

**MANUEL SUR LA PENTE
DES MINES A CIEL OUVERT**

CHAPITRE 1

SOMMAIRE

Ce chapitre a été rédigé dans le cadre du
PROJET SUR LES PENTES DES EXPLOITATIONS A CIEL OUVERT

des

Laboratoires de recherche minière
Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie
Energie, Mines et Ressources, Canada

PROGRAMME DE RECHERCHE SUR LES MINERAUX
LABORATOIRES DE RECHERCHE MINIERE
RAPPORT DU CANMET 76-22

© Minister of Supply and Services Canada 1978

Available by mail from:

Printing and Publishing
Supply and Services Canada,
Ottawa, Canada K1A 0S9

CANMET
Energy, Mines and Resources Canada,
555 Booth St.,
Ottawa, Canada K1A 0G1

or through your bookseller.

Catalogue No. M38-14/1-1978F Price: Canada: \$2.50
ISBN 0-660-90030-0 Other countries: \$3.00

Price subject to change without notice.

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1978

En vente par la poste:

Imprimerie et Édition
Approvisionnement et Services Canada,
Ottawa, Canada K1A 0S9

CANMET
Énergie, Mines et Ressources Canada,
555, rue Booth
Ottawa, Canada K1A 0G1

ou chez votre libraire.

Nº de catalogue M38-14/1-1978F Prix: Canada: \$2.50
ISBN 0-660-90030-0 Autres pays: \$3.00

Prix sujet à changement sans avis préalable.

MANUEL SUR LA PENTE DES MINES A CIEL OUVERT

Le présent manuel est composé de dix chapitres, publiés séparément. La plupart des chapitres ont des suppléments, qui sont aussi publiés séparément. Les dix chapitres ont pour titre:

1. Résumé
2. Géologie structurale
3. Propriétés mécaniques
4. Eaux souterraines
5. Conception
6. Soutènement mécanique
7. Sautage périphérique
8. Surveillance
9. Remblais de stériles
10. Planification de l'environnement

Les chapitres et leurs suppléments sont disponibles au Bureau de distribution des publications, CANMET, Energie, Mines et Ressources, Canada, 555, rue Booth, Ottawa (Ontario), K1A 0G1.

Pour ce chapitre, prière d'indiquer la référence suivante:

Sage, R., rédacteur. Chapitre 1 du Manuel sur la pente des mines à ciel ouvert - résumé; CANMET (Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie, ancienne Direction des mines, Energie, Mines et Ressources, Canada), RAPPORT DE CANMET 76-22, 65 pages; septembre 1976.

AVANT-PROPOS

Avec l'expansion de l'extraction du charbon et des sables bitumineux, l'exploitation des mines à ciel ouvert, qui justifie déjà de quelque 70 pour cent de la production des minerais du Canada, prendra certainement de plus en plus d'importance dans l'industrie des minéraux. C'est pourquoi le CANMET s'est lancé dans un projet important pour élaborer le Manuel sur la pente des mines à ciel ouvert, qui devrait entraîner un rendement minier supérieur, grâce à une meilleure conception des pentes.

Ce projet a soulevé beaucoup d'intérêt pendant son exécution au Canada, comme dans d'autres pays, et déjà, nombreux en sont les résultats qui sont appliqués à la conception des mines. Il faut admettre, cependant que la seule publication du Manuel ne suffit pas. Il faut aider les ingénieurs et les planificateurs à adopter les procédures qui y sont décrites. Ce besoin de transfert de technologie sera satisfait, grâce à une série d'ateliers destinés au personnel des mines. Ces ateliers auront lieu dans divers centres miniers entre 1977 et 1981, après la publication du manuel.

Une caractéristique intéressante du projet est sa réalisation en collaboration. En effet, la plupart des organismes et des personnes qui s'occupent de la planification des mines à ciel ouvert dans notre pays ont contribué à la conception du manuel. Il a été financé à la fois par l'industrie et le gouvernement fédéral.

Le mérite de la création de ce Manuel revient aux membres de l'équipe qui ont cherché à atteindre du début jusqu'à la fin, les objectifs du projet en y consacrant, pendant cinq ans, un effort personnel considérable. Le sentiment d'être venu à bout d'un travail difficile et le fait de les nommer ici constitue leur meilleure récompense. Ce sont: M. Gyenge, G. Herget, G. Larocque, R. Sage et M. Service.

Le Directeur général
du Centre canadien de la technologie
des minéraux et de l'énergie

D.F. Coates

PREFACE

La décision de préparer un manuel technique sur la conception des pentes des mines à ciel ouvert a été prise à la suite d'études sur le prix de revient et les avantages potentiels d'une recherche sur les pentes rocheuses. Ces études, exécutées pour les Laboratoires de recherche minière par Don Coates et feu Amil Dubnie, ont montré qu'il devrait être possible, en améliorant les techniques de conception, d'attaquer de nombreux talus d'exploitation encore plus près de leur angle optimal. Dans de nombreux cas, ceci pourrait avoir des avantages substantiels, soit en réduisant le volume de stériles à déplacer, soit en augmentant la quantité de minerai récupéré. On a estimé qu'en 1970, 40 millions de dollars auraient pu être ainsi récupérés.

Le Projet sur les pentes des exploitations à ciel ouvert a débuté en 1972 pour mettre au point de meilleures techniques de conception des pentes. Reconnaisant l'importance de l'industrie minière, le projet a été entrepris, de concert, par l'industrie et le gouvernement fédéral. La planification et la coordination du projet, ainsi que la rédaction des chapitres, a été la tâche des Laboratoires de recherche minière. Une grande partie des travaux de mise au point a été faite par les sociétés minières canadiennes, les ingénieurs-conseils et les universités. A l'occasion, nous avons fait appel à des experts de l'extérieur du Canada.

Tellement de personnes du secteur minier ont participé au projet, qu'il est impossible de les mentionner toutes ici, quoique, le cas échéant, elles ont été citées dans les remerciements de chaque chapitre du manuel. Il faut néanmoins souligner la contribution toute particulière de Don Coates. Il est largement responsable de l'idée originale. Pendant les cinq ans qu'il a fallu pour faire de ce manuel une réalité, il a été l'inspiration des nombreux efforts nécessaires.

Le Manuel sur les pentes des mines à ciel ouvert se veut un instrument de travail pratique, destiné au personnel des mines pour qu'il l'utilise dans ses exploitations. Il y aura toujours des problèmes qui nécessiteront des connaissances et une expérience qui vont au-delà de ce qu'apporte le manuel. Le personnel des mines doit tout au moins être conscient de la nécessité d'une étude rationnelle des pentes et être en mesure d'en appliquer les résultats. C'est à cette nécessité que veut répondre le Manuel auprès de tous ceux qui exploitent une mine à ciel ouvert au Canada.

TABLE DES MATIERES

	Page
INTRODUCTION	1
GEOLOGIE STRUCTURALE	3
Collecte des données	3
Stockage des données	3
Réduction des données	6
Secteurs d'étude	6
Etapas de l'aménagement de la mine	10
Coûts	10
PROPRIETES MECANIKUES	12
Programme d'essais	12
Essais	14
Résistance des discontinuités au cisaillement	16
Résistance des matériaux au cisaillement	16
Analyse des essais de cisaillement	16
Résistance des roches à la compression	16
Propriétés physiques	17
Etapas de la mise en valeur de la mine	18
EAUX SOUTERRAINES	19
Objectifs	19
Détermination des pressions	19
Analyse	22
Réseau d'écoulement souterrain	22
Perméabilité	22
Elaboration du réseau d'écoulement souterrain	22
Résultats de l'analyse	23
Drainage	23
Méthodes de drainage	24
Murs étanches	25
Surveillance	25
Etapas de l'aménagement de la mine	25
Coûts	27
CONCEPTION	28
Faisabilité	29
Analyse	30
Analyse de la stabilité	30
Analyse financière	31
Etapas de la mise en valeur de la mine	34
Etudes associées	35
Coûts	36

	Page
SOUTÈNEMENT MECANIQUE	37
Méthodes de soutènement	37
Ancrages dans les terrains rocheux	37
Corrosion des ancrages	39
Béton projeté	41
Contre-boutants	41
Conception	41
Surveillance	41
Coûts	42
Soutènement d'un gradin	42
Pente moyenne	42
Pente importante	43
Coûts du béton projeté	44
SAUTAGE PERIPHERIQUE	45
Facteurs qui affectent le sautage	45
Explosifs	45
Découplage et étagement	45
Retards et espacement	46
Embouchure et forage	46
Etat du site	46
Techniques de sautage périphérique	50
Sautage avec tampon	50
Sautage avec chambre d'expansion	50
Tir à deux temps	50
Forage en ligne	51
Coûts	52
Sautage et vibrations du sol	52
Niveaux des dommages et mesure	54
SURVEILLANCE	55
Niveaux de surveillance	55
Niveau I	55
Niveau II	57
Niveau III	58
Téléométrie	58
Contrôle par ordinateur	58
REMBLAIS DE STERILES	60
Recherches	60
Conception	61
Construction et exploitation	61
Pergélisol	62

	Page
PLANIFICATION DE L'ENVIRONNEMENT	64
Exploration	64
Recherche écologique	65
Etudes socio-économiques	65
Etudes météorologiques	65
Considérations sur le Nord	65
Effets de la construction	65
Pollution des eaux	65
Remise en état des terres	66
Autres opérations	66
Législation	67
Coûts	67

FIGURES

Géologie structurale	
1 Levé photographique à la planchette	4
2 Méthode de cartographie	5
3 Types de roches et l'orientation des plans de stratification	7
4 Croquis des structures principales et des discontinuités mineures	8
5 Choix des secteurs d'étude	9
6 Evaluation préliminaire des types d'instabilités possibles	9
Propriétés mécaniques	
7 Essai de cisaillement sur le terrain	14
8 Appareil de compression triaxiale	15
9 Appareil de cisaillement rectiligne	15
10 Résistance au cisaillement	16
11 Appareil d'essai de poinçonnement	17
Eaux souterraines	
12 Principe des contraintes effectives	19
13 Piézomètres	20
14 Réseau d'écoulement des infiltrations	21
15 Distribution simplifiée des pressions	23
16 Limites de la nappe phréatique	23
17 Systèmes de drainage de la pente	24
18 Mur imperméable pour contrôler les infiltrations	25
19 Etudes des eaux souterraines pour une exploitation à ciel ouvert	26

	Page
Conception	
20 Aspect des parois de fosses	28
21 Fiabilité	29
22 Variabilité de la paroi d'une mine	29
23 Secteurs d'étude	30
24 Types d'instabilité par cisaillement-plans	30
25 Cisaillement circulaire	31
26 Ecoulement en blocs et basculement	31
27 Courbe de fiabilité	32
28 Coût du déblai des débris de glissement	32
29 Coût du déblai des roches de crête	32
30 Diagramme de financement	33
31 Organigramme des activités pour l'étude des parois	34
32 Organigramme des activités de conception de la mine	35
33 Soutènement mécanique	35
Soutènement mécanique	
34 Soutènement approprié au contact avec le minerai bien défini	38
35 Ancrage dans les roches	38
36 Installation classique d'ancrage dans le roc	39
37 Soufflage de béton projeté	40
38 Contre-boutant	40
39 Soutènement contre un cisaillement-plan	41
40 Capsules dynamométriques de 250 tonnes (2500 kN)	42
Sautage périphérique	
41 Rayon de rupture en fonction du diamètre du trou de mine	46
42 Effets des retards successifs sur la vitesse de particule maximum	47
43 Surface unie et régulière obtenue par le tir à deux temps dans une roche compétente	47
44 Rupture par excavation et roche meuble sur une paroi obtenue par tir à deux temps	47
45 Surface régulière obtenue par tir à deux temps dans des roches crevassées	48
46 Surface obtenue par tir à deux temps correspondant à un joint majeur parallèle au front rocheux	48
47 Rupture par excavation et roche meuble sur une paroi dues aux joints d'un pendage	48
48 Rupture par excavation et roche meuble dues à une faille	48
49 Joints en dressants	49
50 Diaclases ouvertes à 90° par rapport au front	49
51 Diaclases verticales à 90° de la surface rocheuse	49
52 Fracture de la crête	49

	Page
53 Coût du sautage-tampon	52
54 Coût du sautage avec chambre d'expansion	52
55 Coût du tir à deux temps et du sautage-tampon	53
56 Coût du forage en ligne et du sautage-tampon	53
 Surveillance	
57 Emplacement des bornes d'observation et des bornes-cibles	56
58 Emplacement des stations de nivellement	56
59 Disposition d'un extensomètre de déplacement	57
60 Extensomètre à câble pris de la crête d'un terril	57
61 Extensomètre à boulon	57
62 Pendule inversé	58
63 Trois dispositions télémétriques possibles	59
 Remblais de stériles	
64 Glissement circulaire dans un talus de stériles	62
65 Glissement sur une fondation de faible résistance	62
66 Méthodes de construction de remblais de déchets	63

TABLEAUX

1 Estimation du prix de revient d'une étude sur la géologie structurale	11
2 Programme hypothétique d'essais	13
3 Comparaison des taux approximatifs d'accidents mortels	29
4 Lignes directrices du budget de conception	36
5 Coût du soutènement	43
6 Taux de chargement pour sautage avec chambre d'expansion	50
7 Espacement des trous de mine pour le forage en ligne	50
8 Solutions aux problèmes de sautage périphérique	51
9 Types de dommages liés à la vitesse maximum des particules	53

INTRODUCTION

1. L'étude des talus d'exploitation est une part importante de la planification des mines à ciel ouvert. La disposition des parois affecte à la fois la quantité du minerai récupéré et le volume de stériles à extraire. Elle influe donc beaucoup sur la rentabilité de l'extraction. L'objet de l'étude des pentes est de déterminer la disposition qui rend l'aménagement dont la rentabilité de l'extraction sera la plus forte.

2. Quant il décide à quel angle on va attaquer le talus d'exploitation, l'ingénieur doit trouver un moyen terme entre les frais qu'entraînerait une instabilité de pente et le prix de revient de l'extraction des stériles. Plus la paroi est abrupte, plus grand est le risque d'instabilité. Ceci peut provoquer des frais de déblaiement, des retards de production, ou des pertes de minerai. Des parois plus proches de l'horizontale, d'un autre côté, sont plus stables mais l'extraction des stériles devient plus coûteuse. Le plan optimal permet de minimiser le prix de revient combiné de l'extraction des déchets et d'une instabilité qui pourrait survenir.

3. Les méthodes classiques de conception des pentes ne tiennent pas compte de l'influence économique que peut avoir l'agencement de ces dernières sur la planification de la mine. L'une des

raisons en est l'idée - héritée du génie civil - que toute instabilité doit être évitée. On ne reconnaît pas, dans l'industrie minière, que l'instabilité peut être économiquement avantageuse, si tous les frais encourus - y compris les dépenses effectuées pour garantir des conditions de travail sûres - sont annulées par des coûts d'enlèvement des stériles plus faibles grâce à des pentes plus abruptes.

4. Un autre inconvénient des méthodes d'étude classiques est qu'elles ne tiennent pas compte de la nature variable des sols et des roches, ce qui empêche de déterminer avec précision la stabilité de la pente. De temps à autre, les pentes peuvent manifester de l'instabilité alors que l'analyse avait indiqué qu'elles devaient être stables. Une meilleure approche serait donc de déterminer la probabilité d'instabilité d'une pente. Le risque de glissement peut alors être évalué et inclus dans l'analyse de risque de l'entreprise d'extraction dans son ensemble.

5. Le Manuel sur la pente des mines à ciel ouvert décrit des méthodes de détermination du risque d'instabilité des pentes. Il explique également comment faire entrer les coûts et les bénéfices liés à des pentes plus abruptes dans la planification globale. Ces méthodes sont fondées

sur la théorie de la fiabilité, c'est-à-dire sur la probabilité qu'un front ou une partie du front restera stable.

6. L'approche par fiabilité permet de reconnaître qu'il peut y avoir instabilité et d'en calculer les frais correspondants. Le Manuel indique des méthodes d'estimation de ces frais. Une fois ces derniers estimés, en même temps que les frais d'extraction, le chargé d'étude peut déterminer les coûts-avantages d'une disposition donnée ainsi que les risques pris. Cette information sert à prendre des décisions d'investissement dans la mine et à choisir la disposition optimale.

7. Le Manuel distingue trois étapes dans l'aménagement de la mine. L'étape de faisabilité comprend les recherches et les analyses nécessaires pour prendre la décision d'exploiter. Il est nécessaire de tirer des plans préliminaires à ce stade. La plus grande partie des données obtenues sur le terrain peuvent également être rassemblées et faire partie du programme d'évaluation du minerai présent.

8. L'étape de la conception de la mine suit la prise de décision d'exploiter. Il faut alors rassembler de nombreuses données sur le terrain, ainsi que des analyses complètes des parois potentielles et incorporer les résultats dans une analyse des risques financiers.

9. Pendant l'étape d'exploitation, des données supplémentaires sont recueillies grâce aux importantes surfaces mises à jour par l'extraction. Les hypothèses faites lors de la conception sont alors vérifiées et, s'il y a lieu, une nouvelle étude est exécutée.

10. L'étude de la pente des mines commence avec des recherches destinées à déterminer les propriétés des matériaux à extraire. La géologie structurale vient en première place car, dans les

pententes rocheuses, la stabilité est habituellement le fait de discontinuités (failles, fissures et plans de stratification). Il s'agit ensuite de faire des essais sur les matériaux qui constituent la pente pour en déterminer les propriétés mécaniques telles que les résistances à la compression et au cisaillement. Les eaux souterraines, qui ont une grande importance dans l'exploitation minière en général et dans la stabilité des pentes en particulier, sont alors étudiées.

11. Une fois les données rassemblées, une analyse de la stabilité des pentes et une analyse financière sont faites pour choisir la disposition optimale de la mine. Ceci s'inscrit dans le cadre de l'étape de conception et il faut alors prendre en considération les teneurs des minerais et les méthodes d'exploitation, en même temps que la stabilité des talus d'exploitation.

12. S'il y a instabilité, il peut être nécessaire de prendre des mesures pour y remédier. Des pentes critiques peuvent parfois être stabilisées en augmentant la résistance des roches grâce à un soutènement mécanique. La qualité et donc la stabilité des parois peuvent être considérablement améliorées par sautage périphérique contrôlé.

13. L'aménagement des pentes doit se faire en toute sécurité. On peut y parvenir grâce à une surveillance minutieuse des mouvements des pentes pendant l'extraction. Cette activité implique également la vérification des hypothèses faites lors de la conception initiale.

14. Chacune des activités présentées ci-dessus fait l'objet d'un chapitre du manuel. Deux chapitres supplémentaires décrivent les exigences spéciales de la conception des remblais de stériles et le rôle de la planification de l'environnement pour l'exploitation des mines à ciel ouvert. Ce qui suit est un résumé de chacun des neuf chapitres.

GEOLOGIE STRUCTURALE

15. La plupart des instabilités de pentes rocheuses sont dues à des discontinuités (fissures, failles et plans de stratification). Les discontinuités influencent également l'écoulement des eaux souterraines qui affectent à leur tour la stabilité.

16. Les analyses de stabilité doivent tenir compte de ces effets. Le géologue spécialiste des structures doit déterminer l'emplacement, l'orientation et l'ampleur des discontinuités et aider à déterminer leur effet sur la stabilité des pentes.

COLLECTE DES DONNEES

17. La première étape d'une recherche de géologie structurale est d'étudier les renseignements géologiques existants et de déterminer la géologie régionale. A partir de là, les problèmes de stabilité peuvent être pesés et un programme d'étude géologique mis au point. Même s'il n'existe pas de renseignements antérieurs, l'étude des caractéristiques générales des formations rocheuses aux alentours d'une mine éventuelle peut permettre de mettre en évidence des problèmes typiques. Les études pourraient porter sur les effets climatiques, la désagrégation, les zones de cisaillement et de failles et les types de roches responsables de conditions instables (par exemple, les cavernes creusés par l'eau dans le calcaire).

18. La première évaluation est suivie par la collecte de données détaillées. La meilleure façon d'y parvenir est de dresser, sur place, la carte de l'orientation, de la longueur, de l'espacement et de l'aspect des discontinuités et de la répartition des types de roches. La géologie souterraine peut être relevée par l'étude des carottes de forage. Il s'agit d'obtenir un dossier entièrement représentatif sur toutes les discontinuités qui pourraient affecter la stabilité de la pente.

19. Les levés photographiques à la planchette et la photogrammétrie au sol complètent utilement la carte dressée sur place. Les levés photographiques à la planchette (figure 1) sont les plus simples. La photogrammétrie au sol est plus précise, mais aussi plus chère - elle n'est économique que s'il faut relever un grand nombre de fissures. Des mesures géophysiques en surface et dans des trous de forage donnent des renseignements utiles sur la répartition des types de sols et de roches ainsi que sur les fractures des roches. La géophysique en surface, en particulier, est simple et peut être exécutée avec du matériel commercial peu coûteux.

STOCKAGE DES DONNEES

20. Les recherches géologiques engendrent de grandes quantités de données qu'il faut enregistrer avec précision et clarté qui doivent être facilement accessibles.

21. L'approche traditionnelle du traitement des données est de porter sur des plans et des tracés de section les discontinuités les plus importantes ainsi que les types de roches, puis analyser les données par des méthodes graphiques ou numériques. Il faut pour cela un personnel expérimenté. L'ordinateur offre une alternative à ce traitement. Il présente en particulier, l'avantage pour l'ingénieur géologue, de pouvoir répartir le levé de la carte et l'analyse en une série d'étapes simples qui peuvent être exécutées par un personnel relativement peu expérimenté.

22. Utiliser des ordinateurs exige de normaliser la cartographie géologique. Une méthode convenable, les directives de travail sur le terrain correspondantes, ainsi qu'une collection de programmes d'ordinateur, appelée DISCODAT, ont été mises au point pour le Manuel sur les pentes des mines à ciel ouvert (figure 2).

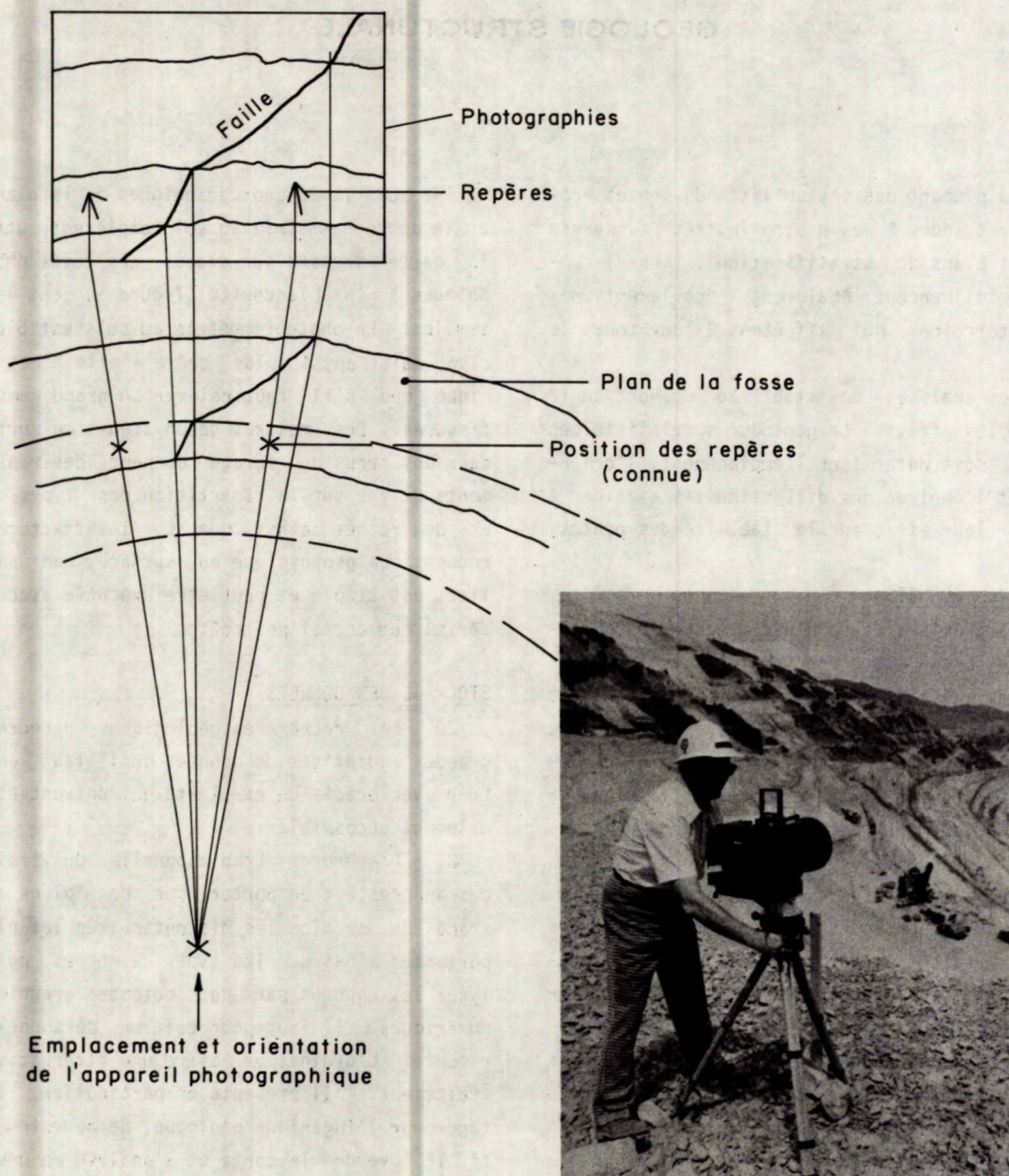


Fig 1 - Levé photographique à la planchette pour dresser la carte de talus d'exploitation d'une mine à ciel ouvert, à l'aide d'un appareil d'un objectif de longue focale et levé topographique de mine (courtoisie de Kennecott Copper Corporation).



Card Type	Identification	Elevation	Den.	Format	Pit Bench
0101	010103				
Local Grid					
Easting		Northing		Traverse	
		Trend	Plunge	Length	Ec.
		11E	-10E	446	
Remarks: - July 15, 1973 - weather sunny					

Fig 2 - Méthode de cartographie sur le terrain à l'aide d'une boussole Brunton. Haut à gauche: mesure de la direction d'un cheminement. Haut à droite: mesure de l'inclinaison d'un cheminement. Enregistrement des renseignements destinés au système de cartographie sur ordinateur.

REDUCTION DES DONNEES

23. Les données géologiques destinées à l'analyse de la stabilité des pentes se répartissent principalement en trois groupes - types de roches, structures majeures et structures mineures. Les figures 3 et 4 montrent comment présenter de telles données. La personne chargée de l'étude a besoin de renseignements supplémentaires, notamment la résistance mécanique des roches et les propriétés géotechniques des structures majeures et mineures.

24. Les observations géologiques sur le terrain doivent comprendre la description de caractéristiques, telles que la dureté, à partir desquelles on peut faire une estimation préliminaire de la résistance mécanique des roches. Les caractéristiques géotechniques des discontinuités majeures et mineures doivent être enregistrées et ceci inclut l'emplacement, l'orientation, la longueur, l'espacement, les ondulations, et la résistance mécanique des gouges ainsi que la résistance mécanique des faces de fracture. Les discontinuités majeures sont décrites et portées individuellement sur une carte. Les éléments mineurs tels que les ensembles de joints de fissures sont traités statistiquement; par exemple, leur espacement est décrit par leur dispersion autour d'une valeur moyenne.

25. La caractéristique la plus importante des discontinuités structurelles est leur orientation. Le traitement statistique de l'orientation exige de porter les observations sur un quadrillage de surface égale. Ceci révèle le groupement des discontinuités de même orientation. La figure 4 montre des groupes typiques de direction de joints de fissures pour une mine à ciel ouvert. La moyenne ou la valeur représentative de ces groupements et leur dispersion sont déterminées statistiquement.

26. La longueur et l'espacement des fractures sont importants, car ils affectent la façon dont une série de fractures peuvent se répandre pour former une surface de glissement. Déterminer la longueur exacte des fractures et leur espacement est difficile. Les techniques actuelles peuvent toutefois fournir des estimations de la longueur de la trace et de l'espacement d'un joint de fissure. On peut les utiliser pour évaluer la mesure

dans laquelle les fractures peuvent constituer des surfaces de glissements.

27. Les ondulations et la rugosité augmentent la résistance au cisaillement d'une fracture rocheuse pendant le glissement. La rugosité correspond aux petites irrégularités sur la surface d'une roche. Les ondulations correspondent aux vagues de plus grande longueur d'onde qui survivraient probablement au cisaillement. Ces caractéristiques sont enregistrées ainsi que des estimations de la résistance des matériaux qui comblent les fractures.

28. Les venues d'eau souterraine doivent être enregistrées pendant l'établissement de la carte géologique. Il faut les classer sur une échelle qui va de humide à suintement réel. Ces observations guident les recherches ultérieures sur les eaux souterraines.

SECTEURS D'ETUDE

29. Une fois le recueil et l'interprétation des données terminés, l'ingénieur géologue doit diviser la mine en secteurs d'étude préliminaire. Dans chaque secteur, les types de discontinuités et leur orientation par rapport aux parois prévues pour la mine, doivent être semblables. Les secteurs peuvent être choisis en supposant un angle de pente arbitraire de 50° et en dessinant la fosse prévue sur une carte qui indique les structures principales, les types de roches et les discontinuités mineures. Le dessin de la fosse peut être fait approximativement par des lignes droites et les secteurs d'étude délimités (figure 5). Les structures qui ont une même orientation peuvent avoir des effets différents sur les talus d'exploitation de la fosse qui se font face. Des sections droites ou courbes de la fosse, peuvent également affecter la stabilité des pentes de diverses façons. Il faut envisager tous ces facteurs.

30. Parvenu à ce point, le géologue doit évaluer les types d'instabilité qui peuvent se produire dans chacun des secteurs d'étude préliminaire. Ceci permet d'orienter les recherches de géologie structurale et d'assurer aussi, par recouvrement des études, une certaine continuité entre les diverses activités. On envisage trois modes fondamentaux d'instabilité - le cisaillement

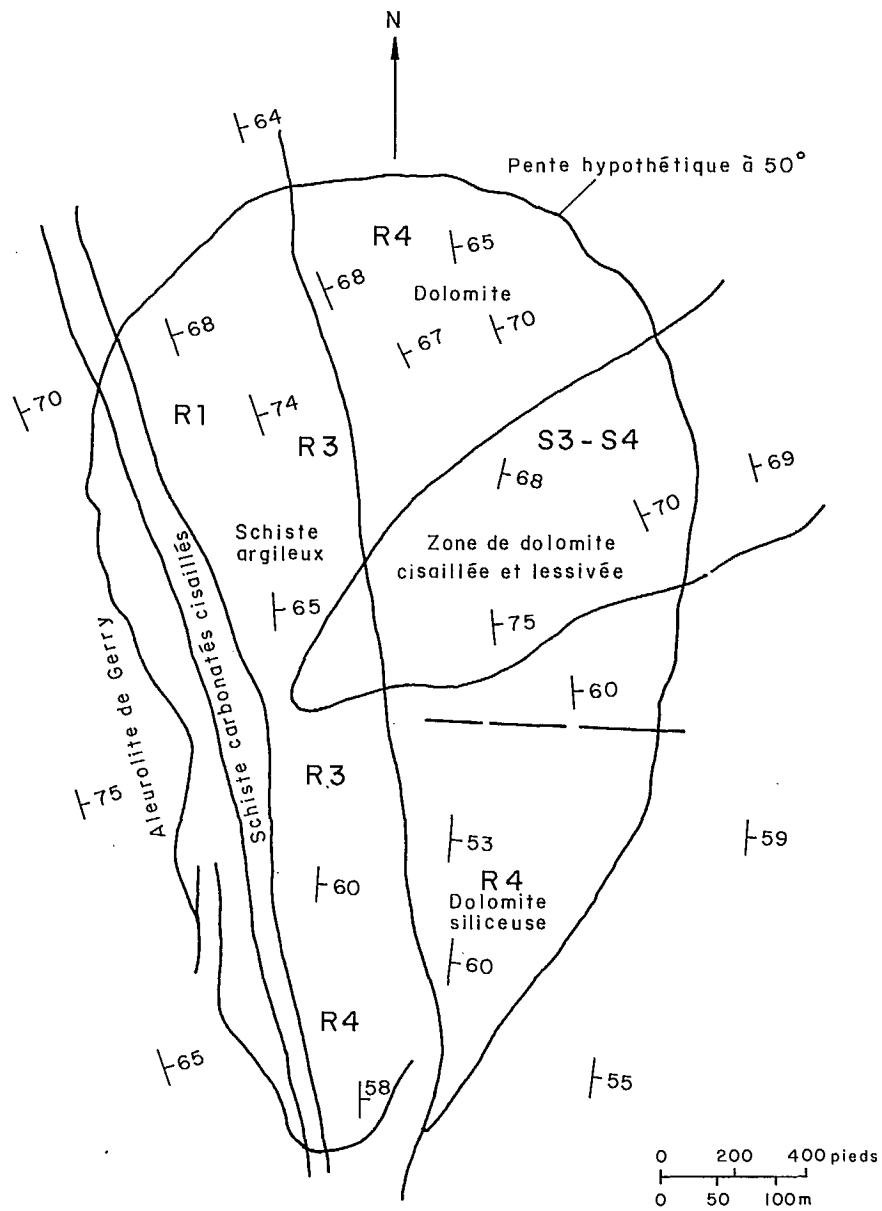


Fig 3 - Carte sommaire indiquant les types de roches et l'orientation des plans de stratification pour un site de mine.

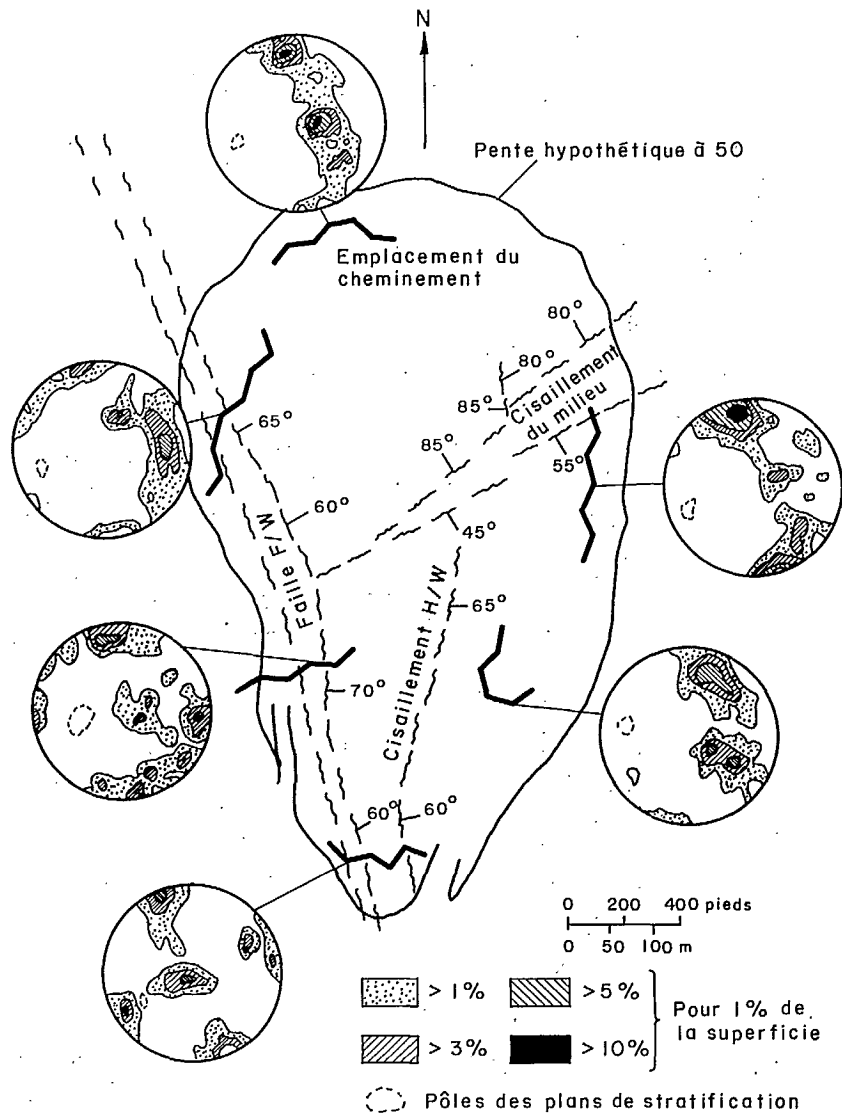


Fig 4 - Croquis sommaire indiquant les structures principales et l'orientation des discontinuités mineures.

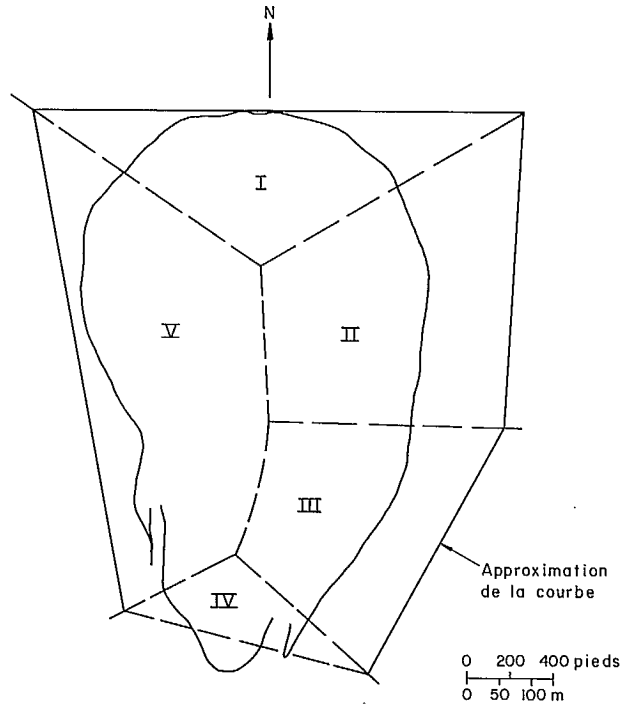


Fig 5 - Choix des secteurs d'étude.

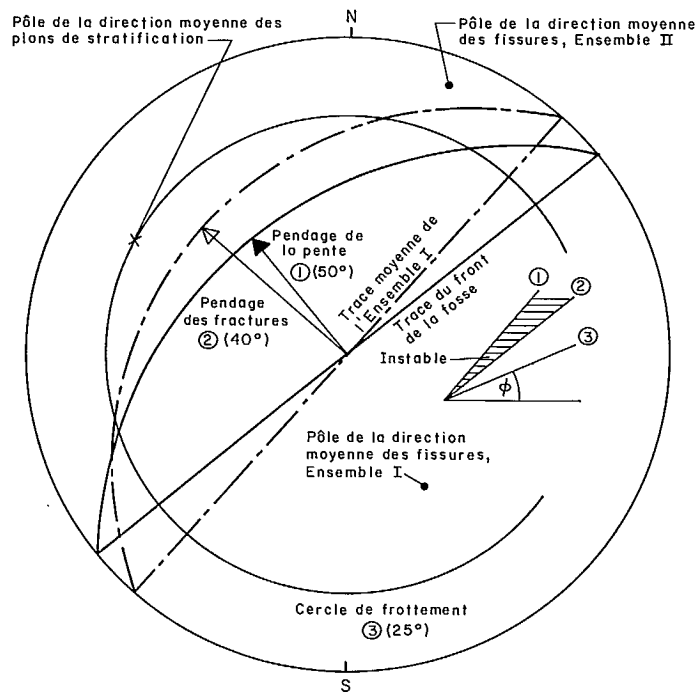


Fig 6 - Evaluation préliminaire des divers types d'instabilités possibles pour le secteur d'étude III de la figure 5.

plan, le cisaillement circulaire, et la coulée des blocs.

31. Nous donnons un exemple pour le secteur d'étude III de la figure 5. Pour ce secteur, les observations sur le terrain ont donné les détails suivants:

Substances rocheuses - dolomite siliceuse	
Résistance mécanique - R4 - roche très dure	
Orientation des joints - Ensemble I 310/40*	
	- Ensemble II 208/81*
Plan de stratification	- 118/64*
(peu fréquent)	
Cisaillement du terrain de recouvrement	- 125/60-65*
(Rempli de salbande argileuse)	

On suppose que la surface de la pente est 320/50*, et que l'angle de frottement est de 25°. Les orientations marquées d'un astérisque représentent la direction du pendage/pendage.

32. A la figure 6, les directions moyennes des discontinuités et des plans de stratification sont représentées par des pôles. Pour l'ensemble de discontinuités I, dont le pendage vers la fosse pourrait être critique, on a représenté sur la figure, la trace et le cercle de frottement pour un angle de 25°. Le front de la pente étant tracé à 320/50, on peut tirer, comme premières conclusions, qu'un glissement par cisaillement-plan le long de l'ensemble I est possible, et qu'un cisaillement circulaire à travers les roches très dures est peu probable.

ETAPES DE L'AMENAGEMENT DE LA MINE

33. Le recueil et l'analyse de données de géologie structurale se poursuivent à chacune des étapes de la mise en valeur de la mine.

34. L'objectif, au stade de faisabilité, est d'obtenir une connaissance raisonnable de la structure géologique et des types possibles d'instabilités. Les recherches se limitent à la géo-

logie régionale, à une cartographie de reconnaissance et à l'étude de carottes des forages d'évaluation du minerai. Toutefois, même ces données limitées permettent d'évaluer les angles de pente possibles et peuvent faire la différence entre une exploitation rentable ou non.

35. A l'étape de la conception de la mine, toutes les données pertinentes doivent être recueillies pour donner, à la personne chargée de l'étude, les meilleurs renseignements possibles. L'emplacement des failles doit être déterminé, la moyenne et la répartition des ensembles des joints de fissures et des plans de stratification évalués, et la distribution des types de roches établie.

36. Pendant l'exploitation, il faut continuer à recueillir des données, en profitant de la mise à jour par l'extraction des surfaces de pente. Les objectifs, dans cette étape, sont de vérifier les hypothèses géologiques faites lors de la conception et de fournir de nouvelles données pour réaménager les pentes. La carte structurale des gradins doit faire partie du travail de routine d'un département de géologie minière.

COÛTS

37. La quantité d'informations sur les structures nécessaire pour planifier une mine, varie selon le type d'exploitation à ciel ouvert. Un gîte minéral peu profond exigera moins d'études qu'une fosse grande et profonde. Les recherches sont influencées par le rapport déchets/minéraux et par les limites dues à la géologie et à la teneur en minerai. Une géologie complexe exigera plus de recherche qu'une géologie simple.

38. Le prix de revient des recherches géologiques structurales varie en conséquence. A titre d'information, les prix de revient approximatifs, en dollars de 1974, sont indiqués dans le tableau 1.

Tableau 1: Estimations du prix de revient d'une recherche de géologie structurale

Etape:	Faisabilité		Etude		Exploitation	
	Journées- hommes	Prix de revient	Journées- hommes	Prix de revient	Journées- hommes	Prix de revient
Profondeur de la fosse						
< 100 pieds (30 m)	5	1500	15	4500	35	10500
100 à 1000 pieds (30 à 300 m)	15	4500	40	12000	120	36000
> 1000 pieds (300 m)	20	6000	50	15000	160	48000

PROPRIETES MECANIQUES

39. L'analyse de la stabilité des pentes requiert la mesure de la résistance mécanique des matériaux à l'aide de tests appropriés, tant sur le terrain qu'en laboratoire. Pour être en position de calculer des forces et des déplacements on doit mesurer les propriétés physiques telles que la densité et la module d'élasticité.

PROGRAMME D'ESSAIS

40. L'exploitation d'une mine à ciel ouvert met en jeu un grand volume de sols et de roches et donc une grande diversité de propriétés mécaniques. Par exemple, non seulement chaque type de roche a des caractéristiques propres différentes, mais encore dans un type de roche donné, les propriétés peuvent varier à cause d'altérations et de la présence de discontinuités. Un programme bien planifié d'essais sur le terrain et en laboratoire est nécessaire, si l'on veut déterminer toutes les propriétés mécaniques utiles.

41. Les recherches sur les propriétés mécaniques doivent être fondées sur la délimitation préalable de secteurs de la mine faite pendant les

recherches de géologie structurale. Ce zonage s'accompagne de l'estimation des propriétés mécaniques et les types d'instabilité probables dans chacun des secteurs.

42. Un programme d'essais doit être établi pour chaque secteur d'étude. Les facteurs à envisager sont:

- le volume de matériaux à extraire et l'importance du secteur pour l'exploitation;
- les emplacements et les méthodes d'échantillonnage précis pour recueillir des spécimens représentatifs;
- le prix de revient de l'échantillonnage et de la préparation des spécimens;
- le type de matériaux à étudier, la disponibilité d'installations d'essais, la nature et la précision des renseignements nécessaires et le prix de revient des essais.

Il est très pratique de présenter un programme d'essais sous la forme d'un tableau de référence, qu'on peut aisément consulter pour rédiger un rapport. Le tableau 2 montre une partie d'un programme hypothétique.

Tableau 2: Programme hypothétique d'essais

Propriété mécanique	Priorité	Méthode d'essai	Résultat de l'essai concernant:	Source et méthode d'échantillonnage	Essai	Observation
Résistance au cisaillement du système de joints α_3 , Secteur B	1	Cisaillement direct en laboratoire sur un spécimen irrégulier	Le système de joints α_3 du secteur A; le système de joints α_3 du secteur B	Ramassé à la main, sur le talus	complet	
		Cisaillement direct en laboratoire sur des spécimens de carotte	Le système de joints α_3 de la zone B-23, secteur B	Forages NX à 21-17, 21-21 et 21-3B	limité, destiné à des vérifications	
Résistance au cisaillement du système de joints α_2 , secteur A	1	Cisaillement direct en laboratoire sur des spécimens de carotte	Le système de joints α_2 du secteur A; le système de joints α_4 du secteur B; tous les joints du secteur G	Enchantillons de carotte de forage H-51, en-dessous de la cote 650	complet	
		Cisaillement direct en laboratoire sur des spécimens de carotte	La partie supérieure du secteur A; le système de joints α_4 de la zone B-23 du secteur B	Echantillons de carotte du forage H-51, au-dessus de la cote 650	limité, destiné à des vérifications	
Résistance à compression des dolomites	2	Essai de poinçonnement	La zone B-23 altérés du secteur B	Echantillons de carotte H-51, au-dessus de la cote 650	limité, destiné à des vérifications	Dans les autres cas, utiliser les résultats du rapport d'essai 16-73 pour la dolomite dans l'ensemble de la mine
Densité des masses rocheuses	3	Essais sur les forages	Le secteur A, B, G et K	Trous percés par explosifs à des fins de production	complet	
etc.			etc.		etc.	

ESSAIS

Résistance des discontinuités au cisaillement

43. La résistance des discontinuités au cisaillement est le paramètre de résistance le plus important pour l'analyse de la stabilité des pentes rocheuses. Le glissement le long des discontinuités est la forme d'instabilité la plus courante.

44. La meilleure méthode pour déterminer la résistance au cisaillement d'une discontinuité est d'exécuter un essai in situ. De tels essais peuvent être faits à grande échelle, soit sur une surface de 3 à 5 pieds carrés (1 à 2 mètres carrés). Ceci permet d'évaluer l'influence des irrégularités de la surface sur la résistance au cisaillement. Les résultats obtenus sont alors, sans doute, plus représentatifs des conditions réelles. Ces essais sont toutefois coûteux.

45. La figure 7 montre le dispositif d'essai. On isole un bloc de roche situé sur la discontinuité en le dégageant des roches qui l'entourent. Des vérins hydrauliques fournissent une force normale et une force de cisaillement. Dans certains endroits il peut être possible d'exécuter des essais dans une galerie d'exploration en employant les parois comme point d'appui pour les vérins. Au-dessus du sol, il faut toutefois des ancrages ou des boulons fixés dans la roche pour appuyer les vérins.

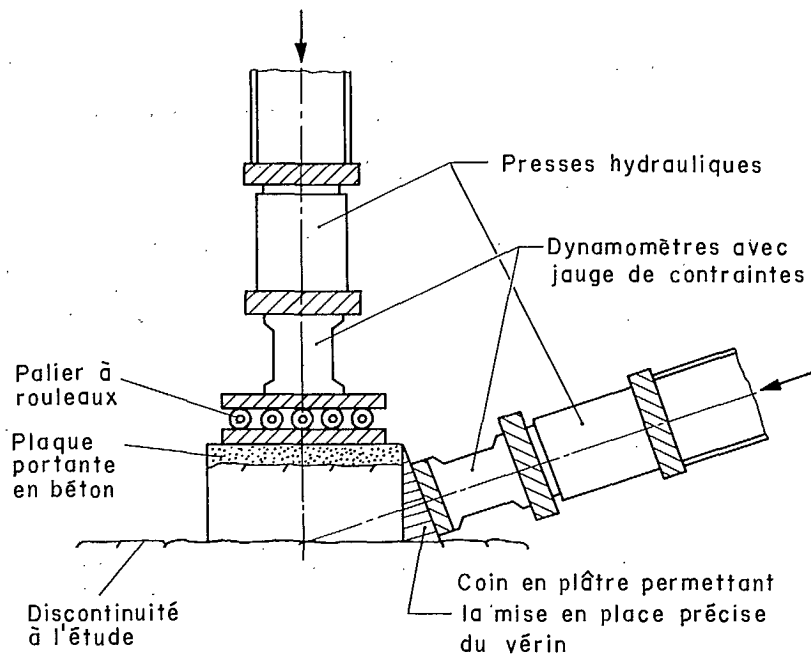


Fig 7 - Essai de cisaillement sur le terrain.

46. Si l'on ne fait pas d'essais in situ, il faut des tests en laboratoire. Il y a deux types d'essais fondamentaux, l'essai par compression triaxiale et l'appareil de cisaillement rectiligne (boîte de Casagrande).

47. La figure 8 montre un appareil de compression triaxiale. Sa principale caractéristique est une chambre remplie d'un fluide - habituellement de l'huile ou de l'eau - sous pression. Ce fluide exerce une contrainte latérale sur le spécimen. Une contrainte axiale est appliquée par l'intermédiaire d'un piston axial. La discontinuité à tester est orientée grossièrement à 45° de la

verticale. Dans ce cas, les contraintes de cisaillement sur la discontinuité sont proches du maximum et assurent la rupture par glissement sur celle-ci. Les pressions d'essai utilisées doivent correspondre à la gamme de pressions probables existants sur la pente à étudier.

48. La figure 9 montre un appareil de cisaillement rectiligne. Des vérins appliquent une force normale et une force de cisaillement à la surface de discontinuité pour provoquer un mouvement de cisaillement. Le spécimen doit habituellement être placé dans du plâtre ou du ciment. Il existe dans le commerce un appareil portatif que

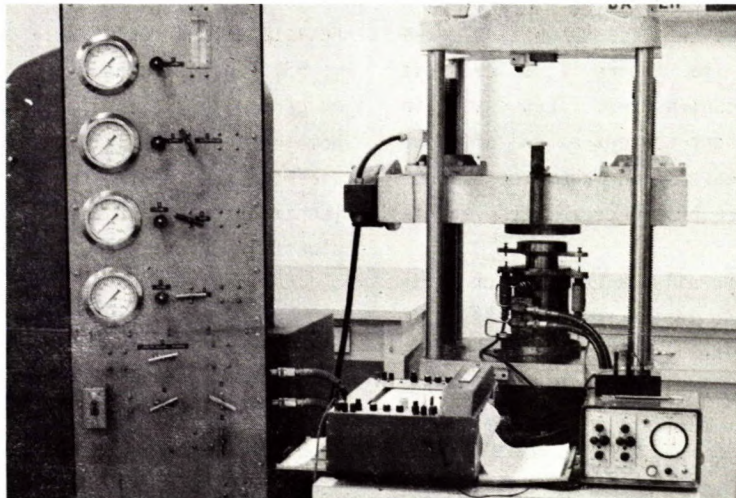


Fig 8 - Un appareil de compression triaxiale avec enregistrement automatique des données.

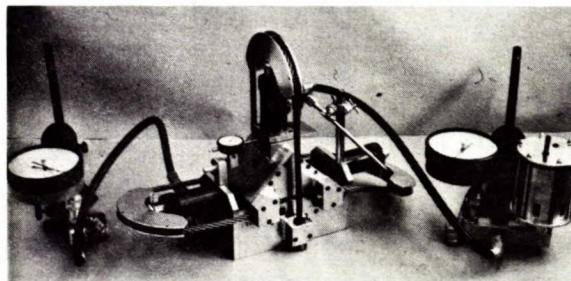


Fig 9 - Un appareil de cisaillement rectiligne destiné aux essais sur des petits échantillons. L'appareil montré sur la photo est portatif.

l'on peut utiliser sur le terrain.

Résistance des matériaux au cisaillement

49. Le terme matériau se rapporte ici aux roches et au sol intacts. Le cisaillement peut se produire au sein de masses homogènes telles que les terrains de couverture et les roches de faible résistance. Il peut également survenir dans des roches très altérées et désagrégées dont la structure géologique est irrégulière, si bien qu'il ne se forme pas de surfaces de glissements préférentielles. Le cisaillement de l'argile de friction des discontinuités peut aussi se manifester.

50. Les essais in situ sur la résistance au cisaillement des discontinuités peuvent aussi servir à déterminer la résistance propre du matériau rocheux. Les principes utilisés sont les mêmes que ceux illustrés par la figure 7, si ce n'est qu'il n'y a pas de discontinuités. Les essais in situ à grande échelle sont coûteux et on effectue le plus souvent des essais en laboratoire, pour déterminer la résistance propre de la roche au cisaillement.

51. L'emploi d'appareils de compression triaxiale, comme celui de la figure 8, est le meilleur moyen pour déterminer en laboratoire la résistance des roches au cisaillement. Le procédé est semblable à celui employé pour les essais sur les discontinuités si ce n'est que l'échantillon n'est pas fissuré. La rupture se produit invariablement suivant un plan incliné par rapport à la verticale, à cause de la répartition des contraintes maximum de cisaillement.

Analyse des essais de cisaillement

52. Les essais à l'appareil de compression triaxiale, à l'appareil de cisaillement rectiligne et in situ doivent être analysés pour déterminer les paramètres de résistance destinés à la conception de la pente. On y parvient en portant sur un graphique les contraintes normales en abscisse et les contraintes de cisaillement en ordonnée; la figure 10 montre les courbes typiques pour une roche.

53. Pour les roches, ces trois courbes se coupent en général en un point unique T, connu sous le nom de point de pression de transition.

Pour des applications pratiques, la pression de transition est égale à la résistance à la compression uniaxiale, Q_u , de la roche. Un graphique tel que celui de la figure 10 donne les paramètres de résistance qui correspondent à la gamme de contraintes envisagées et que l'on choisit pour étudier la pente.

54. La variation statistique des propriétés mécaniques doit être mesurée. Les valeurs moyennes et la dispersion par rapport à la moyenne, pour des échantillons représentatifs, doivent être déterminées pour chaque essai, en tenant compte de leur précision et de leur reproductibilité. Ces valeurs servent à déterminer la moyenne et l'écart des paramètres d'étude.

Resistance des roches à la compression

55. La résistance à la compression gouverne, en général, la stabilité des roches résistantes et homogènes dont la structure géologique est irrégulière. Si d'importantes contraintes horizontales (contraintes tectoniques) se produisent au pied d'un talus élevé, il peut y avoir écrasement des

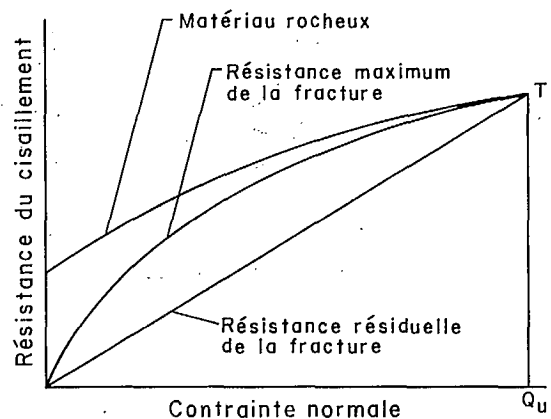


Fig 10 - Résistances au cisaillement des roches, en fonction de la contrainte normale. La courbe du haut représente la résistance de la roche. La courbe du milieu représente la résistance au cisaillement maximale des fractures propres et rugueuses. La courbe du bas représente la résistance au cisaillement résiduelle d'une discontinuité - après qu'un important mouvement de cisaillement ait eu lieu.

blocs de roches à cet endroit. Ceci peut engendrer des ruptures dans les roches et en éboulement.

56. Il n'est pas pratique de mesurer directement la résistance à la compression d'importants blocs de roches. Il est préférable de déterminer la résistance à la compression uniaxiale de petits spécimens représentatifs et d'en déduire la résistance des blocs plus grands.

57. Plusieurs essais peuvent servir à déterminer la résistance d'une roche à la compression uniaxiale. On peut la mesurer directement par un essai à l'appareil de compression triaxiale avec une pression latérale nulle, ou par un essai de poinçonnement (figure 11). Dans ce dernier cas, il existe une relation empirique entre la charge au moment de la rupture et la résistance à la compression uniaxiale. On peut utiliser des spécimens de forme irrégulière.

58. La résistance des roches à la compression décroît quand leur taille augmente car plus elles sont volumineuses plus il y a de chance d'y trouver des défauts. En principe, la relation existant entre la résistance et la taille peut être



Fig 11 - Appareil d'essai de poinçonnement pour déterminer la résistance des roches à la compression uniaxiale.

déterminée en laboratoire en testant des spécimens de plus en plus grands. En pratique, il convient toutefois mieux d'utiliser des relations empiriques.

Propriétés physiques

59. Les trois propriétés qui gouvernent les déformations - le module de Young, le coefficient de Poisson et le module de cisaillement - servent à calculer le déplacement de la pente pendant l'excavation, ainsi que la distribution des contraintes. Il y a aussi une corrélation entre ces propriétés et la résistance mécanique.

60. On peut les déterminer en laboratoire, en mesurant les variations de longueur et de largeur de spécimens soumis à une charge. On peut également les mesurer in situ, en chargeant la surface d'une strate rocheuse et en calculer le déplacement, mais ces essais sont coûteux.

61. Plus pratiquement, ces propriétés peuvent être évaluées in situ et indirectement, connaissant la vitesse des ondes sismiques dans le sol ou dans les masses rocheuses. L'équipement nécessaire existe dans le commerce. Les mesures peuvent être faites en surface ou dans des trous de sonde. La relation entre la vitesse des ondes et les caractéristiques de déformation est bien établie. Bien qu'elle ne s'applique qu'à un milieu élastique idéal, elle fournit une bonne estimation des propriétés de déformation.

62. Il peut être important, pour certains matériaux, de mesurer les propriétés de déformation en fonction du temps. Ces caractéristiques de "fluage" ou de "plasticité" affecteront l'aménagement de la pente si elles entraînent un effondrement progressif de la pente. Elles peuvent être déterminées en appliquant une charge fixe pendant une longue période de temps et en observant la déformation jusqu'à ce qu'elle cesse effectivement. L'essai se fait sous diverses charges pour déterminer les caractéristiques pour l'ensemble de la gamme de contraintes que subira probablement la pente réelle.

63. La connaissance des propriétés caractéristique, telles que les limites de saturation en eau et de plasticité des sols ainsi que la distribution des grains en fonction de leur taille dans

Les roches, peuvent être nécessaires à l'aménagement de la pente. On peut également s'en servir pour classer les matériaux.

64. Les propriétés caractéristiques servent également à mesurer les pressions de gonflement et de déplacement qui se produisent dans certaines roches et sols quand ils sont mouillés. Ces phénomènes peuvent affecter la stabilité des pentes. Des indices de gonflement sont déterminés en immergeant le matériau dans des conditions définies et en mesurant les pressions et les déplacements qui s'en suivent.

65. La densité nécessaire pour déterminer les masses dans les analyses de stabilité, peut être mesurée en laboratoire ou sur le terrain. La porosité et la teneur en eau peuvent affecter le comportement des matériaux. On peut les déterminer à partir des poids normal, sec et saturé d'un échantillon de volume connu.

66. Ce chapitre sur les propriétés mécaniques ne décrit pas deux essais importants. La première est la détermination de la perméabilité, qui gouverne le mouvement des eaux souterraines et donc la pression hydrostatique; elle est décrite au chapitre sur les eaux souterraines. La deuxième, est la classification de la qualité des roches (RQD), décrite dans le chapitre sur la géologie structurale. Il s'agit de noter les proportions de carottes de roches dont la longueur intacte est supérieure à 4 pouces (10 centimètres). Il existe une corrélation entre le RQD et la résistance mécanique de la masse rocheuse.

ETAPES DE MISE EN VALEUR DE LA MINE

67. A l'étape de la faisabilité, les essais

doivent fournir les renseignements préliminaires destinés à l'analyse de la stabilité des talus au moindre coût. Il faut utiliser au maximum les essais indirects qui sont relativement simples, telle que la mesure de la vitesse des ondes sismiques, et des tests caractéristiques tels que le RQD. Les essais directs se limitent habituellement aux échantillons en provenance des trous de sondage. Là où c'est possible, les meilleurs exemples de discontinuité dans les carottes devraient être réservés aux essais mécaniques.

68. Le programme d'essai lié à l'étape de conception est le plus chargé, car celle-ci demande de nombreux tests et des renseignements détaillés sur les propriétés des matériaux; on tente donc de planifier un programme adéquat, qui fournira des échantillons représentatifs pour un prix raisonnable. Le programme d'essai est commandé par les recherches de géologie structurale, et il faut que l'ensemble des résultats obtenus soient partagés entre les spécialistes chargés des essais, de la conception et des études de géologie structurale. Les travaux préliminaires doivent indiquer s'il faut faire des forage supplémentaires pour obtenir des échantillons. Ceci relève du domaine d'étude de géologie structurale et des eaux souterraines.

69. A l'étape d'exploitation, les essais sont facilités par la disponibilité d'échantillons recueillis au moment de l'extraction. La principale exigence, à ce stade, est de fournir des données pour une étude nouvelle, ainsi que pour une meilleure connaissance des propriétés préalablement établies ou de les vérifier en particulier, quand de nouvelles zones sont mises à jour.

EAUX SOUTERRAINES

70. Les eaux souterraines influencent l'étude des pentes, car la pression hydrostatique réduit la résistance aux cisaillements des discontinuités. La résistance au glissement est proportionnelle à la force normale qui s'exerce sur les points de contact de la discontinuité. Si une pression hydraulique s'exerce sur la surface, une partie de la force normale est transmise par l'eau. Il y en a donc moins qui est transmise par les points de contact, et la résistance au frottement de glissement est donc réduite (figure 12).

OBJECTIFS

71. Les recherches sur les eaux souterraines ont deux objectifs:

- de déterminer les pressions hydrostatiques pour étayer l'étude de la pente;
- de déterminer la façon de réduire cette pression, par drainage ou d'autres moyens de contrôle, si nécessaire.

72. Les analyses de stabilité des pentes doivent évaluer l'influence de la pression des eaux souterraines. Si elle est critique, il faut étudier les méthodes pour la réduire et en évaluer les avantages et les coûts.

DETERMINATION DES PRESSIONS

73. La pression des eaux souterraines peut être mesurée directement, à l'aide de piézomètres. Le plus simple d'entre eux est un tuyau scellé dans un trou de forage. Son extrémité inférieure est ouverte, ce qui permet à l'eau d'entrer ou de

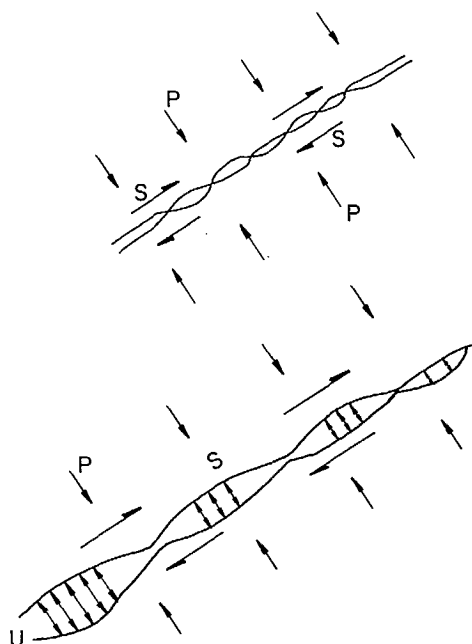
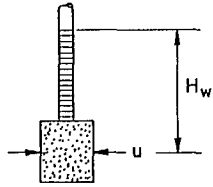
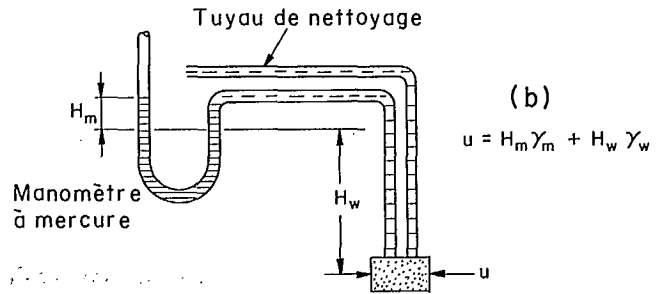


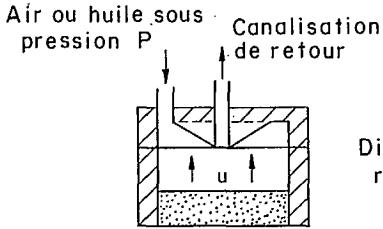
Fig 12 - Principes des contraintes effectives. Dans une discontinuité sèche comme celle du haut de la figure, la contrainte P est transmise par les points de contact. La résistance au cisaillement S est proportionnelle à la force transmise par les points de contact: $S=C+P \tan \phi$. Dans la discontinuité saturée que montre la figure du bas, la contrainte P est transmise, en partie, par la contrainte exercée sur l'eau, U , et en partie par les points de contact. La résistance S est maintenant proportionnelle à la force réduite, transmise par les points de contact: $S=C+P (P-U) \tan \phi$. $P-U$ est la contrainte effective.



(a) Niveau mesuré par une jauge
 $u = \gamma_w H_w$

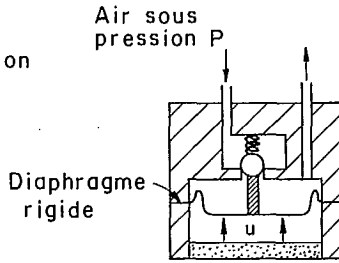


(b) $u = H_m \gamma_m + H_w \gamma_w$



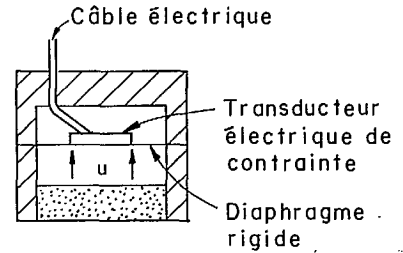
(c)

La pression de l'eau sur le diaphragme scellé la canalisation de retour. P croît jusqu'à l'ouverture de la soupape, alors: $u = P$



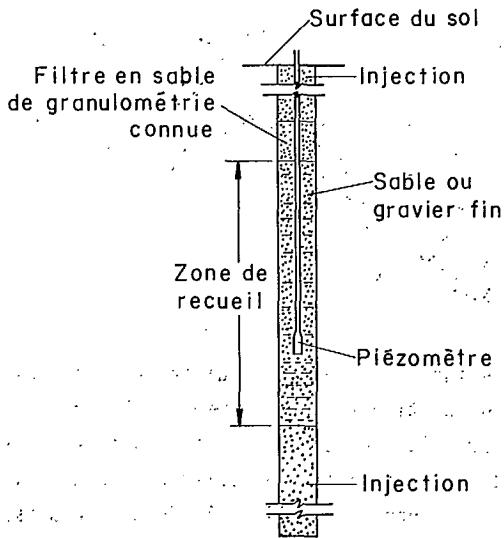
(d)

La pression de l'eau sur le diaphragme provoque l'ouverture de la soupape à bille. P augmente jusqu'à la fermeture, alors: $u = P$

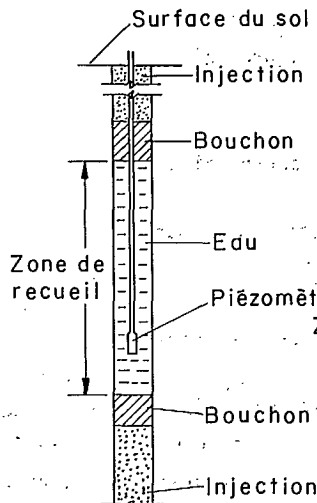


(e)

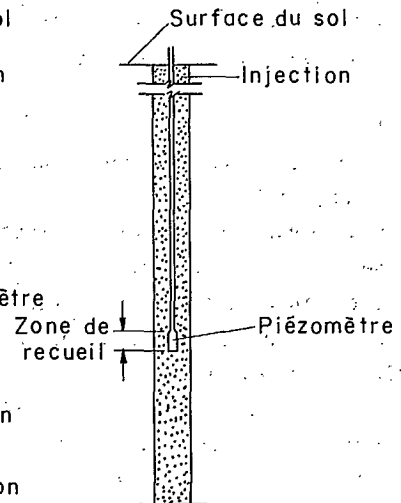
$u = f$ (signal de la jauge)



(f)



(g)



(h)

Fig 13 - Les cinq principaux types de piézomètres sont: (a) la colonne montante; (b) le manomètre; (c) le diaphragme mécanique; (d) la soupape à bille; (e) la jauge de déformation électrique. Les coupes schématiques des installations comprennent: (f) collecteur de sable ou de gravier; (g) packers de pression; (h) injection totale.

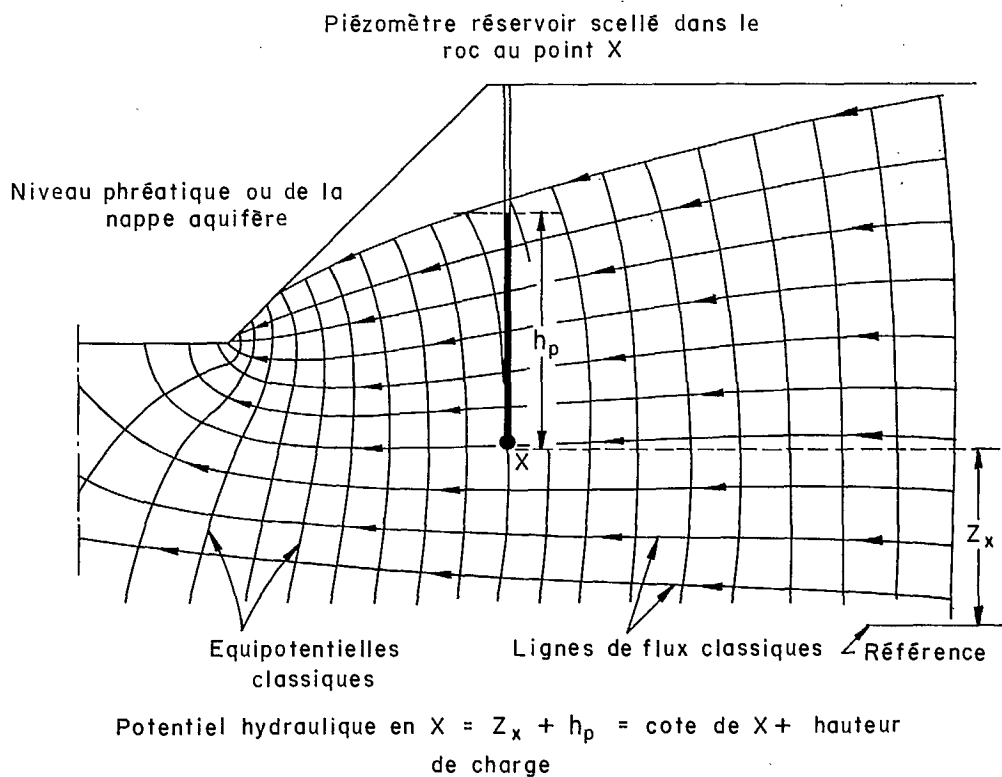
sortir. Le niveau de l'eau dans le tuyau, ou la colonne montante, donne une mesure de la pression au bas du tube. Les piézomètres plus perfectionnés sont munis d'instruments scellés dans le trou de forage, qui donnent une lecture directe de la pression.

74. Les piézomètres doivent être installés avec soin, si l'on veut qu'ils donnent des résultats fiables. Il est important de choisir le type adéquat. Par exemple, la colonne montante qui requiert une arrivée d'eau pour enregistrer une variation de pression, répond très lentement à ces variations, dans un sol de faible perméabilité. On peut avoir recours à un piézomètre plus perfectionné qui n'a pas besoin d'écoulement d'eau, pour éviter une trop longue attente (figure 13).

75. Les piézomètres seuls ne suffisent pas à la détermination des pressions des eaux souter-

raines à la conception de la mine. D'abord, il est impossible d'installer le grand nombre de piézomètres nécessaires. Ensuite, une part importante des recherches sur les eaux souterraines consiste à prévoir la répartition de la pression dans les pentes futures, quand non seulement la géométrie de la mine aura changé, mais encore les sources d'eau souterraine telles que les cours d'eau peuvent avoir changé aussi.

76. En pratique, la répartition de la pression de l'eau dans l'ensemble d'une pente est déterminée en combinant les mesures sur le terrain et les études théoriques. Les premières déterminent les propriétés des matériaux de la pente qui affectent l'écoulement des eaux souterraines et établissent l'origine des ces eaux. Des études théoriques servent alors à prédire la pression de l'eau souterraine dans l'ensemble de la pente. Les piézo-



h_p est déterminée à partir de l'intersection de l'équipotentielle qui passe par X et de la surface de la nappe phréatique

Fig 14 - Réseau d'écoulement des infiltrations à travers une pente.

mètres donnent les données de départ des études théoriques, et, ce qui est très important, permettent de surveiller les changements de pression et de vérifier la précision des prédictions.

ANALYSE

77. La clé de l'étude théorique de la distribution des pressions de l'eau souterraine tient dans le cheminement de cette eau, qu'on peut représenter par des lignes de flux et des lignes équipotentielles. Le potentiel est ici un paramètre important de ce cheminement et on le définit comme l'élévation de station d'observation, plus la pression mesurée en hauteur d'eau. Les eaux souterraines s'écoulent des régions de potentiels supérieurs vers celles de faibles potentiels; il n'a pas de mouvement le long des équipotentielles.

Réseau d'écoulement souterrain

78. Les écoulements souterrains peuvent être représentés par un schéma de lignes d'écoulement et d'équipotentielles appelé réseau d'écoulement (figure 14). La limite supérieure des écoulements est la nappe phréatique, ou la surface phréatique. Le niveau de l'eau dans un piézomètre à la colonne montante installée sur une pente s'élève jusqu'à une hauteur où l'équipotentielle, qui passe par l'extrémité inférieure de la colonne, rencontre la surface phréatique.

79. La pression des eaux souterraines peut donc être déterminée à partir des équipotentielles d'un réseau d'écoulement. En toute rigueur, le réseau d'écoulement représente le cheminement des eaux à travers un milieu uniformément poreux, tandis que dans le cas des pentes rocheuses, il se fait principalement le long des discontinuités plutôt qu'à travers la roche intacte. On peut toutefois utiliser un réseau d'écoulement pour représenter le flux moyen à travers les pentes rocheuses.

Perméabilité

80. La principale caractéristique du matériel qui constitue le talus et qu'il faut connaître avant de pouvoir tracer un réseau d'écoulement, est la perméabilité. C'est une mesure de la quantité d'eau qui s'écoulera sous une différence de

potentiel donné. Diverses techniques servent à mesurer la perméabilité de la masse rocheuse sur le terrain.

81. La cartographie de surface et des forages, ainsi que la diagraphie des sondages de forage et l'étude des rapports correspondants, servent à repérer les fractures qui affectent la perméabilité.

82. En chargeant un trou de sonde au dessus du niveau phréatique et en mesurant la chute de la colonne d'eau avec le temps on peut se servir de la relation entre l'écoulement et la pression pour calculer la perméabilité.

83. Les essais sous pression constante mesurent le flux nécessaire pour maintenir une charge au-dessus (ou en-dessous) de la pression d'équilibre. Ces essais se font habituellement à une certaine profondeur dans des sections de trous de sonde isolées par des joints gonflables. Le rapport pression/écoulement peut servir à calculer la perméabilité.

84. Dans l'essai de puits ou de rabattement de la nappe d'eau, on mesure la variation de pression d'eau avec le pompage du trou de sonde. En régime permanent, le débit lors du pompage peut servir à calculer la perméabilité du sol environnant.

Elaboration du réseau d'écoulement souterrain

85. Une fois que la perméabilité et d'autres paramètres tels que l'origine des eaux souterraines ont été déterminés, on peut commencer à construire le réseau d'écoulement. Il y a plusieurs méthodes possibles.

86. La prise de croquis est la méthode la plus simple et a l'avantage d'être peu coûteuse et directe, pour les schémas d'écoulement simple, elle donne un bon aperçu des conditions réelles d'écoulement. Le principe est que les lignes d'écoulement et les équipotentielles se coupent à 90°; on exécute le croquis par approximations successives.

87. La méthode des résistances électriques se base sur l'analogie entre la loi de Darcy régissant l'écoulement des eaux et la loi d'Ohm, relative au courant électrique. Un réseau de résistances ou une feuille de papier conducteur servent à faire un modèle de la pente. Le déplacement du courant électrique à travers le modèle représente

l'écoulement de l'eau et le voltage électrique représente le potentiel hydraulique.

88. Les techniques d'analyse qui utilisent des calculations numériques sont les plus efficaces dont on dispose. Dans ces analyses, les équations d'écoulement pour la pente sont résolues approximativement et permettent de prédire à la fois le débit et la distribution des pressions. L'avantage des méthodes numériques est qu'il est relativement facile d'analyser les perméabilités.

89. Toutes ces méthodes permettent d'envisager diverses géométries de la pente et les autres facteurs qui contrôlent les eaux souterraines. La meilleure méthode, pour la plupart des cas, est l'analyse numérique par ordinateur, bien que la prise de croquis soit un outil utile pour les cas simples.

Résultats de l'analyse

90. Les analyses donnent une série de réseaux d'écoulement pour les géométries existantes et prévues de la pente, et tiennent compte des facteurs comme le détournement de cours d'eau et les variations des précipitations. Les réseaux permettent de prédire la pression de l'eau souterraine dans l'ensemble de la pente; l'effet de ces pressions sur la résistance au cisaillement est

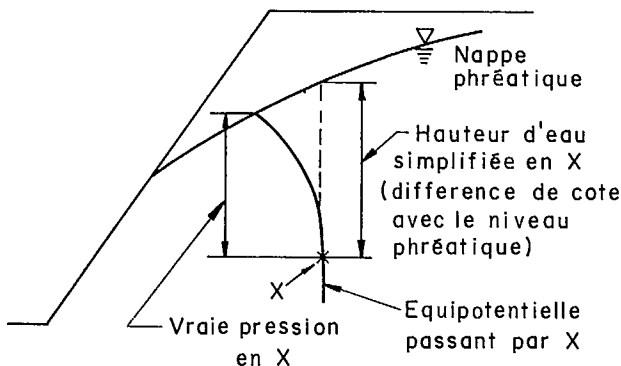


Fig 15 - Distribution simplifiée des pressions. La détermination approximative de la distribution des pressions par l'évacuation de la profondeur verticale au-dessous de la nappe phréatique est généralement surestimée.

inclus dans les analyses de stabilité, lors de la conception de la pente et de la mine.

91. La répartition réelle des pressions est complexe pour toutes les pentes, y compris les plus simples. Les techniques actuelles d'analyse de la stabilité exigent une distribution simplifiée. On peut y parvenir en établissant la pression hydrostatique en fonction de la nappe phréatique. C'est une évaluation habituelle assez prudente car les pressions sont toujours exagérées (figure 15).

92. Si l'on désire envisager les variations dans la distribution des pressions des eaux souterraines, par exemple à cause des fluctuations saisonnières, on peut y parvenir en précisant une limite supérieure et une limite inférieure à la nappe phréatique (figure 16).

DRAINAGE

93. Si la pression des eaux souterraines contribue à l'instabilité, le drainage pourrait y remédier de façon satisfaisante.

94. Avant de se décider à drainer, il est nécessaire de faire une étude soignée des effets de drainage possibles sur la stabilité de la pente. Ceci signifie qu'il faut évaluer les analyses de stabilité sous drainage, faire des essais

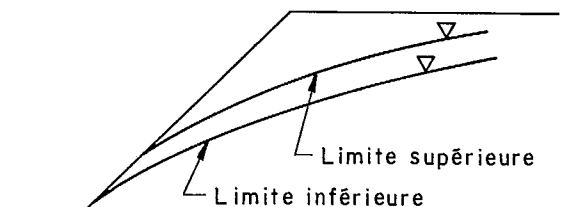


Fig 16 - Les variations dans la distribution des pressions de l'eau souterraine dues aux fluctuations saisonnières ou à l'incertitude sur les paramètres mesurés peuvent être estimées à partir des limites supérieure et inférieure de la nappe phréatique.

sur le terrain pour déterminer le potentiel de drainage, ainsi que des analyses théoriques concernant les effets du drainage sur la pression hydrostatique souterraine.

95. L'évaluation théorique du drainage utilise les mêmes techniques qui servent à déterminer la distribution des pressions de l'eau souterraine. Par exemple, des analyses par ordinateur peuvent servir à obtenir un réseau d'écoulement pour la pente drainée. Les pressions hydrostatiques peuvent alors être déterminées à partir de ce réseau.

96. Il est essentiel de faire des essais sur le terrain pour vérifier qu'un système prévu de drainage donnera les résultats escomptés. Une méthode classique est d'installer des piézomètres dans une zone critique, puis de forer plusieurs drains ou de creuser un puits. On peut alors comparer les pressions avant et après le drainage. Il importe, à la fois pour les essais et pour les installations actuelles, que l'eau renfermée dans les formations géologiques ou les discontinuités soit captée. Le débit d'un puits ou d'un drain ne mesure pas l'efficacité du drainage; l'objectif est de réduire la pression.

Méthodes de drainage

97. Le choix de la méthode de drainage dépend de nombreux facteurs comprenant la hauteur de la pente, la perméabilité ainsi que des contraintes

économiques et opérationnelles. On utilise en général quatre méthodes (figure 17).

- Les drains horizontaux ou sub-horizontaux sur le flanc de la pente sont simples et relativement faciles à creuser; ils n'ont besoin que de peu d'entretien et drainent par gravité. Les trous de forage sont généralement garnis de tuyaux perforés.
- Le forage de puits verticaux en deça du sommet de la pente ou sur le flanc de la pente, ont l'avantage d'être à l'écart des travaux, et s'ils se trouvent derrière la crête, peuvent être utilisés pour drainer avant même de commencer l'excavation. Il faut toutefois des pompes, avec les frais d'entretien que cela comporte.
- Les tranchées creusées à flanc de coteau, ou qui suivent la pente, sont nécessairement peu profondes et ne peuvent drainer que la surface. Toutefois, quand les instabilités à faible profondeur sont critiques, un drainage par tranchées peut être rentable.
- L'excavation de galeries dans la masse rocheuse en arrière de la pente est coûteuse, mais quand il faut un drainage à grande échelle, elle est souvent la méthode la plus efficace. Elle ne gêne pas l'exploitation et peut servir à d'autres fins, telles que l'évaluation du minerai et la cartographie structurale. Il est possi-

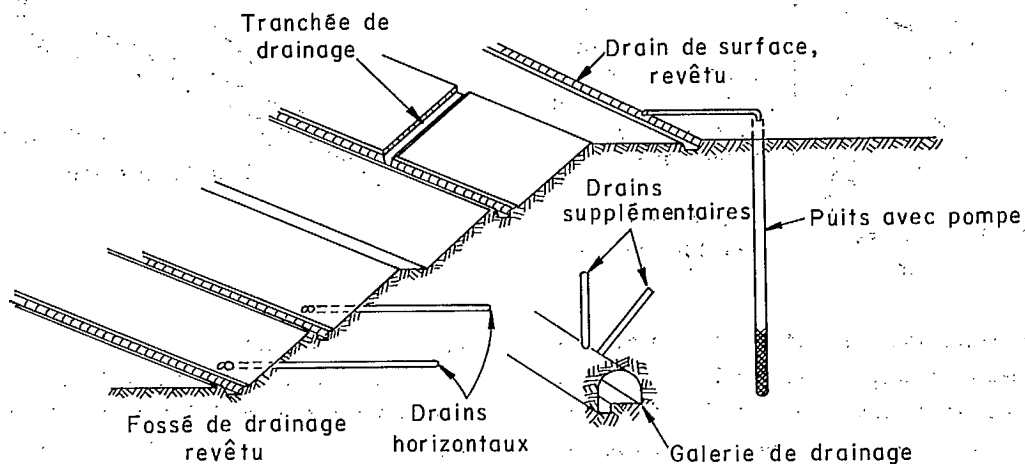


Fig 17 - Systèmes de drainage de la pente.

ble de creuser des drains supplémentaires à partir de la galerie.

Murs étanches

98. Une méthode efficace pour contrôler les eaux souterraines dans certaines circonstances est de construire des murs étanches pour empêcher l'eau d'atteindre la pente. Cependant, cela ne peut être réalisé que lorsqu'il existe une couche bien définie de matériaux aquifères, tel qu'un ancien lit de rivière. On peut couper ou réduire l'arrivée de l'eau par l'emploi de palplanches ou par remplissage de tranchées avec des matériaux imperméables, mais la méthode la plus courante est l'injection de ciment.

99. Dans ce dernier cas, on fore des trous et on y pompe le coulis jusqu'au remplissage total. Des piézomètres de chaque côté du rideau permettent de surveiller la chute de pression; on fore des trous supplémentaires et on y injecte le coulis jusqu'à ce qu'on obtienne le contrôle désiré (figure 18).

SURVEILLANCE

100. Un aspect essentiel des études et du contrôle des eaux souterraines est une surveillance régulière des pressions souterraines, grâce aux piézomètres. Le débit des drains, les écoulements

dans les cours d'eau et dans les galeries à flanc de coteau et l'observation des suintements sur les talus d'exploitation sont également des méthodes de surveillance utiles.

ETAPES DE L'AMENAGEMENT DE LA MINE

101. La figure 19 montre les mesures appropriées en matière de contrôle de l'eau souterraine prises des diverses étapes de l'aménagement de la mine. Une évaluation préliminaire des eaux souterraines est faite à l'étape de faisabilité. On étudie les caractéristiques régionales et les informations existantes à partir de photographies aériennes, de cartes et des données sur les puits, les écoulements des cours d'eau et les données météorologiques.

102. On peut effectuer des forages d'exploration pour une dépense supplémentaire minime, afin de mesurer la perméabilité, faire la diaggraphie, prélever des carottes, identifier les discontinuités qui forment des voies d'écoulement et afin d'effectuer les mesures piézométriques.

103. Il faut faire des recherches détaillées sur les eaux souterraines au moment de la conception de la mine. Tous les forages d'exploration devraient également être utilisés pour faire des essais de perméabilité et des mesures piézométriques. Il faut habituellement des trous de forage

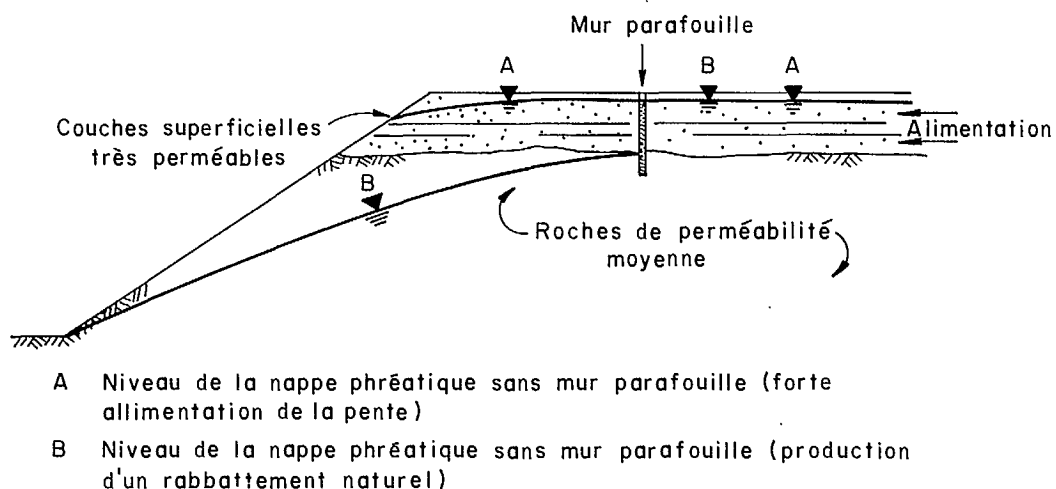


Fig 18 - Mur imperméable pour contrôler les infiltrations dans une pente.

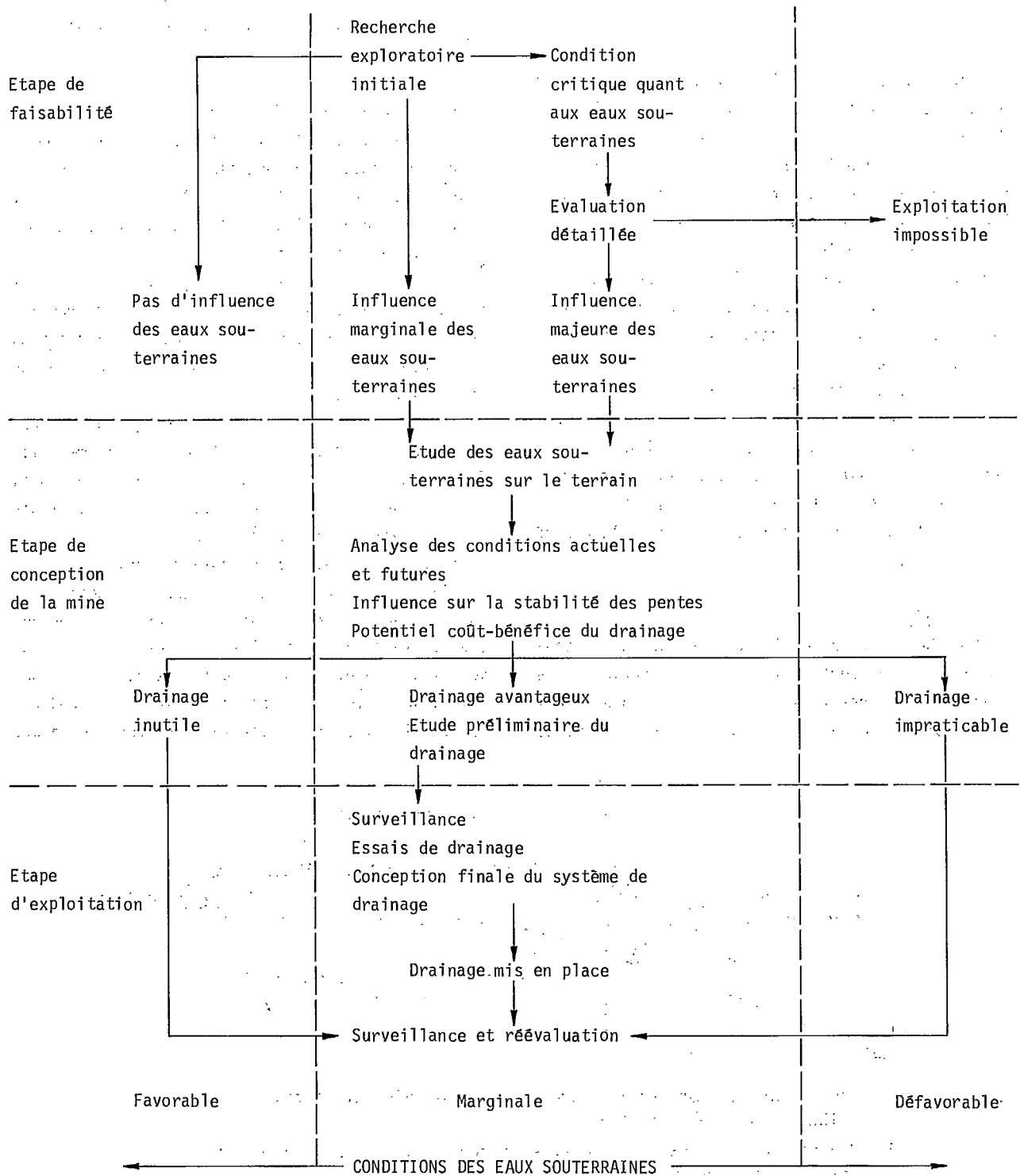


Fig 19 - Etudes des eaux souterraines pour une exploitation à ciel ouvert.

supplémentaires destinés précisément aux recherches sur les eaux souterraines.

104. Le rassemblement de données est suivi d'analyses théoriques nécessaires pour établir des réseaux d'écoulement. Ces derniers permettront d'identifier les zones où le drainage pourrait être nécessaire et orienteront les recherches ultérieures.

105. Pendant l'exploitation, les eaux souterraines doivent être surveillées régulièrement par un réseau de piézomètres et en observant les infiltrations, l'écoulement des drains, etc. Les renseignements obtenus guident les recherches et les analyses supplémentaires rendues nécessaires par des conditions des sols autres que celles prévues ou parce que la disposition de la mine a été modifiée.

COÛTS

106. Le coût des recherches sur les eaux souterraines varie beaucoup selon les mines. Les estimations suivantes sont un relevé des connaissances actuelles pour diverses profondeurs de fosses coniques. Les coûts du forage et du drainage ne sont pas inclus; nous utilisons la valeur des dollars de 1975.

Etape	Profondeur définitive de la fosse - en pieds (m)		
	100(30)	500(150)	1000(300)
Faisabilité	\$ 8000	16000	24000
Conception de la mine	\$10000	20000	39000
Exploitation	\$ 6000	11000	16000

107. Les délais nécessaires approximatifs pour la réalisation des diverses étapes sont les suivantes:

Etape	Profondeur définitive de la fosse - en pieds (m)		
	200 (60)	200 - 500 (60 - 150)	500 - 1000 (150 - 300)
Faisabilité	4 mois	5 mois	6 mois
Conception de la mine	6 mois	8 mois	10 mois
Exploitation	3 mois	4 mois	5 mois

CONCEPTION

108. L'objectif de la conception des pentes des mines à ciel ouvert est de déterminer la disposition qui permet les bénéfices financiers et la quantité de minéral récupéré les plus fortes. L'ingénieur chargé de l'étude doit envisager simultanément les angles de pentes définitifs et provisoires, les angles de gradins, l'emplacement des rampes et la progression de l'exploitation (figure 20).

109. Le volume de stériles à extraire décroît, habituellement, quand les parois sont plus abruptes, et les pentes raides sont donc souvent souhaitables. Le risque d'instabilité d'une pente augmente toutefois avec son inclinaison et ses conséquences pour la sécurité sont d'un intérêt primordial. Les mines à ciel ouvert ont un dossier excellent quant à la sécurité, car les accidents dus aux éboulements sont particulièrement rares (tableau 3). Il s'ensuit qu'avec les précautions convenables, des parois plus abruptes peuvent être envisagées sans pour autant compromettre la sécurité.

110. Les principaux avantages de parois plus abruptes sont les quantités moindres de stériles à extraire et un déblaiement retardé. Toutefois, ce type de parois peut aussi bien occasionner des frais d'exploitation supérieurs: une instabilité pourrait signifier le déblaiement des éboulements, un retard de production ou une perte de minéral. Des gradins de travail moins nombreux et plus étroits peuvent faire baisser le rendement de l'exploitation. L'ingénieur en charge de la conception doit donc trouver un compromis entre le prix de revient de parois plus abruptes et les économies faites sur l'enlèvement des stériles.

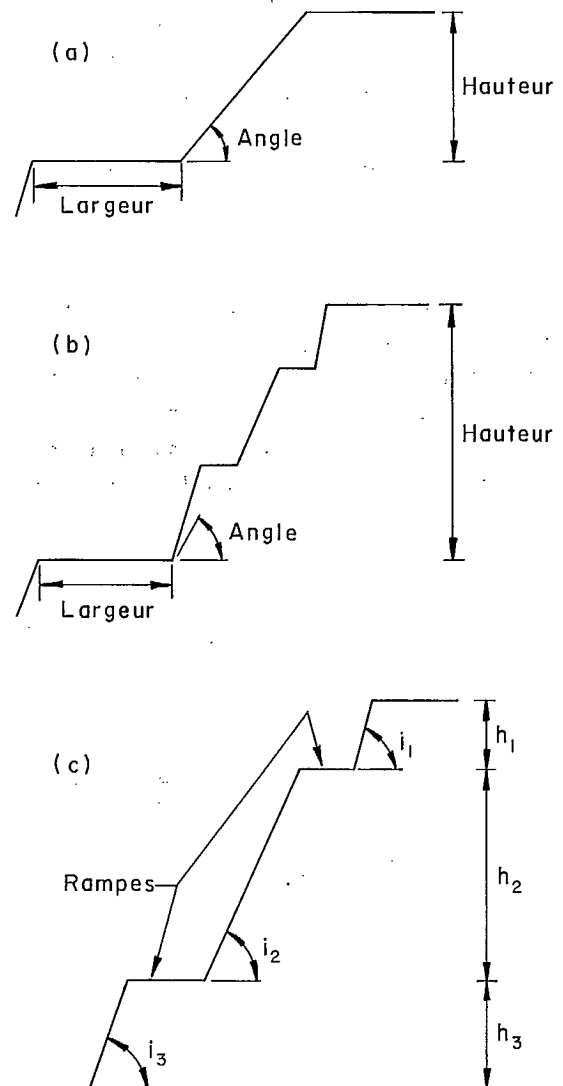


Fig 20 - Divers aspects des parois de fosses qui concernent l'ingénieur chargé de l'étude de conception: (a) la géométrie des gradins; (b) la géométrie des bermes; (c) la géométrie des rampes.

Tableau 3: Comparaison des taux approximatifs
d'accidents mortels
(pour 10^6 heures de travail)

Circulation routière	1.8
Voyage en avion	2.4
Voyage en motocyclette	4.4
Cigarettes	2.6
Exploitation à ciel ouvert	0.42
Chutes de roches	0.01
Ecoulements de déblais, stockage, etc.	0.03
Chute de personne	0.05
Accident de véhicule	0.10
Divers	0.23
Bûcheronnage	0.94
Construction	0.26

FAISABILITE

111. La personne chargée de l'étude doit travailler à partir de paramètres intrinsèquement variables tels que la teneur des minerais, leur qualité, et la résistance mécanique des roches. Le meilleur moyen de traiter des matériaux variables est d'utiliser la théorie de la fiabilité (figure 21 et 22). Dans l'analyse de la stabilité des pentes, la fiabilité est définie comme la probabilité qu'une pente sera stable.

112. Les décisions d'investissement dans une mine sont, dans une large mesure, fondées sur les bénéfices prévus et les risques correspondants. Les planificateurs de mines ont déjà pris conscience des avantages de la théorie de la fiabilité pour évaluer les risques qui menacent les investissements. Grâce à elle, ils peuvent faire entrer dans leurs analyses, la variabilité du prix des produits, du coût de la main-d'oeuvre et les réserves de minerais. Cette théorie permet aussi d'intégrer la conception des parois du plan d'aménagement de la mine et de faire l'analyse des risques.

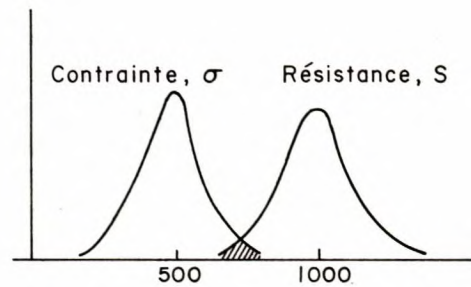


Fig 21 - La théorie de la fiabilité reconnaît que, à cause de variations des matériaux géologiques, des profils de parois et de l'état des eaux souterraines, la résistance au glissement et les contraintes provoquant le glissement varient selon les secteurs. Dans cette figure, bien que la résistance mécanique moyenne soit deux fois plus grande que la contrainte moyenne, les variations de l'une d'elles peuvent signifier que dans les parties de la mine où les contraintes dépasseront la résistance, comme l'indique la partie de la figure, il y aura glissement.



Fig 22 - Exemples de variabilité de la paroi d'une mine: un glissement sur une paroi dans une section de la mine qui ne semblait pas différente des autres où il n'y a pas eu de glissement. En d'autres termes, le glissement était impossible à prédire avec certitude.

ANALYSE

113. La conception de la pente d'une fosse se fait en deux étapes. La première est d'évaluer la stabilité de la pente pour chaque disposition possible. La deuxième est de faire entrer ces données dans l'analyse financière.

Analyse de la stabilité

114. La première étape de l'analyse de la stabilité est de rassembler les résultats des recherches de géologie structurale, de celles sur les propriétés mécaniques et les eaux souterraines et d'établir des secteurs d'aménagement de la fosse. Dans chacun des secteurs la résistance mécanique des roches, les caractéristiques structurales et les autres facteurs qui influent sur la stabilité sont approximativement uniformes. Le choix des secteurs peut être également affecté par la fiabilité requise pour la paroi. Par exemple, l'ingénieur peut devoir prévoir une fiabilité plus grande dans la zone où se trouve l'usine de surface ou un système de transport. La figure 23 présente des répartitions typiques de ces secteurs.

115. Les modes d'instabilité possibles sont indiqués pour chaque secteur. Les cisaillements plans (figure 24) sont les plus courants; ils se

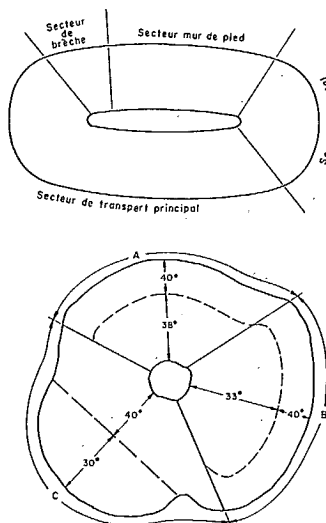


Fig 23 - Haut: facteurs possibles gouvernant le choix des secteurs d'études. Bas: une grande mine à ciel ouvert divisée en secteurs d'études de la pente.

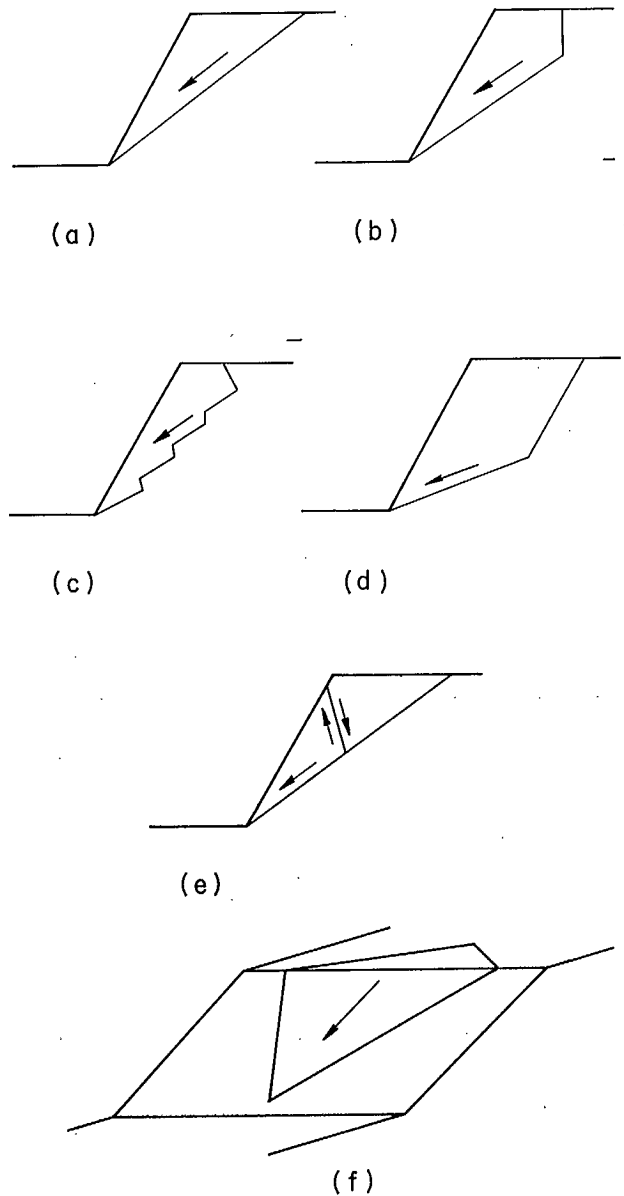


Fig 24 - Types d'instabilité par cisaillement-plan: (a) un plan de glissement et un bloc; (b) un plan de glissement et une fissure de tension; (c) une série de plans de glissement courts reliés par des joints transversaux; (d) deux plans de glissement; (e) un seul plan de glissement et cisaillement du bloc en plusieurs fragments; (f) deux plans de glissement obliques et un cisaillement en coin à trois dimensions.

présentent sur les pentes rocheuses dont les discontinuités ont une orientation défavorable. Dans les morts-terrains ou les roches ductiles, un cisaillement circulaire (figure 25) peut se produire. Les cisaillements-plans et circulaires sont caractérisés par des surfaces de glissement. L'analyse de stabilité exige que la résistance au cisaillement sur ces surfaces soit déterminée, ainsi que les forces qui ont tendance à provoquer le glissement.

116. Le Manuel contient des programmes d'ordinateurs pour faire l'analyse de fiabilité quant aux cisaillements plans et circulaires. En outre, il présente des méthodes manuelles de première estimation de la stabilité.

117. La figure 26 montre les instabilités du type écoulement en blocs et basculement qui sont possibles dans les roches cassantes. Elles sont moins courantes que le cisaillement-plan ou circulaire mais plus difficiles à analyser. Le facteur critique est la concentration de contraintes qui se produit au pied d'une pente. Si cette contrainte, qui peut être très accentuée par une action tectonique, dépasse la résistance à la compression de la roche, une fragmentation progressive à partir du pied peut se produire.

118. L'analyse recommandée est d'étudier la distribution des contraintes à l'aide de programmes d'ordinateurs ou de méthodes d'approximation tenant compte de la meilleure estimation possible des effets tectoniques. On suppose qu'il y a instabilité dès le moment où la résistance à la compression est dépassée.

119. Pour chaque secteur d'étude, on utilise les analyses de stabilité pour préparer des courbes de fiabilité pour différentes hauteurs et angles de parois. Ces abaques (figure 27) servent comme données des analyses des risques financiers.

Analyse financière

120. L'évaluation financière exige beaucoup de renseignements en plus des courbes de fiabilité qui correspondent aux diverses parois possibles. Il faut aussi des données de géologie économique sur les coûts de l'extraction et estimer les frais qu'occasionneraient les instabilités possibles (figures 28 et 29).

121. La meilleure façon de traiter ces données est d'utiliser un ordinateur. Le Manuel comporte un programme d'analyse des coûts-avantages. Il faut alimenter le programme avec un ensemble complet de plans de mines comme cas de référence. Ces plans doivent indiquer la progression de l'exploitation et la répartition du minerai et des stériles ainsi que les teneurs des minerais et les coûts d'exploitation.

122. Le programme coûts-avantages calcule les effets par rapport aux cas de base de l'augmentation de l'inclinaison des parois, y compris les

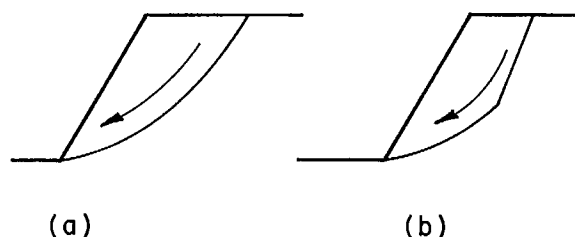


Fig 25 - Cisaillement circulaire. Dans les roches ductiles sans zones faibles et qui n'ont pas d'orientation critique, le type d'instabilité potentiel serait un cisaillement circulaire comme l'indique le schéma (a), qui se produit parfois en se combinant avec un plan de glissement comme en (b).

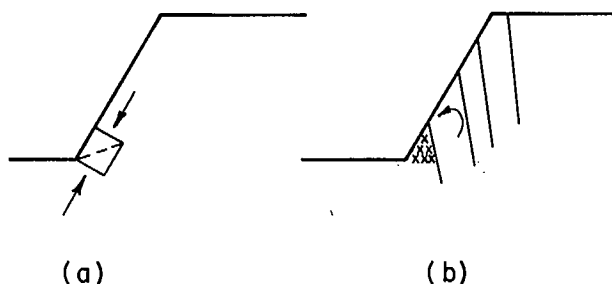


Fig 26 - Ecoulement en blocs et basculement. Dans les roches fragiles isotropes, l'instabilité commencerait par un écrasement ou un cisaillement au pied de la pente comme l'indique la figure (a), et provoquerait peut être un écoulement en blocs et un basculement de plaques comme en (b).

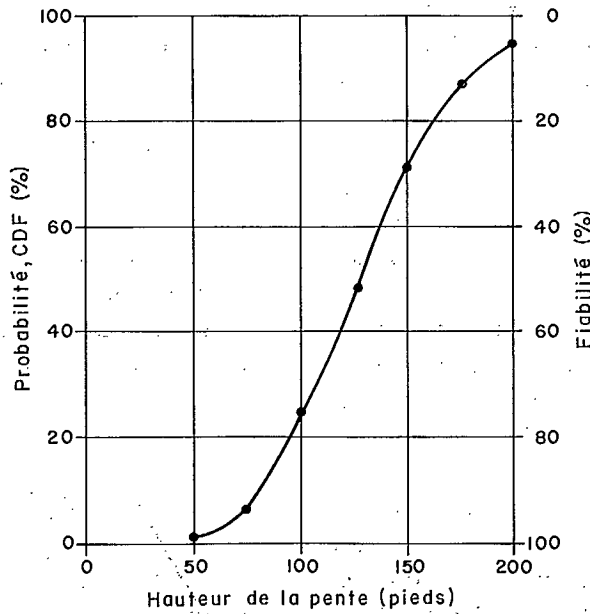


Fig 27 - Courbe de fiabilité. Variation de la probabilité de glissement en fonction de la hauteur pour une pente à 65° .

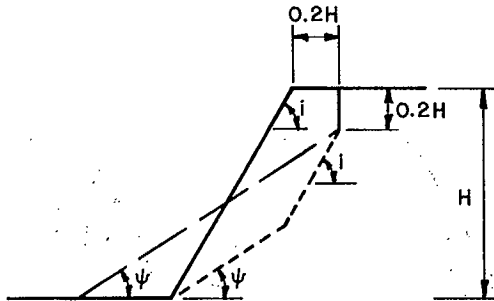


Fig 28 - Modèle de détermination du coût possible d'une instabilité. Le volume des débris de glissement à déblayer est censé se trouver entre la ligne en pointillés et la ligne en tirets. Il ne s'agit ici que d'une des options qui pourraient convenir.

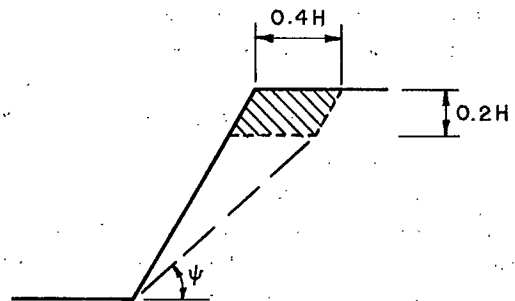


Fig 29 - Quand l'instabilité se produit, le moyen qui pourrait permettre de continuer l'exploitation est de décharger la zone de glissement potentiel en extrayant les roches de la crête. La figure donne des indications sur la quantité de terrain qu'il faudrait déplacer, ce qui fournit une base à l'estimation du coût possible d'une instabilité.

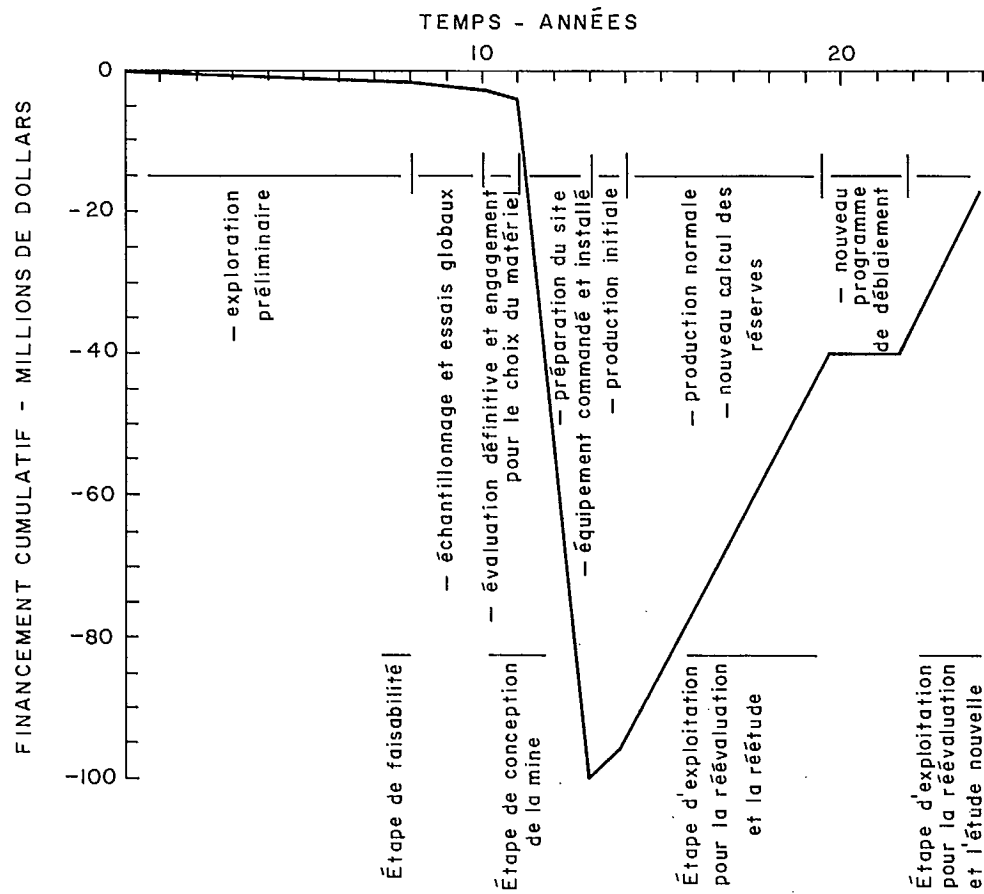


Fig 30 - Diagramme de financement. Les trois étapes de la mise en valeur d'une mine, dans laquelle l'étude des parois intervient, sont la faisabilité, la conception de la mine et son exploitation.

coûts de l'excavation des stériles et de l'instabilité. Les coûts-avantages peuvent être déterminés pour chaque année de la durée de vie prévue pour la mine, et actualisés au moment de l'étude. La disposition optimale est choisie en comparant les valeurs actuelles nettes des diverses dispositions.

123. Le risque d'instabilité est intégré à l'étude par la méthode de Monte Carlo. Dans cette technique, l'analyse de chaque secteur est répétée un grand nombre de fois. Dans toute analyse donnée, on inclut au hasard l'instabilité. L'ordinateur est toutefois programmé de façon à ce que l'occurrence de l'instabilité suive globalement les courbes de fiabilité. Ceci simule la probabilité d'instabilité pour une exploitation réelle.

124. Une bonne estimation des coûts-avantages auxquels il faut s'attendre nécessite entre 30 et 100 analyses. Le programme est efficace; le temps de calcul sur un gros ordinateur, pour un plan d'exploitation minière classique de 15 ans, est d'au plus quelques minutes. La géométrie optimale des secteurs, déterminée mécaniquement, doit toutefois être retouchée par l'ingénieur pour éliminer les transitions brutales d'un secteur à l'autre.

125. L'évaluation des coûts-avantages de la disposition d'une mine ne constitue qu'une partie seulement des renseignements que l'on envisage dans une analyse complète des risques d'investissement ou d'exploitation d'une mine. D'autres facteurs - tous variables - incluent les taux d'imposition, les redevances et les dépenses d'équipement. Le Manuel présente aussi un programme d'ordinateur pour une analyse de risque économique complète pour une mine.

126. Le programme de risque utilise les résultats de l'analyse des coûts-avantages comme données de départ. On y ajoute des données sur les redevances prévues, les taux d'imposition, etc. ainsi que leur fluctuation probable. Un certain nombre de simulations par la méthode de Monte Carlo sont faites pour déterminer l'effet des dites variations sur les recettes de la mine, et ainsi d'en évaluer le risque financier.

ETAPES DE LA MISE EN VALEUR DE LA MINE

127. Les activités d'études, aux diverses étapes de l'exploitation de la mine, sont indiquées dans le diagramme de financement (figure 30). Les recherches au stade de la faisabilité se concentrent sur le rassemblement de données. On insiste sur la géologie structurale, sur l'étude des eaux souterraines et des propriétés mécaniques des matériaux des parois, mais on se réfère aussi aux pentes déjà faites et à l'expérience passée qui fournissent des données utiles. Avec une bonne coordination, une grande partie de ce travail peut être combinée avec l'évaluation du corps de minerai aux frais réduits. Il est important de compiler tous les renseignements dans des rapports car il y a souvent des délais entre les étapes de faisabilité et d'aménagement de la mine.

128. Le recueil de données est suivi par une définition des secteurs et la préparation de courbes de fiabilité établies à partir d'analyses par approximation. L'analyse financière détaillée pour déterminer les angles de pentes optimaux peut ne pas être nécessaire. Les étapes de conception au stade de la faisabilité sont présentées par la figure 31.

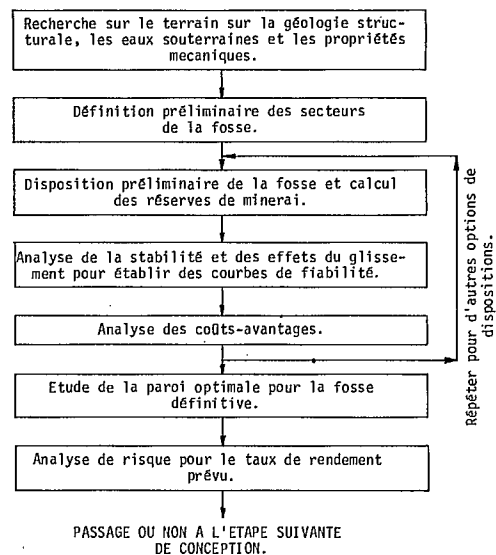


Fig 31 - Etape de faisabilité: organigramme des activités pour l'étude des parois.

129. Des analyses détaillées de la stabilité et l'analyse financière complètes sont nécessaires à l'étape de la conception de la mine. Il faut préparer, au moins, deux ensembles complets de plans annuels de la mine pour des angles de parois différents. Il faut envisager de façon détaillée la disposition des angles de rampes, des bermes et des gradins. Il faut étudier aussi la mise en place de bermes de sécurité et des gradins d'éboulement spéciaux pourraient être nécessaires pour les angles des parois particulièrement abruptes. Il faut préparer des rapports complets sur toutes les recherches, les analyses de stabilité et financières; elles constituent un legs essentiel pour les planificateurs à venir. La figure 32 montre les activités propres à cette étape.

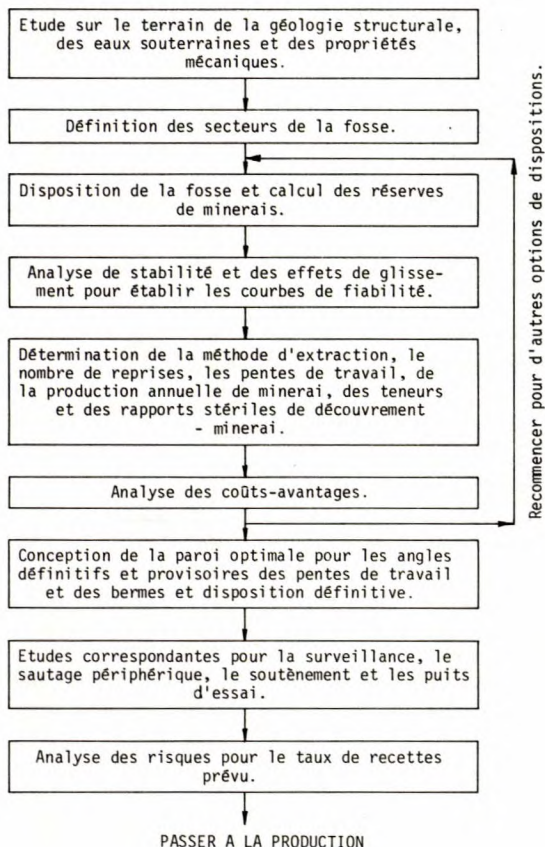


Fig 32 - Etape de conception de la mine: Diagramme d'activité de conception de la mine.

130. L'étape d'exploitation donne une grande quantité de données supplémentaires, en particulier grâce à la topographie des gradins mis à jour. Le comportement des pentes existantes est un guide précieux pour prévoir celui des parois à venir. Il peut être possible d'excaver une pente provisoire à titre d'essai avant la paroi définitive.

131. Ce renseignement révélera les points où les hypothèses de la conception initiale ne sont pas validés. S'il y a lieu, les analyses de stabilité peuvent être revues et la mine, réétudiée. Une nouvelle conception peut également être nécessaire à cause d'un changement dans les teneurs du minerai ou des coûts de l'extraction, ou encore à cause de l'expansion de l'exploitation.

ETUDES ASSOCIEES

132. Si les analyses de stabilité et l'analyse financière indiquent des angles de pente optimaux plutôt abrupts, il peut être nécessaire de mettre au point un système de surveillance d'ensemble pour assurer la sécurité. Le coût d'un tel système devrait être comparé aux bénéfices tirés d'une exploitation avec des angles plus grands.



Fig 33 - Une expérience sur le terrain qui utilise des ancrages pour terrains rocheux et un grillage pour étayer mécaniquement une section de paroi.

133. La faisabilité de l'utilisation de pentes abruptes, peut dépendre de l'étendue des dommages causés aux parois par le sautage périphérique. Ce dernier, convenablement contrôlé et mené de concert avec un bon piquage, peut minimiser les dégâts causés aux pentes et éliminer les éboulis susceptibles de limiter la raideur des parois.

134. Il peut être économiquement avantageux, dans certaines conditions, de mettre en place un soutènement mécanique (figure 33). Par exemple, dans le cas où cela pourrait permettre d'exploiter le minerai sans menacer l'usine de surface. En outre, il peut être parfois moins coûteux

d'utiliser un soutènement mécanique et une pente abrupte plutôt que d'avoir à ramener des stériles pour consolider une paroi afin de lui donner une stabilité équivalente.

COÛTS

135. Le coût de la conception de la mine varie beaucoup. Pour donner quelques indications aux planificateurs, le tableau 4 donne, toutefois, le prix de revient estimé, selon la valeur du dollar de 1973, des diverses étapes de la mise en valeur de la mine. Les chiffres sont fondés sur l'expérience d'un certain nombre de sociétés.

Tableau 4: Lignes directrices du budget de conception* (\$ 1973)
(gamme de profondeurs typiques entre parenthèses)

profondeur	<100 pieds <(30 m)	100 à 1000 pieds (30 à 300 mètres)	>1000 pieds >(300 mètres)
Etape de faisabilité	\$ 10000 (1000-50000)	\$ 20000 (5000-200000)	\$100000 (10000-500000)
Etape de conception de la mine	\$ 15000 (1000-50000)	\$ 50000 (5000-200000)	\$100000 (10000-500000)
Etape d'exploitation	\$ 10000 (1000-50000)	\$ 50000 (5000-200000)	\$100000 (10000-500000)

*Fondé sur le double des salaires plus le prix de revient du matériel spécial.

SOUTÈNEMENT MECANIQUE

136. Le soutènement mécanique stabilise les pentes des fosses en augmentant la résistance mécanique roches. Le résultat obtenu est toutefois relativement petit. L'étalement n'est mis en place que lorsqu'une pente montre des signes d'instabilité pendant l'exploitation. Il peut dans ce cas augmenter suffisamment la résistance pour assurer une stabilité à long terme.

137. Il peut s'avérer à l'occasion que les frais de revient mineurs avec le soutènement mécanique sont moins élevés que ceux d'une pente naturellement stable. Un exemple en serait un contact minéral clairement défini qui pourrait être une limite naturelle à l'exploitation, mais avec un risque de glissement sur les plans de stratification (figure 34). Cependant, dans un tel cas, l'étude et l'analyse de la stabilité doivent être très précises. Le degré d'instabilité doit être clairement connu pour justifier le soutènement.

METHODES DE SOUTÈNEMENT

Ancrages dans les terrains rocheux

138. La plupart des glissements, dans les mines à ciel ouvert, sont dûs à un glissement sur des zones de faiblesse telles que des ensembles de joints et de plans de stratification. On peut augmenter la résistance au glissement par des forces de compression s'exerçant sur ces plans. On y parvient en posant des ancrages dans le rocher à travers les zones faibles (figure 35).

139. L'ancrage de type classique (figure 36) est constitué par un câble d'acier placé dans un trou de forage. Le câble est ancré par une injection de ciment au fond du trou. En surface on construit un massif d'appui formé en béton armé avec une plaque d'ancrage en métal. Une contreplaque en acier et des coins immobilisent le câble après qu'il ait été tendu. Le trou est ensuite

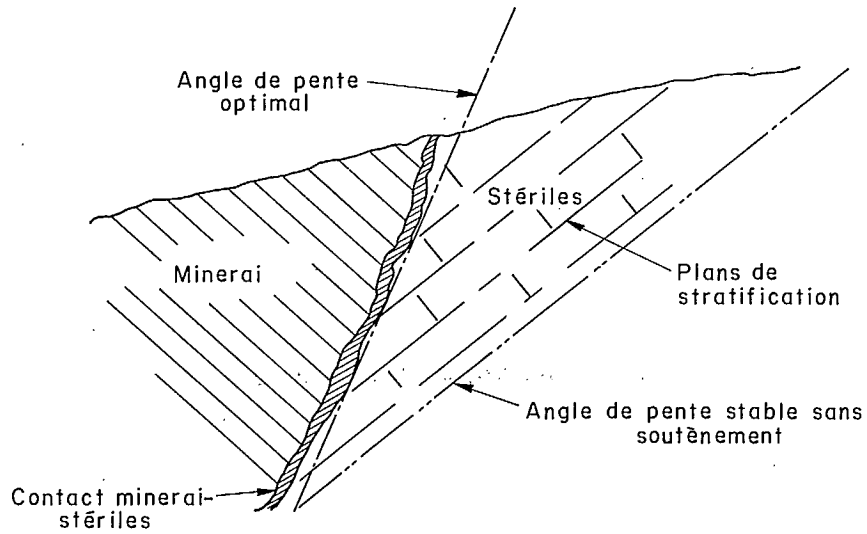


Fig 34 - Un soutènement peut convenir si le contact avec le minerai est clairement défini alors que les plans de stratification sont défavorables.

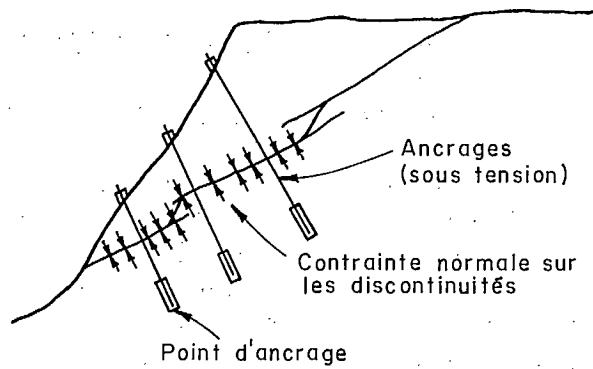


Fig 35 - Les ancrages dans le rocher augmentent la force de compression qui s'exerce sur les discontinuités et donc la résistance au glissement.

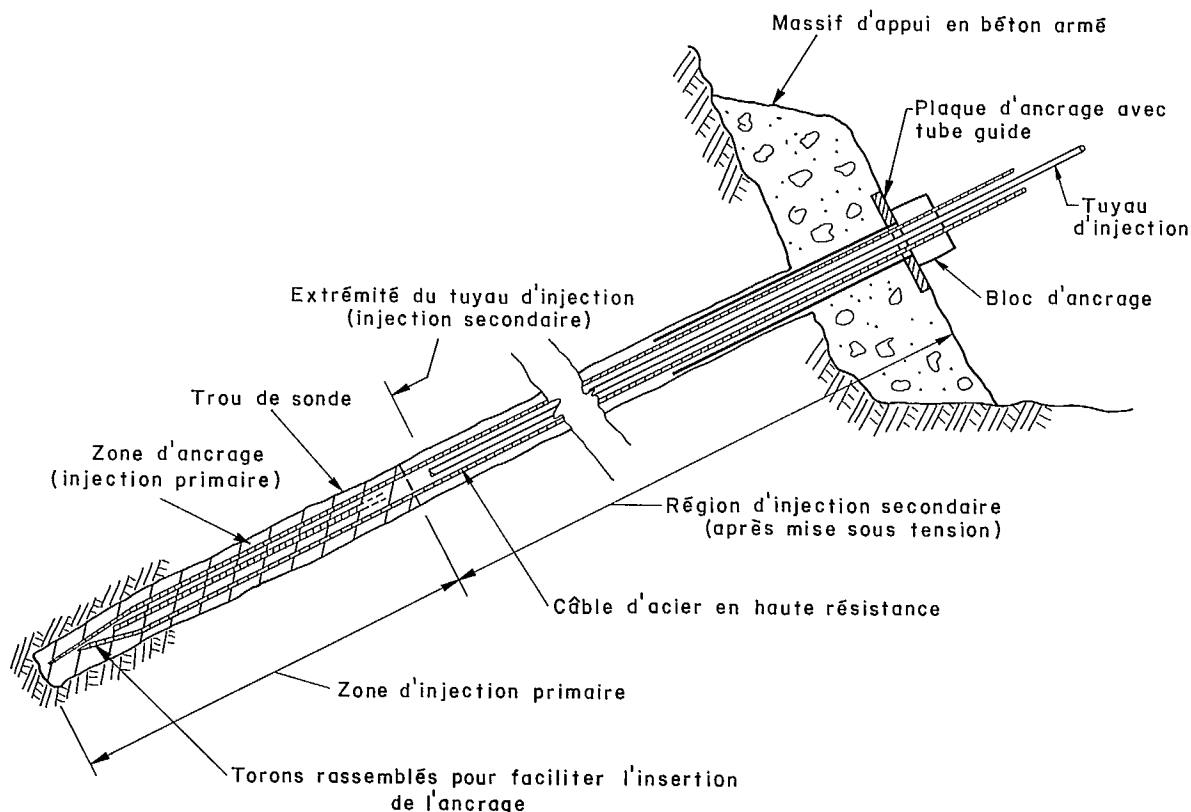


Fig 36 - Installation classique d'ancrage dans les terrains rocheux.

rempli de béton pour fixer le câble en permanence. On peut utiliser des barres de métal au lieu des câbles.

140. La tension exercée sur un ancrage en terrain rocheux est habituellement de 30 à 300 tonnes (300 à 3000 kN), quoique certains, supportant jusqu'à 2000 tonnes (20 000 kN) aient déjà été utilisées.

141. Les techniques et les matériaux d'ancrage utilisées dans le soutènement des pentes ont été mis au point par l'industrie du béton précontraint. L'acier doit être de très haute résistance mécanique et être manipulé avec soin. Il ne faut pas ni l'enrouler ni le plier irréversiblement, ni le laisser rouiller - les points de rouille pourraient devenir des points de concentration de contraintes et provoquer la rupture au moment de la mise sous tension. Il faut les dé-

couper à l'aide d'un scie au carbordum; en effet la chaleur du chalumeau pourrait provoquer une perte de résistance.

142. Un ancrage doit être installé avec soin. Les vérins mettent en jeu de grandes forces et un câble rompu peut fouetter. Il faut prendre des précautions pour protéger le personnel.

Corrosion des ancrages

143. Les tensions considérables mises en jeu dans les ancrages en terrains rocheux aggravent les effets de la rouille et introduisent les problèmes de rupture dus à la corrosion. Ce phénomène, mal connu ne se produit seulement que pour des contraintes relativement grandes et provoque des fissures internes puis une rupture soudaine.

144. La meilleure façon de le protéger de la corrosion est de cimenter complètement l'ancrage



Fig 37 - Soufflage de béton projeté pour stabiliser une paroi de mine.

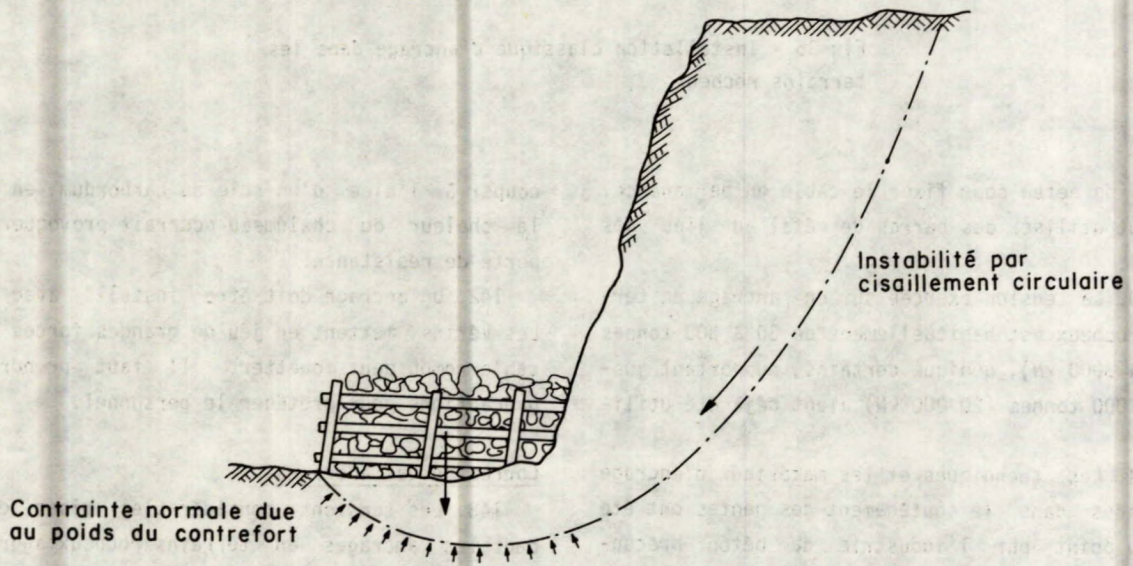


Fig 38 - Une contre-boutant ou cadre porteur contenant un poids mort constitué de roches, fournit un contrepois qui résiste au cisaillement circulaire et augmente la contrainte normale et donc la résistance au glissement au voisinage du pied.

après la mise sous tension du câble. Toutefois, s'il faut surveiller la force exercée par l'ancrage, on ne peut pas utiliser de ciment et il faut soit le graisser soit le gainer.

Béton projeté

145. Le béton projeté est un revêtement en béton appliqué par pulvérisation et formé d'un mélange d'agrégats, de sable, de ciment, d'eau et d'un additif favorisant une prise rapide (figure 37). Le béton projeté prend effectivement au moment de l'impact. Il y a une certaine perte de matériau à cause du rebond sur la paroi.

146. Le béton projeté sert à retenir des roches de surface lâches et à empêcher une détérioration progressive. Il peut offrir une certaine résistance au cisaillement à l'endroit des limites de joints.

147. On a récemment mis au point un béton armé projeté. On y ajoute des morceaux de câbles d'acier augmentant ainsi la résistance à la traction. Les inconvénients en sont le coût et la difficulté d'emploi.

148. L'un des inconvénients du béton projeté est le risque d'imperméabiliser le front de la pente et de permettre aux eaux souterraines de s'accumuler et de menacer ainsi la stabilité. Dans ce cas, il faut installer des barbacanes. Un autre désavantage est qu'il ne peut être appliqué qu'à des températures supérieures à 0°C.

Contre-boutants

149. Les contre-boutants ont un effet stabilisateur en ajoutant un poids mort qui s'oppose à la tendance au glissement (figure 38). On les a déjà utilisés au Canada pour stabiliser des pentes de mines à ciel ouvert, mais ils ne constituent habituellement pas une méthode de soutènement convenable.

CONCEPTION

150. L'étude du soutènement se fait en trois étapes:

- a. identification des instabilités et recueil des données pertinentes sur la géologie, les propriétés mécaniques et les eaux souterraines,
- b. analyse technique, et

c. analyse économique

151. Les principes de l'analyse technique sont illustrés par la figure 39. La force perturbatrice est la composante du poids W parallèle à la discontinuité. Les forces résistantes sont la composante de la force de soutènement T et la résistance au cisaillement de la discontinuité. La résistance au cisaillement est proportionnelle aux forces W , T et à la force de pression hydraulique U qui agit en travers de la discontinuité.

152. Les analyses du chapitre de conception servent à déterminer la force de soutènement nécessaire pour obtenir la fiabilité souhaitée de la pente. Une fois cette force connue, des évaluations économiques sont faites. La fiabilité de la pente, comme le prix de revient du soutènement, dépendent de la disposition des ancrages dans le rocher, et en particulier, de l'angle d'inclinaison. Toutefois, la fiabilité dépend relativement peu de l'inclinaison de l'ancrage et la disposition la moins coûteuse peut habituellement être choisie.

SURVEILLANCE

153. Des capsules dynamométriques munies des jauges de contrainte peuvent être utilisées pour surveiller directement le comportement des ancrages. La figure 40 en montre un modèle classique. Elle est placée entre le dispositif de blocage et la plaque d'ancrage et transmet donc l'ensemble de la charge de l'ancrage à la surface rocheuse.

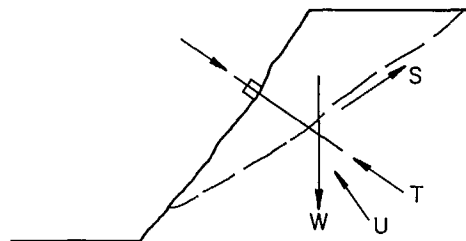


Fig 39 - Soutènement contre un cisaillement-plan, quand une discontinuité est presque parallèle à la pente, mais avec un pendage moins fort.

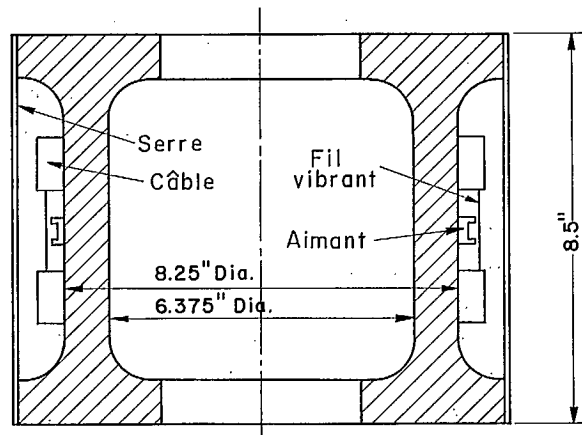


Fig 40 - Capsules dynamométriques de 250 tonnes (2500 kN): les déformations du cylindre d'acier à travers lequel l'ancrage passe sont mesurés par des jauges à fil vibrant. Les connexions électriques de lecture n'apparaissent pas.

154. On peut employer aussi des capsules dynamométriques munies des transducteurs hydrauliques ou mécaniques. Dans les premières, la mesure de la pression du fluide à l'intérieur de la cellule sert à mesurer la charge. Les dernières mesurent la tension exercée à l'aide d'un cylindre d'acier préalablement étalonné pour connaître la relation charge-déformation.

155. Un ancrage sous surveillance ne peut pas être cimenté. Il faut le protéger contre la corrosion soit en le graissant soit en le gainant.

156. Une technique de surveillance qui n'est pas recommandée est l'essai de "soulèvement", pendant lequel on augmente la charge sur l'ancrage à l'aide d'un vérin pour vérifier la tension. Une telle perturbation n'est pas souhaitable.

COÛTS

157. Estimer le prix de revient du soutènement est difficile car il n'a pas encore été appliqué à grande échelle par l'industrie minière. L'expérience du génie civil ne s'applique habituellement pas à cause de buts et de normes différentes.

158. Les exemples suivants sont un guide pour le calcul des coûts de ces activités supplémentaires, qui vont au-delà des recherches minières normales et de la surveillance nécessaire pour le

soutènement. Trois cas sont envisagés: gradin, pente moyenne et pente abrupte; les détails sur les coûts sont donnés dans le Tableau 5.

Soutènement d'un gradin

159. Un gradin de 40 pieds (12 mètres) de haut par 100 pieds (30 mètres) de long doit être étayé par 20 barres d'ancrage d'une capacité de 40 kips (180 kN), et ayant en moyenne 40 pieds (12 mètres) de long. Quatre ancrages sont sous surveillance. Il faut creuser au diamant deux trous de sonde de 50 pieds (15 mètres) de profondeur pour les recherches et pour obtenir des échantillons. Le coût du soutènement est \$1.75/pied² (\$19/m²).

Pente moyenne

160. Une pente de 100 pieds (30 mètres) de haut par 320 pieds (100 mètres) de long est étayée par 64 ancrages constitués de câbles, chacun d'une charge utile de 300 kips (1300 kN) et d'une longueur moyenne de 100 pieds (30 mètres). Dix ancrages sont sous surveillance. Six forages au diamant de 150 pieds (50 mètres) de profondeur sont nécessaires pour les recherches. Cinq journées-hommes sont dépensées à dresser des levés structuraux. Des essais à l'appareil de cisaillement rectiligne sont exécutés sur des carottes prove-

Tableau 5: Coût du soutènement (1974)

	Gradin	Pente moyenne	Pente abrupte
Recherche et analyse			
Supervision à \$150/jour	150	750	2250
Forage au diamant à \$10/pied (\$33/m)	1000	9000	30000
Etablissement d'une carte structurale à \$150/jour	300	750	3000
Echantillonnage et essais	200	2000	7750
Piézomètres	-	1000	3000
Analyse à \$150/jour	150	2250	6000
Installation et surveillance			
Forage par percussion			
à \$2/pied (\$7/m)	1600	-	-
à \$3/pied (\$10/m)	-	19200	-
à \$4/pied (\$13/m)	-	-	180000
Ancrages en rochers			
(matériaux à \$3/pied (\$10/m) et main à \$10/pied (\$33/m) d'oeuvre) à \$12/pied (\$40/m)	2400	-	-
	-	64000	-
	-	-	540000
Capsules dynamométriques et lecture	1200	5000	15000
Appareil laser et cibles	-	-	14000
TOTAL	7000	103950	801000

nant du programme de forage et sur des échantillons recueillis sur la pente. Des piézomètres sont installés dans deux des trous de forage au diamant situés en arrière de la crête de la pente. Le prix de revient du soutènement est \$3.25/pieds² (\$35/m²).

Pente importante

161. Une pente de 500 pieds (150 mètres) de

haut par 1000 pieds (300 mètres) de long est étayée par 300 ancrages constitués de cables, chacun d'une charge utile de 450 kips (2000 kN) et d'une longueur moyenne de 150 pieds (50 mètres). Il faut, pour les recherches, dix trous au diamant de 300 pieds (100 mètres) de profondeur. Vingt journées-hommes sont dépensées pour faire la cartographie structurale et vingt journées-hommes pour faire la diagraphie des carottes, la collecte

d'échantillons destinés aux essais et la surveillance du travail sur le terrain. Dans quatre des trous de forages sont placés des piézomètres. Un appareil de mesure de distance au laser sert à la surveillance. Le prix de revient de l'étalement est de \$1.60/pied² (\$17/m²).

162. On ne tient pas compte dans ces coûts de l'activité de surveillance permanente ou de la rédaction des rapports. Ces activités sont essentielles mais ne devraient qu'augmenter légèrement les dépenses totales. Ces estimations grossières indiquent que le coût du soutènement par ancrage est de l'ordre de \$1.50 à \$2.50 par pied carré de front de taille (de \$16 à \$27/m²) et que 10 à 20% du coût total proviennent de l'analyse et de la conception.

Coût du béton projeté

163. Les coûts indiqués ci-dessous pour le béton projeté sont fondés sur le prix de revient réel, plus un taux horaire pour l'équipement. La surface recouverte par verge cube de matériau avec une épaisseur nominale de 4 pouces et des pertes par rebondissement de 10% est de 70 pi²/verge³

(10/m²/m³). Pour une vitesse d'application de 15 verges cubes par heure (12/m³/h) le coût est \$0.60/pi² (\$6.50/m²).

164. Le coût du béton projeté renforcé de fil d'acier est d'environ \$100 par verge cube (\$130/m³) pour les matériaux; le coût de l'équipement est semblable, mais la production horaire est plus faible et elle est d'environ 12 verges cubes par heure (10/m³/h). Le prix de revient du soutènement est d'environ \$1.65/pi² (\$17/m²).

Matériaux pour le béton projetés	Dollars 1974
- Agrégats et additifs par verge cube (m ³)	\$30 (\$39)
Equipement taux horaire	
Machine de pulvérisation du béton projeté	10
Grue	30
2 bétonneuses	50
Chargeur	20
Compresseur	20
Main-d'oeuvre, taux horaire (6 employés)	60
Total	\$190

SAUTAGE PERIPHERIQUE

165. Les techniques de sautage périphérique limitent les dommages qui peuvent être causés aux parois et aux gradins définitifs de la fosse. On y parvient en diminuant la concentration d'énergie dans les parois due aux sautages principaux, et aux sautages contrôlés. Les dommages les plus courants causés par les tirs de mines sont les ruptures par excavation, la fracture de la crête ou le dégagement des roches de la paroi adjacente à la zone de sautage. Les vibrations dues à l'explosion peuvent toutefois endommager les parois et les constructions à une certaine distance du tir.

FACTEURS QUI AFFECTENT LE SAUTAGE

Explosifs

166. Les explosifs utilisés dans les mines à ciel ouvert offrent une large gamme de pression d'explosion. Pour une densité donnée de chargement, la zone de fracturation et les vibrations varient en fonction de la pression de l'explosif utilisé. Les dommages causés aux parois peuvent

donc être réduits en utilisant un explosif de pression moindre.

167. Pour un explosif donné, la pression dans le trou de mine augmente avec le diamètre de la charge. La figure 41 montre la relation qui existe entre le rayon de fracture et le diamètre du trou de mine. On peut voir que le AN/FO et les explosifs admissibles produisent un rayon de fracture de deux à quatre fois plus petit que la dynamite.

Découplage et étagement

168. La pression d'explosion peut être réduite en découplant ou en étageant les charges. Le découplage consiste à laisser un espace entre la charge et la paroi du trou de sautage. L'étagement consiste à relier des petites charges à un cordon détonnant ou d'alterner les explosifs avec des pièces d'espacement pour produire une colonne explosive discontinue. Si toutefois les trous de mines sont remplis d'eau, l'efficacité du découplage est réduite de beaucoup.

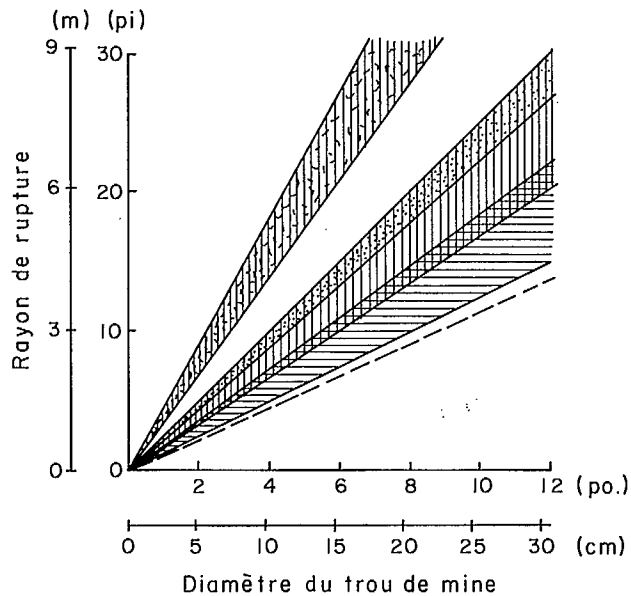


Fig 41 - Rayon de rupture en fonction du diamètre du trou pour des charges cylindriques de divers explosifs.

LÉGENDE

- ▨ 60 % dynamite, schistes de White Pine¹
- ▧ 60 % dynamite, roches pyrochostiques et à tufs
- ▩ AN/FO et explosifs admis, schistes de White Pine¹
- AN/FO Granite de Lithonia
- ▤ C - 4, Granite de Bellingham²

1. $\frac{\text{Longueur trou} > 100}{\text{diamètre}} \approx 0,85$
 $\frac{\text{profondeur mesure de rupture}}{\text{profondeur du trou}} \approx 0,85$
 $\frac{\text{roches de recouvrement}}{\text{diamètre du trou}} \approx 30$
2. Calculé en supposant que
 $\frac{\text{rayon de rupture (charge cylindre)}}{\text{rayon de rupture (charge sphérique)}} \approx 1,5$

Retards et espacement

169. Pour minimiser les ruptures par excavation et les vibrations, les sautages doivent se faire de façon à ce que chaque rang ou trou puisse déboucher sur un front libre. Le niveau de vibration dépend du poids de la charge. En général, toutes les charges, qui ne sont pas séparées par un temps d'au moins 15 millisecondes, font parties de la même charge en ce qui concerne les vibrations. Comme l'indique la figure 42, les vibrations dues aux charges à micro-retard se limitent au double d'une charge unique.

Embouchure et forage

170. La profondeur du forage en surprofondeur et l'embouchure du trou de sautage affectent la fracturation de la crête. Pour les roches compétentes - la résistance à la compression statique est supérieure à 30 000 psi (20 MPa) - une largeur d'embouchure 12 fois le diamètre du trou de sautage devrait limiter les dégâts causés à la paroi. Dans des roches de résistance moyenne - de résistance à la compression statique de l'ordre de 15 000 psi (10 MPa) - l'embouchure devrait mesurer environ 22 fois le diamètre du trou de sautage.

Dans des roches tendres ou incompétentes - résistance à la compression statique environ 5000 psi (3.5 MPa.) - il faut utiliser une embouchure mesurant 30 fois le diamètre du trou de sautage.

171. Le forage en surcroît de profondeur doit être de sept à dix fois le diamètre de la charge. Il n'est pas nécessaire dans les roches stratifiées horizontalement ou crevassées et devrait être évité au-dessus des routes de transport à venir ou des bermes définitives.

Etat du site

172. Il faut tenir compte des propriétés des roches pour mettre au point des méthodes de sautage périphérique efficaces. Les plus importantes sont la fréquence et l'orientation des caractéristiques structurales, et la résistance dynamique in situ de la roche.

173. La rupture par excavation se produit quand la résistance dynamique à la compression in situ de la masse rocheuse est dépassée. Cette résistance peut être déterminée par des tirs d'essai. La résistance à la compression dynamique est égale à la pression maximum de l'explosion qui ne produit pas d'écrasement dans la paroi du trou de

sautage.

174. La résistance à la traction dynamique est déterminée à partir de tirs dans deux trous de mine contigus. A l'aide d'une densité de charge qui n'écrasera pas la paroi du trou, on établit l'espacement maximum pour lequel on produit une bonne fissure de liaison entre les trous. La résistance à la traction dynamique de la masse rocheuse est alors déterminée à partir de la pression d'explosion dans le trou de sautage et la zone de roche fracturée.

175. Les figures 43 et 44 comparent des parois obtenues par tirs à deux temps dans des roches compétentes et des roches hautement fissurées et fracturées. La rupture par excavation est beaucoup plus évidente dans la figure 44.

176. Les zones dans lesquelles les joints sont serrés ou remplis subissent moins de rupture par excavation que celles dont les ensembles de joints sont ouverts. La figure 45 montre une paroi en bon état dans une formation rocheuse très fissurée. On obtient facilement une paroi lissée quand il existe une structure faible parallèle à la paroi souhaitée (figure 46). Le sous-cavage des diaclases ou des failles presque parallèles à la paroi définitive de la fosse peuvent causer un ameublissement du front et provoquer une rupture par excavation importante (figure 47 et 48). On peut obtenir des parois de très bonnes conditions si des joints en dressant sont parallèles au front définitif de la fosse (figure 49). Si les diaclases sont normales au front de la fosse, comme le montre la figure 50, on peut s'attendre à une rupture par excavation impliquant des fractures de

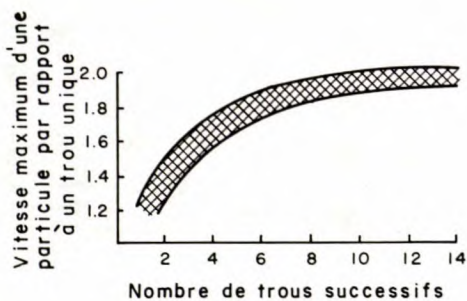


Fig 42 - Effet des retards successifs sur la vitesse de particule maximum.

stratification croisée. Les problèmes d'une rupture par excavation se présentent rarement dans les gisements sédimentaires horizontaux, si les fractures de stratification croisées ne sont pas trop nombreuses.

177. La fréquence des discontinuités a une influence majeure sur les ruptures par excavation et les fractures de la crête. Elles peuvent entraver le sautage contrôlé quand leur espacement est inférieur à celui des trous. Cela s'observe en comparant le front de la figure 43, sur laquelle l'espacement des joints est grand, à celui de la figure 51 où les joints sont peu espacés. La



Fig 43 - Surface unie et régulière obtenue par le tir à deux temps dans une roche compétente.



Fig 44 - Rupture par excavation et roche meuble sur une paroi obtenue dans des roches très fracturées par tir à deux temps.



Fig 45 - Une surface acceptable et régulière obtenue par tir à deux temps dans des roches crevassées.



Fig 46 - Surface obtenue par tir à deux temps correspondant à un joint majeur parallèle au front rocheux.



Fig 47 - Rupture par excavation et roche meuble sur une paroi dues aux joints d'un pendage moins escarpé que la ligne de tir à deux temps.



Fig 48 - Rupture par excavation et roche meuble dues à une faille presque parallèle à la ligne de tir à deux temps.



Fig 49 - Joints en dressants, parallèles à la surface de la roche mais d'un pendage moins escarpé que la paroi.



Fig 51 - Diaclases verticales fréquentes à 90° de la surface rocheuse.



Fig 50 - Diaclases ouvertes à 90° par rapport au front.



Fig 52 - Fracture de la crête.

figure 52 illustre comment des diaclases très proches les unes des autres peuvent provoquer des problèmes de fracture de la crête.

TECHNIQUES DE SAUTAGE PERIPHERIQUE

Sautage avec tampon

178. Le sautage avec tampon est la forme la moins coûteuse de sautage périphérique. Les coûts de forage sont légèrement supérieurs à ceux du sautage de production à cause de l'espacement moindre des trous.

179. Le fardeau et l'espacement pour la rangée tampon devraient être entre 0.5 et 0.8 fois celui du rang de production adjacent. L'espacement des trous de sautage pour le rang tampon devrait être 1.25 fois celui du fardeau. La charge explosive par trou devrait aboutir à un taux de chargement d'environ 0.6 fois celui utilisé pour les sautages de production.

Sautage avec chambre d'expansion

180. Pour le sautage avec chambre d'expansion, l'explosion est déclenchée après le sautage de production pour dresser la pente suivant la limite prévue pour l'excavation. La charge est conçue pour créer une faible pression d'explosion et li-

miter les ruptures par excavation. Pour de meilleurs résultats, tous les sautages avec chambre d'expansion doivent être déclenchés simultanément.

181. Le tableau 6 donne quelques taux de chargement pour divers matériaux rocheux pour le sautage avec chambre d'expansion. Il faut ajouter ou soustraire 20% à ces valeurs si la roche est particulièrement compétente ou très fracturée.

182. Le rapport fardeau sur espacement, dans les roches compétentes, devrait être de l'ordre de 0.8 à 1.25. Dans les roches très fracturées ou très tendres, il devrait être de 0.5 à 0.8. Dans le cas de rangée des chambres d'expansion voisin d'un rang de production définitif, le fardeau est mesuré à partir de la ligne de la rupture par excavation du rang de production. Des trous guides peuvent aider s'il est difficile d'obtenir une bonne paroi par sautage avec chambre d'expansion.

Tir à deux temps

183. Pour le tir à deux temps, une ligne de tirs de mine légèrement chargés saute avant l'explosion de production de façon à produire une fracture continue le long de la ligne prévue pour l'excavation.

184. Pour avoir les meilleurs résultats possibles, il faut des forages précis car les trous doivent être dans le même plan. Un pied mal constitué à la suite d'un sautage précédent doit être supprimé de façon à ce que les trous du tir à deux temps soient plus faciles à forer.

185. La charge explosive ne doit pas briser les roches environnantes. Un rang tampon de trous de

Tableau 6: Taux de chargement comme première approximation pour le sautage avec chambre d'expansion

	Charge spécifique livres/pied cube (kg/m ³)	Charge spécifique livres/tonne* (kg/tonne)
taconite	0.043 (0.69)	0.39 (0.20)
minerai de cuivre	0.025 - 0.035 (0.40 - 0.56)	0.29 - 0.40 (0.14 - 0.20)
minerai d'amiante	0.010 (0.16)	0.11 (0.06)

*tonne de 2000 livres

Tableau 7: Première approximation de l'espacement des trous pour le forage en ligne

Type de roche	Facteur d'espacement trous de mines
Taconite	24
Minerai de cuivre	30
Minerai d'amiante	48

sautage sert à protéger la ligne de tir à deux temps des effets du sautage de production.

186. Les trous du tir à deux temps doivent, si possible, sauter 50 millisecondes avant le tir principal. Toutefois, s'il existe une possibilité d'effondrement des trous, le chargement et le sautage doivent se limiter à 6 trous. Des contraintes d'exploitation peuvent également obliger le tir de groupes de trous de sautage à deux temps choisis comme ils se présentent.

Forage en ligne

187. Pour un forage en ligne, un rang de trous de mines très proches les uns des autres et vides d'explosifs est foré selon la limite prévue d'ex-

cavation. Ceci produit un plan de moindre résistance sur lequel débouche le rang de production définitif. Un rang-tampon est nécessaire pour protéger des effets du tir de production.

188. Les dimensions des trous les plus communes sont 1.5 et 3 pouces (4 à 8 cm), mais de plus grands diamètres peuvent être utilisés. Le tableau 7 indique les facteurs d'espacement des trous de mine pour quelques types de roches. Pour calculer la distance entre les trous, on multiplie leur diamètre par le facteur d'espacement.

189. Si le sautage contrôlé ne réussit pas, les méthodes utilisées doivent être évaluées soigneusement. Le tableau 8 donne des suggestions de mesures de correction possibles.

Tableau 8: Solutions aux problèmes de sautage périmétrique

Problèmes	Cause probable	Solutions
rupture par excavation dans l'ensemble de la paroi (aucune trace de trou de sautage)	a) rang tampon surcharge chargé ou trop proche b) le sautage contrôlé peut être surchargé	a) éloigner le rang tampon de la limite de la fosse réduire la pression d'explosion de la charge tampon, utiliser un micro-retard de 15 msec entre les charges tampons (si cela n'a pas déjà été fait). b) augmenter l'espacement des trous ou diminuer la charge explosive (en découplant ou en étageant) la charge explosive dans des trous de chambre d'expansion où des trous à deux temps
rupture par excavation autour des forages	pression d'explosion supérieure à la résistance à la compression dynamique de la roche in situ	découpler ou étager les charges dans des trous de tir avec chambre d'expansion ou des trous de tir à deux temps, diminuer la charge (pour le sautage avec chambre d'expansion)
rupture par excavation entre les trous de sautage	trous de sautage tampon trop proches	augmenter l'espacement découpler ou étager les charges
les diaclases mettent obstacles au fonctionnement du sautage contrôlé	a) espacement trop grand b) fardeau insuffisant c) délai de détonation excessif entre les trous périphériques	a) réduire l'espacement et la charge explosive b) rendre le fardeau plus grande que l'espacement c) détoner simultanément les trous de rang périphérique
une très mauvaise fragmentation à la limite de la fosse; le tir ne réussit pas à percer jusqu'à la limite d'excavation	rang-tampon trop loin de la limite de la fosse	diminuer la distance entre le rang-tampon et les trous du tir à deux temps ou les trous de forage en ligne
crête facturée	embouchure insuffisante ou roche exceptionnellement peu résistante (fracturée ou désagrégée) à la crête	augmenter la hauteur de l'embouchure, éliminer le forage en surprofondeur dans les trous qui recouvrent la crête d'une berme, utiliser des espacements dans la partie supérieure de la colonne explosive, forer des trous guides de petit diamètre

COÛTS

190. Le coût du sautage contrôlé est mesuré convenablement en tenant compte de l'augmentation au coût des tirs de production normaux. Le forage en ligne est le plus coûteux, suivi dans l'ordre décroissant, par le tir à deux temps, le tir avec chambre d'expansion et le sautage-tampon.

191. Les coûts typiques du sautage contrôlé sont indiqués par les figures 53 à 56. Remarque que le sautage avec chambre d'expansion, pour le minerai d'amiante, semble moins coûteux que le sautage de production (figure 54). La raison en est que le taux de chargement représente moins de la moitié de celui du tir de production. Les coûts du tir à deux temps et du forage en ligne comprennent tous deux le sautage-tampon nécessaire. Le coût du forage en ligne est d'un ordre de grandeur supérieur à celui du coût des autres techniques de sautage périphérique.

SAUTAGE ET VIBRATIONS DU SOL

192. Les tirs de production doivent être conçus pour minimiser les vibrations du sol, pour proté-

ger les structures proches telles que les immeubles ou les excavations souterraines, ou pour prévenir des petits éboulis de pierres. Le contrôle des vibrations s'effectue dans le micro-retard des mises à feu, la séquence de tir, la géométrie du tir, le choix du bourrage et des explosifs utilisés dans le tir de production.

193. Les retards à la détonation entre les rangs de trous de tir doivent être supérieurs à 15 millisecondes, en particulier pour les deux derniers rangs de production, avant la limite de la fosse.

194. Les coupures en V permettent aux charges individuelles de déboucher sur un front libre; ceci réduit les vibrations. Les dispositions de trous de tir en carré produisent plus de vibrations que celles en rectangle. L'explosif avec la pression la plus faible, correspondant à la force de rupture nécessaire, doit être utilisé pour le tir de production.

195. Les vibrations seront légèrement réduites s'il n'y a pas de bourrage. Toutefois, dans la plupart des cas, cette diminution n'est pas suf-

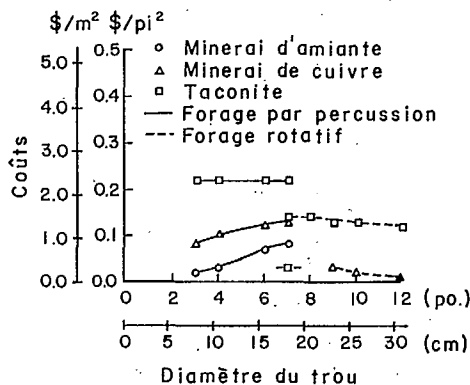


Fig 53 - Coût du sautage tampon, moins le coût du tir de production (utilisant les mêmes dimensions de trous de mines), en fonction du diamètre du trou pour divers types de roches.

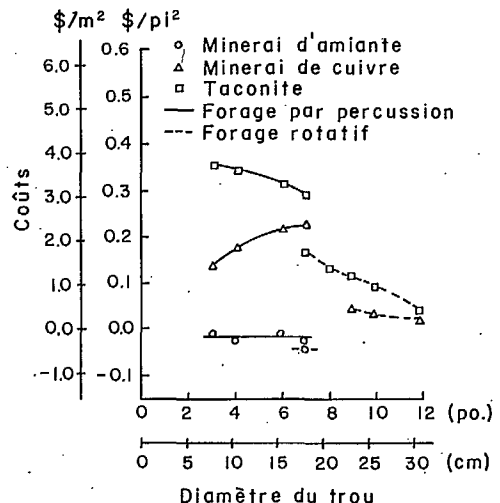


Fig 54 - Coût du sautage avec chambre d'expansion, moins le coût du tir de production nécessaire pour abattre le même volume de terrain, en fonction du diamètre des trous pour divers types de roche, en supposant que les explosifs coûtent 0.25 dollars par livre (\$0.56/kg).

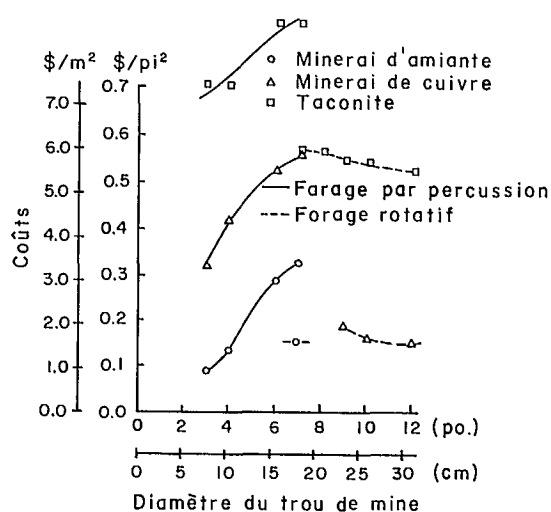


Fig 55 - Coût du tir à deux temps et du sautage tampon, moins le coût du sautage de production nécessaire pour abattre le même volume de terrain, en fonction du diamètre du trou de mine pour divers types de roches en supposant que les explosifs coûtent 0.25 dollars la livre (\$0.56/kg).

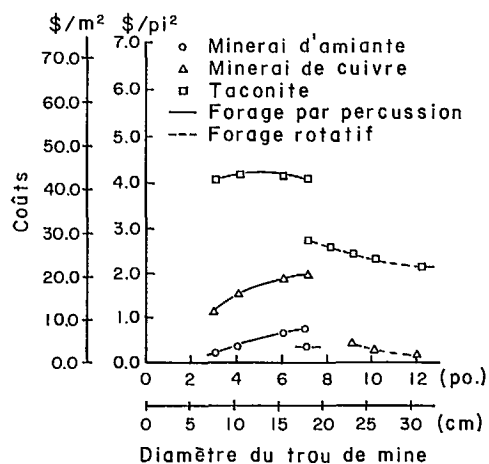


Fig 56 - Coût du forage en ligne et du sautage tampon, moins le coût du tir de production nécessaire pour abattre le même volume de terrain, en fonction du diamètre du trou pour divers types de roche, en supposant que l'explosif coûte 0.25 dollars la livre (\$0.56/kg).

Tableau 9: Types de dommage liés à la vitesse maximum de particule

Type de structure	Type de dommages	Seuil de la vitesse de particule à partir desquels les dommages indiqués commencent	
		pouces/seconde	cm/seconde
Commutateur au mercure à monture rigide	coupé	0.5	1.5
Maisons	fissures dans le plâtre	2	5
Blocs de béton, comme dans une nouvelle maison	crevasses dans les blocs	9	25
Trous de forage tubés	décentrement horizontal	15	40
Equipement mécanique-pompes, compresseurs	essieux désaxés	40	100
Constructions métalliques préfabriquées sur assise de béton	assise fissurée, construction tordue et déformée	60	150

fisante pour justifier son emploi puisqu'il y a augmentation des ondes explosives et des projectiles de roche.

Niveaux des dommages et mesure

196. La vitesse de particule au sol donne la meilleure indication des dommages probables causés par le tir. Le tableau 9 énumère les niveaux de vitesse de particule et les dommages correspondants.

197. Le sautage ne devrait pas commettre des

dégâts, si la vitesse de particule est inférieure à deux pouces par seconde (5 cm/sec). Une relation empirique entre la vitesse de particule, le poids de la charge par microretard et la distance par rapport à la zone de tir peuvent être utilisés dans la conception du plan de tir pour s'assurer que cette vitesse n'est pas dépassée. Comme autre moyen on peut mesurer les vibrations du sol à l'aide d'un séismographe pour établir la relation entre le poids de la charge selon le retard, la distance et la vitesse de particule.

SURVEILLANCE

198. L'objectif de la surveillance est de repérer une instabilité possible de la paroi de la fosse pour y porter remède de façon adéquate. Il s'agit essentiellement de protéger les hommes et le matériel.

199. La principale activité de surveillance porte sur la mesure du déplacement. Il importe également de surveiller le niveau des eaux souterraines et les vibrations dues au tir de mines, qui peuvent compromettre la stabilité. Si l'on se sert d'ancrages pour étayer une pente, leur tension doit être mesurée régulièrement. Une inspection visuelle régulière peut repérer des signes avant-coureurs d'instabilité, telles que des fissures et des éboulis de roches.

200. Les perfectionnements récents des instruments de surveillance comportent la mise au point d'appareils de mesures des distances électro-optiques (EDM) qui permettent de contrôler les déplacements de surface. Les progrès de la télémétrie - la lecture à distance d'instruments à l'aide d'ondes radio ou de connexions par câbles - permettent maintenant leur utilisation dans les mines à ciel ouvert.

201. La surveillance a lieu pendant l'étape d'exploitation de la mine. Il est toutefois essentiel de la planifier à l'avance, et de décider

de la nature et de l'emplacement des appareils pendant l'étape de conception de la mine.

NIVEAUX DE SURVEILLANCE

202. Dans le manuel, la surveillance se répartit en trois secteurs. Le niveau I est la surveillance globale des parois, conçue pour repérer les zones d'instabilité potentielle. L'activité à ces niveaux est planifiée à l'étape de conception de la mine et commence avec l'exploitation. Le niveau 2 est la surveillance détaillée de ces instabilités potentielles. Le niveau 3 est la surveillance des instabilités existantes pour que l'exploitation puisse se faire en sécurité.

Niveau I

203. La surveillance des crêtes et des gradins à l'aide de matériel d'arpentage est recommandée au niveau I. Ces mesures constituent le minimum nécessaire pour repérer un mouvement. Les instruments utilisés sont le théodolite, le théodolite et un EDM, ou un EDM permettant de mesurer les angles. La figure 57 montre schématiquement la surveillance topographique. T représente une cible sur la crête ou la pente qui doit être surveillée à partir des stations d'observation S_1 et S_2 . Les bornes-repères doivent être durables.

204. Si l'on dispose d'un théodolite EDM, il est possible de surveiller le déplacement des crêtes par cheminement. Cette méthode consiste à placer l'instrument à la verticale de la cible à surveiller et de faire des mesures de distance et d'angle vers des cibles adjacentes. Il faut utiliser des bornes-repères simples mais très bien ancrées.

205. Un nivelage précis vient compléter la surveillance du mouvement des surfaces dans les zones

ou il y a peu de morts-terrains et quand la surface est raisonnablement plate. La figure 58 montre les emplacements recommandés pour les stations de nivellement par rapport aux cibles du théodolite EDM.

206. Il importe de faire des mesures sur les eaux souterraines si des conditions hydrologiques défavorables sont prévues, et il faut installer des piézomètres pour en surveiller la pression.

207. Il faut mesurer les vibrations et l'am-

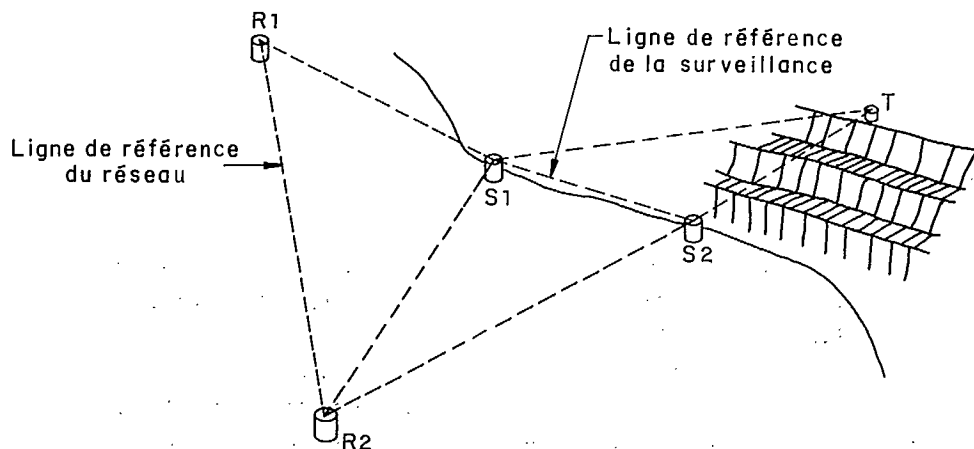


Fig 57 - Emplacement relatif de la mine, des bornes d'observation et des bornes-cibles pour surveiller le mouvement de la fosse.

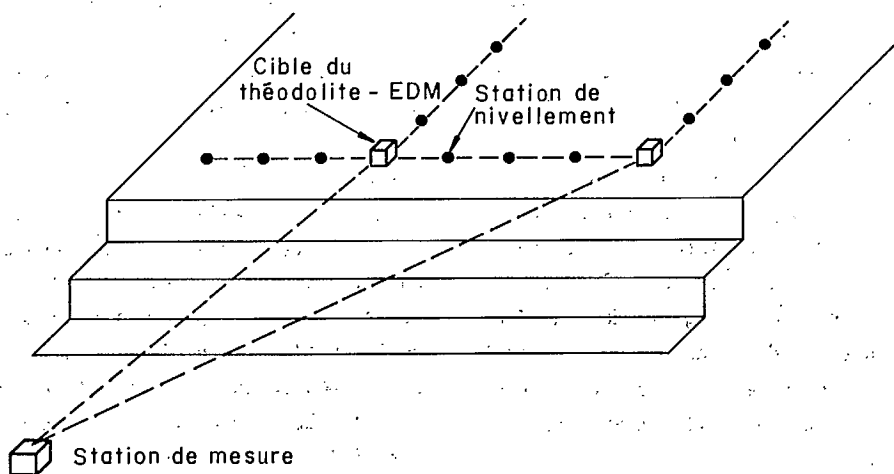


Fig 58 - Emplacement recommandé pour les stations de nivellement par rapport aux cibles du théodolite EDM.

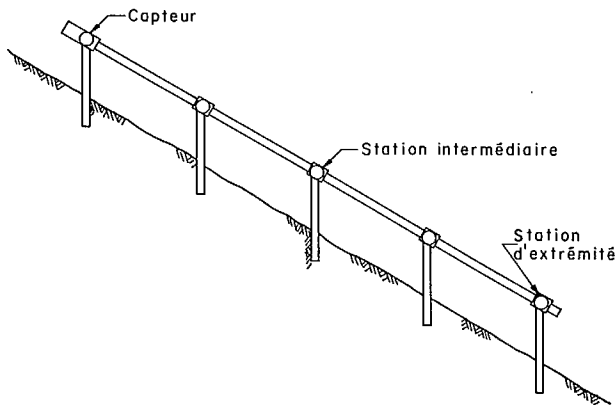


Fig 59 - Disposition d'un extensomètre de déplacement.

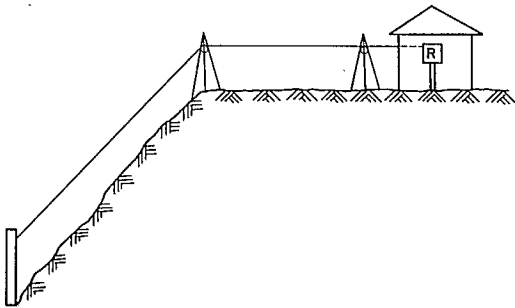


Fig 60 - Extensomètre à câble pris de la crête d'un terril.

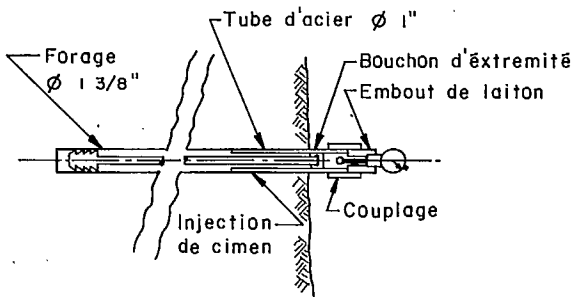


Fig 61 - Extensomètre à boulon.

pleur des dégâts causés par les tirs de mine à mesure que s'effectue le sautage pour l'exploitation. Ces renseignements permettent de s'assurer que les niveaux de vibration acceptables ne sont pas dépassés et orientent la planification du sautage périphérique.

208. Il est improbable qu'une surveillance automatique par télémétrie soit nécessaire lors des débuts de la mise en valeur de la mine. Quand on achète du matériel radio pour la mine, on peut toujours envisager les possibilités d'emploi futur de télémétrie.

NIVEAU II

209. Quand on repère une instabilité potentielle, l'effort de surveillance doit être intensifié. Il est important de déterminer:

- La superficie et les limites de la zone instable,
- L'amplitude et la vitesse du mouvement
- La direction générale du déplacement.

On peut y parvenir en faisant des mesures supplémentaires au théodolite EDM ainsi qu'au niveau.

210. Des crevasses dues à la tension apparaissent souvent sur les crêtes et les bermes au début d'un mouvement de la pente de la fosse. Des mètres à rubans permettent de mesurer le mouvement entre des piquets ancrés de part et d'autre d'une crevasse.

211. Si l'on s'inquiète tout particulièrement de la sécurité, il est recommandé d'utiliser des techniques de surveillance plus perfectionnées. Un tube télescopique qui protège un mètre rigide en tige métallique ancrée entre les piquets monté comme sur la figure 59, peut mesurer des déplacements de 0.02 pouces à 20 pouces (0.5 mm à 0.5 m). Pour des mouvements de plus grande amplitude, des extensomètres à câble sont recommandés (figure 60). Le mouvement peut être enregistré en permanence, ou encore un mouvement d'amplitude choisi à l'avance peut déclencher un dispositif d'alerte.

212. Les déplacements souterrains peuvent être mesurés avec des extensomètres, des inclinomètres placés dans les trous de sonde (figure 61), ou des pendules inversés (figure 62). Le pendule inversé est l'instrument le plus sensible et le plus précis pour surveiller les mouvements souterrains,

mais il n'est utilisable qu'à des profondeurs inférieures à 100 pieds (30 m).

213. Si des ancrages ont été installés, leur tension doit être surveillée par un dynamomètre. Le dynamomètre recommandé est un cylindre ou un anneau d'acier dont la déformation sous charge est captée par des jauges de déformation étalonnées.

214. Les vibrations du sol dues aux sautages peuvent contribuer à l'instabilité. Il faut donc les mesurer dans les zones en mouvement. S'il y a corrélation entre un mouvement et un sautage, il faut reconsidérer le plan de sautage pour l'exploitation.

Niveau III

215. Si une paroi de fosse ne peut être stabilisée, il faut se préparer à un glissement éventuel. La fonction primordiale de la surveillance est, dans ce cas, de permettre de poursuivre l'exploitation en sécurité.

216. Si la surveillance se fait pour la sécurité, les instruments d'arpentage ne conviennent en général pas. Il faut compter avant tout sur des extensomètres de surface à tiges ou à câbles,

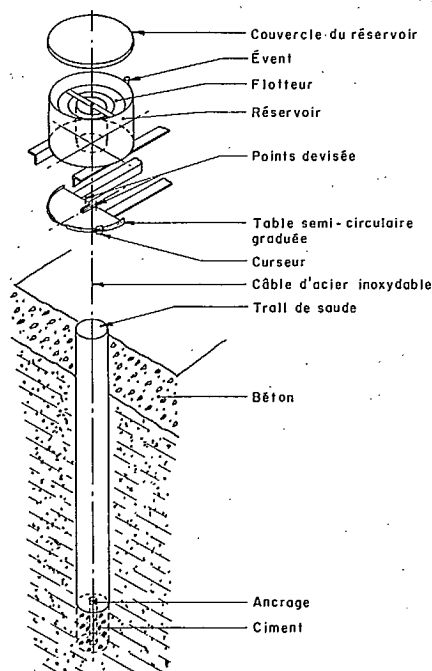


Fig 62 - Pendule inversé.

qu'ils soient équipés de dispositifs d'alerte, ou lus régulièrement par télémétrie. Les dispositifs tels que les barrières de glissement utilisées par les chemins de fer pour repérer les zones d'éboulis de rochers, peuvent être utilisés.

217. Il faut envisager l'emploi des extensomètres convenables dans les trous de sonde. Les extensomètres à boulons résistent mieux aux dommages que les extensomètres à câbles multiples, mais un déplacement différentiel de la roche, normalement à l'axe du trou, les rend rapidement inutilisables. Les extensomètres doivent être lus à distance par télémétrie, ou être équipés de dispositif d'alerte au mouvement, s'il se produit.

TELEMETRIE

218. Un système de surveillance automatique par télémétrie peut lire les instruments et transmettre, traiter et stocker les données. Tous les instruments de surveillance doivent comporter un capteur pour transformer les lectures en signaux électriques. La surveillance automatique peut être organisée pour que chaque instrument donne l'alerte lorsqu'une lecture limite choisie à l'avance est dépassée. Le matériel n'est pas sans défaut, et une panne de fonctionnement ne pourrait supprimer l'alerte. Une meilleure méthode consiste en "l'interrogation" régulière des instruments par la station de commande centrale (figure 63). Des mesures erronées ou l'absence de réponses peuvent alors être contrôlées.

Contrôle par ordinateur

219. L'utilisation de la télémétrie permet de recueillir un grand nombre de données rapidement, dont l'étude et le traitement peuvent être difficiles, particulièrement si la sécurité exige un traitement rapide de ces données pour donner l'alerte dans le cas d'une instabilité possible. Le traitement informatique des données peut surmonter ces problèmes.

220. L'utilisation d'un mini-ordinateur, pour 20 capteurs seulement, pourrait être justifiée surtout si l'on considère comme essentielles les possibilités suivantes:

a. Surveillance pour la sécurité,

- b. Balayage automatique des stations à distance,
- c. Compensation des variations des capteurs (par exemple réponse non linéaire),
- d. Sortie des résultats traités chez les services techniques,
- e. Traitement rapide pour analyse des tendances,
- f. Etude des données sur les variables telles que le déplacement,
- g. Adaptation rapide des cycles de balayage.

221. La plupart de ces fonctions pourraient être exécutées par des instruments conçus spécialement. Un mini-ordinateur donne toutefois une souplesse que les instruments n'ont pas. A l'aide d'un ordinateur, les variations relevées par le système de surveillance ou les fonctions à exécuter n'impliquent que des modifications de programme.

222. Les sorties de l'ordinateur peuvent habituellement être imprimées sur télétype. La surveillance ne devrait pas nécessiter un relevé permanent de données; dans des conditions normales, un rapport quotidien est suffisant. Les conditions anormales peuvent être signalées immédiatement par télétype. L'ordinateur imprime l'heure à laquelle l'anomalie se produit avec l'origine, le type et les valeurs des caractéristiques pertinentes.

223. Si des conditions inhabituelles se présentent, l'ordinateur peut être programmé pour modifier les méthodes de balayage de façon à ce que les capteurs correspondants soient lus plus souvent. L'ordinateur peut également déclencher des alarmes telles que des sirènes ou des feux clignotants si un danger potentiel se développe.

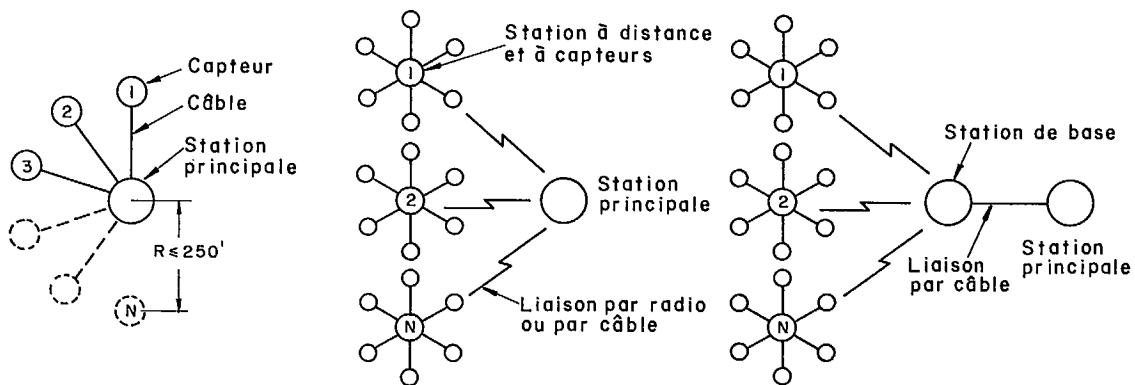


Fig 63 - Trois dispositions télémétriques possibles.

REMBLAIS DE STÉRILES

224. L'expression "remblais de stériles" recouvre les digues de déchets, les terrils de roches, de morts-terrains ou de sol. Dans le présent Manuel, les spécifications pour leur conception, concernant essentiellement la stabilité et envisagent, en partie, les effets des remblais sur les cours d'eau naturels et les eaux souterraines. Les aspects de récupération sont décrits au chapitre sur la planification de l'environnement.

RECHERCHES

225. Le choix de l'emplacement d'un remblai de stériles exige les recherches suivantes:

- a. étude technique et géologique
- b. essais sur les fondations
- c. essais sur la ballastière
- d. essais sur les matériaux stériles
- e. levés topographiques

226. Outre les propriétés mécaniques nécessaires à l'analyse de la stabilité, d'autres propriétés sont intéressantes. Les caractéristiques de

sédimentation des résidus influencent le temps de passage et la profondeur d'eau nécessaire dans les bassins de décantation. Le potentiel d'oxydation, en particulier des minéraux contenant des sulfures, est important quand on étudie les effets possibles des infiltrations sur les cours d'eau naturels. La combustion spontanée du charbon, dans les stériles, peut être étudiée pour choisir une planification particulière appropriée. La nature des réactifs de traitement rejetés avec les déchets est également importante à cause de leurs effets potentiels sur les cours d'eau naturels.

227. Les données climatiques et écologiques sont nécessaires à la conception des remblais de déchets et le reboisement planifié. Elles sont publiées par le Service de l'environnement atmosphérique d'Environnement Canada à Ottawa. On peut s'y procurer des cartes. Elles indiquent les courbes isothermes, l'humidité, les vents et les précipitations. La Commission hydrologique du Canada (Environnement Canada, à Ottawa) publie les données sur les cours d'eau.

228. Les recherches souterraines permettent de déterminer la nature de tous les sols qui recouvrent la roche du fond. L'épaisseur et la composition de chaque couche doivent être connues. Le régime des eaux souterraines et ses variations avec les années, sont des informations utiles. Des détails sur les travaux de mine existants ou prévus sont importants et il est également précieux de savoir s'il y a des cavités de dissolution.

CONCEPTION

229. Le glissement circulaire est le type classique d'instabilité des remblais de stériles (figure 64). Il peut être provoqué par des pentes trop abruptes, par la surcharge de fondations trop faibles ou par une élévation du niveau de l'eau dans le remblai.

230. Le glissement se produit parfois, si une fondation en pente est composée d'argile ou de silt de faible résistance, ou s'il y a une fine couche de matériaux altérés sur le socle rocheux (figure 65).

231. Le chapitre sur la conception de la mine décrit en détail les techniques d'analyse qui conviennent à l'évaluation de la stabilité. Dans le cas de la conception des remblais de stériles, l'ingénieur a l'avantage de connaître, à la fois, la nature du matériau et la méthode de construction, à l'exception des problèmes de fondation. Les calculs de stabilité sont donc plus sûrs que les analyses des pentes de la mine.

232. Il y a liquéfaction quand les résidus entrent temporairement en suspension dans l'eau et s'écoulent comme un liquide visqueux. Ceci se produit souvent quand une brèche apparaît dans une digue de déchets. Lorsque les déchets d'un remblai sont meubles et saturés, les vibrations produites par un tremblement de terre ou par un camion peuvent entraîner la liquéfaction. L'ingénieur doit préciser, si cela s'impose, les méthodes de dépôt ou prévoir le drainage pour écarter cette possibilité.

233. Lorsque la digue est débordée par les déchets, il peut s'y former une brèche avec la perte de contrôle de la retenue; c'est probablement la cause la plus courante de l'instabilité d'un bar-

rage, et l'ingénieur doit y palier en déterminant de façon convenable les flancs-bords et la largeur de la crête. Il peut être nécessaire d'utiliser un matériau qui est moins sujet à l'érosion que les déchets normaux.

234. L'érosion des pentes de remblai peut provoquer l'instabilité. Pour les digues de déchets, la convergence des eaux d'écoulement vers les retraits, et d'autres changements de contour, peuvent provoquer le transport de particules solides par les eaux d'infiltration qui traversent le barrage ou passent en-dessous. Quand une quantité suffisante de matériaux a été emportée par l'eau, un conduit peut se former, croître progressivement sous le remblai jusqu'à ce que le débit devienne excessif et qu'une brèche se forme.

235. Le tassement sous un remblai peut provoquer la rupture de tuyauteries voisines. Dans une digue de déchets, cela peut provoquer une fissure dans le joint d'étanchéité. On doit prévoir un tel mouvement à l'étape de la conception.

236. Les terrils de stériles de charbon peuvent s'enflammer par combustion spontanée. Des gaz toxiques peuvent être formés, et le feu devenir très difficile à contrôler, surtout si en essayant de l'éteindre, la poussière de charbon produite provoquait une explosion. On doit tenir compte de ces risques dans la conception et la construction de ces terrils.

237. Les infiltrations à travers les remblais de déchets doivent être arrêtées ou drainées. De cette façon la stabilité est maintenue et les répercussions sur l'environnement peuvent être contrôlées.

238. La zone de captage derrière un barrage de déchets peut être étendue. Le détournement de cours d'eau, de ruisseaux et de fossés est à envisager pour minimiser l'écoulement vers le bassin de résidus. Ceci réduira de beaucoup les risques d'inondation en cas d'orage et diminuera l'infiltration et le volume des effluents à traiter.

CONSTRUCTION ET EXPLOITATION

239. Les barrages de déchets sont construits souvent de l'une des trois façons suivantes: la méthode en aval, la méthode en amont, et la méthode du centre fixe (figure 66). L'enlèvement

des matières organiques et la prévention des infiltrations contribuent beaucoup à la stabilité des remblais.

240. L'entretien, en particulier, des barrages de déchets, est important après la construction d'un remblai, car leurs conditions changent sans cesse. Les problèmes peuvent grossir très rapidement, en particulier pendant les périodes de fortes précipitations. Si on s'attend à une érosion rigoureuse, il faut prévoir un enrochement ou des plantations végétales pour les protéger.

241. La surveillance du mouvement des crêtes et des eaux souterraines, en particulier dans les digues de déchets, permet d'avertir à temps en cas

de problème. De telles mesures devraient faire partie intégrante du programme de surveillance de la mine.

PERGELISOL

242. Placer des remblais de déchets sur du pergélisol peut avoir des résultats inhabituels. Par exemple, le pergélisol peut monter dans le remblai et provoquer une instabilité de la pente, si des lentilles de glace sont créées et qu'elles fondent au printemps. D'autre part, le pergélisol peut reculer dans la fondation pour résulter en un tassement excessif si le matériau dégelé est argileux ou silteux. Les remblais posés sur des pentes de

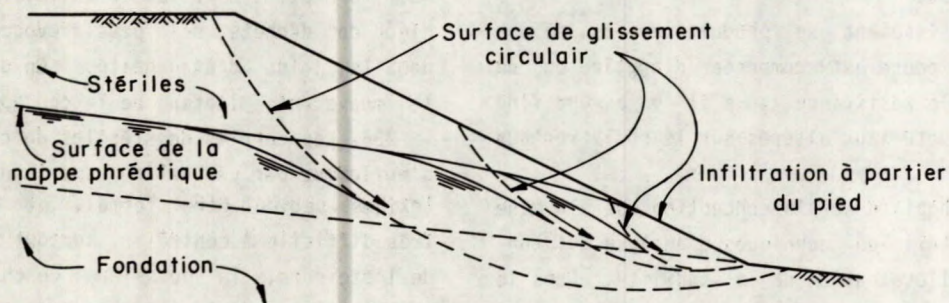


Fig 64 - Glissement circulaire dans un talus de stériles.

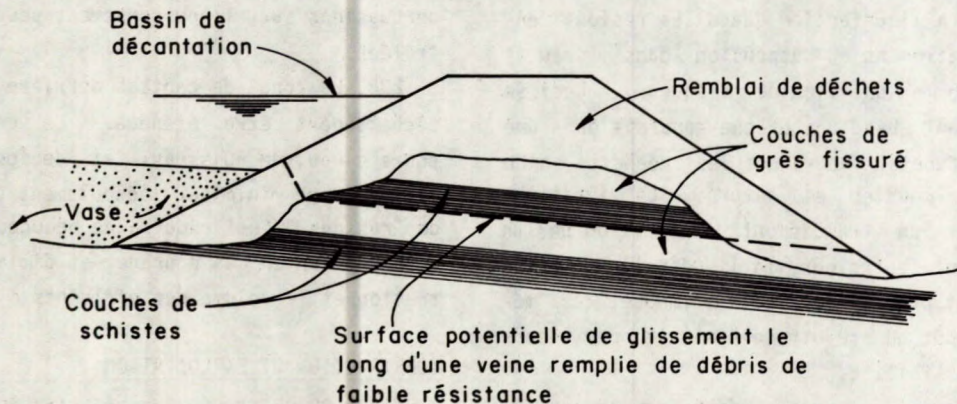


Fig 65 - Glissement sur une fondation de faible résistance.

pergélisol peuvent impliquer des conditions exceptionnelles de glissement, d'écoulement des eaux souterraines et de formations de glace. Il peut

être très difficile de corriger ces situations et il vaut mieux les prévoir et prendre des mesures pour les éviter.

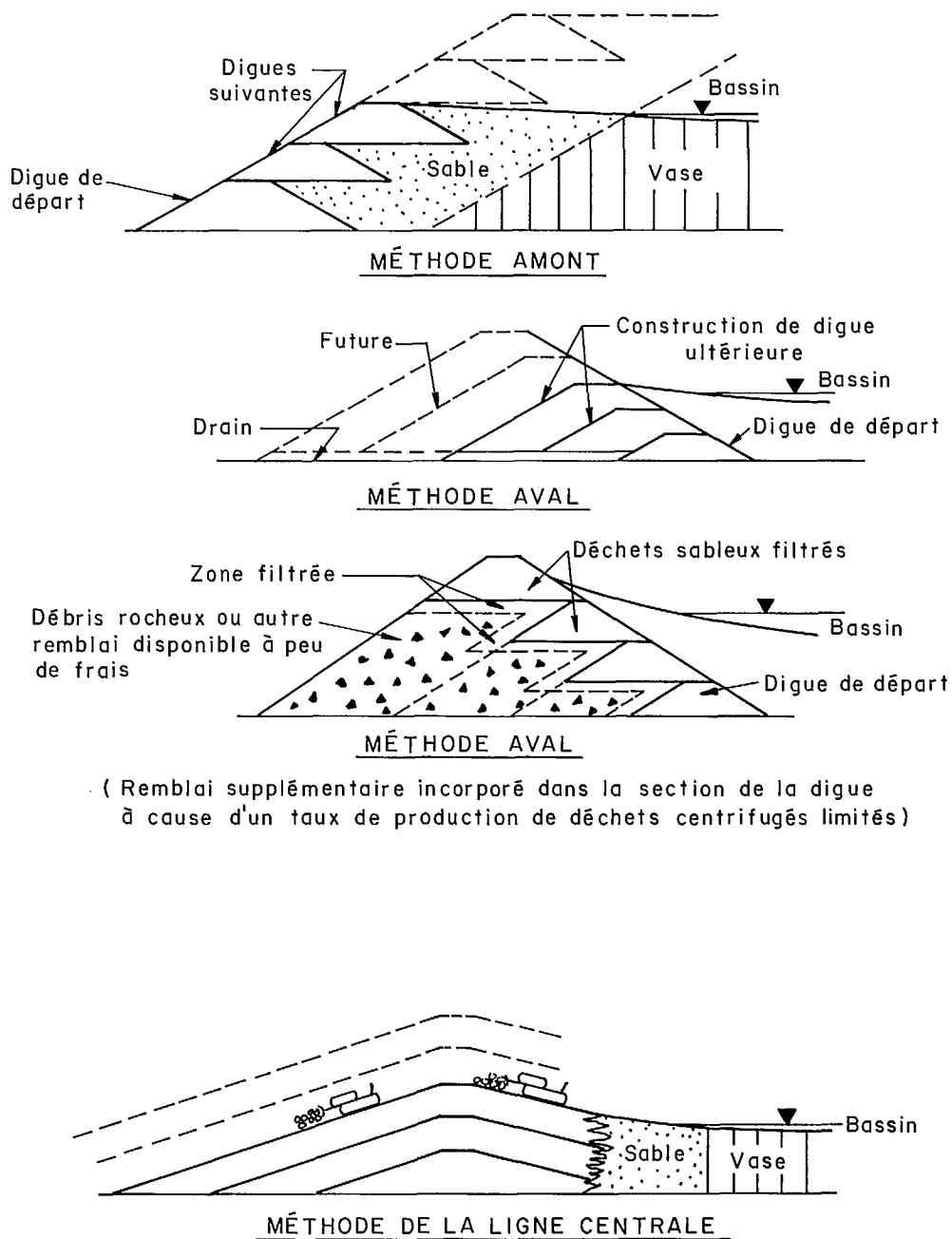


Fig 66 - Méthodes de construction de remblais de déchets.

PLANIFICATION DE L'ENVIRONNEMENT

243. Les personnes chargées de la conception d'une mine doivent envisager les effets d'une mine sur ses environs. Les choix techniques pour les mines nouvelles, comme pour les mines existantes, doivent être faits en fonction de leur influence sur l'environnement. Une fois un plan adopté, ces effets doivent être surveillés, le contrôle de la pollution de l'eau et le reboisement venant en première place parmi les nombreux facteurs environnementaux mis en jeu.

EXPLORATION

244. Dans les premiers stades d'une entreprise minière, l'entretien de la qualité de l'environnement est habituellement peu coûteux et favorise des bonnes relations avec le public. Toutefois, le jalonement, le défrichage, les levés cartographiques et géophysiques et les forages au diamant sont souvent faits par des entrepreneurs qui ne se préoccupent peut-être guère de protéger l'image du promoteur. C'est pourquoi il est particulièrement important de superviser l'exécution des contrats d'aménagement. Voici quelques aspects à noter:

a) Les approvisionnements de combustible doivent être stockés au-dessus du plus haut niveau des eaux.

b) Si du pétrole est répandu sur le terrain, il ne faut pas le retirer ou l'enterrer, ce qui pourrait engendrer des problèmes plus grands; les zones affectées peuvent être clôturées pour protéger la faune.

c) Les traverses des cours d'eaux doivent être conçues pour ne pas entraver le débit et ne pas causer de dépôts de sédimentation.

d) Le pétrole, les fluides de forage, les ordures et d'autres contaminants ne doivent pas être jetés dans les lacs et les fleuves.

e) Les ordures peuvent être brûlées avec précaution, mais il est préférable de les enterrer.

f) Les installations hygiéniques doivent être situées à distance de l'eau courante.

g) Le défrichage des ligne de levé et le déboisement doivent être tenus au minimum.

h) Les puits d'essai, les tranchées et les autres excavations doivent être remblayés après usage.

245. Il peut être conseillé de prélever les échantillons de sources d'eau douce pour connaître les conditions naturelles avant le début de l'exploration. S'il existe une possibilité de contamination des puits d'eau potable, il peut être souhaitable de cimenter tous les forages d'exploration.

246. Près des zones résidentielles, les problèmes potentiels de bruit doivent être envisagés. Une consultation préalable avec les gouvernements locaux et d'autres groupes peuvent souvent prévenir les plaintes.

RECHERCHE ECOLOGIQUE

247. Quand on prend la décision de mettre en exploitation un corps de minerai, l'écologie locale ainsi que les conditions sociales et économiques doivent être étudiées. Ceci fournit des données de référence avec lesquelles on peut mesurer les effets de la mine. Les photographies aériennes donnent des renseignements sur le régime des eaux de surface et la végétation. Une zone de contrôle semblable au site minier, mais suffisamment éloignée pour ne pas être affectée par l'exploitation, doit être choisie comme référence.

248. Les cours d'eau sont habituellement plus vulnérables au changement que l'écologie terrestre. Il faut envisager, lors des études qui précèdent l'exploitation, et pendant la surveillance ultérieure:

- a. les aspects physiques tels que la profondeur, la température et la texture des sédiments;
- b. les caractéristiques hydrologiques telles que la couleur, la turbidité, les solides dissous et le contenu organique;
- c. les produits toxiques tels que les métaux lourds et les détergents;
- d. les biocénoses telles que les concentrations de phytoplancton, les plantes, les poissons et les bactéries.

249. Les études terrestres portent habituellement sur les types de sol, la flore et la faune.

ETUDES SOCIO-ECONOMIQUES

250. L'exploitation d'une usine affectera l'économie et la répartition de la population locale en formant un nouvel usage des terres. Le trafic local routier et ferroviaire, ainsi que les approvisionnements en eau de la communauté peuvent être affectés de façon importante.

251. Des relations harmonieuses avec les habitants des environs sont de toute évidence souhaitables. Elles seront favorisées par des présentations publiques pour discuter d'aspects tels que

les parcs de matériel, l'emplacement des campements du chantier de construction, les heures de travail et les plans de récupération, etc.

ETUDES METEOROLOGIQUES

252. Il peut être important de connaître le climat local. Les effets des déflagrations peuvent être influencés par le vent, tout comme la dispersion des panaches de fumée des usines et des fonderies. Il peut être conseillé d'établir une station météorologique locale pour mettre au point une banque de données contenant les renseignements pertinents.

CONSIDERATIONS SUR LE NORD

253. Bien que tout le Canada se trouve dans le Nord, l'exploitation dans les zones arctiques et sub-arctiques posent des problèmes spéciaux. Dans les régions pergélisolées, les pentes excavées et le sol gelé découvert risquent de dégeler et de s'effondrer. La destruction des ordures et des déchets biologiques est plus difficile. Le pétrole répandu peut être plus gênant à cause de la décomposition plus lente des hydrocarbures. Une fois entamée, l'érosion par les cours d'eau a tendance à se poursuivre avec des conséquences qui peuvent être ennuyeuses.

EFFETS DES CONSTRUCTIONS

254. Les dommages à la végétation à cause de la construction peuvent modifier le régime des eaux souterraines. Le drainage de l'exploitation influera aussi sur les eaux souterraines.

255. La suppression de la végétation près de cours d'eau peut augmenter la quantité d'azote dans l'eau. Le drainage du site minier, avant et après l'exploitation, peut modifier l'hydrologie environnante avec toutes les conséquences que cela comporte pour les poissons et la flore aquatique.

POLLUTION DES EAUX

256. Les répercussions de l'exploitation sur les cours d'eau existants sont difficiles à prévoir. Il suffit de changer une seule propriété physique pour modifier toutes les autres. Par exemple, les sédiments peuvent n'avoir aucun effet toxique direct sur les poissons mais peuvent

toutefois détruire certaines plantes et priver le poisson de nourriture. Les effets possibles sont, au mieux, prédits en observant des exploitations minières semblables dans des environnements du même type.

257. Le problème de la contamination par les acides, provenant des mines et des terrils de stériles, est commun et fréquent dans l'ensemble du pays. Il est en général dû à la présence de pyrite, de pyrrhotite et de chalcocite. La production d'acide peut être empêchée en supprimant une seule des trois substances suivantes: l'oxygène, l'eau ou les sulfures. L'approche la plus économique doit être déterminée dans chaque cas.

258. Le niveau des eaux souterraines ainsi que leur qualité peuvent être affectés par les opérations d'exploitation. Ceci peut causer de gros problèmes aux utilisateurs locaux. La baisse de la nappe phréatique de la région minière n'est pas rare, mais l'augmentation de la nappe, à cause de la présence d'un grand bassin de décantation, peut également se produire.

259. Le coût d'un programme de lutte contre la pollution peut être minimisé en déterminant la qualité de l'eau avant le début de l'exploitation. Ceci évitera d'avoir à satisfaire à des exigences ultérieures de qualité qui dépasseraient les conditions naturelles. Le détournement de cours d'eau et le creusement de fossés et de digues permettent souvent de réduire la quantité d'eau qu'il faut contrôler.

260. Le recyclage de l'eau peut être possible. Il pourrait diminuer les besoins en eau douce et réduire, de façon appréciable, le volume d'eau à traiter et donc l'ampleur des installations. Dans certains cas, même le coût des réactifs peut être réduit.

261. Le coût du contrôle des effets des bassins de décantation sur les ressources hydrologiques peut être réduit au minimum par l'emploi de méthodes convenables. Un joint d'étanchéité sur la partie en amont d'un barrage, par exemple, peut être efficace pour réduire la contamination. Des plantations sur les déchets réduiront le lessivage des minéraux par les eaux de pluie.

REMISE EN ETAT DES TERRES

262. La remise en état des terres demande l'établissement d'objectifs pour l'utilisation finale du site. Dans bien des cas, il n'y aura pas d'utilisation finale; c'est pourquoi il suffira d'assurer la sécurité du visiteur éventuel, ainsi qu'un minimum de reboisement. En d'autres lieux, des installations récréatives, des exploitations commerciales ou industrielles exigeront des travaux d'architecture paysagiste et un reboisement.

263. Les exigences de reboisement varient d'une exploitation minière à l'autre et dans une même mine. Les bassins de décantation et les digues, les terrils de roches et de morts-terrains exigent tous des traitements différents. Une neutralisation initiale ainsi que l'addition d'engrais sont souvent nécessaires. Des graines ou de jeunes brins choisis judicieusement sont susceptibles de fournir une couverture végétale autonome ne nécessitant aucun entretien. Il faudra peut être créer une succession biologique de plantes appropriées et une période d'entretien au cours de laquelle l'emploi d'engrais et une neutralisation supplémentaires seront obligatoires. Cette période d'entretien peut s'étendre sur une période de trois ans au plus, mais elle peut s'avérer plus longue dans des conditions extrêmes soit à cause de l'environnement, soit à cause de la qualité des sols récupérés.

264. Il y a de nombreux exemples de récupération réussis et le présent Manuel cite un certain nombre de propriétés, choisies à travers le pays, qui peuvent servir de modèles pour de nouveaux programmes.

AUTRES OPERATIONS

265. Les voies de transport et de roulement peuvent avoir des incidences gênantes sur l'environnement. Il faut prévoir des ponceaux pour éviter le débordement comme l'envasement. Les effets des produits chimiques, appliqués sur la surface des routes, doivent être étudiés avant usage. Le bruit des camions peut gêner les voisins la nuit, particulièrement.

266. Les pipelines - pour les résidus, les boues, l'eau et le pétrole - doivent être conçus de façon à pouvoir faire face à une obturation, une coupure de courant ou une rupture. Il est important d'y assurer un accès facile et de prévoir des points de vidange aux endroits appropriés.

267. Les plans de drainage de la mine doivent tenir compte des effets possibles sur les eaux souterraines et de surface. Un traitement peut être nécessaire avant le rejet des eaux usées.

268. Le travail aux explosifs peut exiger des précautions spéciales si la mine est proche de zones résidentielles ou urbaines. Les sautages doivent être conçus pour éviter des vibrations susceptibles de causer des dommages. Les personnes sont bien plus sensibles que les immeubles aux mouvements du sol. Elles peuvent imputer au sautage, des dommages structuraux mineurs qui, en fait, existaient auparavant. Aussi, prendre des photographies et des mesures avant de commencer les sautages peut éviter des dépenses ultérieures. L'élaboration d'un programme convenable d'éducation du public pourrait s'avérer un bon investissement.

LEGISLATION

269. La protection de l'environnement relève de la compétence commune du gouvernement fédéral et des gouvernements provinciaux. Dans la plupart des cas, les lois provinciales s'appliquent, alors que les lois fédérales établissent des normes minimales.

270. Trois Lois fédérales ont une importance particulière. La Loi des pêcheries établit des normes nationales pour la qualité des eaux, et contient des stipulations contre la pollution industrielle. La Loi sur les ressources en eau du Canada régit la gestion des ressources en eau et

définit des limites aux déchets rejetés. La Loi sur la lutte contre la pollution atmosphérique définit aussi des normes de qualité de l'air.

271. Le Manuel contient une liste des lois pertinentes qui concernent les mines et la planification de l'environnement ainsi qu'une étude des règlements établis en vertu des diverses lois.

COÛTS

272. Une reconnaissance écologique préliminaire du site prévu pour la mine devrait exiger environ cinq journées-hommes, soit environ \$2000 (1974).

273. Une recherche écologique complète avec études de référence pourrait exiger de 30 à 250 journées-hommes, et coûter de \$10 000 à \$60 000 (1974).

274. La plupart des mines en exploitation font face à des frais d'échantillonnage de l'eau et de l'air. Le traitement des eaux usées peut être une exigence majeure: par exemple, une mine de l'est du Canada dépense \$300 000 (1972) par an pour exploiter et amortir son usine de traitement; une mine ontarienne traite 3.2 milliards de gallons par an (14.5 millions de mètres cubes) d'eaux usées pour un prix de revient annuel de \$31 000 (1970).

275. Le coût du reboisement des stériles a été estimé entre \$150 et \$500 l'acre (\$60 à \$200 l'hectare) en 1973, plus \$200 l'acre (\$80 l'hectare) par an pour l'entretien. Toutefois, s'il faut rajouter de la terre, le coût augmente rapidement; le reboisement des mines de charbon a été estimé entre \$300 et \$3000 l'acre (1972) (\$120 à \$12 000 par hectare). Une mine manitobaine a estimé les coûts initiaux et d'entretien pour des déchets contenant des sulfures à \$750 l'acre (\$300 l'hectare) et \$245 l'acre (\$300 l'hectare) et \$245 l'acre (\$170 l'hectare) respectivement en 1972.