ces résultats sont montrés au tableau III avec les résistances en compression des roches ainsi que les coûts des taillants par pi<sup>3</sup>. Pour obtenir la vitesse par quart, il faut corriger avec un facteur d'utilisation qui peut varier entre 50 et 80% suivant la machine et les conditions particulières rencontrées.

D'autres rendements sont disponibles d'un article récent sur le sujet du fonçage de tunnel par Muirhead et Glossop. Cependant, les résultats présentés ici offrent déjà une très bonne idée des rendements auxquels on peut s'attendre en fonction des formations traversées.

## 2.6 Coût du fonçage de tunnel par les machines de fonçage "pleine face"

Le coût du fonçage mécanique d'un tunnel est influencé par de nombreux facteurs. Parmi ces facteurs, un des plus importants est le coût d'amortisation de la machine. Dans bien des cas, les utilisateurs ont choisi de déclarer une valeur de récupération à la fin de chaque projet ou encore amortissent la machine sur un métrage choisi. La plupart des compagnies préfèrent exprimer le coût d'amortissement en coût par pied linéaire. D'autre part, il est fort possible que les machines existantes aient des vies utiles de 100,000 heures de fonctionnement.

TABLEAU III

PARAMETRES POUR DES PROJETS DE FONCAGE  
AVEC DES MACHINES "PLEINE FACE"

Type de roche	Résistance en compression (1b/po <sup>2</sup> )	Coût des taillants de forage (\$U.S./pi <sup>3</sup> )	Vitesse de pénétration (pi/h)
Schiste argileux	1400 à 7000	3.5 à 7	10.0 à 16.5
Schiste calcaireux	2800 à 8600	4.5 à 9	8.0 à 13.0
Schiste gréseux	4300 à 11500	6 à 10	5.0 à 8.5
("Molasses")	1400 à 5700	6 à 10	10.0 à 16.5
Calcaire et dolomie	14300 à 26000	9 à 22	6.0 à 10.0
Calcaire silicieux	26000 à 36000	13 à 35	4.0 à 5.0
quartz	14300 à 28600	9 à 26	2.5 à 5.0
grès			
grès calcaireux	7000 à 21500	7 à 10	5.0 à 12.0
Granite	21500 à 50000	70 et plus	2.5 à 4.0
Gneiss	17000 à 40000	26 à 70	3.0 à 5.0
Gneiss ardoisier	13000 à 21500	9 à 26	5.0 à 8.5

Dans le coût total entre également le coût de la main d'oeuvre. Ce coût est conséquent en grande partie de la vitesse de pénétration. Un autre coût important, spécialement pour les roches dures et abrasives, est le coût des consommables dans lequel apparaît le coût des taillants. Aussi, comme les machines de toutes sortes, il y a des coûts d'entretien et des coûts de réparations. Pour terminer, il y a le coût de l'équipement divers et des services nécessaires pour le fonctionnement de ces machines incluant l'évaluation géologique.

En général, les coûts actuels présents de fonçage de tunnel ne sont pas facilement disponibles étant donné la nature compétitive du fonçage de tunnel parmi les entrepreneurs en construction. Les seuls coûts précis dont nous disposons présentement sont ceux que Verity a déterminés lors de la rédaction de son rapport auquel on a référé précédemment.

Ces coûts datant déjà de quelques années ne représentent pas nécessairement les coûts actuels étant donné d'une part l'inflation et d'autre part les améliorations aux machines et aux taillants. Les coûts de fonçage de tunnel au Canada sont fournis en termes de coût par pied linéaire et en termes de coût par vg. cu. Ils se situent à environ \$100. par pied pour les trois tunnels dans de la roche moyennement dure et entre \$31. et \$52. par vg. cu. Le tunnel dans de la roche très molle a coûté \$415. par pied incluant le revêtement et \$21.50 par vg.<sup>3</sup> excavée. On peut dire présentement que le coût se situe en dessous du coût par les méthodes conventionnelles pour le fonçage dans de la roche de dureté moyenne. Et à cause d'une augmentation plus rapide des coûts pour le fonçage suivant la méthode conventionnelle, cette tendance va s'accroître avec les années.

L'importance du coût des taillants dans le coût total d'excavation par fonçage mécanique peut être perçue en regardant les coûts pour les taillants fournis par le représentant de Demag au tableau III. Les plus hauts coûts de taillants montrés font à eux seuls que la méthode de fonçage mécanique est incapable d'entrer en compétition avec la méthode conventionnelle pour le fonçage dans la roche très dure. Un coût de \$70.00 par pi. cu. est beaucoup plus dispendieux que le fonçage par méthode conventionnelle dans tous les cas.



## 2.7 Renseignements géologiques

Contrairement à ce qui est le cas avec la méthode conventionnelle de fonçage de tunnel, la méthode mécanique requiert l'assemblage de nombreuses données géologiques et l'exécution de certains essais particuliers sur des échantillons de roches. Cette quantité de renseignements est rendue nécessaire pour l'étude du site en vue d'abord de prouver la rentabilité économique d'employer une machine de fonçage. Ensuite, on doit pouvoir prédire la cédure de production avec une précision relativement grande en ayant soin de prendre en considération les délais prévisibles. Dans le tableau IV, nous reproduisons les recommandations de Handewith de Ingersoll Rand, un important manufacturier entrepreneur, pour l'étude d'un site de fonçage à la machine. Dans ce tableau relativement détaillé, on distinguera les données géologiques requises, les méthodes pour ramasser ces données et l'usage de ces données.

Généralement les études sont faites aussi complètes que possible suivant le temps alloué car la précision des prédictions en dépend. Toutefois, rarement toutes les études citées dans le tableau IV sont faites pour un projet donné. On fait habituellement au moins du forage de carotte en des points stratégiques pour établir la géologie et à partir d'échantillons, on fait des déterminations de résistance en compression, des essais de poinçonnement et une analyse chimique des roches (% SiO<sub>2</sub>) pour évaluer les problèmes d'abrasion que pourraient produire les roches en jeu.

## 2.8 Comparaison des rendements et des coûts obtenus avec la méthode mécanique et avec la méthode conventionnelle (forage-sautage)

Peu de chances se sont présentées où une comparaison des coûts entre le fonçage mécanique et la méthode conventionnelle forage-sautage pouvait être faite sous des conditions identiques. S+M Constructors ont complété, il y a quelque temps, un tunnel de 23000 pieds ayant 8 pieds de diamètre pour le St. Louis Metropolitan Sewer District. Le premier 13000pieds de ce tunnel a été fait par la méthode conventionnelle. Le dernier 10000pieds fut miné en utilisant une machine de fonçage Jarva Mark 8. Les statistiques gardées par S+M Constructors sur les deux méthodes d'excavation et une

TABLEAU IV ETUDES PREALABLES AU FONCAGE D'UN TUNNEL A  
L'AIDE D'UNE MACHINE PLEINE FACE

DONNEES GEOLOGIQUES REQUISES	METHODES POUR RAMASSER LES DONNEES	USAGE DES DONNEES
1) Carte géologique générale de la région.	<ul style="list-style-type: none"> <li>. cartographie de surface,</li> <li>. forage de carotte,</li> <li>. fosse d'essai,</li> <li>. galerie d'exploration,</li> <li>. cartes géologiques publiées.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. faire des prévisions préliminaires de taux de fonçage,</li> <li>. déterminer les zones majeures de ralentissement du fonçage dû à des conditions géologiques défavorables,</li> <li>. comparer avec des fonçages dans des conditions géologiques similaires et faire un jugement sur le succès économique du projet.</li> </ul>
2) Estimé des pressions de terrain et du temps de maintien.	<ul style="list-style-type: none"> <li>. galerie d'exploration,</li> <li>. expérience antérieure dans le même terrain sous des conditions de couverture similaire,</li> <li>. puits ou forage de carotte,</li> <li>. essai de plaque ou essai de vérin dans le trou de sonde ou essai en chambre.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. déterminer le déplacement sécuritaire et les demandes de soutènement stationnaire temporaire,</li> <li>. estimer les demandes de soutènement permanent (pourrait être modifié après la fin du fonçage),</li> <li>. estimer les délais de production dus aux pressions de terrain excessives,</li> <li>. évaluer l'ancrage de la taupe (poussée et couple).</li> </ul>
3) Propriétés résistives de la roche:	<p><u>Sur le terrain:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>. estimé à partir de carottes fraîches,</li> <li>. estimé avec le marteau Schmidt sur les affleurements,</li> <li>. vitesses sismiques,</li> <li>. dureté Moh sur des échantillons frais.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. estimer le taux de fonçage de production,</li> <li>. estimer les coûts de taillants pour la roche.</li> </ul>

TABEAU IV (suite)

En laboratoire:

- |   |  |  |
|---|--|--|
| 4) Propriétés d'abrasion de la roche:   | <ul style="list-style-type: none"> <li>. ASTM - D2490-71,</li> <li>. essai normalisé de IR Lawrence,</li> <li>. poinçonnement</li> <li>. essai tri-axial.</li> <li>. % SiO<sub>2</sub>/résistance en compression/ profondeur de coupe,</li> <li>. en comparant avec l'usure sous des conditions analogues,</li> <li>. essai Tabor ou l'essai Tabor modifié,</li> <li>. essai à la scie,</li> <li>. essai d'abrasion Los Angeles</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>. déterminer la vie et les coûts des éléments du système de fonçage en contact avec la roche incluant les taillants.</li> </ul>   |
| 5) Détecter les gaz explosifs, corrosifs et dangereux:                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>. rapport sur le carottage,</li> <li>. étude de l'histoire dans de la roche similaire,</li> <li>. sondage géophysique,</li> <li>. forage avec sonde à l'avant.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>. sécurité et protection du personnel,</li> <li>. choix des systèmes de ventilation et de surveillance,</li> <li>. protection des composantes de la machine.</li> </ul>   |
| 6) Systèmes de joints et de lits (étendue, pendage, direction et intégrité)           | <ul style="list-style-type: none"> <li>. cartographie de surface des affleurements et carrières,</li> <li>. forage de carotte (carottes perdues)</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>. estimer les délais de fonçage dus à des conditions de roches défavorables,</li> <li>. déterminer les demandes de soutènement temporaire.</li> </ul>   |
| 7) Failles - direction, chevauchement, rejet et intégrité.<br>Eau - Tête et quantité. | <ul style="list-style-type: none"> <li>. cartographie de surface,</li> <li>. forage de carotte - perte et amenée d'eau dans trou de sonde,</li> <li>. étude de localisation de puits d'eau,</li> <li>. SONAR ou RADAR de roche,</li> <li>. forage avec sondage à l'avant,</li> <li>. sondage géophysique.</li> </ul>   | <p>Note: (les systèmes de joints primaires et secondaires avec un espacement inférieur à 1/3 m aident le fonçage plus grand que 1/3 m causent des accrochages dans le système de manutention de la roche brisée).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>. déterminer les demandes de pompage d'eau</li> <li>. déterminer à l'avant des demandes de rideaux de coulis,</li> <li>. déterminer les demandes de soutènement.</li> </ul> |

comparaison sous des conditions identiques fournissent des résultats intéressants. Même si les méthodes d'excavation de la roche sont relativement différentes, elles ont des coûts de base qui sont communs à chacune et ainsi peuvent être comparées. Les catégories de coûts sont la main d'oeuvre, l'entretien, la production, l'équipement et les consommables plus les coûts de revêtement de béton, si c'est le cas.

Dans presque toutes les catégories de coûts, l'excavation à la machine est moins dispendieuse. L'exception, bien entendu, est le coût de l'équipement où le coût initial de la machine est plusieurs fois plus grand que le coût de l'équipement nécessaire pour la méthode conventionnelle de minage. Toutefois, le minage mécanique a demandé 43% moins de main d'oeuvre que le minage par la méthode conventionnelle. Un autre domaine relié de près au coût de la main d'oeuvre est la production; on a déterminé que la production avec la machine était approximativement 20% plus rapide que par la méthode conventionnelle. Les approvisionnements en consommables se sont montrés 26% plus chers pour le minage par la méthode conventionnelle. Et pour le moment, on considère que dans l'image d'ensemble, les coûts d'entretien seraient environ les mêmes pour les deux types de minage. On a remarqué de plus que l'excavation à la machine sauvait approximativement 0.33  $\text{vg}^3$  de béton par pied linéaire de tunnel. Il fut également noté que le minage à la machine élimine le besoin de tirer des lignes dans un tunnel qui doit être revêtu de béton et il fut beaucoup plus facile de nettoyer un tunnel foncé à la machine. Les chiffres avancés plus haut sont pour un cas particulier datant de 1967, il ne représente pas la moyenne ou des conditions de 1973. De plus, afin de situer les chiffres avancés, on doit dire que ceux-ci sont basés sur une machine fonçant dans une roche moyenne-dure ayant une résistance en compression d'approximativement 18000 lb/po<sup>2</sup>. La pénétration de la machine dans le calcaire était d'environ 4.8 pi/h alors que les taillants ont coûté environ \$7.50/pi. D'après S+M Constructors, au cours de ce projet particulier à St. Louis, le fonçage mécanique s'est montré la méthode la plus économique de minage.

Il est important de noter que présentement les rendements obtenus avec la méthode conventionnelle de forage sautage se situent entre 40 et 60 pi par jour dans la plupart des projets. D'autre part, aucune des méthodes conventionnelles de fonçage n'excède 4 pi/h. Ceci est tout près du minimum obtenu par les machines de fonçage dans des roches allant jusqu'à 20000 lb/po<sup>2</sup>.

## 2.9 Avantages - désavantages

Le fonçage de tunnels par la méthode mécanique a plusieurs avantages. Par exemple, étant donné les conditions géologiques adéquates des roches allant jusqu'à une dureté moyenne, une longueur adéquate de tunnel de diamètre uniforme, alors celui-ci peut être foncé plus rapidement et à un coût plus bas que par la méthode de forage - sautage dû à la nature continue de l'opération. La section circulaire requiert moins de support au cours de l'usage permanent et il y a moins de chutes de blocs au cours du fonçage. Le bris hors-profil est significativement moindre à moins que du sautage contrôlé soit employé. Le transport de la roche brisée est facilité par une fragmentation uniforme qui permet le choix d'un système continu de convoyeur pour l'enlèvement.

D'un autre côté, il y a plusieurs désavantages concernant l'usage des machines de fonçage. En premier lieu, elles sont très dispendieuses. En plus de cela, il y a le désavantage que les machines de fonçage sont habituellement faites pour un ouvrage en particulier où l'ingénierie des taillants, la puissance, la poussée et la vitesse de rotation sont spécifiés pour rencontrer des conditions uniques à un ouvrage. Des ajustements sont très dispendieux à faire et le présent manque de normalisation concernant les diamètres des tunnels ne rend pas très attrayant le développement de machines de tablettes. Il s'ensuit des délais de livraison souvent importants de l'ordre de 9 à 18 mois. Le fonçage par machine offre une flexibilité beaucoup plus restreinte, par exemple, on ne peut pas faire de changements de dimension le long du tunnel. Les machines ne peuvent pas prendre une courbe d'un rayon inférieur à beaucoup moins de 300 pieds et leur habileté à prendre des pentes est restreinte à environ 45<sup>0</sup> vers le haut et

à 27° vers le bas et cela avec certaines difficultés supplémentaires. On a besoin de beaucoup plus de renseignements géologiques que pour la méthode forage - sautage parce que les résultats dépendent à un plus haut degré des changements de conditions. Aussi, la méthode est comparativement nouvelle et le nombre de bris, particulièrement dans la roche dure est particulièrement élevé.

#### 2.10 Problèmes lors du forage de tunnel avec des machines de fonçage

Le sous-comité canadien sur l'exploration en mécanique des roches a fait une étude bibliographique pour établir la fréquence des problèmes types rencontrés lors du fonçage de tunnel avec des machines pleine face. Ils ont déterminé que les trois principales sources de problèmes sont:

- i) des couches dures et des concrétions dures dans une matrice molle; le maintien de l'ancrage et de la direction sont difficiles à faire,
- ii) terrain s'affaissant; des affaissements du toit et de la face généralement associés avec des traits de géologie structurale; et
- iii) arrivée d'eau et/ou de gaz.

A la suite de cette étude, le sous-comité a proposé un système de sondage basé sur l'usage d'une foreuse au diamant de petit diamètre le long de l'axe de la machine de fonçage et comprenant une analyse visuelle de la carotte, des sondages géophysiques dans le trou et les captages à l'aide de détecteurs appropriés.

Il existe aussi aujourd'hui encore un autre groupe de problèmes importants relativement à l'ingénierie de la machine et cela en incluant tout le système nécessaire au fonçage. Ces problèmes se situent au niveau surtout de l'ingénierie structurale de la machine et du réglage de la direction d'avancement.

Le fonçage de tunnel par machine se compose de nombreuses phases demandant l'usage judicieux de spécialistes. Souvent pour un projet

particulier, il est difficile de rassembler une telle équipe et des pertes de rendements suivent invariablement. Pour éviter ces problèmes, le client doit attacher une importance toute particulière à l'expérience de l'équipe totale de fonçage en plus du coût de soumission.

### 2.11 Perspectives d'avenir

Dans l'avenir, on peut s'attendre à un usage beaucoup plus grand des tunnels pour les besoins de génie civil. Certains avancent que d'ici cinq ans, 80 pourcent des tunnels utilisés dans ces travaux seront foncés par la méthode mécanique aux Etats-Unis d'Amérique. L'augmentation plus rapide des coûts pour le fonçage suivant la méthode conventionnelle peut expliquer en partie cette allégation. Il y a aussi le fait que de moins en moins de gens sont intéressés à travailler dans des conditions difficiles comme celles exigées dans la méthode conventionnelle, même à salaire élevé.

Au point de vue technique, il est possible que l'on arrive à faire économiquement le fonçage mécanique de tunnel dans les roches dures. Trois voies pourraient surtout mener à cette situation. D'abord en développant des méthodes combinées de fonçage par méthode mécanique, thermique et hydraulique. Le fonçage mécanique serait par exemple facilité par l'application d'une source de chaleur intense à la face rocheuse ce qui réduirait sa résistance à l'attaque mécanique. Un refroidissement rapide à l'eau pourrait réduire encore plus cette résistance. Il y aurait aussi la possibilité de produire des plans de faiblesse dans la face rocheuse à l'aide de jets d'eau puissants. Toutes ces méthodes sont présentement à l'étude et pourraient porter fruit à plus ou moins long terme.

Une autre possibilité technique est l'amélioration des taillants tant au point de vue de la surface d'attaque que des coussinets. Au cours des dernières années, il y a eu des progrès considérables dans ce domaine. Etant donné que le marché pour ces taillants se développe rapidement, il est probable que des sommes considérables seront investies pour améliorer ces outils. Cette amélioration réduirait les coûts pour le fonçage dans les roches de dureté moyenne et rendrait possible le fonçage de roches très dures.

Il y a quelque temps, le Bureau des Mines des E.U.A. a fait des appels d'offres pour le développement d'un système de réglage automatique pour les machines de fonçage de tunnel au coût de plusieurs millions de dollars. On peut s'attendre à voir apparaître d'ici quelques années un assemblage de capteurs, d'organes de commande et de mini-ordinateurs pour faire la commande automatique des machines de fonçage. Cela permettra d'étendre l'emploi de cette méthode de fonçage et mènera probablement à une réduction de coûts étant donné que le système veillera sûrement à maintenir des conditions de fonctionnement optimales en considérant tous les facteurs. Là où des dangers existent lors du fonçage, un tel système pourrait être utilisé et il serait ainsi possible d'éviter de mettre en danger la vie des hommes autrement assignés à ces machines.

Le manque de flexibilité des machines de fonçage de tunnel pleine face va probablement les éliminer encore pour une bonne période de temps de la plupart des situations minières. Par ailleurs, il se pourrait que des machines à tête taillante travaillant par balayage soient modifiées pour être utilisées dans de la roche dure et faire l'affaire dans les mines.

Etant donné l'importance à plusieurs points de vue du fonçage de tunnel pour les E.U.A., le U.S. Bureau of Reclamation a initié un programme de recherche d'envergure sur plusieurs aspects reliés au fonçage de tunnel par méthode mécanique. Cette recherche est combinée avec la construction du tunnel Stillwater. Il est probable que beaucoup de renseignements et peut-être des innovations seront rapportés en relation avec ce projet dans les années à venir. Le coût du programme de recherche se chiffre à cinq millions de dollars, soit un peu plus du quart du coût pour le fonçage lui-même.

### 3. FONCAGE DE MONTEES

#### 3.1 Méthodes de fonçage de montées

Les montées que l'on rencontre surtout dans les mines sont exécutées aujourd'hui suivant quatre méthodes principales:



1. la méthode conventionnelle de fonçage par forage - sautage avec ou sans système de protection pour les ouvriers du type Alimak;
2. la méthode de fonçage par carottage utilisable dans la roche relativement molle;
3. le fonçage par broyage par la méthode pleine face dans des roches de dureté variable avec trou pilote; et
4. le fonçage par broyage par la méthode pleine face dans des roches de dureté variable sans trou pilote.

Certaines méthodes existent pour le fonçage dans des sols ou dans des roches non consolidés mais ce sujet dépasse le cadre de cette présentation. Aussi la méthode conventionnelle ne sera discutée que pour fins de comparaison. La méthode pleine face sans trou pilote est toute récente de quelques mois et on ne peut pas encore discuter beaucoup de cette méthode introduite par le manufacturier Calweld.

### 3.1.1 Machine à carottage

Les machines à carottage sont utilisées dans les roches molles comme l'anhydrite, le sel gemme et la potasse. Suivant cette méthode de fonçage qui est illustrée à la figure 6, on fore d'abord un trou pilote puis avec un gros foret on broye la roche suivant une couronne ce qui a pour effet de produire une carotte comme lors du forage au diamant d'un diamètre légèrement inférieur à celui du trou. On ne connaît pas encore d'usage de cette méthode au Canada et pour cette raison elle ne sera pas discutée en plus de détails à part de souligner que la méthode permet le fonçage de trous allant jusqu'à 5 pi de diamètre à des vitesses entre 5 et 40 pi/h.

### 3.1.2 Machine de fonçage pleine face avec trou pilote

Ce groupe peut être divisé en deux types légèrement différents suivant leur mode de fonctionnement, c'est-à-dire:

1. les machines qui forent un trou pilote vers le haut et qui élargissent ce trou en partant du haut; et
2. les machines qui forent un trou pilote vers le bas et qui élargissent ce trou en partant du bas.

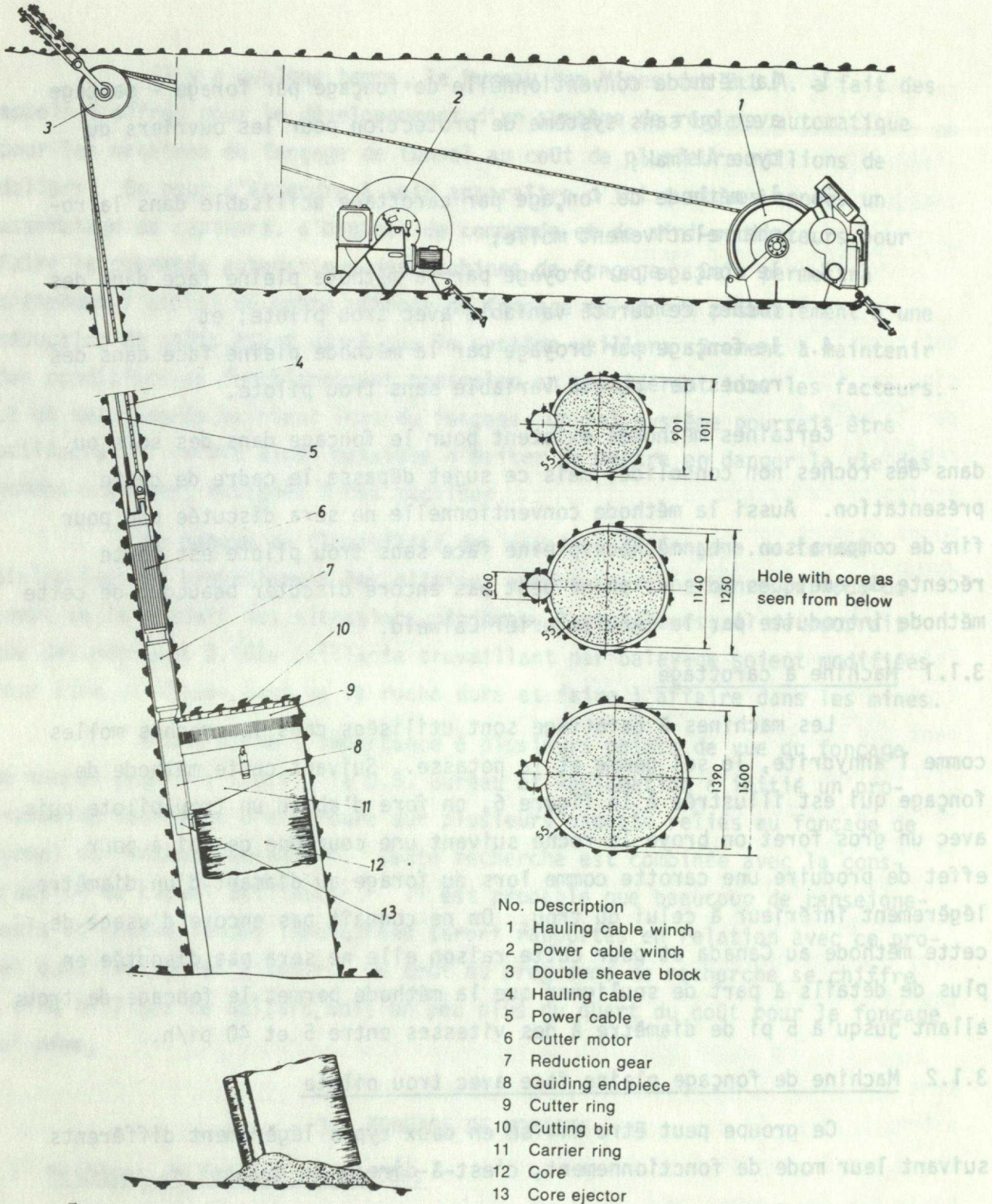


Figure 6 - Principe de fonctionnement de la machine de forçage de montée par carottage par Salzgitter.

Ces deux méthodes sont illustrées schématiquement à la figure 7. Dès maintenant, on peut dire qu'aujourd'hui on a tendance à utiliser la deuxième méthode presque exclusivement. Les outils employés pour le fonçage avec cette méthode sont d'abord des forets pilotes similaires à ceux que l'on utilise couramment pour le forage de trous de sautage dans les mines à ciel ouvert. On représente à la figure 8 une série de forets de ce type que l'on appelle généralement foret tricône. Pour les forets utilisés dans des roches molles, les cônes portent des dents de forme variable et en acier durci, pour ceux employés dans les roches très dures, les cônes sont imprégnés de pastilles de carbure de tungstène; entre ces deux extrêmes on retrouve toute une série de compositions et de formes d'éléments taillants. L'outil servant à élargir le trou pilote se compose d'un ensemble de taillants rotatifs ou de taillants à disques du même type que ceux que l'on retrouve sur les machines de fonçage de tunnel. La figure 9 illustre un montage typique de taillant sur un alésoir. Originellement, l'alésoir avait la forme d'un arbre de Noël avec des taillants à deux ou trois niveaux, aujourd'hui toutefois les différents taillants ont tous tendance à être sur le même niveau.

### 3.2 Ingénierie générale d'une machine de fonçage de montée employée dans les mines canadiennes

Toute machine de fonçage de ce type comprend les composantes suivantes:

1. Une tige de forage avec outils
2. Une foreuse du type rotary avec son équipement accessoire
3. Une unité de déplacement

Il existe sur le marché de nombreuses machines de ce type dont les principaux fabricants sont Robbins et Dresser ainsi que quelques autres compagnies de moindre importance parmi lesquelles on retrouve Subterranean et Koken. Tout comme pour les machines de fonçage de tunnel, il n'y a pas de fabricant canadien. Dans les lignes qui suivent, on n'a pas suffisamment d'espace pour décrire toutes les particularités des différentes machines mais on va surtout faire des commentaires sur une machine d'usage très répandu, soit la 61-R de Robbins, tout en signalant certaines des différences se présentant sur les autres machines.

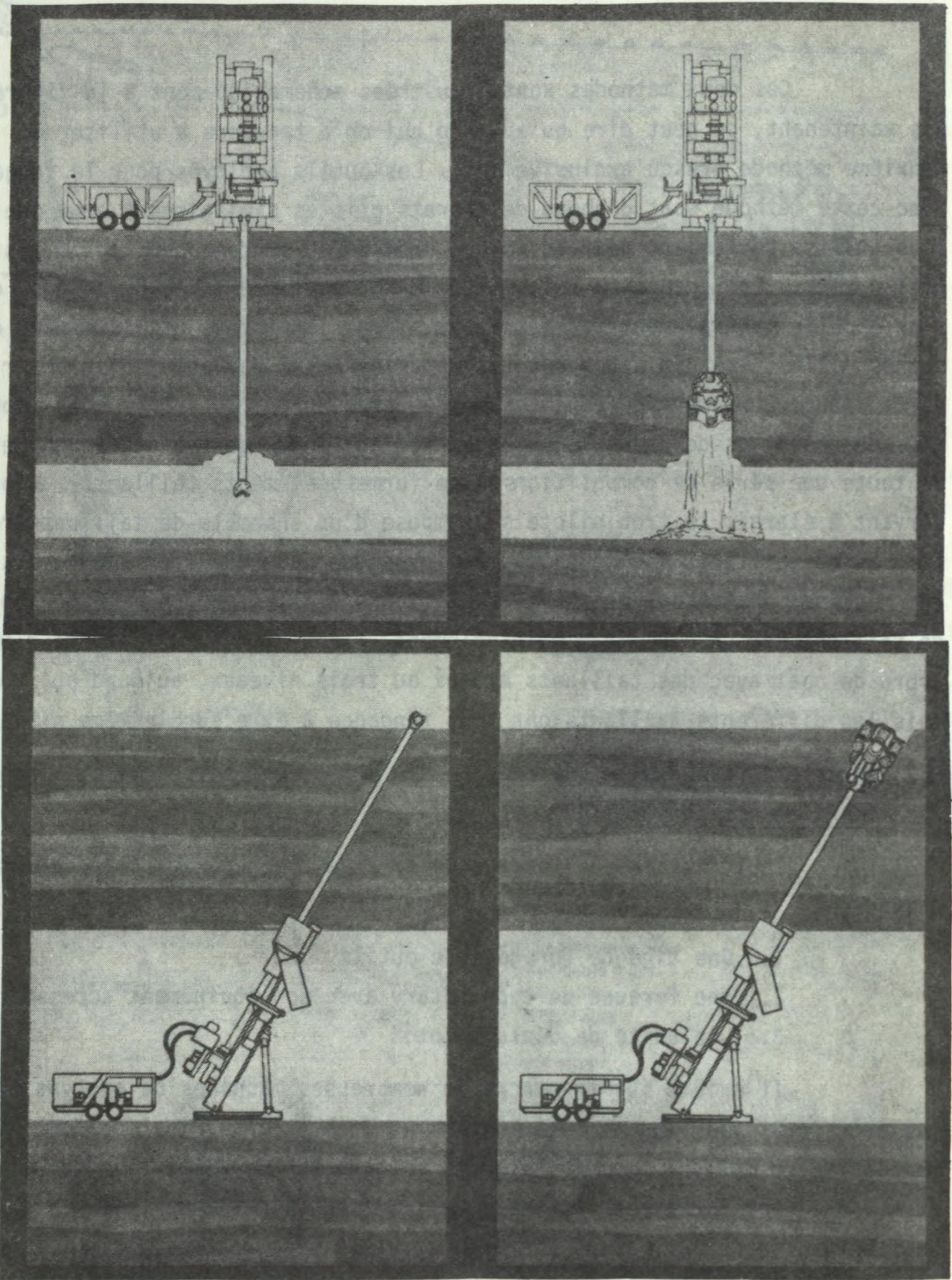


Figure 7 - Deux méthodes de fonçage de montée par la méthode pleine face avec trou pilote.

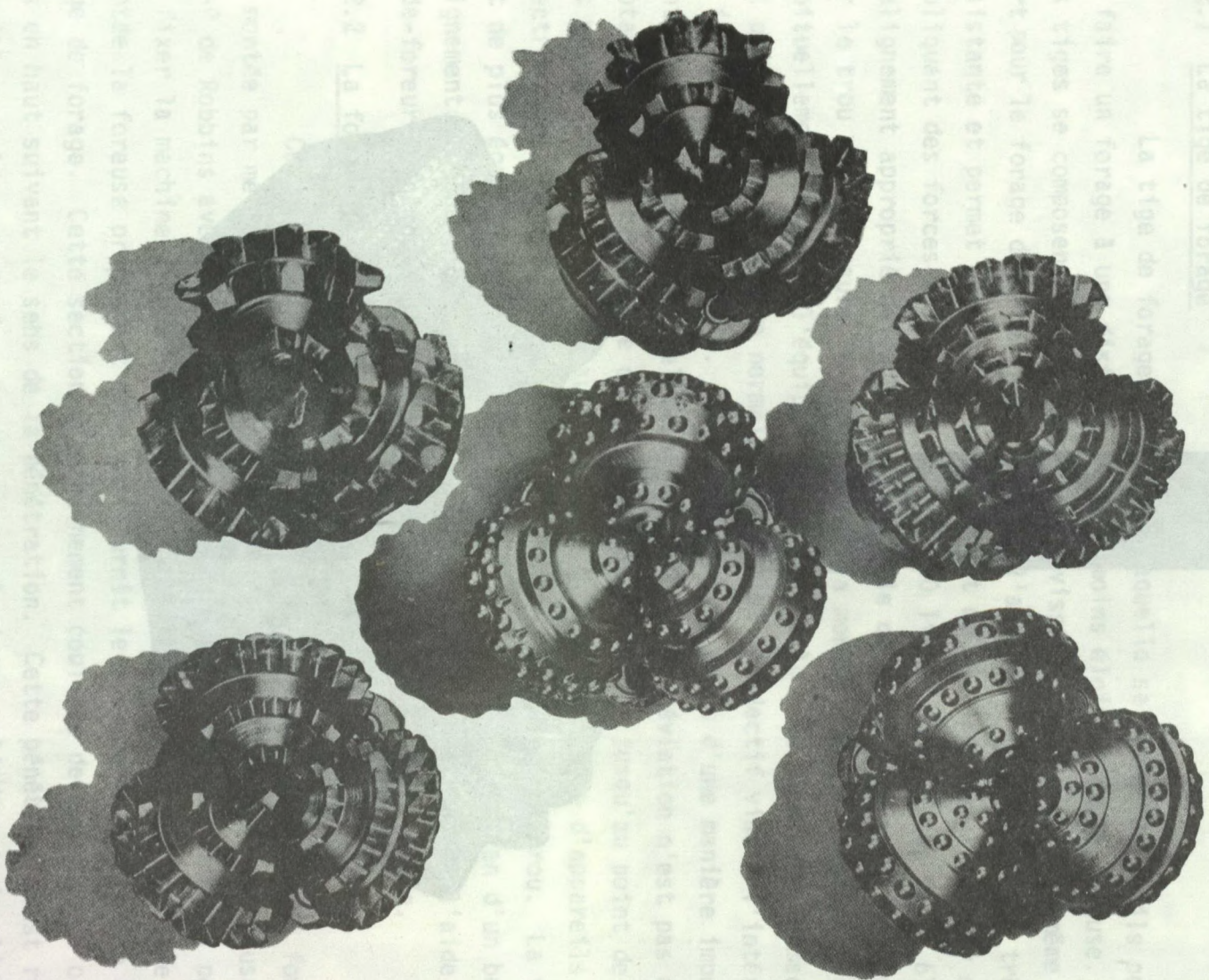


Figure 8 - Forets tricônes pour usage avec un éventail de dureté de roche.

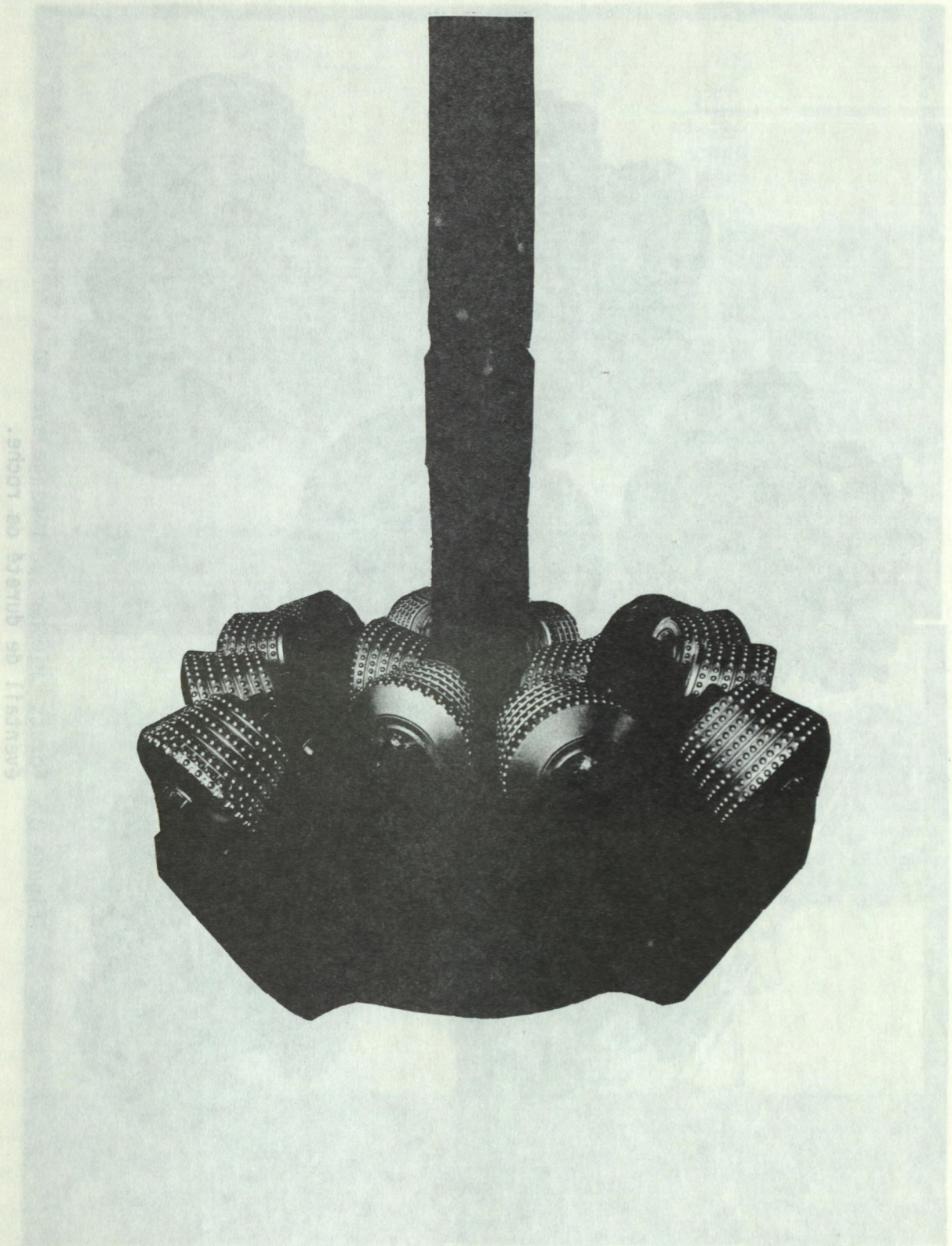


Figure 9 - Alésoir utilisé dans la méthode de fonçage de montée pleine face avec trou pilote.

### 3.2.1 La tige de forage

La tige de forage au bout de laquelle se fixent les outils permet de faire un forage à une distance plus ou moins éloignée de la foreuse. Les tiges se composent de sections de 5 pi vissées bout à bout. La même tige sert pour le forage du trou pilote et pour l'alésage. Cette tige est très résistante et permet de pousser sur le foret ou de tirer sur l'alésoir en appliquant des forces allant jusqu'à 600,000 livres dans le cas de la 61-R. L'alignement approprié de la section initiale de cette tige, avant de commencer le trou pilote, assure la direction de la montée. Cet alignement est habituellement fait par l'équipe d'arpentage de la mine. Lorsque la machine est utilisée d'une manière normale, on atteint l'objectif visé à l'intérieur de ( $\pm 2\%$ ) de façon générale. Si le trou pilote dévie d'une manière importante, on recommence habituellement celui-ci si la déviation n'est pas acceptable. Si un trou dévie d'une manière importante, jusqu'au point de ne pas percer dans l'ouverture au niveau inférieur, on dispose d'appareils électroniques à ondes de basses fréquences pour localiser ce trou. La tige est de plus équipée de stabilisateurs pour faciliter le maintien d'un bon alignement. L'addition des sections de tiges peut se faire avec l'aide d'un aide-foreur ou par un système hydraulique avec commande à distance.

### 3.2.2 La foreuse

Cette section compose la partie principale du système de forage de montée par méthode mécanique. On présente à la figure 10 une foreuse 61-R de Robbins avec ses accessoires. Elle se compose d'un bâti qui permet de fixer la machine au plancher rocheux durant le forage. Sur ce bâti est montée la foreuse proprement dite qui fournit le mouvement de rotation à la tige de forage. Cette section d'entraînement coulisse de haut en bas ou de bas en haut suivant le sens de la pénétration. Cette pénétration est rendue possible par la poussée fournie par un ou plusieurs cylindres hydrauliques. Sur la machine 61-R, deux vitesses de rotation sont disponibles pour le forage du trou pilote, 36 et 72 tr/mn, et deux pour l'alésage, 10 et 20 tr/mn; d'autres machines offrent une variation continue de vitesses entre respectivement 0 et 70 tr/mn et 0 et 25 tr/mn. La construction permet de forer des

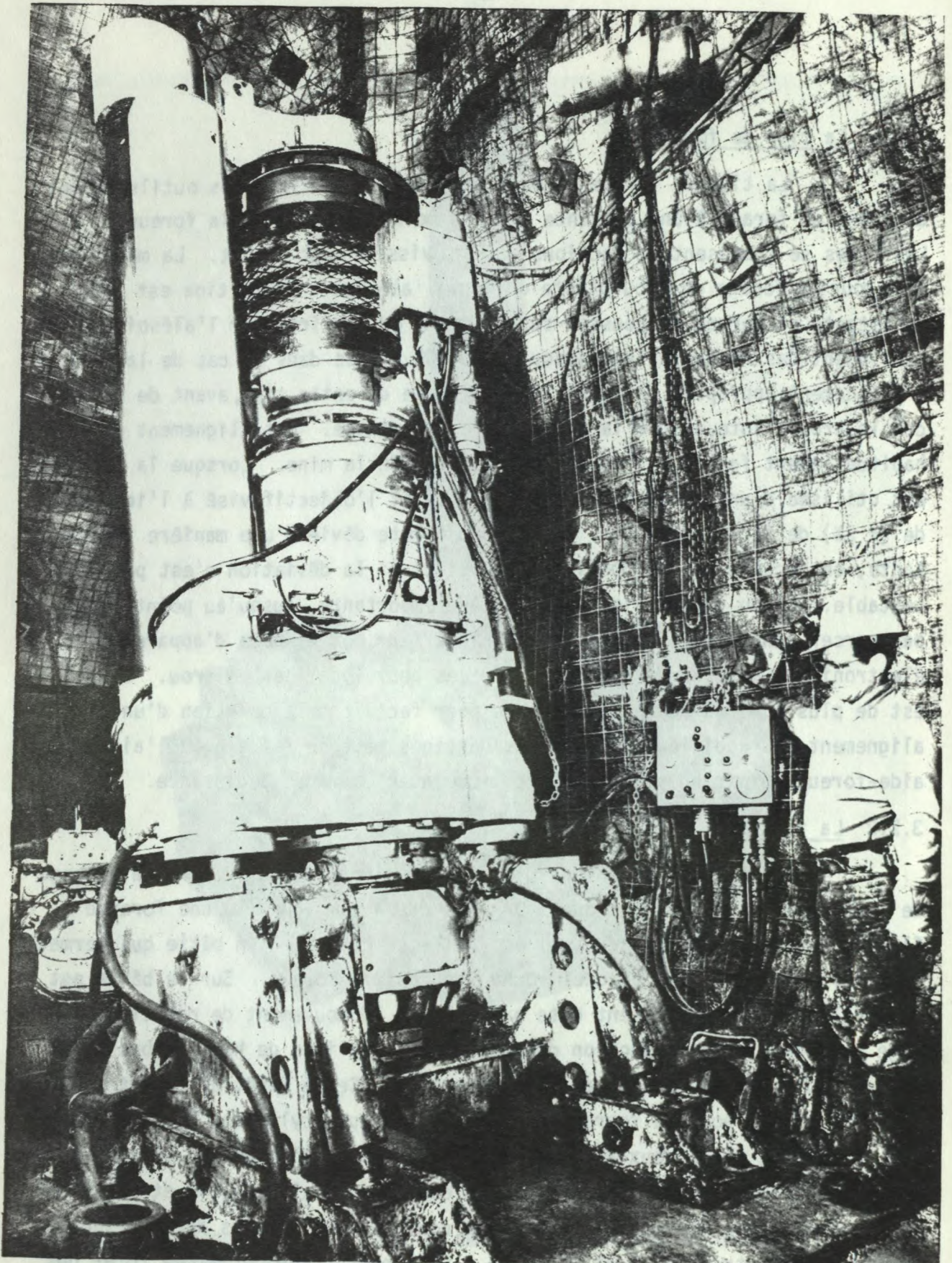


Figure 10 - Machine de fonçage de montée pleine face avec trou pilote par Robbins - modèle 61-R.



trous plus ou moins inclinés par rapport à la verticale, toutefois, le forage de trous à un angle inférieur à  $50^{\circ}$  est souvent une source de problèmes supplémentaires. Le fonçeur actionne la foreuse à partir d'une console de commande et l'approvisionnement en puissance électrique et/ou hydraulique est produit ou modifié par des unités transportables. Au cours du forage du trou pilote, les débris de forage sont remontés à la surface par un mélange d'air et d'eau alors que les débris d'alésage beaucoup plus importants sont souvent enlevés après transbordement si nécessaire par des trains de berlines. Les moteurs d'entraînement de rotation sont à courant alternatif pour la Robbins 61-R, pour d'autres machines ils sont hydrauliques ou à courant continu. Contrairement à la plupart des machines de fonçage de tunnel, les machines de fonçage de montée sont fixes dans la grande majorité des cas lors du fonçage de l'ouverture. Un certain manufacturier allemand offre cependant des machines qui se déplacent dans le trou vers le bas et qui ne nécessitent pas le forage d'un trou pilote; toutefois, on ne retrouve pas de telles machines au Canada. Chaque site de fonçage de montée doit être préparé au préalable avant l'arrivée de la foreuse, on fournit habituellement à la machine une plate-forme en béton d'où sortent des boulons de fixation.

### 3.2.3 L'unité de déplacement

Un tracteur permet de déplacer la foreuse à un autre endroit sur un même niveau. Ce déplacement se fait relativement lentement étant donné l'encombrement de la machine et la puissance relativement faible de ces tracteurs. Les tiges en section de 5 pieds sont déplacées habituellement par un scooptram ou par un train de berlines.

### 3.3 Usages

L'usage des machines de fonçage de montée est aujourd'hui passablement répandu dans l'industrie minière. Dans un complexe minier important comme celui de l'Inco à Sudbury, on possède déjà depuis quelque temps au-delà de dix machines de fonçage alors que de petites exploitations se contentent souvent d'une seule machine. Là, où la quantité de fonçage de montée est relativement réduite, on fera peut-être appel à des entrepreneurs. Ces montées dans les mines servent pour la ventilation, l'acheminement du minéral

ou de la gangue d'un niveau à un autre, et les services. Aussi récemment, on a commencé à se servir de ces montées comme ouvertures d'où l'on fait du forage pour exploiter un chantier d'abattage.

Contrairement à ce qui est le cas avec les machines de fonçage de tunnel, on utilise ces machines pour le fonçage de montée dans des terrains très durs dans certains cas bien au-delà de la valeur de résistance en compression de 25000 lb/po<sup>2</sup>. Dernièrement, on a annoncé qu'un certain groupe minier de l'Afrique du Sud faisait des études sérieuses en vue d'utiliser ces machines dans les mines d'or situées dans des quartzites. L'économie de l'emploi est discutable dans la roche très dure mais des facteurs comme la nécessité de faire les choses rapidement et avec une certaine sécurité favorise l'emploi de ces machines même si, pour une montée donnée, il peut être plus économique de faire le travail par la méthode conventionnelle. C'est d'ailleurs ce qui explique que certaines mines canadiennes dans la roche très dure n'emploient pas ces machines à cause du nombre limité de montées que leur méthode de minage nécessite. On fait rarement usage du fonçage mécanique de montée pour des distances inférieures à 100 pieds et l'on a foré des montées de ce type jusqu'à des longueurs de deux milles pieds. Les dimensions courantes dans les mines se situent aux environs de 5 pieds de diamètre, toutefois plusieurs mines emploient des ouvertures de 4 pieds alors que dans certaines mines importantes, la méthode d'exploitation demande des montées allant jusqu'à 7 pieds de diamètre et même plus. Lorsque la puissance de la machine n'est pas suffisante, l'alésage du trou pilote de souvent 11 pouces de diamètre est fait en deux étapes. Seulement dans les mines de l'Inco de Sudbury, on a fait le fonçage de plus de 100,000 pieds depuis 1964 en employant la méthode mécanique de fonçage de montée. Ceci fait que le Canada est l'un des pays où l'on fait le plus grand usage de ces machines.

#### 3.4 Coût des machines de fonçage de montée

Le coût de ces machines avec accessoires se situe entre environ \$100,000 et \$400,000 dépendamment de la capacité de la machine. L'alésage constitue une portion importante de ce coût. A titre d'exemple, un alésage de 5 pi de diamètre se vend aux environs de \$30,000.

### 3.5 Rendement des machines de fonçage de montée par méthode pleine face avec trou pilote

Le rendement lors du fonçage de montée par méthode mécanique dans les mines est fonction de nombreux facteurs. Parmi ces facteurs, on peut nommer les propriétés mécaniques, la géologie, les conditions de fonctionnement, l'angle de forage, le diamètre de la montée et la distance de fonçage. Le rendement lors du forage du trou pilote est souvent un indice du rendement que l'on obtiendra durant l'alésage pour obtenir la dimension finale de la montée. La qualité des taillants en un moment donné est aussi un facteur dont on ne peut ignorer l'importance. En plus le rendement général de l'opération est affecté par les délais produits par des arrêts dans les approvisionnements en puissance, en eau, en air ou encore par des retards dans l'évacuation des débris d'alésage. Toutes les méthodes de prédiction des rendements nécessitent l'introduction d'un facteur pour tenir compte de la résistance de la roche, ce facteur est souvent la résistance à la compression uniaxiale ou un indice déterminé lors d'essais de poinçonnement.

Parmi les chiffres sur les rendements que l'on rencontre en littérature, on a généralement pour le fonçage du trou pilote des chiffres entre 4 et 16 pi/h alors que pour l'alésage, on a entre 1 et 8 pi/h. Ceci est pour un intervalle considérable de résistances de roche, soit entre 8000 et 50,000 lb/po<sup>2</sup>. Dans une roche donnée, les rendements sont, en première approximation et suivant une zone limitée, directement proportionnels à la vitesse de rotation et à la poussée exercée sur les outils.

### 3.6 Coût du fonçage de montée par des machines de fonçage de montée par méthode pleine face avec trou pilote

Tout comme le rendement, le coût est influencé par de nombreux facteurs dont beaucoup sont les mêmes que pour le rendement. L'amortissement de la machine de fonçage ne semble pas un problème important pour la plupart des usagers de machines de fonçage. Une étude relativement complète de la littérature en fonçage mécanique de montée a permis de constater que les coûts de fonçage se sont échelonnés entre \$30.00 et \$300.00 par pied

suivant plusieurs facteurs dont, en plus de ceux mentionnés précédemment à la section 3.5, il faut inclure l'expérience des usagers.

La relation entre l'indice de résistance de la roche et la vitesse de pénétration ou le coût est incertaine. Toutefois, lors d'une récente conférence sur le fonçage, A. Bauer a présenté un graphique montrant le coût de fonçage en fonction de la résistance en compression pour des montées de deux diamètres différents. La figure 11 reproduit ce graphique qui est valable dans l'intervalle de longueur entre 200 et 600 pieds. Les coûts montrés sont des coûts moyens et ne comprennent que les coûts de fonctionnement, n'incluant pas ainsi la dépréciation de la machine.

La vie des taillants affecte directement le coût de fonçage. A titre d'indication, on peut dire qu'avec une roche d'environ 30,000 lb/po<sup>2</sup>, on obtient une vie de taillants d'environ 800 pieds. La vie des forets est à peu près du même ordre de grandeur théoriquement. Cependant, dû au fait du chargement excessif habituel de ces forets par le poids des tiges ou par une surcharge imposée par le système hydraulique, cette valeur est passablement réduite dans de nombreux cas.

Dans un article récent par des ingénieurs de l'Inco à Sudbury, on a présenté les coûts moyens pour le fonçage mécanique d'une montée dans de la roche dure (25,000-35,000 lb/po<sup>2</sup>) et d'un diamètre de 5 pi comme étant égal à \$100.00 par pied. Ce coût se distribue comme montré au tableau V. On remarquera l'importance du facteur alésoir et taillants qui représente pour cette mine 35% du coût de fonctionnement avec cette méthode de fonçage de montée. L'autre série de coûts montrée à ce tableau sera discutée plus loin dans le texte.

### 3.7 Renseignements géologiques

Les études géologiques préalables à l'usage de machines de fonçage de montée sont beaucoup plus rudimentaires que pour l'usage de machines de fonçage de tunnel. D'abord, étant donné qu'elles sont utilisées dans les mines, on connaît déjà passablement le terrain qu'elles auront à traverser. Les études se bornent souvent à des essais de poinçonnement et à

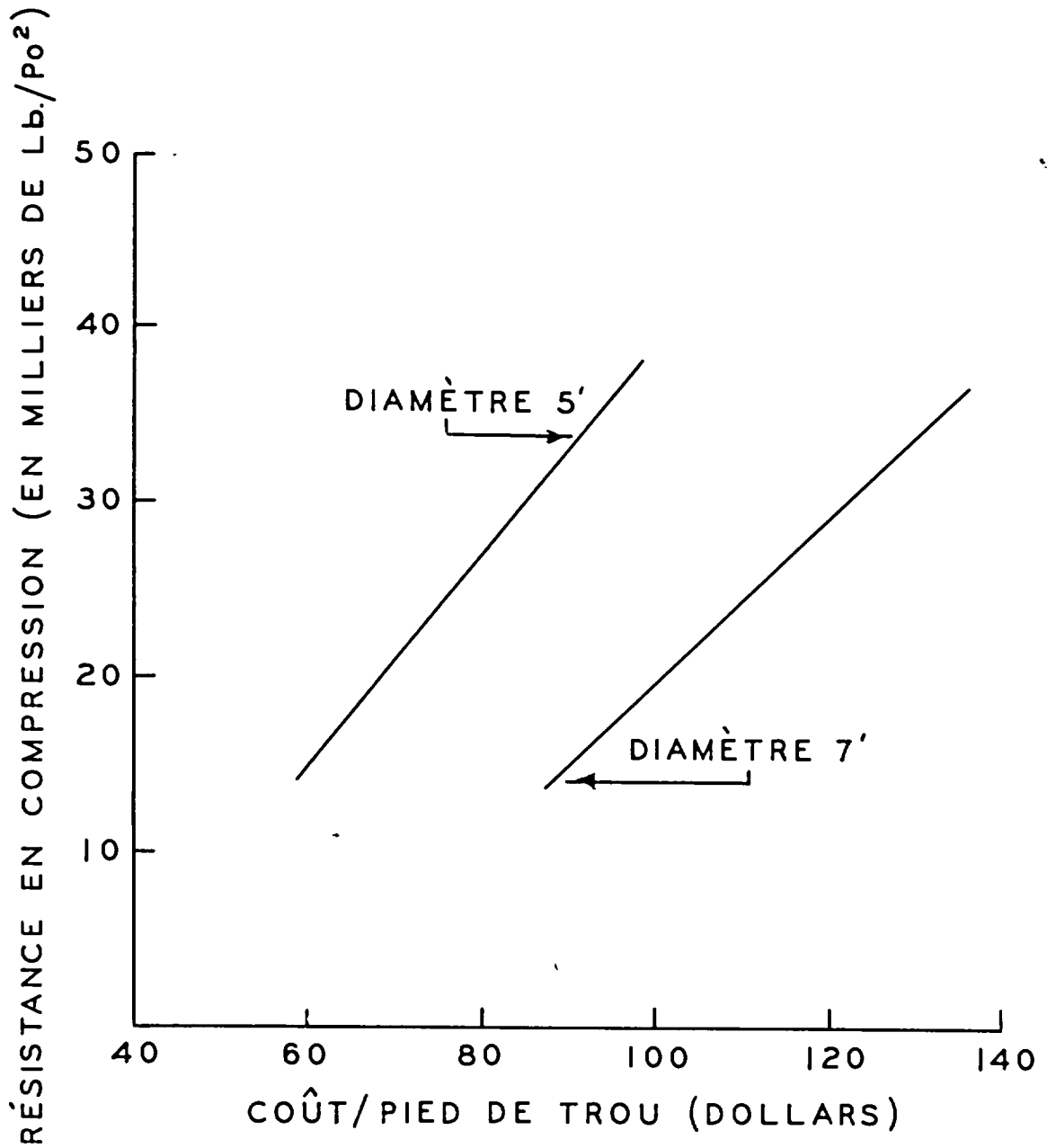


FIGURE II COÛT DE FONÇAGE DE MONTÉE PAR MÉTHODE MÉCANIQUE EN FONCTION DE LA RÉSISTANCE DE LA ROCHE

TABLEAU V  
DISTRIBUTION DES COUTS  
FONCAGE D'UNE MONTEE DE VENTILATION A L'INCO

	Montée de 5 pi de diamètre foncée mécaniquement (\$)	Montée 9' x 7' avec boisage (\$)
Coût de la main d'oeuvre	19.00	69.45
Boisage	-	24.54
Acier de forage, réparation des foreuses, explosifs	5.77	11.03
Fournitures - machine	3.57	-
Réparations - machine	11.83	-
Forets pilotes	7.32	-
Alésoir et taillants	34.90	-
Déboisage de la montée	-	13.10
Poste de fonçage	18.38	-
	-----	-----
Coût total par pied	100.77	118.12

des déterminations de résistance en compression de la part du manufacturier pour fournir à l'acheteur éventuel une idée des rendements qu'il doit s'attendre à obtenir dans son exploitation. Les fournisseurs utilisent ces essais aussi pour fixer leur choix sur le type de taillants qu'ils recommanderont et pour estimer les vies qui seront probablement obtenues pour les taillants de sorte que l'acheteur pourra avoir une bonne idée du coût total de l'emploi d'une machine de fonçage de montée. Les entrepreneurs faisant ce travail à contrat se bornent souvent à une inspection visuelle des lieux de fonçage alors que d'autres complètent leur analyse par des essais de poinçonnement. L'évaluation de la résistance de la roche va aussi permettre au manufacturier de recommander des conditions de fonctionnement pour la machine de fonçage. Une fois que cette méthode de fonçage a été choisie par une mine, on ne fait généralement plus d'études géologiques avant que ne surviennent des problèmes particuliers.

Plusieurs situations géologiques particulières peuvent mener à des difficultés lors du fonçage. Toutefois, on ne s'attarde que rarement à considérer ces facteurs qui sont la présence de terrain fragmenté, de terrain s'écrasant, de terrain à litage, d'eau souterraine de ruissellement, des zones de coups de toit et d'une composition variable à la face. La faible quantité d'études géologiques est certainement conséquent aux distances relativement faibles de fonçage pour ces montées, en moyenne 400 pi. A mesure que les distances de fonçage augmenteront, les conditions géologiques pourront prendre plus d'importance vis-à-vis du succès ou de l'échec d'un fonçage.

### 3.8 Comparaison des rendements et des coûts obtenus avec la méthode mécanique et la méthode conventionnelle (forage-sautage).

Tout comme pour le fonçage de tunnel, les résultats comparant les deux méthodes dans des conditions identiques sont rarement disponibles. Dans un article récent, des représentants de l'Inco suggèrent même que les comparaisons ne doivent pas nécessairement se faire à diamètre d'ouverture égal. Ils fournissent un exemple en rapport avec le fonçage d'une montée de ventilation où l'alternative est souvent de foncer par la méthode

mécanique une montée de 5 pieds de diamètre ou de foncer une montée de 7' x 9' avec boisage puis déboisage par méthode conventionnelle pour obtenir le même produit final. Les chiffres pour les deux méthodes sont présentés au tableau V introduit auparavant. La méthode conventionnelle montre des coûts plus élevés par pied. Les chiffres présentés ne représentent que des coûts de fonctionnement. Il est raisonnable de croire que les coûts de capitalisation sont plus élevés pour le fonçage avec machines. Ainsi, il devient évident que le fonçage mécanique par  $vg^3$  est beaucoup plus dispendieux dans cette mine que lorsque l'on emploie la méthode conventionnelle. Cependant, le travail se fait plus vite, l'ouverture est plus stable et offre de meilleures caractéristiques d'écoulement. De plus, la période d'entraînement est très réduite, car il prend environ 6 mois pour entraîner un fonçeur mécanique alors que pour le fonçage par méthode conventionnelle, on doit considérer plusieurs années. Toute cette discussion indique une fois de plus que les chiffres ne disent pas tout par eux-mêmes et il faut être très prudent lors de telles comparaisons.

Dans les mines où les roches sont beaucoup moins dures que la roche à l'Inco, le coût par  $vg$ . cu. peut devenir inférieur pour la méthode mécanique de fonçage. En considérant tous les avantages de la méthode mécanique, les coûts pour cette méthode deviennent encore plus avantageux. Tel serait le cas pour le fonçage dans les schistes des mines de cuivre des Cantons de l'Est ainsi que dans d'autres exploitations en milieux de dureté moyenne.

### 3.9 Avantages et désavantages

Les raisons suivantes sont souvent invoquées pour supporter l'usage de machine pour le fonçage de montée:

- la sécurité par rapport aux chutes de blocs,
- l'élimination des explosifs,
- une plus grande vitesse d'exécution,
- une meilleure caractéristique pour le trou,
- une réduction de la main d'oeuvre (aussi le travail n'est pas aussi dur), et
- une réduction des coûts sous certaines conditions.



Cette méthode peut toutefois, être plus dispendieuse que les anciennes méthodes lorsque :

- de la roche extrêmement dure et abrasive est rencontrée et,
- de courtes montées sont requises.

### 3.10 Problèmes

Les principaux problèmes rencontrés lors du fonçage de montée sont causés par la géologie du terrain traversé. Dans du terrain fragmenté, il se produira des arrêts de la machine à cause des dépressions qui peuvent se produire dans la face de fonçage. Il peut se produire également dans ce type de terrain l'écrasement des trous. On peut avoir de la difficulté à évacuer les débris de forage du trou pilote et produire ainsi un coincement. Les terrains qui ont tendance à s'écrouir après qu'on y perce une ouverture, peuvent également produire le coincement de la tige de forage avec le foret pilote ou l'alésoir et demander des procédures onéreuses de récupération. Les terrains à litage peuvent favoriser la déviation du trou pilote. Cependant la déviation peut aussi être produite par une multitude d'autres facteurs plus ou moins bien connus. La poussée sur la tige lors du forage du trou pilote semble avoir une grande importance sur cette déviation. Si trop d'eau de ruissellement envahit le trou pilote, ceci peut causer des difficultés pour l'évacuation des débris de forage et nécessiter l'emploi d'un système d'évacuation complètement hydraulique, ce qui cause des délais et est plus dispendieux. Des coups de toit dans des trous pilotes ou dans des montées en voie d'exécution peuvent produire des dommages mécaniques à la tige et au foret ou à l'alésoir et nécessiter une cimentation partielle du trou pour ensuite répéter le forage. Une composition variable à la face a le même effet que pour le fonçage dans du terrain fragmenté, cela peut demander un réglage plus serré de la poussée sur le foret ou l'alésoir.

### 3.11 Perspectives d'avenir

De même que pour le fonçage de tunnel, la quantité de fonçage de montée par méthode mécanique est appelée à s'accroître au cours des prochaines

années. Plusieurs des raisons invoquées et des voies pour l'amélioration sont les mêmes que pour le fonçage de tunnel. L'économie et la sécurité sont et vont demeurer les deux principales justifications. Les améliorations techniques vont, surtout au cours des prochaines années, favoriser l'économie. La disponibilité de meilleurs taillants, l'introduction de méthodes combinées et l'emploi de systèmes de réglage seront certainement à la base des principales réductions du coût dans le futur.

Relativement au système de réglage pour les machines de fonçage de montée, un groupe du Centre de recherches minières fait une étude approfondie en recherche et développement dans ce domaine en coopération avec une compagnie minière importante. Nous avons choisi les nombreux capteurs nécessaires et nous allons bientôt commencer une période d'enregistrement de données sur le terrain. Après cette période, nous entendons fixer la stratégie de réglage et compléter l'assemblage d'un système de réglage en installant des organes de commande et une unité de prise de décision. Nous entrevoyons que ce système devra veiller à assurer une vitesse de pénétration maximale tout en demeurant à l'intérieur de limites acceptables du point de vue de l'économie de l'ensemble de l'opération. Le système devrait également empêcher l'usage abusif de ces machines et par le fait même augmenter la vie des outils et réduire l'entretien et les réparations. A. Bauer de l'Université Queens à Kingston, Ontario s'est montré d'accord avec nos prévisions dans ce domaine lors d'un récent symposium sur les tunnels à Toronto. Il considère comme nous que les améliorations des coûts pourraient d'avantage découler d'une augmentation de la vie des taillants que d'une augmentation de la vitesse de pénétration. Il suggère qu'un réglage automatique pourrait conduire à cette situation d'une manière efficace.

En attendant l'avènement d'un système de réglage automatique, il est probable que l'industrie accordera une plus grande importance au choix et à l'entraînement du préposé principal au fonctionnement de la machine. Lors d'une étude récente en Afrique du Sud, on a démontré sans équivoque l'importance de ce choix particulièrement du point de vue de l'économie de l'opération.

Depuis quelques années, l'industrie de la construction a découvert les avantages des machines de fonçage de montée. Il est à prévoir qu'une part considérable de l'augmentation de l'usage proviendra de ce secteur. On commence à utiliser ce type de fonçage pour les puits de ventilation de tunnel, dans les systèmes d'alimentation en eau, dans les ouvrages hydro-électriques ainsi que pour les systèmes d'égoût. Egalement, concernant les nouveaux usages, certaines mines commencent à utiliser les machines de fonçage de montée pour le fonçage de tunnels courts légèrement inclinés. Il est également à prévoir que cet usage va se développer.

## 4. BIBLIOGRAPHIE

- (1) A. Bauer, "Status of Tunnelling", Huitième symposium canadien sur la mécanique des roches, novembre, 1972.
- (2) R.M. Brown, "Raise Boring at the International Nickel, Ontario Division", Presented at the CIM Annual Meeting, Montreal, April, 1969.
- (3) M.D. Everell, "Performance of Raise Borers as a Function of Geology and Rock Properties", Huitième symposium canadien sur la mécanique des roches, Toronto, novembre, 1972.
- (4) W.T. Folwell, "Raise Borers Applied Horizontally", Presented at the CIM Annual Meeting, April, 1972.
- (5) G.R. Green, R.C. McDonald, "The Mechanization of Rock Drilling at INCO", Preprint 72-au-65, Society of Mining Engineers of AIME, 1972.
- (6) H. Handewith, "Suggested Tunnel Investigation Criteria for Rock Boring Machines", Huitième symposium canadien sur la mécanique des roches, novembre, 1972.
- (7) I.R. Muirhead, L.G. Glossop, "Hard Rock Tunnelling Machines", Trans. Inst. Mining. Met., January, 1968.
- (8) N.E. Norman, R. Stier, "Economic Factors of Mechanical Rock Tunnelling", Trans. Soc. Mining Eng., AIME, June, 1967.
- (9) T.W. Verity, "The Operation of Mechanical Tunnel Boring Machines in Canada", Internal report MR 69/41-ID, Department of Energy, Mines and Resources, Ottawa, 1970.
- (10) J.W. Wilson, P.C. Graham, "Raise Boring Experiences in the Gold Mines of the Anglo-American Corporation Group", Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, October, 1972.
- (11) La revue "Tunnels and Tunnelling".

Les publications dont la liste apparaît plus bas peuvent être obtenues de:

Bureau de distribution des publications,  
 Direction des mines,  
 Ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources,  
 555, rue Booth,  
 Ottawa, Ontario K1A 0G1

Toutes les demandes devraient être accompagnées d'un chèque ou d'un mandat-poste payable au nom du Receveur Général du Canada.

- 
- Romaniuk, A.S. "English-French Glossary of Mining and Related Terms", IC 245, 1970. \$1.25.
- Verity, T.W. "The Operation of Mechanical Tunnel-Boring Machines in Canada", IC 256, 1970. \$1.25.
- Bielenstein, H.U. and Eisbacher, G.H., "Tectonic Interpretation of Elastic Strain-Recovery Measurements at Elliot Lake, Ontario", R 210, 1970. \$1.00.
- Coates, D.F. and Cochrane, T.S., "Development of Design Specifications for Rock Bolting from Research in Mines", R224, 1970, \$0.75.
- Coates, D.F., "Rock Mechanics Principles", (Revised), Monograph 874, 1970. \$8.75.
- Barron, K., Coates, D.F. and Gyenge, M., "Artificial Support of Rock Slopes", R228, 1971. \$1.25.
- Coates, D.F. and Yu, Y.S., "Rock Anchor Design Mechanics",
- Coates, D.F. and Yu, Y.S., "Rock Anchor Design Mechanics", R223, 1971, \$0.50.
- Canadian Advisory Committee on Rock Mechanics, "Report for 1969 of the Subcommittee on Research Requirements for Rock Foundations",  
 Le Comité consultatif canadien sur la mécanique des roches, "Rapport pour l'année 1969 du sous-comité relativement aux besoins de la recherche pour l'étude des fondations rocheuses". IC 251, 1971. \$1.00
- Verity, T.W., "Ground Support with Sprayed Concrete in Canadian Underground Mines", IC 258, 1971. \$0.75.

Proceedings of the 6th Canadian Rock Mechanics Symposium, Ecole Polytechnique, Special Publication. Délibérations du 6ième symposium canadien sur la mécanique des roches. Publication spéciale, 1971, \$6.50.

Coates, D.F., "L'exploitation minière" IC 285F, 1972, \$0.50.

"Tentative Design Guide for Mine Waste Embankments in Canada", TB 145, 1972, \$5.00.

Proceedings of the 7th Canadian Rock Mechanics Symposium, Edmonton, March 1971, Cat. No. M37-1572, \$5.00.

Coates, D.F., "Principes de la mécanique des roches" (révisé), Monographie 874, 1972, \$8.75.

T.S. Cochrane, G. Knight, L. C. Richards and W. Stefanich, "Comparison of Dust Sampling Instruments", R 250, 1971, \$1.25.

W.M. Gray and N.A. Toews, "Analysis of Accuracy in the Determination of the Ground-Stress Tensor by Means of Borehole Devices", RS 109, 1972, \$0.25.

W.M. Gray and K. Barron, "Stress Determination from Strain Measurements on the Ends of Boreholes; Planning, Data Evaluation and Error Assessment", RS 110, 1972, \$0.25.

D.F. Coates and Y.S. Yu, "Analysis of Grading Effects on Hydraulic and Consolidated Fill", and

M. Gyenge and D.F. Coates, "Mine Fill System Design based on Optimization", RS 113, 1972, \$0.25.

A. Dubnie, "Northern Mining Problems with Particular Reference to Unit Operations in Permafrost", TB 148, June 1972, \$0.75.

A. Dubnie, "Surface Mining Practice in Canada", Mines Branch Information Circular 292, 1973, \$3.00.

R = rapport de recherche  
 IC = circulaire d'information  
 TB = bulletin technique  
 RS = série reprise

