

ÉTUDES ET
RECHERCHES
EN TRANSPORTS



L'INGÉNIERIE DES COUPES DE ROC ET LE PRÉDÉCOUPAGE: THÉORIE ET CAS PRATIQUE

JEAN-MARIE MATHIEU
JEAN-DENIS ALLARD
PIERRE DORVAL

GÉNIE
ET ENVIRONNEMENT



CANQ
TR
GE
SM
114

Québec 

219357

L'INGÉNIERIE DES COUPES DE ROC ET
LE PRÉDÉCOUPAGE: THÉORIE ET CAS PRATIQUES

Dor - Cen - Mon

CANQ

TR

GE

SM

114

MINISTÈRE DES TRANSPORTS
CENTRE DE DOCUMENTATION
700, BOUL. RENÉ-LÉVESQUE EST,
21^e ÉTAGE
QUÉBEC (QUÉBEC) - CANADA
G1R 5H1

Dépôt légal, 4^e trimestre 1989
Bibliothèque nationale du Québec
ISBN 2-550-20330-5

Titre et sous-titre du rapport				N° du rapport Transports Québec		
L'INGÉNIERIE DES COUPES DE ROC ET LE PRÉDÉCOUPAGE:				RTQ-89-05		
THÉORIE ET CAS PRATIQUE				Rapport d'étape	<input type="checkbox"/> An <input type="checkbox"/> Mois <input type="checkbox"/> Jour	
				Rapport final	<input checked="" type="checkbox"/>	
Auteur(s) du rapport				N° du contrat		
Jean-Marie Mathieu, Jean-Denis Allard, Pierre Dorval				Date du début d'étude Date de fin d'étude		
				Coût de l'étude		
Étude ou recherche réalisée par (nom et adresse de l'organisme)			Étude ou recherche financée par (nom et adresse de l'organisme)			
Service des sols et chaussées Division géotechnique Section mécanique des roches 200, rue Dorchester Sud Québec (Québec) G1K 5Z1			Ministère des Transports du Québec 700, boul. Saint-Cyrille Est Québec (Québec) G1R 5H1			
But de l'étude, recherche et renseignements supplémentaires						
Dans le but de minimiser les coûts de terrassement et d'entretien des routes ainsi que d'augmenter la sécurité des usagers, le Service des sols et chaussées du ministère des Transports du Québec a mis sur pied, au début des années 1970, un groupe de travail ayant pour tâche d'étudier tous les aspects entourant la conception et l'exécution des coupes de roc. Cet article présente la synthèse des connaissances acquises au fil des ans.						
Résumé du rapport						
<p>Dans un premier temps, il est question de la partie ingénierie des coupes de roc et de l'utilisation de la technique de prédécoupage. On y discute de la conception de la coupe, laquelle est fonction de la nature du roc, de la géologie structurale du site et de la hauteur de la coupe à exécuter. Par la suite, les étapes à suivre pour la réalisation de la coupe sont expliquées. Finalement, la technique de prédécoupage est décrite en détail alors que chacun des paramètres reliés au prédécoupage fait l'objet d'une discussion.</p> <p>Dans un deuxième temps, l'article présente un cas pratique où les éléments discutés précédemment ont été appliqués lors de la réalisation d'une coupe d'environ 100 mètres de longueur et 66 mètres de hauteur.</p>						
Nbre de pages	Nbre de photos	Nbre de figures	Nbre de tableaux	Nbre de références bibliographiques	Langue du document	Autre (spécifier)
	6	17	1	11	<input type="checkbox"/> Français <input type="checkbox"/> Anglais	
Mots-clés				Autorisation de diffusion		
ingénierie des coupes de roc, technique du prédécoupage, conception de la coupe, géologie structurale du site				<input checked="" type="checkbox"/> Diffusion autorisée <input type="checkbox"/> Diffusion interdite		
				Signature du directeur général		
				Date		

Jean-Femers

89 | 1 | 21

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES PHOTOGRAPHIES	ix
INTRODUCTION	1
<u>PARTIE I - INGÉNIERIE DES COUPES DE ROC ET LE PRÉDÉCOUPAGE</u>	
LA GÉOMÉTRIE DES COUPES	3
LES MÉTHODES D'EXÉCUTION DES COUPES DE ROC	4
LA TECHNIQUE DU PRÉDÉCOUPAGE	7
A) LE DIAMÈTRE DE FORAGE	7
B) L'ESPACEMENT DES TROUS	8
C) LA LONGUEUR DES TROUS	8
D) LE TYPE D'EXPLOSIF	9
E) LA QUANTITÉ D'EXPLOSIFS	9
F) LE MODE DE CHARGEMENT	10
L'INFLUENCE DES CONDITIONS GÉOLOGIQUES	12
<u>PARTIE II - ÉTUDE DE LA COUPE DE ROC DE MARSOUI</u>	
LA LOCALISATION ET LA DESCRIPTION DE LA COUPE	13
LA GÉOLOGIE	13
LA STABILITÉ DU MASSIF	14
LA GÉOMÉTRIE DE LA COUPE	14
LA RÉALISATION DE LA COUPE	15
A) LE PRÉDÉCOUPAGE	15
B) LES MINAGES DE PRODUCTION	16
C) LES NUISANCES	17
LES RÉSULTATS	18
CONCLUSION	19
BIBLIOGRAPHIE	49
ANNEXES	51

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1	LA GÉOMÉTRIE DE L'EXCAVATION	23
FIGURE 2	LA TRONCATURE DU PALIER	24
FIGURE 3	LA COUPE DE ROC ($H = 1,5 \text{ m}$)	25
FIGURE 4	LA COUPE DE ROC ($1,5 \text{ m} < H \leq 6 \text{ m}$)	26
FIGURE 5	LA COUPE DE ROC ($6 \text{ m} < H \leq 12 \text{ m}$)	27
FIGURE 6	LA COUPE DE ROC ($H > 12 \text{ m}$)	28
FIGURE 7	LA COUPE DE ROC ($H \approx 15 \text{ m}$)	29
FIGURE 8	LES ÉTAPES DE CONSTRUCTION	30
FIGURE 9	LE FORAGE DE TROUS VERTICAUX PRÈS DE LA PAROI	31
FIGURE 10	LA PROTECTION D'UN PALIER	31
FIGURE 11	LES EFFETS D'UN ESPACEMENT RAPPROCHÉ	32
FIGURE 12	LES EFFETS D'UN ESPACEMENT ÉLOIGNÉ	32
FIGURE 13	LE MODE DE CHARGEMENT DES TROUS DE PRÉDÉCOUPAGE	33
FIGURE 14	L'INFLUENCE D'UN SYSTÈME DE JOINTS SUR LE PRÉDÉCOUPAGE	34
FIGURE 15	LA LOCALISATION DE LA COUPE DE MARSOUI	35
FIGURE 16	LE BLOC-DIAGRAMME REPRÉSENTANT LES DIFFÉRENT SYSTÈMES DE DIACLASES	36
FIGURE 17	LE PROFIL TRANSVERSAL DE LA COUPE DE MARSOUI	37

LISTE DES PHOTOGRAPHIES

Photo 1	Profil de la coupe de trois paliers le long de la route 132 entre La Martre et Marsouï	41
Photo 2	Coupe de cinq paliers le long de la route 132 entre La Martre et Marsouï. Photographie prise à la fin de la période de construction	43
Photo 3	Même coupe de roc que la photo 2 mais quatre ans plus tard	45
Photo 4	Coupe de roc réalisée en partie avec prédécoupage et en partie sans prédécoupage	45
Photo 5	Exemple de coupe de roc montrant l'espacement irrégulier et la mauvaise orientation des trous de forage du prédécoupage	47
Photo 6	Influence des conditions géologiques; l'orientation d'un système de joints pratiquement parallèle à la direction de la coupe l'a emporté sur le prédécoupage	47

INTRODUCTION

Au début des années 1970, le ministère des Transports du Québec a mis sur pied un groupe de travail ayant pour tâche d'étudier tous les aspects entourant la conception et l'exécution des coupes de roc. Les buts recherchés étaient de minimiser les coûts de terrassement et d'entretien des routes tout en augmentant la sécurité des usagers.

Au cours des ans, ce groupe de travail a développé un savoir-faire dans la conception et l'exécution des coupes de roc ainsi que dans l'utilisation de la technique du prédécoupage. Le présent article traite de quelques-uns de ces aspects.

PARTIE I - INGÉNIERIE DES COUPES DE ROC ET LE PRÉDÉCOUPAGE

LA GÉOMÉTRIE DES COUPES

La conception de la coupe de roc dépend des résultats de l'étude géologique. Un relevé des éléments structuraux du massif rocheux (strates, diaclases, failles, etc.) permet la détermination de la pente d'ensemble du massif excavé et de la pente des parois. La figure 1, intitulée La géométrie de l'excavation, illustre les différentes inclinaisons considérées.

Pour la pente d'ensemble de l'excavation, il faut, d'une part, rechercher une inclinaison avoisinant la pente naturelle des massifs environnants (de 40 à 48 degrés) et que, d'autre part, l'inclinaison choisie pour les parois soit la plus abrupte possible. L'objectif visé, en optant pour cette inclinaison abrupte, est d'obliger les pierres qui chûtent à demeurer près de la paroi rocheuse. Par conséquent, elles se logent dans les fossés ou sur les paliers, et ne sont pas projetées sur la route.

La largeur des paliers est un facteur important dans la conception de la coupe. La largeur est proportionnelle à la hauteur du banc d'excavation dans un rapport d'une demie fois la hauteur. Les parois ont une hauteur de douze mètres et les paliers une largeur de six mètres. La largeur minimale de six mètres tient compte de l'éventualité des coins de palier tronqués et du nettoyage des paliers.

Pour minimiser la troncature des coins de paliers, les bancs ont une hauteur optimale. Cette façon d'opérer permet d'éliminer à l'occasion un banc et, par conséquent, un palier potentiellement tronqué qui aurait servi de tremplin de projection. La figure 2 illustre les problèmes occasionnés par la troncature du palier.

Un autre facteur influençant la conception de la coupe est celui de la berme au pied de l'excavation. Sa réalisation a un impact majeur sur les coûts et sur les quantités de terrassement. En étudiant la figure 1, on constate l'influence de la berme sur les quantités de déblai. Une berme est utile, voire nécessaire, dans les massifs rocheux très friables, très fracturés ou présentant des structures géologiques défavorables. Une étude géologique du comportement du massif rocheux et l'observation des talus existants guident le spécialiste dans son choix.

En tenant compte des facteurs précédents, l'adoption de normes facilite la préparation des projets routiers. Les coupes de roc sont classifiées en quatre catégories en fonction de la hauteur de la coupe.

Les coupes de roc inférieures à 1,5 mètre ont une pente d'excavation de 1,5V:1H sans égard au type de roc. Pour les coupes d'une hauteur comprise entre 1,5 et 6 mètres, la pente d'excavation est de 2,5V:1H dans les roches sédimentaires et de 10V:1H dans tout autre type de roc. Cependant, lorsque la longueur de la coupe est supérieure à 100 mètres, la pente d'excavation est déterminée à la suite de l'étude géologique. Pour une hauteur de coupe variant de 6 à 12 mètres, la pente est déterminée après une étude géologique et le prédécoupage y est requis. Quant aux coupes de plus de 12 mètres, elles font systématiquement l'objet d'une étude géologique.

Dans le cas d'une coupe supérieure à 12 mètres, lorsque l'addition d'un palier supplémentaire donne une hauteur de paroi inférieure à 3 mètres, le spécialiste opte pour une paroi d'une hauteur maximale de 15 mètres. Les figures 3, 4, 5, 6 et 7 présentent les normes utilisées.

LES MÉTHODES D'EXÉCUTION DES COUPES DE ROC

Les études pédologiques permettent d'évaluer la hauteur de la coupe de roc. Les sondages à la tarière à des intervalles de 30 mètres ne fournis-

sent pas le profil exact du roc sain. C'est pourquoi, après le déboisement, les déblais de 2e classe (annexes 1 et 2) sont enlevés de façon à exposer le roc sain sur toute la surface du massif. Dès lors, les préposés à l'arpentage font un relevé de la coupe et réalisent des sections transversales à tous les 5 à 20 mètres selon l'ampleur des variations topographiques. Connaissant l'élévation de l'infrastructure de la route, le spécialiste détermine l'emplacement des paliers et la position de la première ligne de prédécoupage au sommet de la coupe. Des repères en tête de talus indiquent la première ligne de prédécoupage ainsi que la profondeur des trous, de manière à obtenir un palier subséquent horizontal.

La figure 8 montre les étapes de construction de la coupe de roc. Après avoir localisé l'emplacement de la première ligne de prédécoupage, il faut donner au mort-terrain la pente appropriée et construire une aire pour recueillir les débris provenant des zones non affectées par les travaux. Cette aire s'étend du pied du mort-terrain jusqu'à la première ligne de prédécoupage. Sa largeur minimale est de 3 mètres, bien qu'une largeur de 4,5 à 6 mètres soit souhaitable. Son rôle premier, comme celui des paliers, est de recueillir les débris provenant des parties supérieures. En plus, il sert de plate-forme de travail pour les ouvriers et les préposés à l'entretien.

Dès que l'emplacement exact de la première ligne de prédécoupage est connu, les opérations de forage débutent. Les trous sont forés selon l'inclinaison demandée et à la profondeur indiquée sur les repères. Un gabarit est utilisé pour s'assurer de la constance de l'inclinaison des trous. Cette méthode permet une vérification rapide, d'autant plus nécessaire lorsque l'inclinaison des parois est prononcée par rapport à l'horizontale. Il est à noter que les parois ne sont jamais forées verticalement, mais toujours selon une faible inclinaison par rapport à la verticale, de façon à ne pas donner l'illusion d'une paroi surplombant la route.

Le minage principal est à l'opposé du prédécoupage. Lors du minage principal, c'est la fragmentation du roc qui est désirée alors que, lors du prédécoupage, on cherche à contrôler le bris hors-profil en minimisant la fissuration à l'arrière du plan prédécoupé. Aussi, faut-il prendre des mesures afin de protéger la paroi prédécoupée.

Comme mesure initiale de protection, la première ligne de forage du minage principal est localisée à 1,2 mètre de la ligne de prédécoupage. Elle est forée selon l'angle du prédécoupage. S'il en était autrement, le forage des trous de minage intercepterait la paroi prédécoupée et le sautage de ces trous occasionnerait des dommages à la paroi. La figure 9 montre la situation à éviter.

Une autre mesure de protection consiste à agencer le plan de forage du minage principal de sorte que les forages ne recoupent pas le sommet de la future paroi prédécoupée du palier inférieur. Les trous de forage sont implantés à 0,75 mètre de part et d'autre du sommet de la future paroi. Les buts recherchés sont: protéger le coin du palier subséquent et éviter qu'il soit tronqué par les charges de fond des trous du minage principal. La figure 10 illustre ce point.

Une dernière mesure consiste à décaler les opérations de prédécoupage et de minage. Le prédécoupage précède le front du minage principal d'au moins 15 mètres.

La réalisation des coupes de roc de 30, 40, voire 60 mètres ne peut pas être envisagée sans utiliser la technique du prédécoupage. Cette technique permet d'augmenter la stabilité des talus.

LA TECHNIQUE DU PRÉDÉCOUPAGE

Le prédécoupage consiste à créer un plan de fracturation selon une pente, par l'intermédiaire de trous rapprochés, chargés légèrement et amorcés simultanément. Le processus d'amorçage des trous différencie cette technique par rapport à d'autres (voir annexe 3) et lui confère son nom. En effet, le sautage des trous de la ligne de prédécoupage est réalisé avant le minage principal et indépendamment de celui-ci.

Il est reconnu que le prédécoupage permet de réduire les bris hors-profils et augmente la stabilité du massif rocheux, car le plan prédécoupé agit comme une barrière empêchant la propagation des fissures radiales générées par les charges explosives du minage principal. Le prédécoupage tient compte de six variables: le diamètre, l'espacement et la longueur des trous, le type et la quantité d'explosifs, ainsi que le mode de chargement.

a) Le diamètre de forage

Le diamètre des trous forés peut varier en autant que le degré de couplage (i.e. le rapport du diamètre de l'explosif au diamètre du trou foré) est de l'ordre de 0,30.

$$\frac{d}{D} = 0,30 \text{ où } d = \text{diamètre de l'explosif et non de l'encartouchage} \\ \text{(en mm)}$$

$$D = \text{diamètre du trou de forage (en mm)}$$

Le degré de couplage est un facteur important dans la réussite du prédécoupage. Si le diamètre de l'explosif avoisine celui du trou, la pression des gaz est trop forte et il y a broyage des parois du trou. Pour les projets routiers, le degré de couplage est obtenu en utilisant des forets de 64 millimètres et des explosifs de 19 millimètres.

b) L'espacement des trous

Cette variable est définie par la relation suivante:

$$\frac{E}{D} = 10 \quad \text{où } E = \text{espacement des trous (en mm)}$$

$$D = \text{diamètre des trous (en mm)}.$$

Un trou de 64 mm de diamètre commande un espacement de 640 mm. Des essais sur des sections de 15 mètres de longueur déterminent l'espacement optimum. La régularité de l'espacement contribue au succès du prédécoupage.

Notez que la valeur de la constante de l'équation précédente est conservatrice. En effet, il est préférable que l'espacement n'excède pas la limite acceptable pour qu'il y ait fracturation du plan. Des essais sur le terrain ont démontré que la valeur de la constante peut être augmentée à 12 et même 14. Les figures 11 et 12 montrent quels sont les effets sur le plan de prédécoupage d'un espacement rapproché ou d'un espacement éloigné.

c) La longueur des trous

La longueur maximale des trous est fonction de la précision que peuvent maintenir les foreurs, le parallélisme des trous étant un facteur déterminant dans la réussite du prédécoupage. Pour les projets routiers, la longueur des trous atteint environ 13 mètres (13,2 mètres pour une hauteur de coupe de 12 mètres, une pente de 2.5V:1H et 0,3 mètre de sous-forage). Toutefois, de bons résultats ont été obtenus pour des coupes de 20 mètres. Dans ce dernier cas, la précision diminue, la déviation des trous augmente, de même que les risques d'entrecroisement des trous. Pour illustrer l'importance de la précision du forage, voici quelques lignes tirées d'un devis de l'état de la Californie (U.S.A.) (FHA, 1971):

"L'entrepreneur contrôle le prédécoupage et s'assure qu'aucun trou ne dévie de plus de 230 mm selon une parallèle ou une normale par rapport au plan de prédécoupage. Au-delà de ces tolérances, le prédécoupage n'est pas payé sauf si le maître de l'ouvrage se déclare satisfait des résultats. Si plus de 5% des trous de prédécoupage sont hors-normes, l'entrepreneur réduit la hauteur des bancs jusqu'à ce que la tolérance de 230 mm soit respectée".

En ce qui a trait au sous-forage, une étude (Calvin et al., 1985), indique que, dans la plupart des applications de prédécoupage, aucun sous-forage n'est nécessaire théoriquement. Cependant, le devis standard du FHA autorise un sous-forage de 600 mm sous le niveau du fossé afin de faciliter l'enlèvement du roc au pied de la coupe.

d) Le type d'explosif

Le choix de l'explosif est fonction de la vitesse de détonation de celui-ci. Empiriquement, il est reconnu que la vitesse de détonation doit correspondre à la vitesse de propagation des ondes dans le roc. Pour les roches sédimentaires, il est préférable d'opter pour un explosif ayant une vitesse de détonation de 2500 mètres par seconde et, pour les roches ignées et métamorphiques, une vitesse de détonation de 6000 mètres par seconde. Il est toujours recommandé d'utiliser des explosifs conçus spécifiquement pour le prédécoupage, de façon à obtenir une répartition uniforme de la charge sur toute la longueur du trou.

e) La quantité d'explosifs

La quantité d'explosifs requise pour le prédécoupage est évaluée comme suit:

1) au mètre linéaire

$$WL = 8,5 \times 10^{-5} \times D^2$$

où WL = poids de l'explosif (en kg/m)

et D = diamètre du trou (en mm)

2) au mètre carré

$$WS = 0,641 \times Gs \times L$$

où WS = poids de l'explosif (en kg/m²)

GS = densité de l'explosif

L = espacement (en mètre)

Ces équations (Mellor, 1976) sont utiles pour faire les calculs théoriques de charge mais ce n'est qu'après avoir fait des essais sur le terrain que les charges définitives sont déterminées.

f) Le mode de chargement

Le mode de chargement est défini en fonction de trois éléments, soit la charge de fond, la charge de montée et le collet.

La charge de fond est constituée d'une cartouche d'explosif ayant un poids maximum d'un kilogramme et un diamètre avoisinant celui du trou. Le rôle de cette charge est d'assurer le cisaillement au pied du plan de prédécoupage.

La charge de montée est constituée d'une colonne discontinue ou continue. La colonne discontinue est composée d'explosifs de dimensions supérieures à ceux conçus pour le prédécoupage. Pour maintenir la charge explosive au taux prévu, les charges sont réparties à des intervalles réguliers le long du trou. Les intervalles sont obtenus en attachant les explo-

sifs à un cordeau détonant tel que montré à la figure 13a, ou en intercalant les bâtons de bois appelés espaceurs entre les explosifs tel que montré à la figure 13b. Cette façon de procéder n'est guère utilisée, car la préparation des charges nécessite beaucoup de temps et les résultats obtenus sont de qualité inférieure à ceux obtenus avec une colonne continue.

La colonne continue est formée d'explosifs de faible diamètre s'abou- tant l'un à l'autre (figure 13c) ou encore d'un cordeau détonant de 85 kg/ 1000 mètres (figure 13d). Dans le cas du cordeau, si la charge est jugée insuffisante, on l'augmente en doublant le cordeau (figure 13e).

Le collet est la partie supérieure du trou qui n'est pas chargée en explosif. C'est là que le spécialiste rencontre des problèmes; le roc de cette partie peut être projeté, déplacé ou broyé. Il est fréquent que la paroi prédécoupée soit tronquée dans la partie supérieure, c'est-à-dire la partie correspondant au collet. La hauteur du collet varie de 0,6 à 1,5 mètre en fonction du diamètre du trou foré.

Le collet est bourré de matériaux compactables formant un bouchon destiné à confiner les gaz. Parmi les matériaux utilisés, les plus efficaces sont par ordre décroissant (Comeau, 1978):

- la pierre concassée de calibre 12,5 - 9,5 mm
- la pierre concassée de calibre 12,5 - 0 mm
- le gravier de calibre 12,5 - 4,76 mm
- le gravier de calibre 19,0 - 0 mm
- le sable et le gravier
- le sable
- les débris de forage

La FHA recommande un bourrage complet du trou lorsque le massif rocheux est très fracturé ou très friable (Calvin et al., 1985).

L'INFLUENCE DES CONDITIONS GÉOLOGIQUES

La technique du prédécoupage donne les meilleurs résultats dans les roches massives et compétentes. Des résultats surprenants sont tout de même obtenus dans des massifs fracturés ayant subi plusieurs phases de tectonisme. Par contre, il existe des conditions géologiques telles qu'il est pratiquement impossible d'obtenir de bons résultats.

Lorsque des systèmes majeurs de joints recoupent le plan de prédécoupage dans un angle de moins de 30° , on doit s'attendre à avoir un plan prédécoupé intermittent en dents de scie (figure 14).

Un autre facteur géologique affectant l'efficacité du prédécoupage est la présence de joints ouverts. Les gaz s'échappent par ces zones de moindre résistance.

PARTIE II - ÉTUDE DE LA COUPE DE ROC DE MARSOUI

LA LOCALISATION ET LA DESCRIPTION DE LA COUPE

La réfection de la route 132 du côté nord de la Gaspésie, entre les municipalités de Ste-Marthe et Marsoui, a nécessité la taille de deux massifs rocheux. La figure 15 localise la municipalité de Marsoui.

Le massif rocheux le plus important est situé à 2 kilomètres à l'ouest de Marsoui. Sa hauteur est de 66 mètres et sa longueur est de 100 mètres. Le réaménagement de la route au pied du massif fut planifié en fonction d'un déblaiement minimal. La coupe a entraîné l'excavation de plus de 150 000 m³ de déblais de 1^{re} classe (6.30\$/m³) et de 1 500 m³ de déblais de 2^e classe (2.60\$/m³). Plus de 13 000 mètres de prédécoupage (8.50\$/m) ont assuré la régularité et la stabilité des parois du massif. Une difficulté additionnelle se grevant à ce projet fut le maintien de la circulation au coeur de la saison touristique.

LA GÉOLOGIE

Le massif rocheux fait partie d'une formation géologique appelée "le mélange de Cap Chat". Ce mélange repose au coeur d'un synclinal renversé vers le sud. Au site de la coupe, se trouve une séquence de lits de schiste argileux vert et noir fortement tectonisée.

La stratigraphie est peu évidente dans l'ensemble du massif, exceptée dans la partie supérieure est de la coupe. Les lits ont une orientation est-ouest et un pendage de 20° vers le sud. Le schiste altéré se détache en petits fragments semblables à des flocons de maïs. Cette particularité provient du clivage phacoïdal.

Le relevé géologique "in situ" indique trois principaux systèmes de diaclases: N124°/69SW, N168°/70NE et N181°/70SE. La route a une direction N78°.

LA STABILITÉ DU MASSIF

Les éléments structuraux du massif rocheux favorisent la stabilité de la coupe. La direction des pendages de la stratigraphie et des trois principaux systèmes de diaclases contribuent à cette stabilité, puisqu'elle fait en sorte que tout glissement, qui pourrait survenir selon un plan ou l'arête d'un dièdre, est confiné dans la masse rocheuse. La figure 16 montre la configuration des systèmes de diaclases.

En somme, du point de vue de la mécanique des roches, les éléments structuraux de cette coupe avantagent la taille du massif selon l'orientation désirée.

LA GÉOMÉTRIE DE LA COUPE

Initialement tronqué par l'ancienne route 132, le profil du terrain naturel présente à sa base une inclinaison de 65° sur une hauteur de 20 mètres, pour se poursuivre jusqu'au sommet avec un angle moyen de 30°. De part et d'autre de la coupe, les parois des falaises sont abruptes avec une inclinaison variant de 75° à 80°. Des talus d'éboulis recouvrent les parois sur le tiers de leur hauteur. La figure 17 montre le profil du terrain naturel.

Les facteurs géologiques étant favorables à la stabilité de la coupe, la contrainte majeure est l'espace disponible entre le fleuve Saint-Laurent et le massif rocheux. Tenant compte des éléments de sécurité et de visibilité pour les usagers, la route est déplacée vers le massif. La coupe possède les caractéristiques suivantes: 5 paliers et 6 parois.

Les parois ont un angle d'inclinaison de 2,5V:1H (68,2°). La première paroi, localisée en tête de talus, a une hauteur de 6 mètres alors que les autres ont une hauteur de 12 mètres.

Le premier palier a une largeur de 4,5 mètres, les trois suivants ont 6 mètres. Le dernier palier, en bordure de la route, a une largeur de 9 mètres. Cette largeur plus importante fut prévue pour la récupération des débris.

La pente d'ensemble du massif est de 48° par rapport à l'horizontale. Notez que l'inclinaison de la pente du massif excavé outrepassa celle du terrain naturel au site de la coupe. Mais elle est inférieure à l'inclinaison des falaises (75°-80°) situées de part et d'autre de la coupe et appartenant à la même formation géologique.

LA RÉALISATION DE LA COUPE

Pour les travaux des deux premiers paliers supérieurs, l'entrepreneur a acheminé tous les équipements nécessaires pour le forage et le dynamitage par un vieux chemin forestier sur une distance de 4 kilomètres. Utilisant les déblais de 1^{re} classe provenant de ces deux premiers paliers, l'entrepreneur a aménagé du côté est de la coupe une rampe d'accès reliant la base et le deuxième palier. Les matériaux dynamités aux paliers subséquents ont été poussés au buteur à chaque extrémité de la coupe.

a) Le prédécoupage

Les trous du prédécoupage, espacés de 600 mm, avaient un diamètre de 64 mm. Le chargement-type était constitué d'une cartouche d'explosif d'un kilogramme comme charge de fond, surmontée d'une colonne continue d'explosifs conçus pour le prédécoupage.

Deux types d'explosifs de prédécoupage ont été utilisés pour cette coupe. Un premier explosif dont la vitesse de détonation approchait la vitesse de propagation des ondes dans le roc sédimentaire avait les caractéristiques suivantes: diamètre = 19 mm, longueur = 600 mm, densité 1,3 g/cc, vitesse de détonation = 2 800 mètres/seconde. Le second explosif avait une vitesse de détonation plus grande et les caractéristiques suivantes: diamètre = 16 mm, cordeau continu, masse = 85 g/mètre, vitesse de détonation = 6 000 mètres/seconde.

Le collet avait une hauteur de 1,2 mètre. Le bourrage, composé de débris de forage, se limitait à cette portion du trou.

La mise à feu était réalisée à l'aide d'un cordeau détonant de 25 grains (5,3 g/mètre) attaché sur toute la longueur du premier explosif à prédécoupage, alors qu'il était seulement relié à l'extrémité supérieure du cordeau continu. Les cordons détonants de chaque trou étaient reliés entre eux par un cordeau détonant principal dont l'amorçage se faisait à une extrémité avec des détonateurs électriques. Ces modes de chargement décrits correspondent à ceux des figures 13c et 13d.

Tous les tirs de prédécoupage furent exécutés indépendamment des minages de production. Afin de réduire les échancrures dans la paroi prédécoupée, les tirs de prédécoupage avaient des longueurs de l'ordre de 30 à 50 mètres. Les deux explosifs ont été utilisés dans les mêmes proportions et les résultats obtenus sont discutés ci-après.

b) Les minages de production

Les trous de production avaient des diamètres de 75 mm pour un patron de 2,7 m x 2,7 m, de 90 mm pour des patrons de 2,7 m x 3,7 m et de 115 mm pour un patron de 4,1 m x 4,1 m.

La hauteur des collets pour les deux premiers patrons était de 1,8 mètre alors qu'elle était de 2,1 mètres pour les deux autres. Le sous-forage utilisé était le même pour tous les patrons, soit 0,6 mètre étant donné l'excellent degré de fragmentation obtenu.

Le mode de chargement des trous était le suivant: la charge de fond était constituée de 1 à 2 cartouches d'explosifs à base de nitroglycérine (50 mm x 400 mm) alors que la charge de montée était composée d'un agent de sautage en vrac. Dans les trous humides, des gaines de polyéthylène protégeaient l'agent de sautage de toute détérioration. En cas de venue d'eau dans les trous, le chargement était composé uniquement d'explosifs à base de nitroglycérine.

La mise à feu était réalisée à l'aide de détonateurs électriques. Les périodes d'amorçage étaient agencées pour réduire les projections de pierre sur la route. Le facteur de chargement s'est maintenu entre 0,4 et 0,5 kg/m³, ce qui est inférieur au facteur usuel pour les roches sédimentaires.

c) Les nuisances

L'absence de toute habitation dans un rayon de deux kilomètres des travaux a permis à l'entrepreneur de travailler sans craindre les désagréments reliés aux vibrations du sol et aux surpressions d'air. Lors de période humide et lorsque le plafond atmosphérique était bas, les résidents de la municipalité de Marsoui étaient sensibles aux bruits générés par les sautages.

Aux deux derniers paliers, les projections de pierres sur la route furent plus fréquentes mais n'ont pas interrompu indûment la circulation routière.

LES RÉSULTATS

Dans l'ensemble de la coupe, le prédécoupage est réussi puisque la trace des trous est visible le long des parois prédécoupées. Celles-ci sont rectilignes et ne présentent pas de bris hors-profil. Aux endroits où l'explosif à vitesse de détonation lente fut utilisé, le cisaillement de la roche entre les trous est optimal car peu de blocs sont demeurés accrochés. Dans les secteurs où l'explosif à vitesse rapide fut utilisé, les blocs accrochés aux parois ont été plus nombreux, ce qui tend à démontrer que même si la force de brisance était plus élevée, la charge explosive était insuffisante. Notez que l'entrepreneur préférait utiliser le cordeau continu, étant donné que son emploi réduisait le temps de chargement.

Nous sommes d'avis que le maître de l'ouvrage aurait pu à l'occasion augmenter l'espacement de 600 à 750 mm avec le premier type d'explosif et que les résultats auraient été sensiblement les mêmes tout en réduisant le coût.

La précision du forage, compte tenu de l'inclinaison de 2,5V:1H, a joué un rôle prédominant dans la réussite du prédécoupage tout comme la régularité de l'espacement.

En somme, la réalisation de cette coupe s'est avérée un succès. Les parois prédécoupées sont rectilignes et les paliers ne sont tronqués que dans des secteurs limités aux deux derniers paliers. Une visite des lieux, quatre ans après la fin des travaux, montre que le palier de tête contient peu de débris rocheux et qu'il ne s'en trouve pas sur les paliers suivants.

CONCLUSION

Les connaissances acquises dans l'ingénierie des coupes de roc et la technique du prédécoupage ont permis de réaliser des coupes de grande envergure. L'utilisation de la technique du prédécoupage a réduit les bris hors-profils et a diminué les coûts d'entretien des routes. Le prédécoupage évite les surplombs rocheux et assure une régularité dans le profil de la paroi tout en réduisant les quantités de déblais.

Le foreur représente l'élément-clef dans la réussite du prédécoupage. Plus son travail est fait avec précision, plus le prédécoupage est réussi.

Dans toutes les conditions géologiques, même adverses, il est avantageux de faire du prédécoupage.

FIGURES

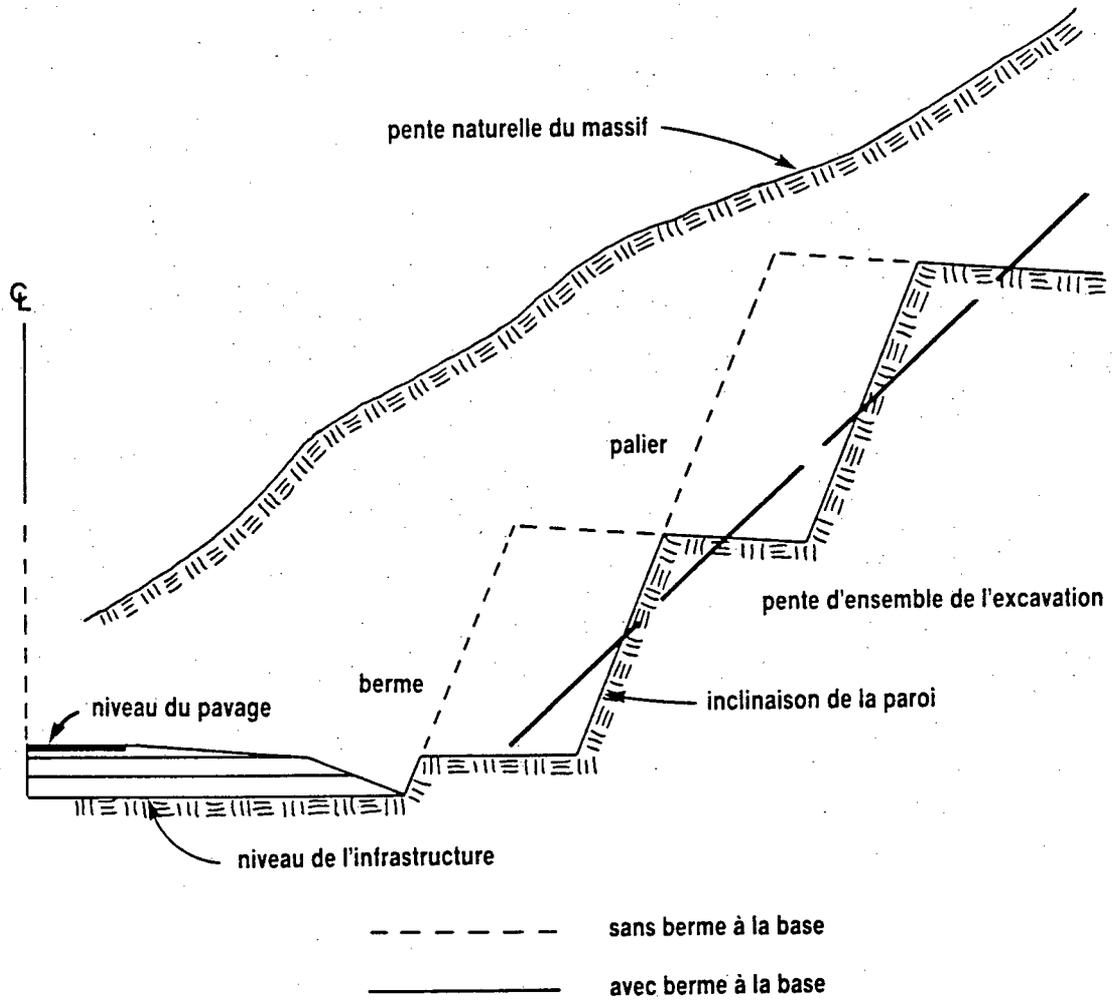


FIGURE 1 LA GÉOMÉTRIE DE L'EXCAVATION

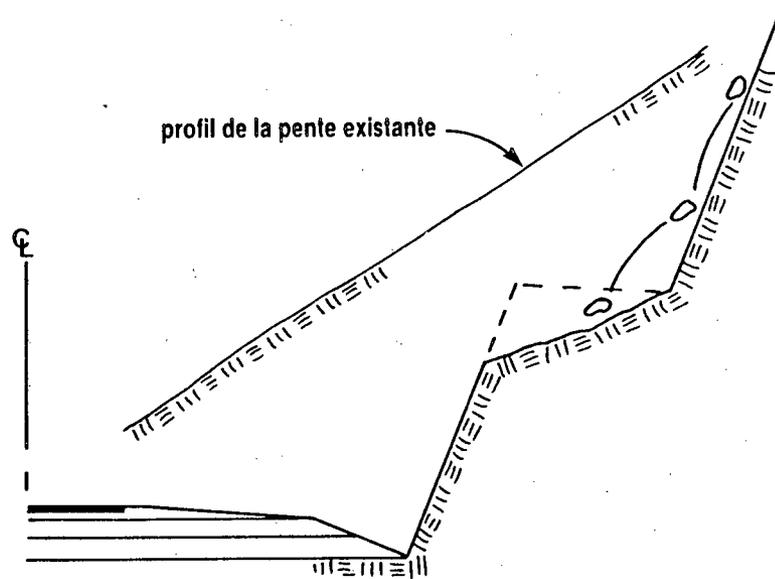


FIGURE 2 LA TRONCATURE DU PALIER

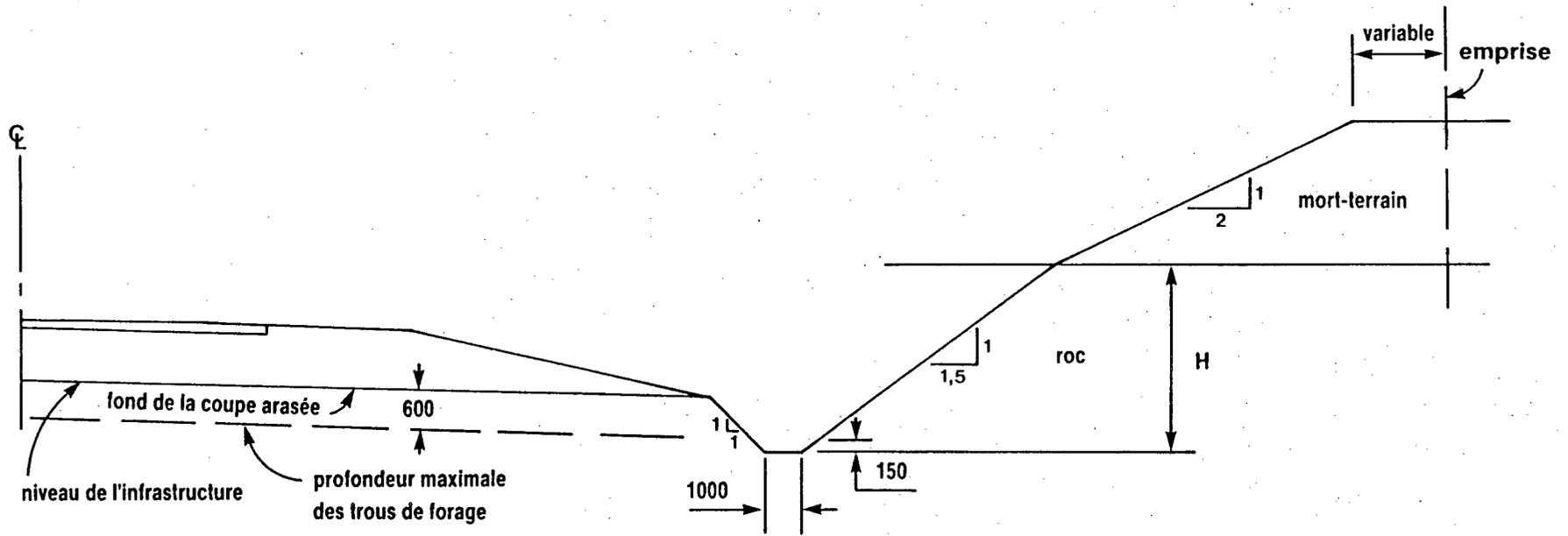
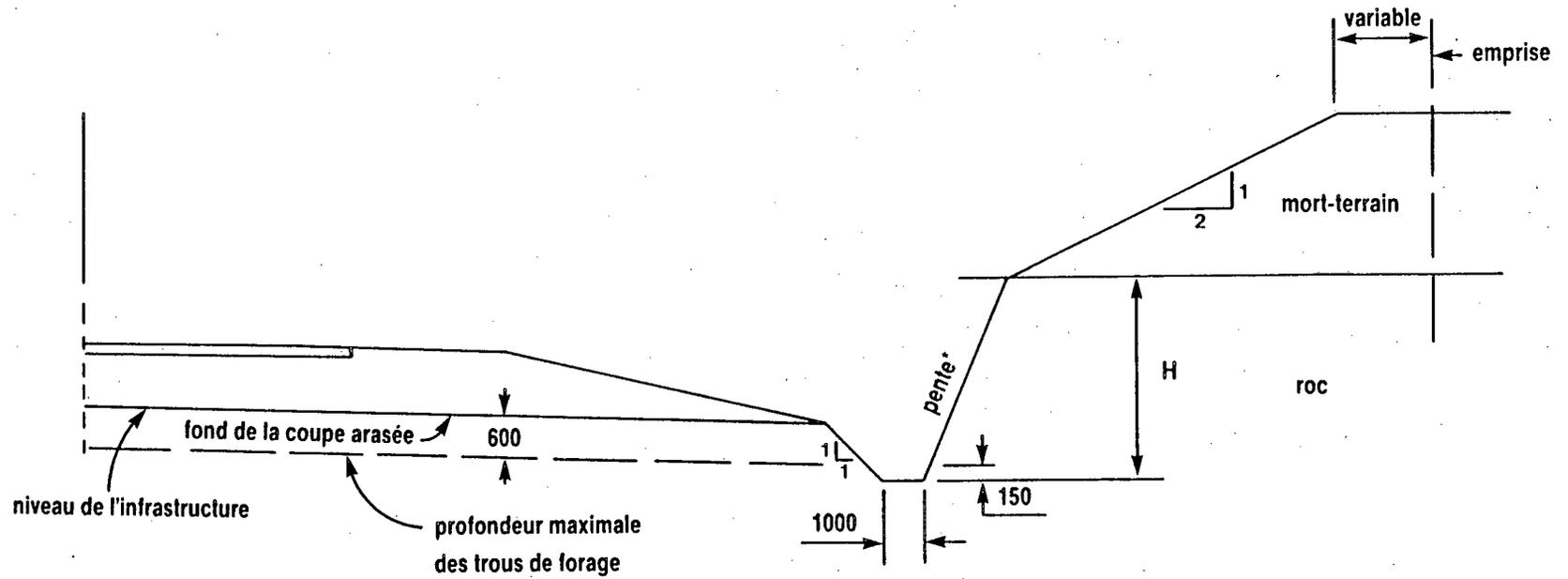


FIGURE 3 LA COUPE DE ROC ($H \leq 1,5\text{M}$)



*roc sédimentaire 2,5V:1H
 autre roc 10V:1H

Note: Les coupes supérieures à 100 m de longueur
 doivent faire l'objet d'une étude spéciale

FIGURE 4 LA COUPE DE ROC ($1,5M < H \leq 6M$)

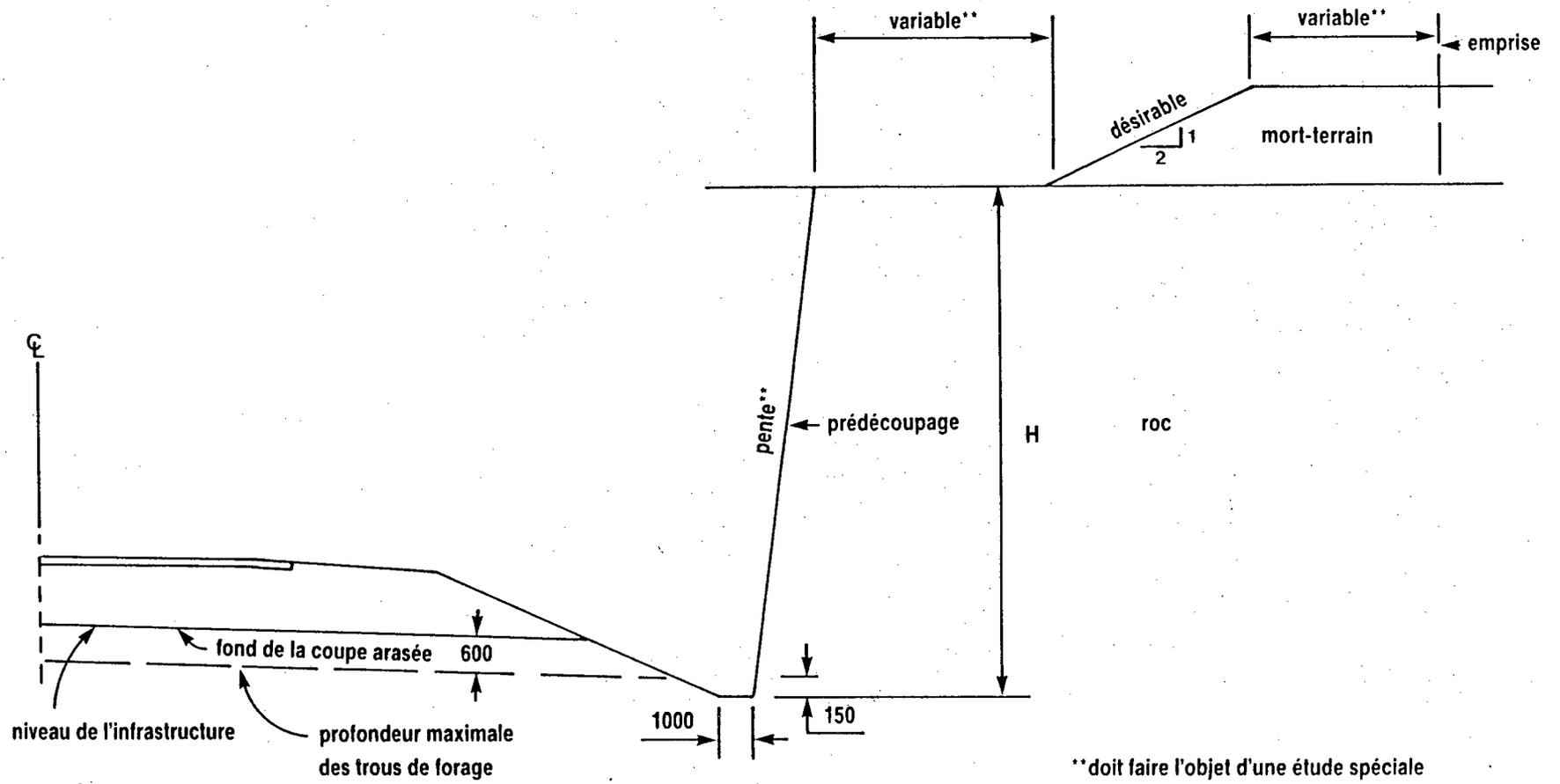
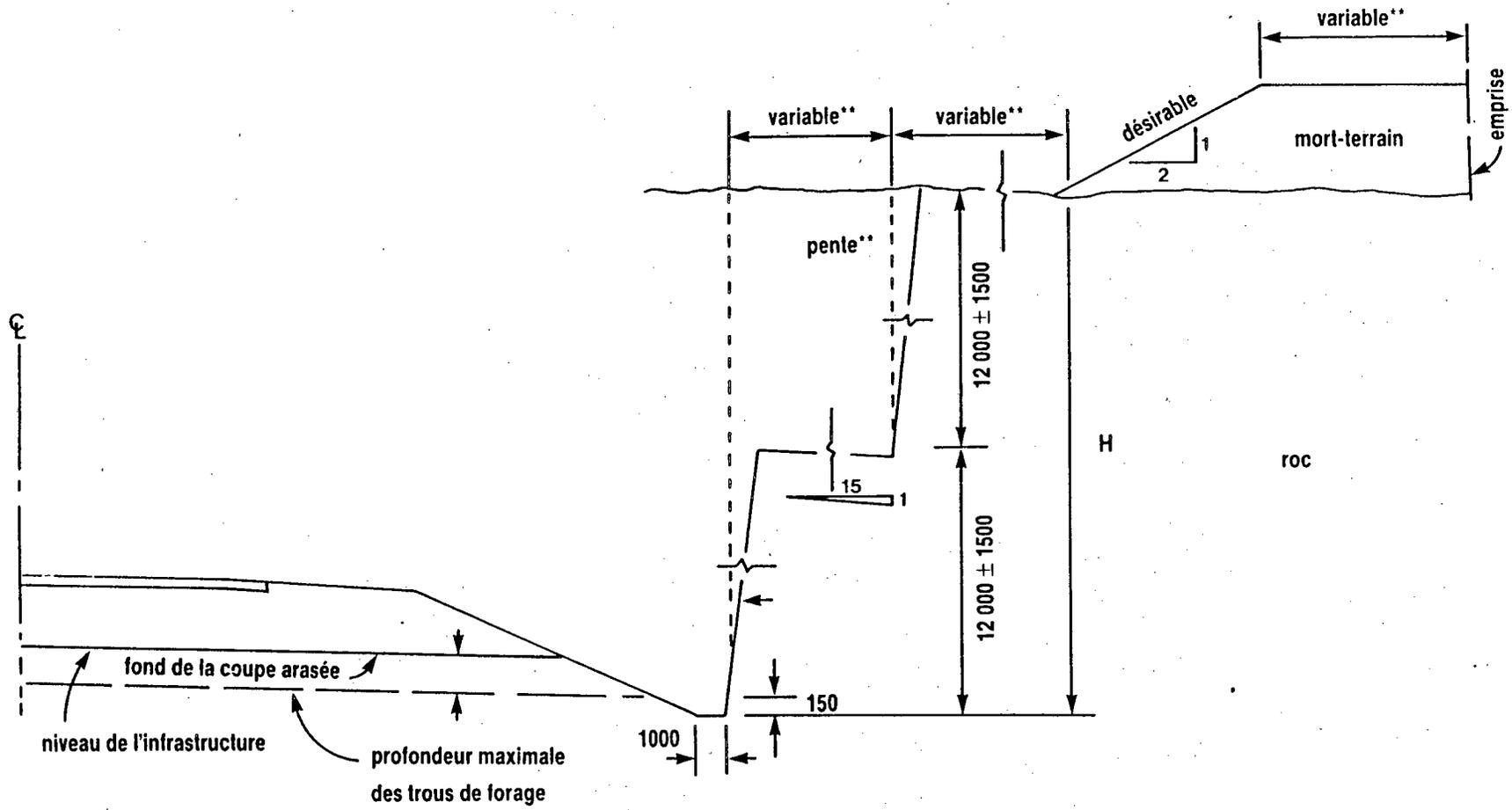
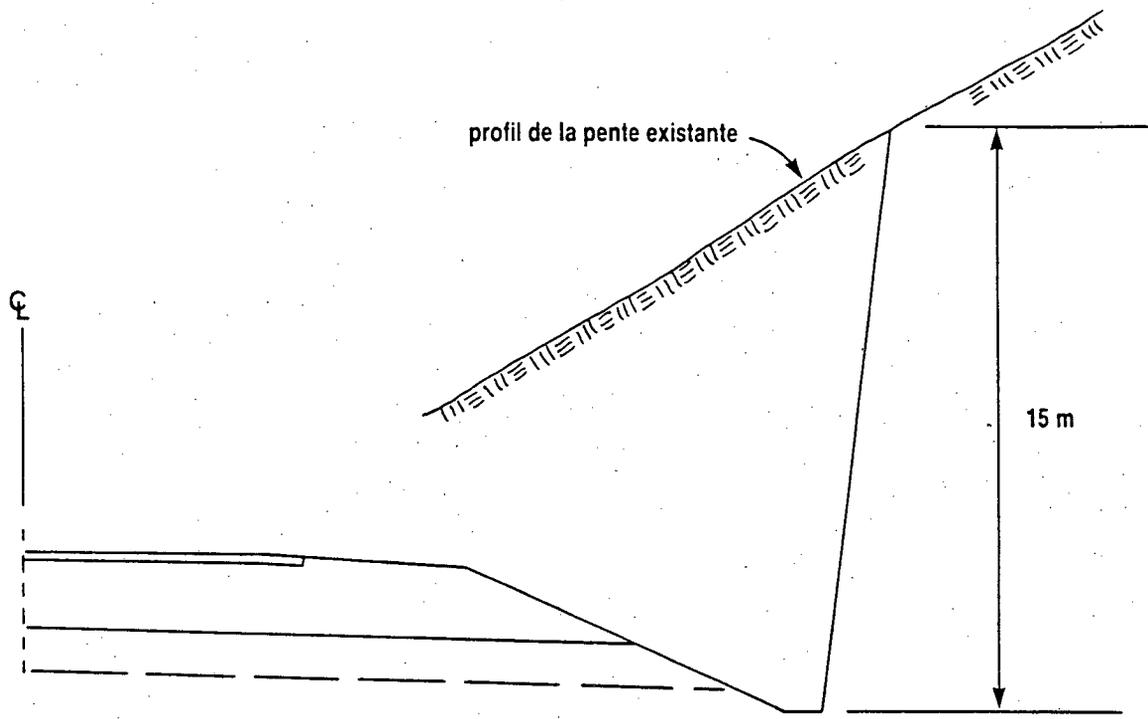


FIGURE 5 LA COUPE DE ROC ($6M < H \leq 12 M$)

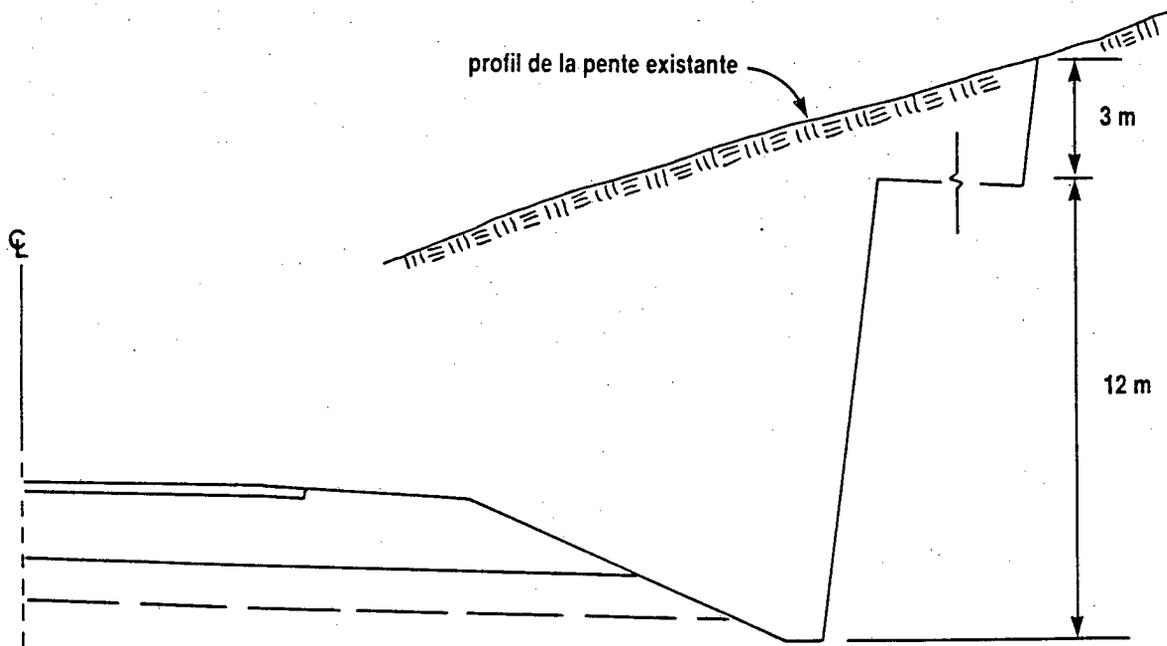


** doit faire l'objet d'une étude spéciale

FIGURE 6 LA COUPE DE ROC ($H > 12M$)

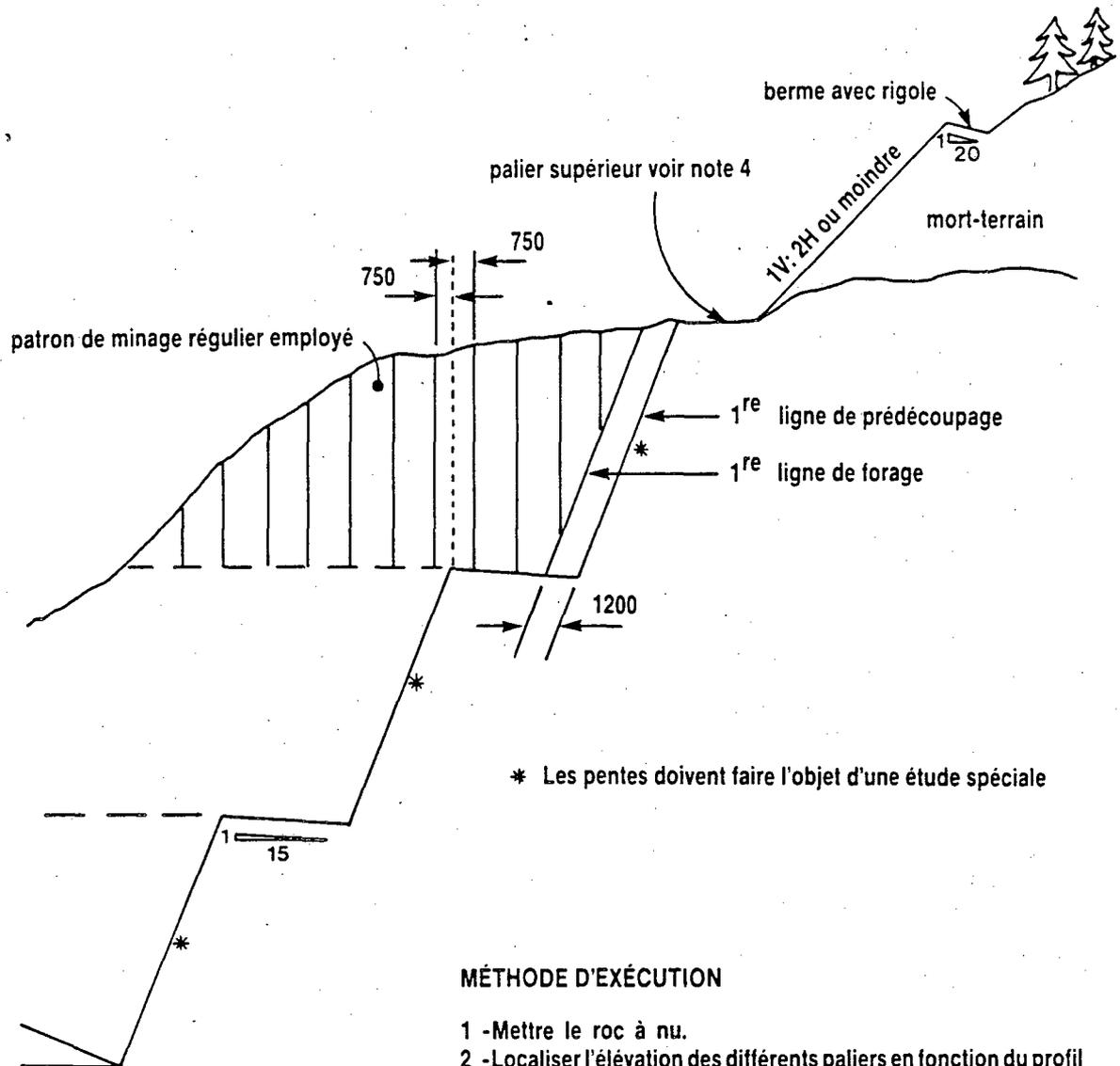


a) Option sans palier



b) Option avec palier à 12 m

FIGURE 7 LA COUPE DE ROC ($H \approx 15M$)



* Les pentes doivent faire l'objet d'une étude spéciale

MÉTHODE D'EXÉCUTION

- 1 - Mettre le roc à nu.
- 2 - Localiser l'élévation des différents paliers en fonction du profil final de la route.
- 3 - Donner au mort-terrain une pente appropriée et prévoir une berme minimale de 1,5 m.
- 4 - Construire le palier supérieur (min. 3 m).
- 5 - Exécuter la première ligne de prédécoupage.
- 6 - Forer les trous pour le minage principal:
 - a) la première ligne de forage parallèle au plan de prédécoupage;
 - b) les forages ne doivent en aucun cas recouper la ligne du prédécoupage du palier inférieur; les trous doivent être localisés à un minimum de 750 mm de part et d'autre de la ligne de prédécoupage subséquente.

N.B.: L'étape 6 a pour but de conserver la stabilité du talus rocheux.

FIGURE 8 LES ÉTAPES DE CONSTRUCTION

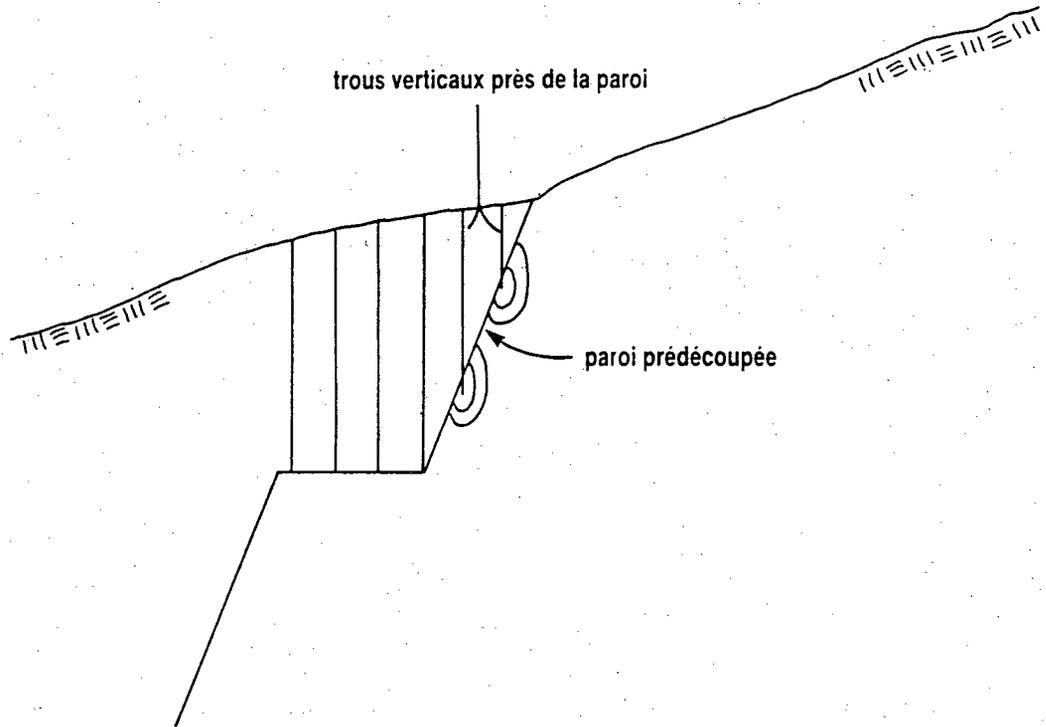


FIGURE 9 LE FORAGE DE TROUS VERTICAUX PRÈS DE LA PAROI

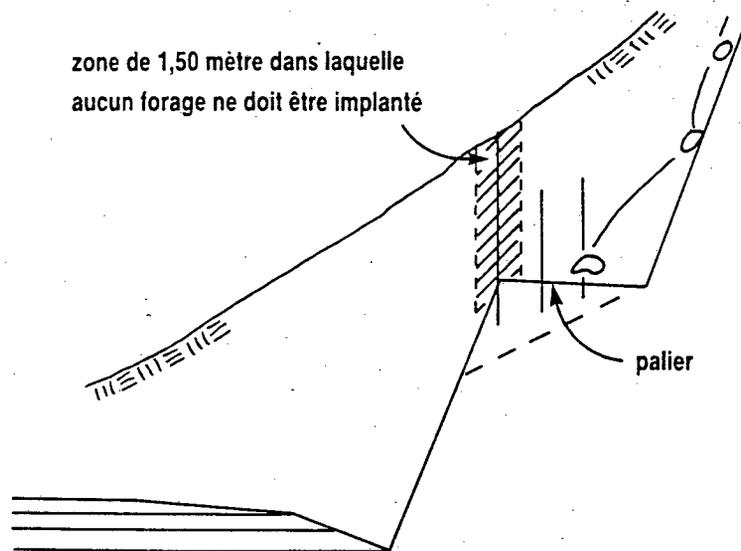


FIGURE 10 LA PROTECTION D'UN PALIER

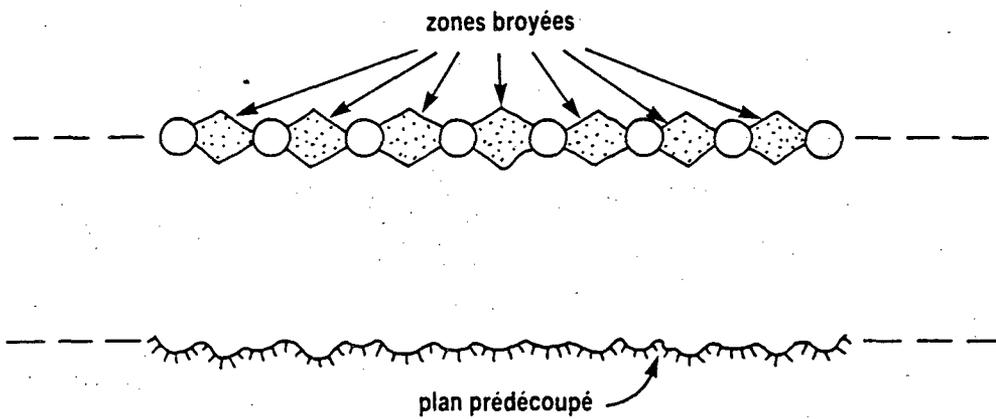


FIGURE 11 LES EFFETS D'UN ESPACEMENT RAPPROCHÉ

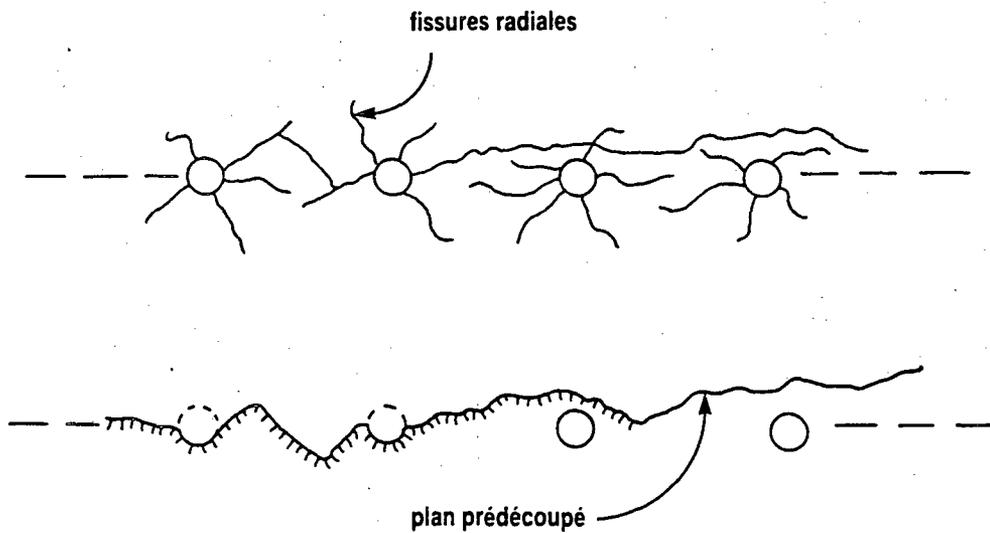


FIGURE 12 LES EFFETS D'UN ESPACEMENT ÉLOIGNÉ

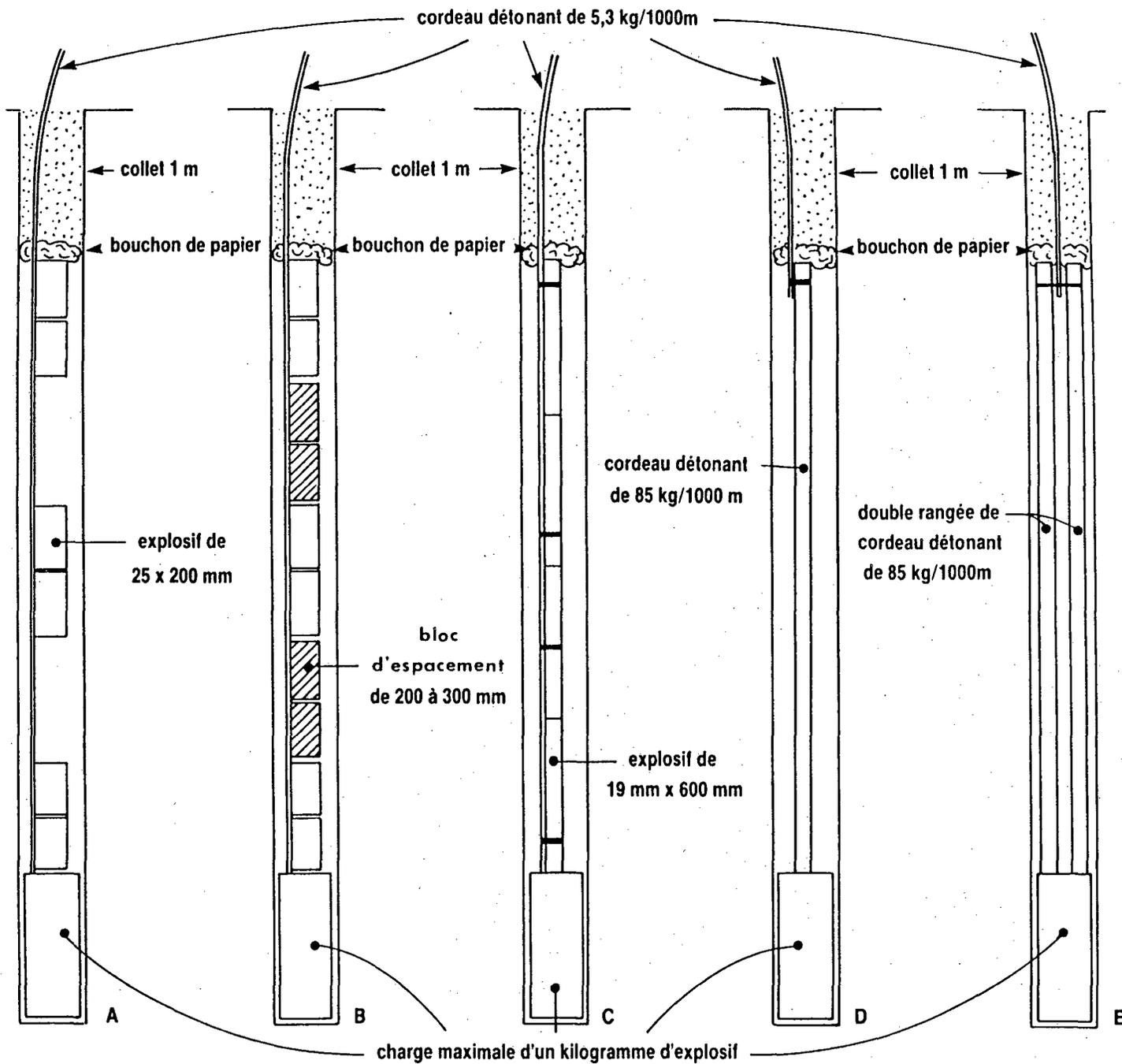


FIGURE 13 LE MODE DE CHARGEMENT DES TROUS DE PRÉDÉCOUPAGE

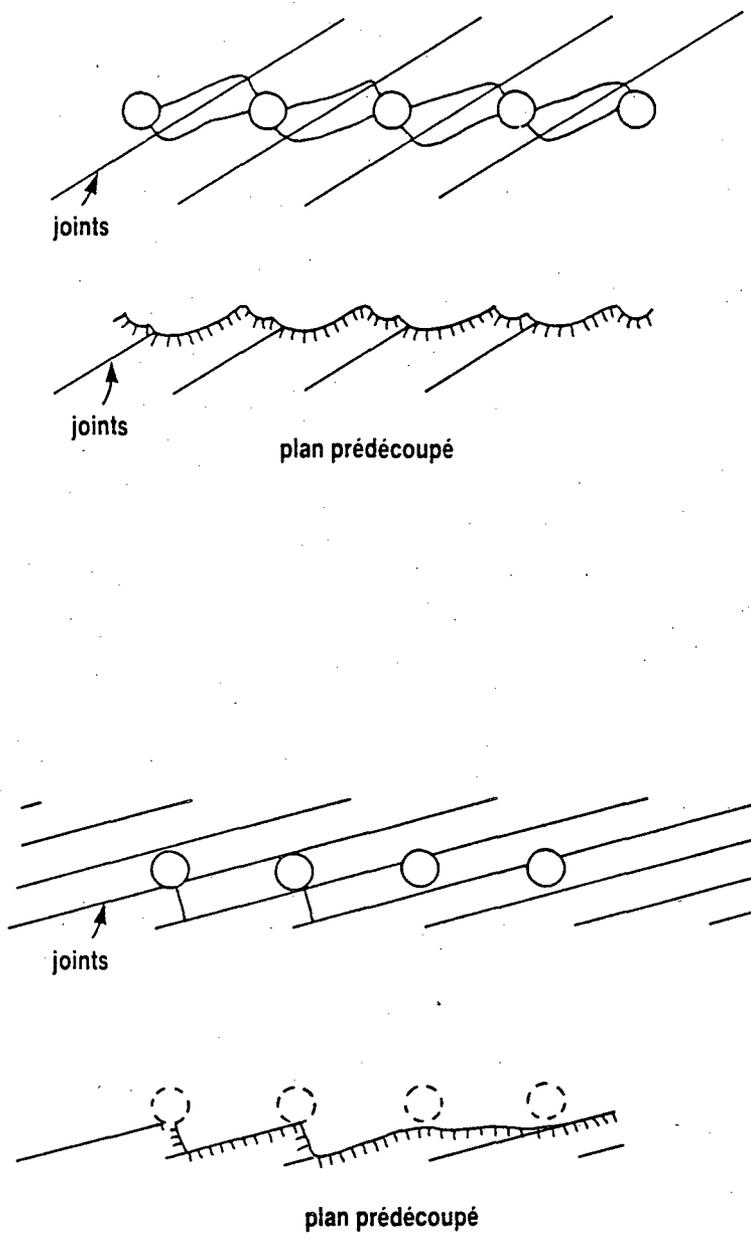


FIGURE 14 L'INFLUENCE D'UN SYSTÈME DE JOINTS SUR LE PRÉDÉCOUPAGE

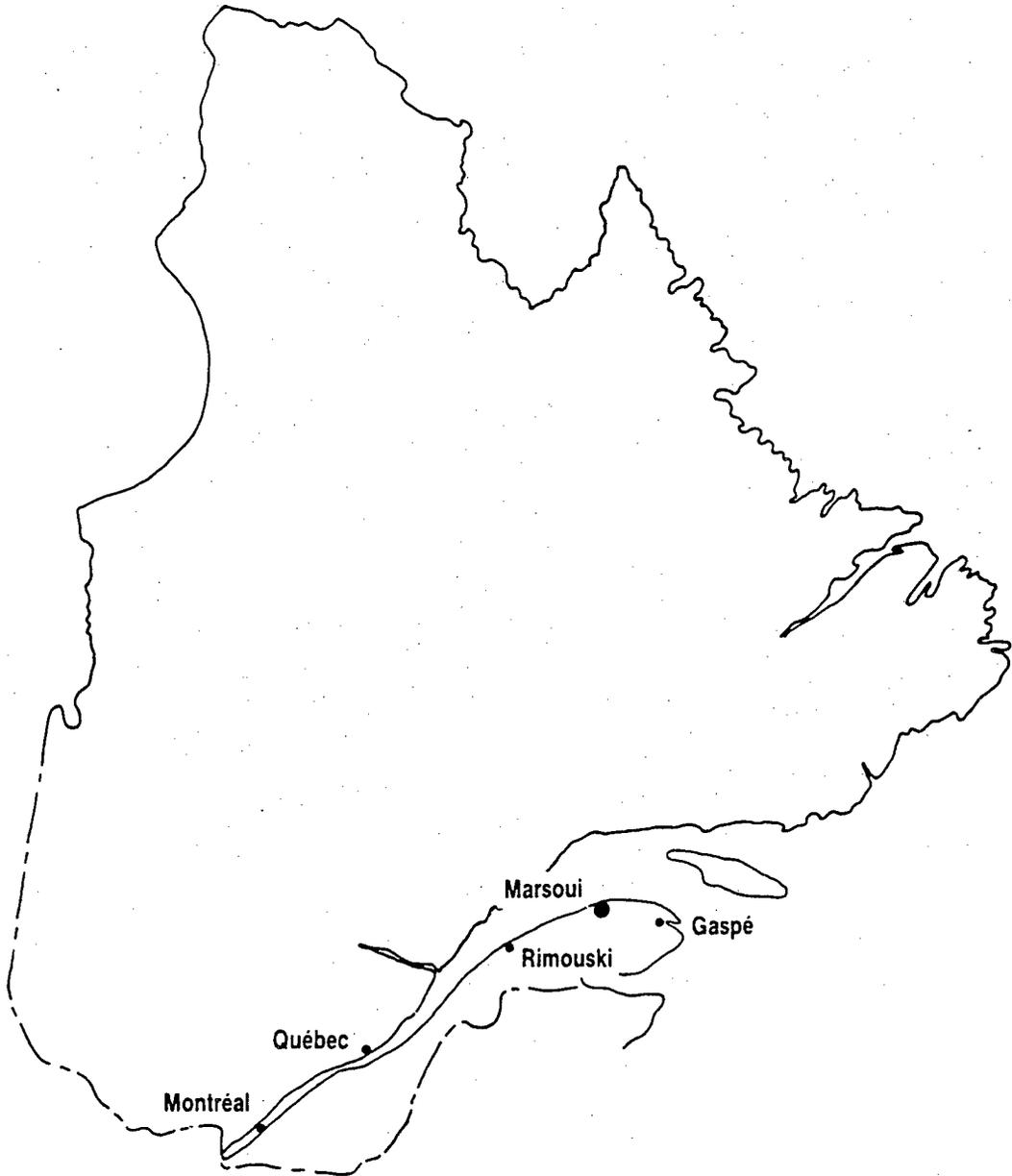


FIGURE 15 LA LOCALISATION DE LA COUPE DE MARSOUI

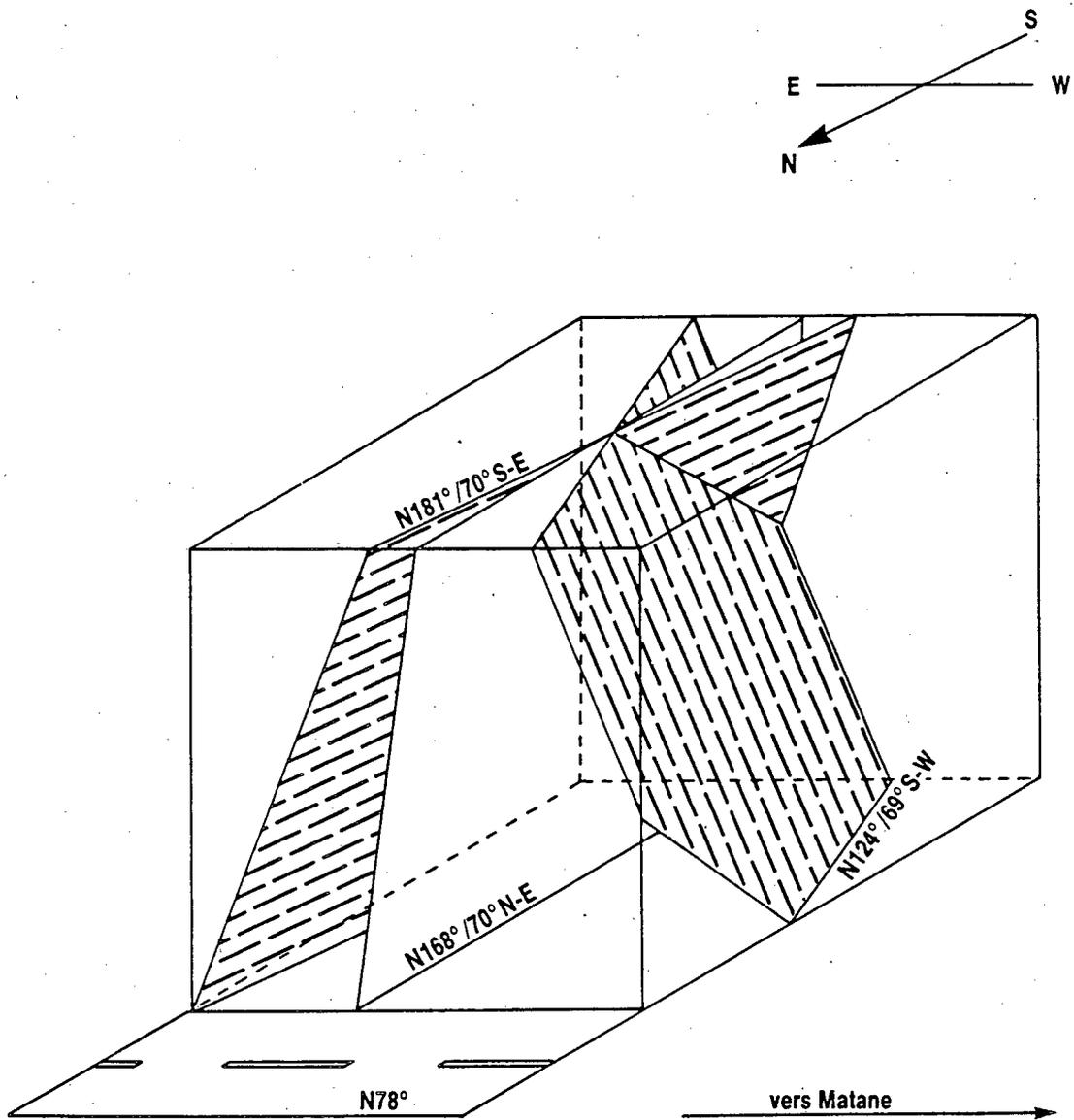


FIGURE 16 LE BLOC-DIAGRAMME REPRÉSENTANT LES DIFFÉRENTS SYSTÈMES DE DIACLASES

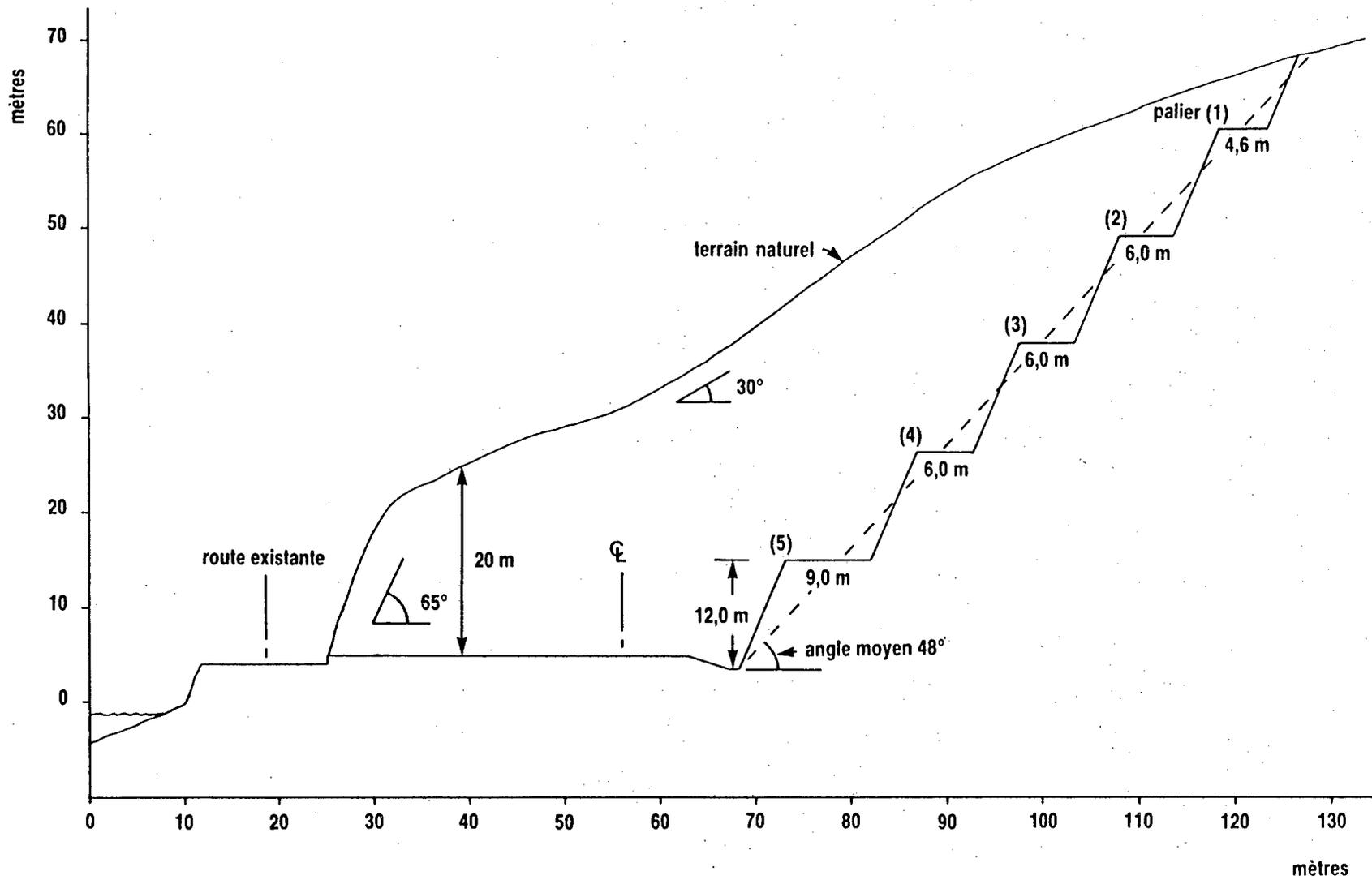


FIGURE 17 LE PROFIL TRANSVERSAL DE LA COUPE DE MARSOUI

PHOTOS

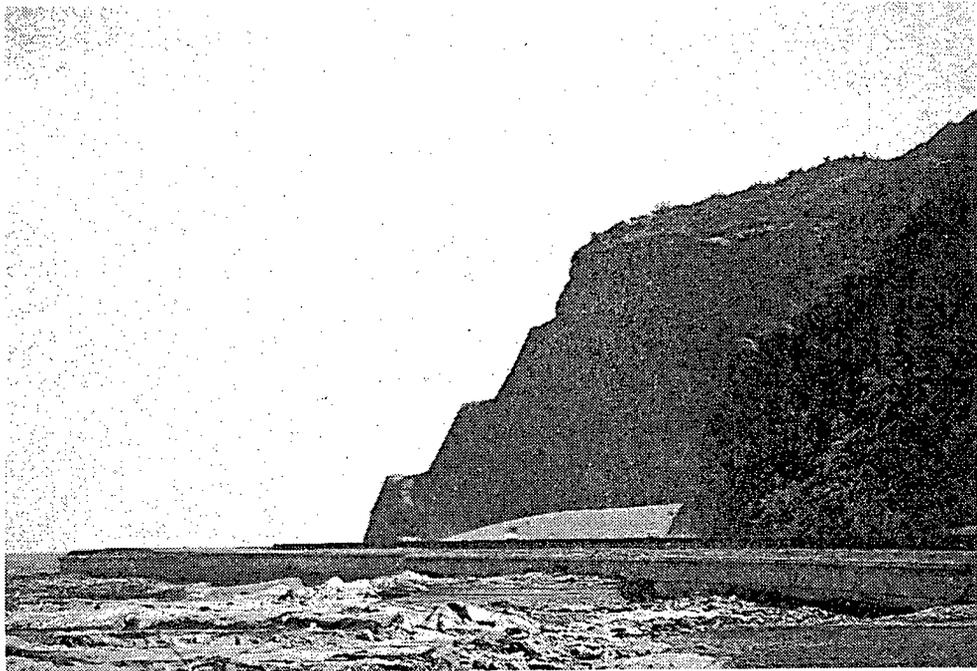


PHOTO 1 PROFIL DE LA COUPE DE TROIS PALIERS LE LONG DE LA ROUTE 132 ENTRE LA MARTRE ET MARSOUI .

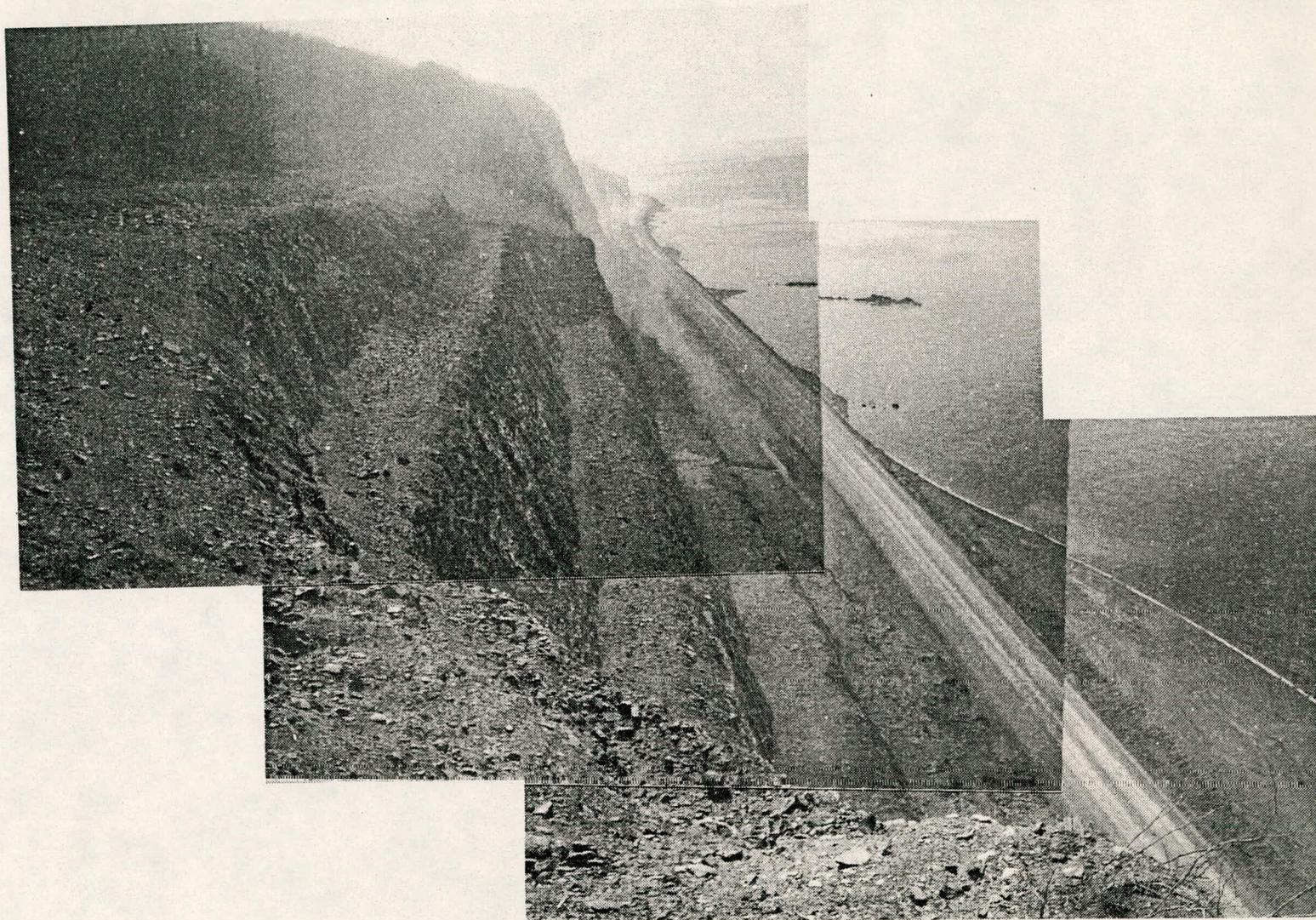


PHOTO 2 COUPE DE CINQ PALIERS LE LONG DE LA ROUTE 132 ENTRE LA MARTRE ET MARSOUI. PHOTOGRAPHIE PRISE À LA FIN DE LA PÉRIODE DE CONSTRUCTION.



PHOTO 3 MÊME COUPE DE ROC QUE LA PHOTO 2, MAIS QUATRE ANS PLUS TARD. L'ABSENCE NOTABLE DE DÉBRIS SUR LES PALIERS TÉMOIGNE DE LA STABILITÉ DE CETTE COUPE.

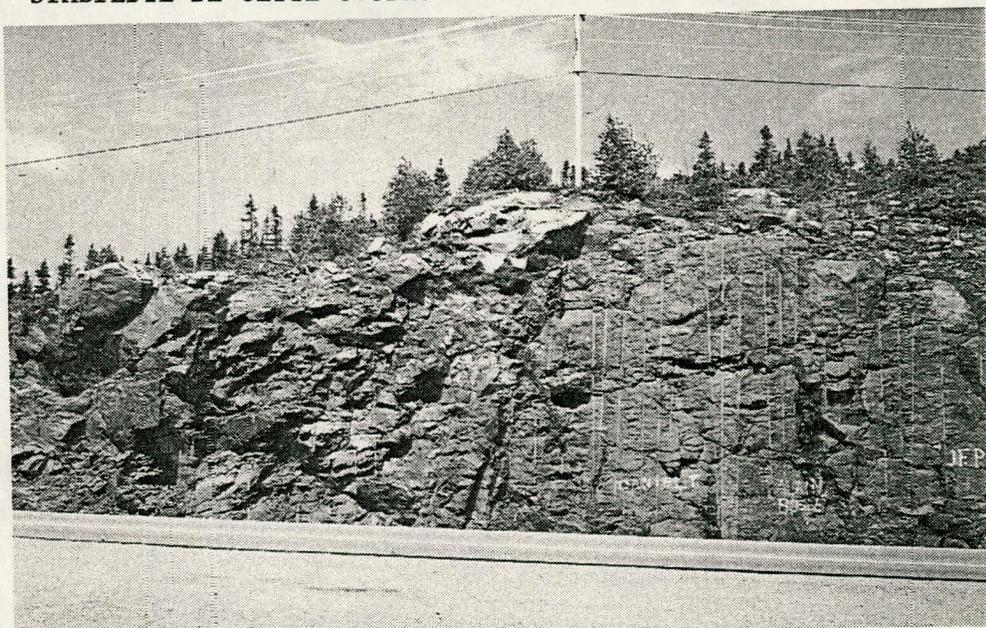


PHOTO 4 COUPE DE ROC RÉALISÉE EN PARTIE AVEC PRÉDÉCOUPAGE ET EN PARTIE SANS PRÉDÉCOUPAGE. LA SECTION PRÉDÉCOUPÉE ILLUSTRE BIEN L'IMPORTANCE DU PRÉDÉCOUPAGE SUR LA STABILITÉ DES PAROIS.

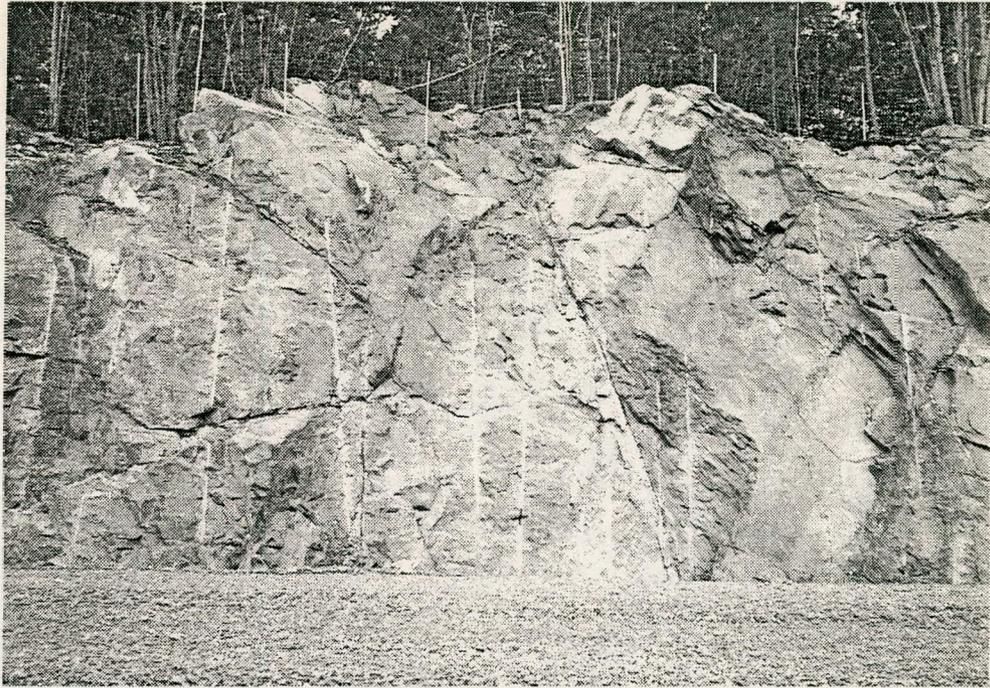


PHOTO 5 EXEMPLE DE COUPE DE ROC MONTRANT L'ESPACEMENT IRRÉGULIER ET LA MAUVAISE ORIENTATION DES TROUS DE FORAGE DU PRÉDÉCOUPAGE.



PHOTO 6 INFLUENCE DES CONDITIONS GÉOLOGIQUES: L'ORIENTATION D'UN SYSTÈME DE JOINTS PRATIQUEMENT PARALLÈLE À LA DIRECTION DE LA COUPE A ANNIHILÉ LE PRÉDÉCOUPAGE.

BIBLIOGRAPHIE

- Allard, J.D., 1985. L'exécution d'une coupe de roc de 66 mètres de hauteur. 8e session d'étude sur les techniques de sautage, Université Laval, Québec, 11 p., 28 cm.
- Biron, S., 1973. Géologie de la région de Marsoui, comté de Matane. Rapport préliminaire DP 244, ministère des Richesses Naturelles, Québec, 9 p., 28 cm.
- Calvin, J.K. et Edward, J.W., 1975. Seminar on Blasting and Overbreak Control. U.S. Department of Commerce, National Technical Information Service, 355 p., 28 cm.
- Canadian Industries Limited, 1971. Manuel des explosifs. 3e édition française, Division des explosifs, Montréal, Québec, 546 p., 19 cm.
- Comeau, W., 1978. Vibrations: théorie et pratique. Première session d'étude sur les techniques de sautage, Université Laval, Québec, 14 p., 28 cm.
- Dupont, 1977. Le manuel des explosifs, édition du 175e anniversaire. Section des services techniques, Division des explosifs, E.I. du Pont de Nemours et Co. (Inc.) Welmington, Delaware 19898, U.S.A., 582 p., 20 cm.
- Federal Highway Administration, 1971, 1972 et 1973. Presplitting Interim Report I, II, III. Highway Research Report, California Division of Highways, U.S. Department of Transportation. I = 27 p., II = 26 p., III = 31 p., 28 cm.

Highway Research Board, 1963. Highway Research Record Number 17, Stability of Rock Slopes, 5 Reports. Division of Engineering and Industrial Research, National Academy of Sciences - National Research Council, Washington, D.C., 15 p., 28 cm.

Mathieu, J.M. et Drolet, A., 1977. Etudes et méthodes d'exécution des coupes de roc. Routes et Transports numéro 19, Association québécoise du transport et des routes Inc., pp. 22-41, 28 cm.

Mellor, M., 1976. Controlled Perimeter Blasting in Cold Regions. Proceedings of the Second Conference on Explosives and Blasting Techniques, Society of Explosives Engineers, Kentucky, pp. 279-300, 28 cm.

Tessier, G.R., 1973. Guide de construction routière, 2e édition. ministère des Transports du Québec, 218 p., 23 cm.

ANNEXE 1

Les déblais de 2^e classe comprennent tous les déblais qui ne sont pas des déblais de 1^{re} classe. Les déblais de 1^{re} classe comprennent le roc solide, les revêtements bitumineux, ainsi que, lorsqu'ils ont un volume supérieur à un mètre cube, les blocs de roc, les gros cailloux et les ouvrages massifs en béton, en pierre ou en maçonnerie fortement cimentés, tous fragmentés aux dimensions exigées au moyen d'explosifs, d'un équipement à percussion ou d'un brise-roches. Les sols gelés et les sols pierreux densément agglomérés sont exclus des déblais de 1^{re} classe.

L'annexe 2 montre, sous forme de tableau, l'évolution des coûts du déblai de 1^{re} classe et de 2^e classe ainsi que les coûts du prédécoupage pour les années 1981 à 1987.

ANNEXE 2

EVOLUTION DES COUTS DE DEBLAI 1^{re} CLASSE, 2^e CLASSE, PREDECOUPE

ANNEE	DEBLAI 1 ^{re} CLASSE		DEBLAI 2 ^e CLASSE		PREDECOUPE	
	COUT (\$/m ³)	QUANTITE (m ³)	COUT (\$/m ³)	QUANTITE (m ³)	COUT (\$/m)	QUANTITE (m)
81	6,38 (8,82)	551730	1,65 (2,28)	5508088	7,54 (10,42)	30975
82	6,42 (8,31)	818810	1,69 (2,15)	8365896	7,53 (9,59)	59431
83	7,34 (8,88)	562358	2,02 (2,44)	5482170	8,98 (10,87)	31343
84	8,48 (9,83)	1582068	1,85 (2,14)	7246526	7,80 (9,04)	92978
85	7,62 (8,46)	1226208	2,37 (2,63)	6323356	8,44 (9,37)	76200
86	8,54 (9,04)	780000	2,73 (2,89)	4068867	9,13 (9,66)	54944
87	10,57 (10,57)	676305	2,53 (2,53)	3023748	10,49 (10,49)	23378

() Coût comparatif à 1987

Les quantités indiquées représentent les quantités totales exécutées dans la province.

ANNEXE 3**AUTRES METHODES DE CONTROLE DU BRIS HORS-PROFIL****Sautage adouci:**

Désigné parfois comme tir de contour, tir périmétrique ou sautage de parement, le sautage adouci est d'origine suédoise. Cette méthode, qui est la plus couramment utilisée pour réduire le bris hors-profil dans les avancées et l'abattage souterrains, est parfois utilisée à ciel ouvert. Pour le sautage adouci, on fore des trous à la limite de l'excavation, on les charge légèrement d'explosifs bien distribués, puis on les met à feu une fois l'excavation principale enlevée. Grâce au tir instantané, ou avec un minimum de délai d'initiation entre les trous, on obtient une action de clivage qui laisse une paroi lisse avec un minimum de bris hors-profil.

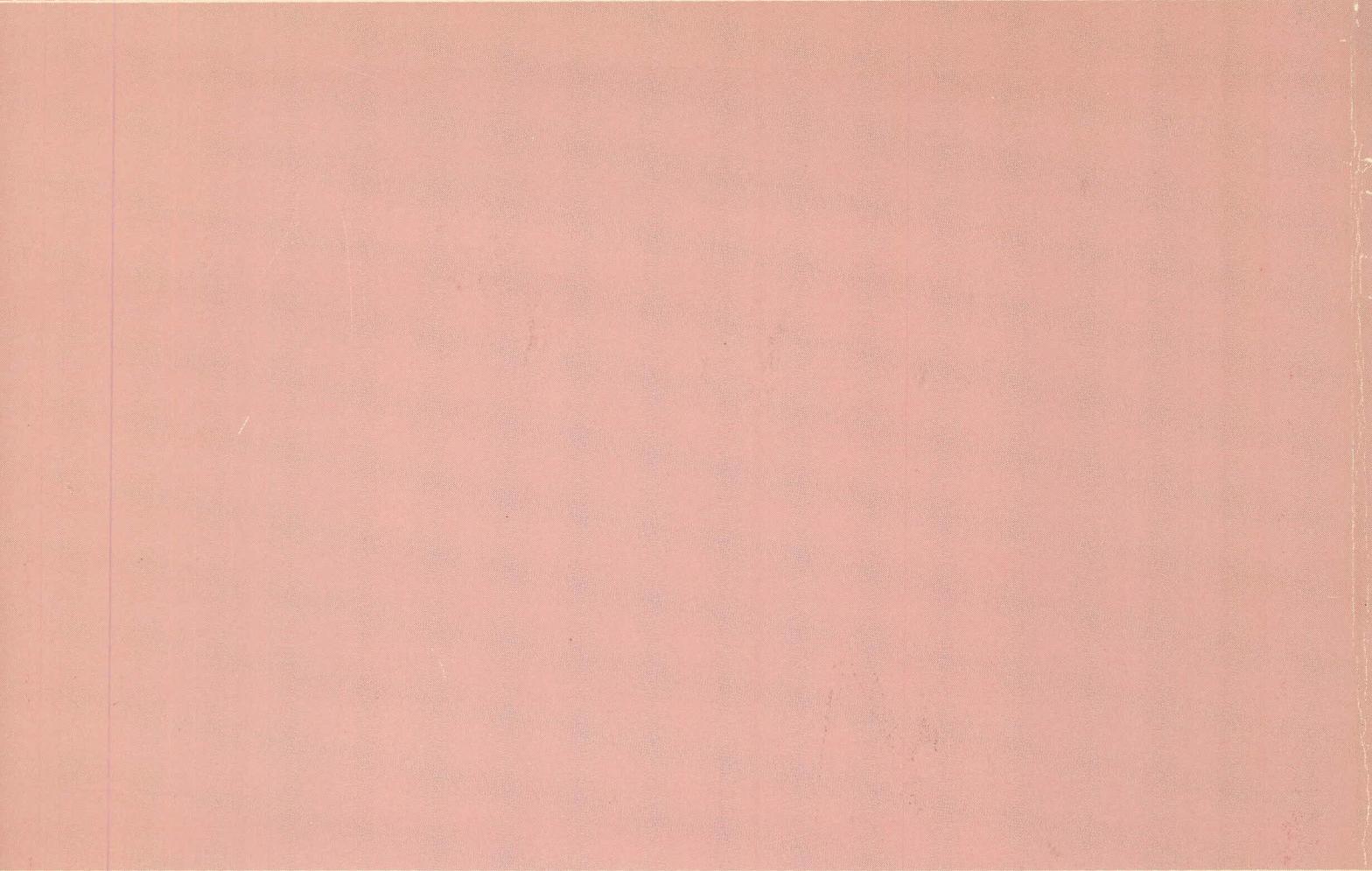
Forage très rapproché (line drilling):

Selon cette technique, on exécute le long de la ligne d'excavation nette un rang de trous de petit diamètre, très rapprochés et non chargés, qui produit un plan de moindre résistance vers lequel le tir principal peut se dégager et réfléchir jusqu'à un certain point les ondes de choc pour réduire d'autant le bris et les efforts sur la paroi définitive. Les trous directement voisins du forage très rapproché sont généralement forés très près les uns des autres et chargés plus faiblement que ceux du tir principal. La distance entre le forage très rapproché et les trous de mine les plus près étant généralement de 50 à 75% du fardeau normal, il est courant de réduire dans les mêmes proportions l'espacement des trous directement voisins et de les charger à 50% de la charge des autres trous.

Sautage coussiné:

Parfois appelé tir de profilage, tir en dalles ou tir de décollement, le sautage coussiné a d'abord été utilisé au Canada. Comme pour le sautage adouci, on fore un rang de trous le long de la ligne d'excavation définitive, on y place des charges faibles bien distribuées, puis on les met à feu une fois l'excavation principale enlevée. Contrairement au sautage adouci, l'espace annulaire dans le trou est rempli de pierre concassée sur toute la longueur de la colonne.

Dupont, 1977. Le Manuel des explosifs, édition du 175e anniversaire.
Section des services techniques, Division des explosifs, E.I. du Pont de
Nemours et Co. (Inc.) Welmington, Delaware 19898, U.S.A., 582 p., 20 cm.



MINISTÈRE DES TRANSPORTS



QTR A 066 836

