

GM 63293

GUIDE D'EVALUATION DES GISEMENTS D'OR - TOME 2 - METHODE D'EVALUATION

Documents complémentaires

Additional Files



Licence

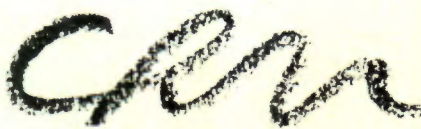


Licence

Cette première page a été ajoutée
au document et ne fait pas partie du
rapport tel que soumis par les auteurs.

Énergie et Ressources
naturelles

Québec 



CENTRE DE RECHERCHES MINÉRALES

GUIDE D'ÉVALUATION DES GISEMENTS D'OR

Tome 2
Méthode d'évaluation




Recursos naturales et Faune, Québec

21 FEV. 2008

Service de la Géoinformation

GM 63293

Québec 

GUIDE D'ÉVALUATION DES GISEMENTS D'OR

Tome 2 Méthode d'évaluation

pour le
Centre de recherches minérales

POUR CONSULTATION SEULEMENT
MINISTÈRE DE L'ÉNERGIE ET RESSOURCES
DIVISION DES DONNÉES GÉOSCIENTIFIQUES
5700, 49 AVENUE OUEST, LOCAL A-201
CHARLESBOURG (QUEBEC)

Tous droits réservés ©

GÉOCONSEIL
MARCEL VALLÉE INC.



ROCHE
Ltée Groupe-conseil

Publié et diffusé par
le Centre de recherches minérales
Ministère de l'Énergie et des Ressources
2700, rue Einstein
SAINTE-FOY (Québec)
G1P 3W8

Dépôt légal - Bibliothèque nationale du Québec
4e trimestre 1990

ISBN: 2-551-12472-7 (série complète)
ISBN: 2-551-12474-3 (tome II)

PRÉAMBULE

Le Centre de recherches minérales est heureux de vous présenter ce *Guide d'évaluation des gisements d'or* destiné aux professionnels et aux responsables de l'évaluation des aspects relatifs à la géologie, l'ingénierie et l'économie des gisements d'or. Ce guide sera utile autant pour les compagnies minières ou d'exploration que pour les différents organismes financiers, de réglementation et gouvernementaux impliqués dans le domaine minier.

La rédaction du guide a été confiée au cours du printemps 1989 au consortium Géoconseil Marcel Vallée inc. - Roche ltée, Groupe Conseil. Plusieurs organismes ont participé au financement et au suivi des travaux de rédaction :

- Association minière du Québec inc. (AMQ)
- Association professionnelle des géologues et des géophysiciens du Québec (APGGQ)
- Association des prospecteurs du Québec (APQ)
- Bourse de Montréal
- Cambior inc.
- Centre de recherches minérales (CRM) (commanditaire principal)
- Commission des valeurs mobilières du Québec (CVMQ)
- Géophysique GPR International inc.
- Ordre des ingénieurs du Québec (OIQ)
- Unité de recherche et de service en technologie minière de l'Abitibi-Témiscamingue (URSTM).

Les deux principaux objectifs poursuivis dans ce document sont de fournir des procédures et des outils appropriés d'évaluation des gisements d'or et d'établir des définitions des réserves plus cohérentes et plus pertinentes que celles utilisées présentement. Le guide d'évaluation des gisements d'or contient aussi une description complète du processus de développement minier.

Ce document s'inscrit dans la liste des guides que le Centre de recherches minérales met à la disposition de ceux qui oeuvrent dans le secteur minéral.

Le directeur général
du Centre de recherches minérales,



Jacques Saint-Cyr, ing.

SOMMAIRE

Le Guide d'évaluation des gisements d'or vise, par une analyse critique des étapes et composantes de l'évaluation des gisements d'or et de la classification des réserves, à **améliorer la précision des estimés¹** et à **réduire les risques de perte financière que comportent les décisions d'investissements dans le secteur minier**. Le Guide analyse, dans une approche systémique, les travaux d'évaluation et de mise en valeur des gisements minéraux dans l'axe de la géologie, dans l'axe de l'ingénierie et dans l'axe de l'économique. La même attention est apportée aux systèmes de classification des réserves et des ressources.

Le Guide s'adresse d'abord aux professionnels² et aux cadres techniques; et, par extension, aux dirigeants et administrateurs des compagnies. Le Guide pourra également servir aux autres intervenants dans le développement minéral, tels le personnel des organismes financiers, des ministères et des organismes de réglementation.

Le Guide d'évaluation des gisements d'or comporte trois Tomes: le Précis, la Méthode d'évaluation et la Classification des Réserves et des Ressources. Le Précis d'évaluation présente une perspective synthétique et résumée du Tome II selon les mêmes chapitres et subdivisions principales et résume la classification des réserves présentée au chapitre 3 du Tome III. Le Précis a pour but de faciliter l'accès à l'ensemble du Guide et aux sujets d'intérêt particulier pour le lecteur.

Après un exposé de la problématique du développement minéral (chap. 2), la démarche du Tome II du Guide fait ressortir les éléments du processus d'évaluation des gisements (chap. 4). Ces éléments sont la *quantification croissante des connaissances*, le *caractère itératif et multidisciplinaire* des travaux et des intervenants et le *contexte probabiliste des résultats* du processus d'évaluation d'un gisement minéral. Le cheminement du Guide consiste à déterminer, par une analyse rigoureuse, les divers éléments et étapes de **perte du métal** et de **dilution du minerai** qui nuisent au rendement global d'une exploitation minière. Les notions de *précision*, de *niveau de confiance* et de *marge d'erreur des estimés* et de *risque relié à la décision de réalisation du projet* sont développées dans cette problématique. Cette démarche du Guide est essentielle à l'établissement de systèmes experts éventuels pour l'évaluation des gisements.

¹ Estimation: 1) action d'estimer, de déterminer la valeur, le prix.. 2) action d'évaluer.. Dictionnaire Robert. La langue française ne possède pas de substantif correspondant au substantif anglais "estimate" pour identifier les **résultats** d'une estimation. Le Guide utilisera le mot "estimé" (dérivé du participe passé de estimer), pour exprimer ce concept essentiel.

² Dans le Guide d'évaluation des gisements d'or, le masculin est utilisé de façon générale pour signifier à la fois le masculin et le féminin, pour raisons de simplicité.

Dans l'axe de la géologie, le Guide vise l'optimisation du travail géologique (chap. 4), des diverses méthodes d'échantillonnages (chap. 5), des méthodes analytiques (chap. 6). Ces étapes permettent l'estimation, à partir des aspects géologiques, géostatistiques et miniers, des volumes, des masses et teneurs qui constitue l'inventaire des gisements et des réserves minières(chap. 7). Dans l'axe de l'ingénierie, les aspects miniers (chap 8) et minéralurgiques (chap. 9) font l'objet d'une revue détaillée dans la même perspective de *cerner les éléments qui contribuent aux pertes et à la dilution*, dans le but d'améliorer l'ingénierie du projet.

Dans l'axe de l'économique (chap 10), le Guide analyse les divers éléments qui contribuent à la rentabilité et propose une cheminement de travail . L'étape de faisabilité et de décision (chap. 11) constitue un bilan rigoureux du projet, bilan qui doit s'appuyer sur des éléments quantitatifs pour assurer le rendement des investissements dans le projet industriel envisagé. Le Guide propose ensuite (chap. 12) des normes d'application axées sur le rôle des professionnels dans la présentation et la révision des dossiers techniques aux Commissions des valeurs mobilières, avec l'appui d'un Comité de Révision, ou Comité d'experts, pour la revue des dossiers litigieux.

En perspective (chap 13), le Guide souligne qu'une amélioration des processus d'évaluation des gisements et de décision se traduira par une **plus grande efficacité** de l'industrie et des milieux financiers et par une **plus grande rentabilité, autant des capitaux de risque aux divers stades du développement minéral que des investissements de production**. De tels résultats ne pourront qu'avoir des rétro-actions bénéfiques sur la perception du public et des milieux financiers pour l'exploration et la mise en valeur des gisements miniers au Québec et au Canada, ce qui contribuera à **améliorer la disponibilité de capitaux de risque pour l'exploration minière canadienne**.

Le Tome III, **Classification des réserves et des ressources**, présente d'abord une perspective des divers systèmes de classification des réserves utilisés depuis le début du siècle (chap. 1) et une revue critique des principaux problèmes (chap. 2). A partir de ces éléments, le Guide propose un système mieux structuré d'inventaire minéral et de classification des réserves (chap. 3). En suivant l'usage déjà établi, le terme **réserve** ne sera utilisé que dans une mine en exploitation commerciale ou dans un projet où les connaissances dans tous les axes de connaissance sont *suffisantes pour permettre d'établir la rentabilité d'un projet de développement minéral*. Aux stades de délimitation, de définition et de mise en valeur du gisement, où la connaissance est surtout d'ordre géologique, les termes **gisement délimité** et **minéralisations inférées** (ce dernier remplaçant les "réserves possibles) seront utilisés

SUMMARY OF THE GUIDE

Proper appraisal of mineral deposits at all stages of mineral development is essential to insure the efficiency of the mineral development process as well as appropriate economic returns of these activities to the investors. The **Guide to Evaluation of Gold Deposits**¹ reviews the various steps and components of the evaluation of gold deposits and the classification of reserves, in order to improve the accuracy of the estimates and **reduce the risks of financial losses that are tied to investment decisions in the mining sector.**

The Guide is designed primarily for the professionals directly involved in the geological, engineering and economic aspects of mineral development, but it will also be of use to operation and corporate management. It should also be useful to other groups also involved in mineral development, such as financial organizations, government departments and regulatory agencies.

The first Volume of the Guide "**Précis d'évaluation**", presents a synthesis of Volume II, "**Méthode d'évaluation**" and Volume III, "**Classification des réserves et des ressources**". Volume II, the "**Méthode..**" reviews, *in a systemic manner*, the components of mineral deposits evaluation in the successive stages of mineral development, based on the main axes (or domains) of knowledge: geology, engineering and economics. The treatment is elaborate, with case studies and references. Volume III, "**Classification..**", after a summary presentation and critical review of the various reserve classification systems in use, offers a revised, more integrated system.

Volume II, the "**Méthode..**" first presents an outline of the context of mineral development and the problems of ore reserve classifications (chap. 2-3). This review emphasises the significant elements of deposit evaluation: the *increasing quantification of knowledge*, the *iterative character of evaluation work*, the *multidisciplinary aspects* of the evaluation processes, and the *probabilistic aspects of most of the estimates*. Improving the efficiency of the investment decisions requires to generalize the use of a more thorough approach to evaluation of deposits, so that the forecasts of production grade and tonnage and anticipated revenue are more often met. The Guide reviews systematically the steps and procedures that contribute to **metal loss and ore dilution**: these are direct drains on the efficiency of all phases of mining evaluation, extraction and ore dressing. Similar approaches are already followed by numerous companies or consultants, but not by all, as events too often show.

In the **geological** axis or domain, the Guide describes the characteristics of geological appraisal work (chap 4), sampling methods (chap. 5), assaying methods and procedures (chap. 6). The various steps and methods for the estimation of volumes, masses and grades of mineral deposits are

¹ 1990, "**Guide d'évaluation des gisements d'or**", sponsored by the Centre de recherches minérales du Québec and seven other organisations and prepared by Géoconseil Marcel Vallée inc. and ROCHE ltée, Groupe conseil.

covered in chapter 7. To help quantify the non-statistical concept of precision of the estimates, the terms **margin of error** and **confidence level of the estimates** are used throughout.

In the **engineering** axis, mining and ore dressing aspects (chap. 8-9) are reviewed in detail, with the same objective of defining ore/metal losses and dilution introduced at the various steps of evaluation as well as improving the engineering aspects of the project. The key emphasis is on the interrelation between ore deposit features and the mining / milling methods chosen. Resulting ore dilution and ore losses are directly related with these choices. The direct relation of appropriate, rigorous sampling of gold ore to accurate control and auditing of the process is emphasized.

In the **economic** axis the Guide reviews the various elements required to establish the economic feasibility and the profitability of the mining project, and proposes assessment procedures and steps (chap. 10). The final (bankable) feasibility study and the decision it supports must be based on appropriate quantitative estimates of all aspects involved, in order to insure the profitability of the investments required for mine development (chap. 11); at this stage, proper evaluation of all risk factors that cannot be quantified is essential to insure proper returns on these investments. Chapter 12 suggests norms for the presentation of professional reports dealing with reserve estimation, feasibility studies and mine financing.

Volume III, **Classification des réserves et des ressources** first presents the various systems used for ore, reserve and resource classifications since the start of the century (chap. 1) and makes a critical review of the main problems encountered, in particular with use of the terms **ore**, **reserves**, **possible reserves**(chap. 2). A revised system for mineral inventory and reserve classification aims to integrate the significant features of the existing ones (chap. 3).

The key elements of the proposed classification system follow current trends. The term **reserve** shall be used in an operating mine or in a mining project, only when information in the geological, engineering and economic knowledge and information is appropriate to insure the feasibility of the mining project: "reserves" are by definition "mining reserves". At earlier stages of deposit development, when quantitative knowledge is available mainly in the geological axis, the terms "**delimited mineralized resource**" or "**delimited mineral deposit**" shall be used. Both Proven and Probable reserves shall be subdivided in two classes to better express the many steps of mineral valuation; similar divisions shall be used for the delimited mineralisation. In addition, the category of "*Possible reserves*" should be replaced by that of "**Inferred mineralisations**" (or resources); this solution conforms to SEC regulations and to the recommendations of the Australasian Code. Use of the margin of error of the estimates at a confidence level of 90% is proposed as an objective, in order to establish their precision and distinguish categories and classes.

GUIDE D'ÉVALUATION DES GISEMENTS D'OR

TOME II : MÉTHODE D'ÉVALUATION

SOMMAIRE	i
SUMMARY OF THE GUIDE	iii
1. INTRODUCTION	3
2. LE PROCESSUS DU DÉVELOPPEMENT MINÉRAL	7
3. LES LIMITES DE L'ÉVALUATION DES GISEMENTS	27
<i>AXE GÉOLOGIQUE</i>	
4. LE CONTROLE GÉOLOGIQUE	43
5. LES ÉCHANTILLONNAGES	71
6. LES ANALYSES	97
7. L'ESTIMATION DES VOLUMES, MASSES ET TENEURS	113
<i>AXE DE L'INGÉNIERIE</i>	
8. LES ASPECTS MINIERS	179
9. LES ASPECTS MINÉRALURGIQUES	219
<i>AXE DE L'ÉCONOMIQUE</i>	
10. LES ASPECTS ÉCONOMIQUES	247
11. L'ÉTUDE DE FAISABILITÉ ET LA DÉCISION	271
<i>APPLICATION</i>	
12. LES NORMES ET LEUR APPLICATION	283
13. PERSPECTIVES	291
RÉFÉRENCES	293
ANNEXE - REMERCIEMENTS	303

LISTE DES FIGURES

<u>FIGURE</u>	<u>TITRE</u>	<u>Page</u>
2-0	Le développement minéral	11
2-1	Stades du développement minéral	13
2-2	Évolution des ressources vers les réserves	15
2-3	L'Évaluation des gisements d'or	En fin du texte
3-1	Composantes du développement minéral	29
3-2	Pertes et dilution dans l'exploitation	30
3-3	Diagramme des interrelations	31
4-0	Les aspects d'évaluation géologique	45
4-1	Géométrie des veines	51
5-0	Aspects des échantillonnages	73
5-1	Échantillonnages souterrains	86
5-2	Diagrammes de comparaison	90
6-0	Déterminations analytiques	99
7-0	Éstimation des volumes masses et teneurs	115
<u>Mine Doyon</u>		
7-1	Histogrammes des échantillons des forages - Zone 1	128
7-2	Histogrammes des échantillons des forages - Zone 2	129
7-3	Contours du minerai: Pondération de la distance	132
7-4	Contours du minerai: Krigeage	133
7-5	Distribution type des forages	134
7-6	Localisation des forages: Mine Doyon	135
7-6A	Marges d'erreur d'estimation: globales et des blocs	144
7-7	Diagrammes d'estimation	152
7-8	Distribution des échantillons des forages, Zone 1	155
7-9	Distribution des échantillons des forages, Zone 2	156
7-10	Correction des hautes teneurs, Zone 1	157
7-11	L'effet proportionnel	158
7-12	Directions d'allongement	160
7-13	Variogrammes logarithmiques, Zone 1	161
7-14	Variogrammes relatifs, Zone 1	162
7-15	Volume d'influence, Zone 1	163
7-16	Système de blocs krigés	164
7-17	Section avec blocs krigés et blocs minés	165
<u>Mine McBean</u>		
7-18	Variogrammes	167

9-19 Variogrammes	168
7-20 Carte des bancs et limite des blocs	169
<u>Mine Chimo</u>	
7-21,22 Semi-variogrammes des teneurs et des épaisseurs	171
8-0 Aspects miniers	181
8-1 Méthode chambre et piliers: horizontale	188
8-2 Méthode chambre et piliers: par paliers	189
8-3 Méthode par longs trous de petits diamètres	192
8-4 Méthode chambres magasin	193
8-5 Méthode coupes et remblais	196
8-6 Méthode coupes et remblais: accès des chantiers	197
8-7 Méthode Avoca	198
8-8 Méthode de soutirage par chambres foudroyées	200
9-0 Aspects minéralurgiques	221
9-1 Schéma de lixiviation en tas	226

LISTE DES TABLEAUX

5-1 Comparaison des méthodes d'échantillonnage des volées	87
7-1 Mailles types	140
7-2 Normes de classification	146
7-3 Marges d'erreur des classes	147
8-1 Caractéristiques des méthodes minières	202
8-2 Efficacité des méthodes minières	203
8-3 Évaluation de chantier	210
8-4 Bilan des réserves: réserves totales	214
8-5 Bilan des réserves: réserves et minéralisations	215
8-6 Bilan des réserves: catégories	216
10-1 Ages d'une exploitation minière	251
10-2 Teneur globale de rentabilité économique	253
10-3 Coûts d'investissements	259
10-4 Comptes d'exploitation provisionnels	261
10-5 Sommaire de l'imposition fédérale et provinciale	264
10-6 Sommaire des droits miniers du Québec	265
11-1 Plan d'analyse de sensibilité	276

CHAPITRE I

INTRODUCTION

<u>1. INTRODUCTION</u>	3
1.1 LA PROBLÉMATIQUE	3
1.1.1 RESSOURCES ET RÉSERVES	4
1.1.2 L'ÉVALUATION DES GISEMENTS D'OR	4
1.2 LE PLAN DE TRAVAIL	4
1.2.1 L'ANALYSE MÉTHODOLOGIQUE	5
1.2.2 CONSULTATIONS / RAPPORT FINAL	5
1.3 REMERCIEMENTS / MISE EN GARDE	5
1.4 L'ÉQUIPE TECHNIQUE	6

TOME II: La méthode d'évaluation

"Une définition de mineraï qui soit acceptable à tous est difficile à trouver..."
H. Gray, Symposium 1967 de l'ICM

1. INTRODUCTION

Le présent Guide a été préparé suite au contrat octroyé à **Géoconseil Marcel Vallée inc.** et **ROCHE ltée, Groupe conseil** par le Centre de Recherches Minérales selon le devis spécifique N° 87002/89-03-01. Le CRM a été créé pour répondre aux besoins exprimés par les représentants de l'industrie minière. Son mandat est d'effectuer, ou de faire effectuer, des travaux de recherche et de développement pour le compte des exploitants et des autres intervenants du secteur minier.

1.1 LA PROBLÉMATIQUE

Les spécialistes qui oeuvrent dans le secteur du développement minéral sont confrontés à de nombreuses difficultés techniques lors de l'estimation des ressources et des réserves minérales aux divers stades du développement. L'évaluation des gisements aurifères présente des difficultés accrues, en vertu de la distribution pépitique des particules de ce métal dans la masse rocheuse et souvent, de la forme très irrégulière des gîtes d'or filoniens.

Les dernières années, plus particulièrement, ont vu nombre d'échecs techniques et financiers suite à la mise en valeur de gisements et à la mise en production de nouvelles mines. On sait que les frais de mise en valeur d'un nouveau gisement peuvent se situer entre 3 M\$ et 30 M\$, tandis que les frais de mise en production peuvent s'étaler entre 10 M\$ et 150 M\$ dépendamment de la situation et de l'importance du gisement. Ces échecs ont eu des résultats défavorables sur les financements subséquents de l'exploration et de la mise en valeur, par le public et par les organismes financiers.

Le Guide d'évaluation des gisements d'or vise donc à améliorer l'efficacité des pratiques et procédures dans les divers volets et étapes de l'évaluation des gisements, pour améliorer la rentabilité des investissements. Cet objectif demande l'*amélioration de la précision des estimés* et la *réduction des risques de pertes financières* que comportent les décisions d'investissement, en *augmentant l'efficacité des procédures d'évaluation et de contrôle*.

La démarche du Guide est donc prioritairement dirigée vers les professionnels, les cadres et les dirigeants qui sont directement impliqués dans l'évaluation des aspects géologiques, d'ingénierie et d'économique des gisements d'or et vers ceux qui ont la responsabilité des décisions. Par extension, le Guide pourra également servir à orienter les travaux des organismes financiers, des organismes de réglementation et des organismes gouvernementaux impliqués soit dans l'évaluation des ressources minérales, soit dans le développement minier.

1.1.1 RESSOURCES ET RÉSERVES

La problématique de l'estimation des ressources et des réserves est complexe. Plusieurs systèmes ont été développés pour répondre aux problèmes, mais plusieurs éléments des diverses définitions et classifications existantes ne font pas l'accord à cause d'ambiguïtés ou même de contradictions internes. Aucun des systèmes existants ne rencontre toutes les exigences pour servir de cadre aux inventaires détaillés des ressources minérales et des réserves à tous les stades du développement minéral. *Un système plus cohérent, mieux intégré et plus complet de classification des ressources minérales et des réserves contribuerait à l'objectif d'efficacité accrue dans l'évaluation des gisements d'or.*

1.1.2 L'ÉVALUATION DES GISEMENTS D'OR

L'évaluation des gisements d'or n'est, de fait, qu'un cas particulier, mais plus complexe, de l'évaluation des gisements minéralisés de toute nature. L'évaluation des gisements d'or est plus difficile que celle des métaux plus abondants pour trois principales raisons. Ce sont les faibles teneurs, la distribution pépitique de ce métal à travers la masse rocheuse et les petites dimensions et les limites irrégulières des gisements filoniens. La compréhension et l'appréciation des méthodes d'évaluation et de leurs implications sont très inégales dans l'industrie de l'exploration et même occasionnellement de l'exploitation minière.

Le Guide devra donc, dans cette perspective, revoir tous les aspects, toutes les procédures et étapes de l'échantillonnage et de la valorisation des gisements d'or. Le cheminement du Guide sera de dégager toutes les implications des caractéristiques des gisements d'or sur les méthodes de travail, sur l'estimation des réserves et sur l'estimation de la faisabilité et de la rentabilité d'un projet minier.

1.2 LE PLAN DE TRAVAIL

Géoconseil Marcel Vallée Inc et Roche Ltée Groupe Conseil ont suivi le plan de travail suivant, pour répondre à la problématique décrite plus haut et rejoindre les objectifs fixés par le CRM.

1.2.1 L'ANALYSE MÉTHODOLOGIQUE

GMV/Roche ont procédé, dans le but de formuler des révisions appropriées, à une évaluation experte des définitions des réserves et des ressources actuellement utilisées au Canada et de leurs variantes dans divers pays à tradition minière, ainsi que des problèmes rencontrés dans leur application. Les différents aspects de l'évaluation des gisements d'or ont fait l'objet d'une analyse rigoureuse, dans une perspective systémique, dans le but de suggérer des approches et des procédures intégrant mieux les divers aspects et étapes de l'évaluation des gisements d'or.

Des rencontres avec divers représentants de services gouvernementaux, d'organismes de réglementation et de participants de l'industrie et des universités ont contribué à cette étape de travail. Un rapport préliminaire a été rédigé à la fin de cette étape et remis au CRM.

1.2.2 CONSULTATIONS / RAPPORT FINAL

En deuxième étape, le rapport préliminaire a été soumis par le CRM aux membres du Comité aviseur formé des représentants des organismes commanditaires. De plus, pour augmenter l'assurance d'atteindre les objectifs visés, le rapport préliminaire a été soumis à une liste représentative d'intervenants de l'industrie minière, des universités, des services gouvernementaux et des organismes de réglementation. L'Annexe "Remerciements" contient la liste des personnes et organismes qui ont répondu à la consultation. La rédaction du rapport final par GMV et ROCHE Ltée, a été faite à la lumière des commentaires et critiques reçus des divers intervenants, ainsi que des commentaires et avis du Comité aviseur.

1.3 REMERCIEMENTS / MISE EN GARDE

Géoconseil Marcel Vallée et ROCHE Ltée, Groupe conseil, reconnaissent avec gratitude la contribution de toutes les personnes et organismes cités en Annexe à la critique et l'enrichissement du Guide. Plusieurs des personnes citées ont fait une revue très détaillée du rapport préliminaire.

Cependant, Géoconseil Marcel Vallée et ROCHE Ltée tiennent à spécifier que, même s'ils se sont efforcés de tenir compte des critiques et des suggestions reçues, ils assument l'entière responsabilité du contenu du Guide, des opinions et des recommandations ainsi que des erreurs de fait et d'omission que la version finale pourrait contenir. La responsabilité d'aucun des intervenants n'est donc engagée par le contenu ou les lacunes du Guide, ni par aucune formulation ou recommandation controversée que le Guide contiendrait .

1.4 L'ÉQUIPE TECHNIQUE

L'équipe professionnelle suivante a contribué à la réalisation du Guide d'évaluation des gisements d'or:

Responsable de la réalisation technique et rédacteur principal

Marcel Vallée, ingénieur géologue,
Géoconseil Marcel Vallée inc.

Collaborateurs principaux:

Denis Côte, ingénieur minier,
Yves Harvey, PhD, ingénieur géologue
ROCHE ltée, Groupe conseil,
Responsable administratif ³,

Michel David, PhD, ingénieur minier,
Michel Dagbert, MSc., ingénieur minier,
Systèmes Géostat International ltée,
Aspects géostatistiques;

Clément Desrochers, ingénieur des mines,
Clément Desrochers et Associés, inc.
Aspects minéralurgiques et métallurgiques.

Les apports de nombreuses autres personnes qui ont contribué au Guide dans sa forme actuelle doivent également être soulignés ici.

³ Denis Côte a remplacé Yves Harvey durant la réalisation du Guide.

CHAPITRE II

LE PROCESSUS

DU

DÉVELOPPEMENT MINÉRAL

2. LE PROCESSUS DU DÉVELOPPEMENT MINÉRAL	9
2.1 PERSPECTIVE DU DÉVELOPPEMENT MINÉRAL	9
2.1.1 LES ÉTAPES DE DÉVELOPPEMENT	9
2.1.2 LES STADES DU DÉVELOPPEMENT MINÉRAL	12
2.1.3 LES AXES DU DÉVELOPPEMENT MINÉRAL	12
2.2 L'ÉVOLUTION DU DÉVELOPPEMENT MINÉRAL	14
2.2.1 LE CHEMINEMENT	14
2.2.2 STADE 4: DÉCOUVERTE ET DÉLIMITATION	16
2.2.3 STADE 5: PROBATION DU GISEMENT	17
2.2.4 STADE 6: INGÉNIERIE DU PROJET	18
2.2.5 STADE 7: ÉTUDES ÉCONOMIQUES	18
2.2.6 STADE 8: FAISABILITÉ ET DÉCISION	19
2.2.7 STADE 9: AMÉNAGEMENT	20
2.2.8 STADE 10: EXPLOITATION	20
2.3 CARACTÉRISTIQUES DES CLASSIFICATIONS	20
2.3.1 EXPLORATION ET MISE EN VALEUR	21
2.3.2 ÉTUDE DE FAISABILITÉ	22
2.3.3 EXPLOITATION MINIÈRE	22

2. LE PROCESSUS DU DÉVELOPPEMENT MINÉRAL

Pour situer les deux volets de la présente étude dans un cadre pertinent, le Guide s'appuiera sur une perspective dressée à partir des étapes et des stades du développement minéral et du schéma des axes de connaissance.

2.1 PERSPECTIVE DU DÉVELOPPEMENT MINÉRAL

Les gisements minéraux sont de dimensions, de formes, de composition et de teneurs diverses. Ils se situent dans des environnements géologiques différents, à des profondeurs variables, ce qui influence autant le processus d'exploration que l'exploitation éventuelle. La composition minéralogique et la diversité des minéraux ou métaux d'intérêt influent sur la facilité ou la complexité des procédés minéralurgiques et métallurgiques. Le rendement éventuel, autant minier que minéralurgique, sera affecté par tous ces facteurs et, il va sans dire, la rentabilité en dépendra. La figure 2-0 illustre les principales ressources et les principaux paramètres en jeu dans le développement minéral.

2.1.1 LES ÉTAPES

Le contexte de l'évaluation des gisements d'or doit être situé dans l'ensemble du processus du développement minéral dont l'exploration, à proprement parler, n'est que la première étape. Cette étape est suivie, après la confirmation de la découverte d'un gîte, par la délimitation et la mise en valeur du gisement et, une fois la faisabilité établie, par celle du développement minier. L'étape de l'exploitation complète ce processus. Autant les objectifs concrets que les méthodes et les objectifs financiers évoluent durant ces étapes successives du développement minéral. Durant ce cheminement, la compagnie junior d'exploration doit, autant que la société minière, justifier l'affectation de fonds additionnels constitués de capital de risque par des résultats d'intérêt croissant suite aux diverses étapes et programmes successifs.

A) L'exploration

Découvrir: Arriver à connaître ce qui était caché ou ignoré.

Dictionnaire Le Petit Robert.

A l'étape de l'exploration, le travail du prospecteur, de l'entrepreneur en exploration est axé sur un potentiel métallogénique à développer et à valoriser. Le succès se mesure par les anomalies, les indices, les gîtes découverts, les gisements développés. A l'étape de l'exploration, toute la dynamique, tous les efforts du prospecteur, du géologue/ingénieur géologue, de l'entrepreneur sont orientés vers le potentiel, vers la découverte à réaliser d'un gîte minéral. L'investissement initial en exploration est un investissement de très haut risque, dans un contexte

d'espérance de gains imprévue (windfall) et souvent dans un contexte très spéculatif. Les travaux sont de caractère extensif, sur des surfaces cibles qui se réduiront, suite aux découvertes, pour finalement se transformer en travaux intensifs de délimitation d'un gisement minéral.

B) La mise en valeur

Une fois la présence du gisement confirmée et ses paramètres établis en première approximation, *l'objectif devient le projet minier à réaliser*. La mise en valeur du gisement est alors caractérisée par des travaux de plus en plus intensifs qui permettent *l'évolution de situations qualitatives vers la quantification croissante* qui sera requise dans le travail du géologue et de l'ingénieur autant que dans celui du financier. Les techniques géostatistiques contribueront à la quantification de l'estimation des ressources et des réserves en établissant le niveau de confiance et la marge d'erreur des estimés résultants. Après la confirmation d'un gisement, l'augmentation des connaissances de géologie et d'ingénierie réduit graduellement le facteur de risque que comportent les investissements additionnels requis pour la mise en valeur du gisement.

C) Faisabilité et décision

Lors de l'étude formelle de faisabilité de la mise en production, toutes les études, dont l'estimation des réserves, doivent être considérées comme faisant partie d'un **bilan des acquis**. Ce bilan vise à établir le niveau de rentabilité et le risque financier attaché à la décision d'exploitation, en s'appuyant sur l'ingénierie de tous les éléments géologiques, miniers, minéralurgiques, environnementaux, ainsi que sur les aspects commerciaux, financiers et même sociaux que comporte un projet donné. A ce moment, la décision de réalisation d'un projet d'exploitation minière implique un investissement dans un projet industriel, dans une perspective de rentabilité.

D) Exploitation

Les problèmes de l'évaluation des gisements se prolongent également au niveau de la mise en production et de l'exploitation de ces gisements. Chaque exploitation développe par l'expérience ses propres méthodes mais la spécificité des gisements, s'ajoutant aux variations dans les définitions et les normes utilisées, empêche souvent d'élargir la portée et l'utilisation de cette expérience. Certains des intervenants semblent parfois oublier que l'exploitation minière se situe dans un contexte industriel et partage la majeure partie des caractéristiques de ce secteur, malgré la spécificité géologique et minière.

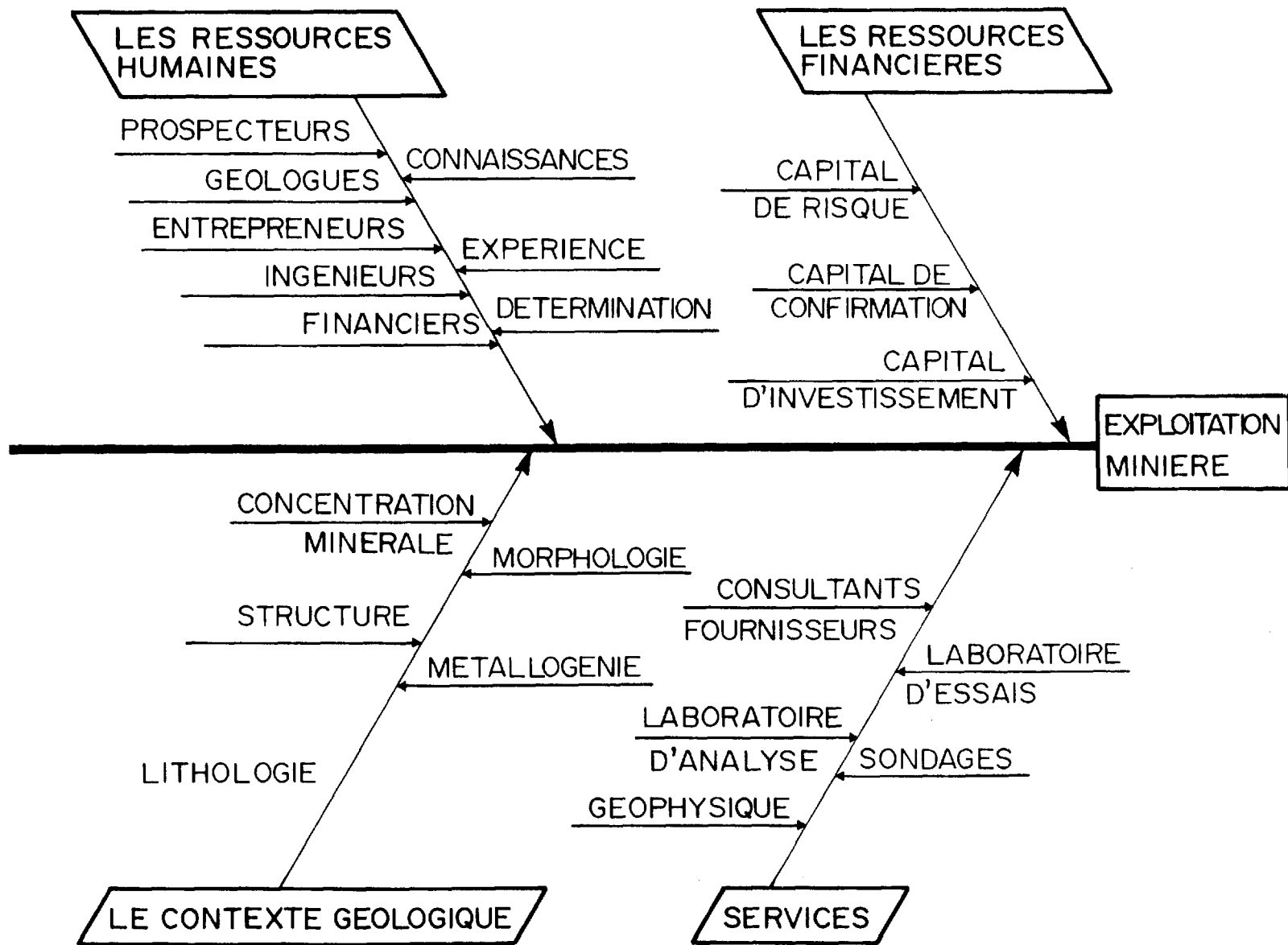


Fig. 20

2.1.2 LES STADES DU DÉVELOPPEMENT MINÉRAL

Les étapes de l'exploration, de la mise en valeur, de la mise en exploitation et l'exploitation des gisements se divisent en stades plus spécifiques, qui s'appuient sur la progression des travaux et des connaissances. Le Guide utilisera le schéma synthétique et linéaire développé par SOQUEM¹, à partir d'un schéma plus sommaire de Kazmitchev, pour décrire ce processus (Figure 2-1). Le processus du développement minéral y est divisé en dix Stades qui sont regroupés en trois étapes ou phases: l'EXPLORATION (Stades 1 à 4), la MISE EN VALEUR (Stades (5 à 8) et l'EXPLOITATION (Stades 9 et 10). Les travaux des Stades 1 à 3 sont de caractère **extensif** tandis que ceux des Stades suivants peuvent être qualifiés d'**intensifs**.

Le schéma que présente le Guide est une version légèrement modifiée de l'échelle SOQUEM. Dans cette nouvelle version, le stade 7 (Faisabilité) est devenu celui des Études économiques et le stade 8 (Décision) est devenu Faisabilité / Décision⁴.

2.1.3 LES AXES DU DÉVELOPPEMENT MINÉRAL

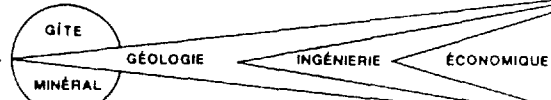
Le processus du développement minéral doit être regardé dans la perspective des axes de connaissance et des axes de référence utilisés dans les diverses classifications. Par exemple, le système des Stades de développement minéral ne comporte qu'un seul axe explicite regroupant les diverses composantes d'un projet de développement minéral pour en caractériser le progrès. Les systèmes traditionnels de classification des réserves n'utilisent qu'un axe mais sans comporter autant de paliers que le système des Stades.

Le système de classification du United States Geological Survey (USGS, 1980²) se caractérise par l'utilisation **explicite** de deux axes de référence, soit l'information géologique et le caractère économique pour la définition des Ressources minérales (Identified Resources). Le Code australien, 1988³, comme le système du USGS, s'appuie sur deux axes, l'axe de la connaissance géologique et l'axe technico-économique.

Le système canadien de classification des ressources et réserves de charbon, Hugues et al., 1988⁴, développe et explicite, sur trois dimensions, la problématique du développement des ressources et des réserves. Les axes utilisés sont l'assurance géologique, l'économique (qui inclut la faisabilité technique) et le besoin et les marchés. En comparaison, dans le système du USGS, dans le système australasien et dans le système canadien proposé par Zwartendyk, 1976⁵, l'axe de la demande et des marchés n'est pas explicité, étant inclus dans l'axe "faisabilité / économique".

⁴ L'étude de faisabilité constitue le stade 7 de l'échelle originale, tandis que le stade 8 est celui de la décision.

		RESSOURCES						RÉSERVES		
		HYPOTHÉTIQUES			IDENTIFIÉES			PROUVÉES ET PROBABLES		
		EXPLORATION				MISE EN VALEUR			AMÉNAGEMENT	
STADE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DESCRIPTION	Reconnaissance régionale	Prospection d'anomalies	Vérification d'indices	Découverte	Délimitation du gîte	Ingénierie du projet	Économique du projet	Faisabilité Décision	Développement minier	Exploitation minière
TECHNIQUES, PROCÉDURES ET MÉTHODES D'ÉVALUATION	Levés aéroportés	Levés terrestres	Levés au sol Sondages Tranchées Jalonnement	Sondages Décapage Échantillonnage préliminaire	Cartographie détaillée et échantillonnage serré par sondage et galeries	Analyse des méthodes d'extraction minières et minéralurgiques. Usine pilote modèle réduit	Pondération des facteurs économiques suivants :	Analyse et synthèse de la rentabilité	Creusement de la fosse ou du puits d'extraction Préparation des chantiers d'abatage Usine de traitement. Infrastructures	MINE Planification Développement Extraction Vente
ÉLÉMENTS D'ÉVALUATION : PARAMÈTRES, FACTEURS À DÉTERMINER. ASPECTS À CONSIDÉRER	Photogéologie. Inventaire géologique et géophysique métallogénique	Géochimie Géophysique Modélisation géologique.	Titres de propriété Contexte géologique et minier Historique Localisation	Estimé par méthodes traditionnelles des teneurs et volumes Dimension de la propriété	Compilation géostatistique des teneurs et volumes Contrôle géologique. Continuité. Uniformité de la minéralisation Facteurs d'erreur.	Dilution, Pertes Recouvrement Échelle d'exploitation optimale. Impact environnement. Infrastructure Main d'œuvre. Géostatistique.	Réserves de minéral. Teneur de coupure Teneur de rentabilité Octroi Plan d'exploitation Investissement Immobilisations Fiscalité. Aspects Légaux, sociaux	Faisabilité complétée Décision en faveur ou contre le développement minier Objectif : Détermination de la valeur escomptée du gisement minier		
MARGE D'ERREUR TENEUR 1)				40 %	30 %	20 %	10 %			
ÉTUDES DE FAISABILITÉ OU D'ORIENTATION										
AXE DE VALORISATION									GISEMENT MINIER	GISEMENT EXPLOITÉ



Référence :
rapport annuel
de Soquem 1974 - 75

Fig. 2.1

**PROCESSUS DE
DÉVELOPPEMENT MINÉRAL**

Le système Exxon (Harrison, 1983⁶), distingue trois axes: la certitude géologique, la récupération (ingénierie) et la certitude économique. Ce système, par l'explicitation de ces trois axes, fournit une grille d'analyse plus approprié. **Le Guide utilisera donc ce système d'axes de référence, comme fil conducteur et grille d'analyse du processus et des travaux de développement minéral aux divers stades. La figure 2-2 explicite graphiquement ce système.**

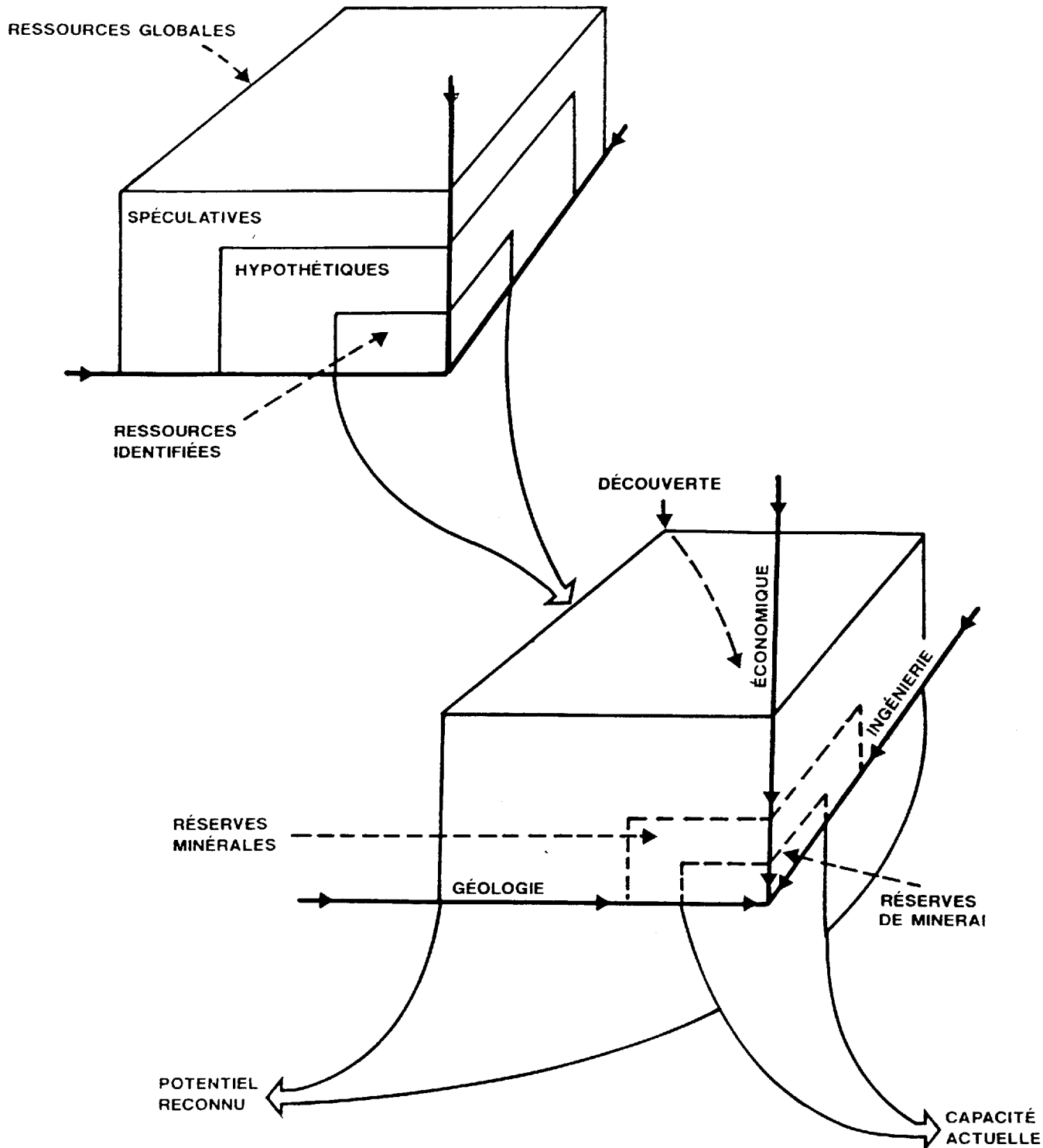
2.2 L'ÉVOLUTION DU DÉVELOPPEMENT MINÉRAL

2.2.1 LE CHEMINEMENT

Le Guide utilise les stades du développement minéral pour situer la perspective du développement et de l'évaluation des gisements dans un mode de connaissance des gisements. Ce processus évolue rapidement, du qualitatif au quantitatif, dans les trois axes de connaissance: l'axe de la géologie, l'axe de l'ingénierie, l'axe de l'économique. Cette connaissance croît et évolue à partir de la découverte au stade 4, jusqu'à la décision au stade 8. Cette quantification se continuera ensuite lors de l'exploitation minière, selon les exigences concrètes et immédiates des réalisations de ce stade.

La progression d'un projet d'un stade à l'autre se fera suite à des évaluations itératives. Les évaluations prendront graduellement la forme, à partir du stade 5, d'études de faisabilité d'abord sommaires et ponctuelles mais dont les paramètres deviendront de plus en plus quantitatifs et détaillés à mesure que progressera le projet. Ces études de faisabilité de caractère préliminaire sont à chaque fois un bilan qui doit justifier la continuation des travaux et la décision d'investir des fonds additionnels dans l'étape suivante.

La FOI de la présence d'un gisement minier, qui guide le prospecteur, le géologue, l'ingénieur et l'entrepreneur, est nécessaire pour motiver et diriger leur action. Elle ne doit pas cependant les aveugler à la nécessité d'établir concrètement, dans une démarche de plus en plus rigoureuse et *quantitative*, les paramètres de la géologie, de l'ingénierie et de l'économique qui sont nécessaires à la réalisation de leur projet. Dans ce domaine, la FOI, pour être fructueuse, doit être renforcée graduellement par la SCIENCE, par l'INGÉNIERIE et par l'ÉCONOMIQUE. La figure 2-0 présente un schéma synthétique des divers éléments humains et techniques que comprend le développement minéral.



INSPIRÉ DE : " A Standardized coal resource /
 reserve reporting system by
 the Coal Association of Canada
 and the Geological Survey
 of Canada "

Fig. 2.2

**ÉVOLUTION DES RESSOURCES
 VERS DES RÉSERVES**

2.2.2 STADE 4: DÉCOUVERTE ET DÉLIMITATION

La découverte d'un gîte minéralisé est un "saut quantique" qui se produit lors de la première intersection minéralisée d'importance. La confirmation de la présence d'un gisement par des échantillonnages et des sondages additionnels complète ce stade clé. C'est à partir de ce moment que surgit la nécessité de définitions et de normes pour la caractérisation des ressources et des réserves minérales. Les travaux de cette étape consistent à confirmer la présence d'un gîte minéralisé et d'en établir, **de façon préliminaire**, la continuité, les limites, les teneurs, le poids spécifique et le volume, donc le tonnage et le contenu métal.

Au stade 4, l'augmentation des connaissances se fait surtout dans l'axe géologique. Dans les deux autres axes, l'augmentation des connaissances est minimale. L'évolution du projet et les décisions se font à partir d'hypothèses de travail et de critères repères pour justifier la confirmation de la présence d'une zone minéralisée d'intérêt technique et commercial éventuel. Le bilan de ce stade sera une étude sommaire pour justifier, à partir des résultats des travaux, la définition du gisement au stade 5.

Les forages, au diamant en général, sont la méthode de travail la plus efficace, autant du point de vue technique que du point de vue monétaire, à ce stade. L'emploi des sondages s'appuiera sur une intégration des connaissances géologiques, géochimiques géophysiques, de façon à optimiser les chances de découverte et les travaux de délimitation des minéralisations et de leurs caractéristiques. Les méthodes géophysiques, particulièrement les levés électromagnétiques (EM) dans les forages tiennent une place croissante dans la découverte et même la délimitation des gisements à grande profondeur.

Les échantillonnages et les forages exécutés au stade 4 sont de nature "préliminaire", car il faut avant de procéder à des échantillonnages très volumineux et coûteux, établir leur à-propos et les conditions de leur optimisation en confirmant, par les méthodes les moins dispendieuses, la présence d'un gisement comportant une plage teneur-tonnage susceptible d'être d'intérêt commercial.

Si par exemple, à cause de la nature pépitique d'une minéralisation d'or, les sondages ne sont pas suffisants pour évaluer la teneur d'un gisement, ils demeurent essentiels pour déterminer la lithologie, la structure et l'étendue de la zone minéralisée et de son enveloppe. Les échantillonnages en vrac ne sont pas, sauf pour des gisements de type placer, appropriés à ce stade. En effet, exécuter de tels travaux pour établir la présence d'un gisement n'est pas approprié. De tels travaux demandent des frais considérables et ne peuvent délimiter une zone minéralisée d'importance, si sa présence et sa continuité n'ont pas été établies par une maille de forages. Pour améliorer l'efficacité, les coûts de l'exploration doivent être maintenus à un palier proportionnel avec le risque encore présent (Vallée, 1989⁷).

Les forages et échantillonnages fournissent une population importante de données analytiques qui permettent, par une première analyse géostatistique, de constater l'effet de pépite et la dispersion des valeurs et de planifier la densité éventuelle et la nature des informations requises. Les estimations de l'étendue, de la forme, de la teneur d'une zone minéralisée au Stade 4 sont de caractère préliminaire, parce qu'appuyées sur des informations distribuées sur une maille large. Ces informations permettent un premier palier de quantification même si les estimés sont encore entachés de beaucoup d'incertitude. C'est à partir de ces résultats que l'entrepreneur pourra justifier la continuation du projet et obtenir les financements requis. *A ce stade, les résultats des estimations de volume/teneur sont tout au plus de caractère probable / indiqué et on ne saurait exprimer qu'une précision globale à la fin du stade 4.*

2.2.3 STADE 5: PROBATION DU GISEMENT

Le Stade 5 comporte la probation détaillée du gisement par des sondages et des échantillonnages systématiques à travers toute son étendue, une fois que l'on a établi au Stade 4 sa présence et la possibilité d'un potentiel d'exploitation commerciale. Par souci d'efficacité, les sondages plus détaillés ne seront entrepris que lorsqu'une continuité aura été établie de façon au moins préliminaire. Des premiers échantillonnages plus volumineux, ou échantillonnages en vrac, peuvent être requis pour confirmer la teneur et la distribution de la minéralisation, en particulier pour des éléments à distribution pépitique comme l'or et l'argent natif ou le platine.

Au stade 5, la probation du gisement s'accroît selon l'axe de la connaissance géologique, par les forages et les échantillonnages. Cette connaissance accrue du gisement permet de débiter la quantification des paramètres dans l'axe technique et permet une première évaluation qualitative, sinon semi-quantitative, selon l'axe du facteur économique.

La densité accrue des informations à ce stade permet en général d'exécuter les premières estimations des volumes et teneurs s'appuyant sur les méthodes géostatistiques. Dans les classifications actuelles, il faut au moins que les estimés des zones minéralisées deviennent de type indiqué / probable sur maille régulière à la fin de ce stade de travail et qu'une partie des minéralisations approche le caractère mesuré / prouvé avec une marge d'erreur plus étroite.

La planification et le contrôle de l'exploitation minière future requièrent l'application des méthodes géologiques (incluant la géophysique), d'ingénierie et d'économique dans un mode quantitatif et systématique. Ces qualités doivent primer, autant dans la collecte d'informations de toute nature que dans les diverses techniques d'échantillonnage et de contrôle reliées à l'extraction, au traitement du minerai et aux autres dossiers. L'à-propos de la prise de décision en dépendra.

2.2.4 STADE 6: INGÉNIERIE DU PROJET

Au stade 6, la quantification des paramètres du projet se poursuit dans les trois axes, dans le but d'établir l'*ingénierie du projet minier*. Dans l'axe géologique, les forages se font selon des mailles plus étroites nécessaires à une première planification de l'exploitation éventuelle et pour assurer la probation des réserves au niveau approprié de certitude. Des échantillonnages en vrac et des essais en usine confirmeront les paramètres de limites, de continuité, de volume, de poids spécifique, de teneur, contenu métal, ainsi que les caractéristiques minières, minéralurgiques et métallurgiques du gisement, en vue de l'étude de faisabilité.

L'augmentation de la densité des mailles d'information, par les sondages et les échantillonnages miniers qui s'ajoutent durant ce stade, permettent d'arriver, à la fin de ce stade, à des inventaires des minéralisations qui seront de caractère **Mesuré / Prouvé** pour au moins une partie et de caractère **Indiqué / Probable** pour la balance.

Dans l'axe ingénierie / faisabilité technique, les études concernant les aspects de caractère minier, minéralurgique ainsi que celles touchant tous les autres aspects du projet, comme la sécurité et la protection de l'environnement, sont des études d'ingénierie de caractère quantitatif auxquelles on attribuera une marge d'erreur pouvant servir dans une étude de sensibilité. Les méthodes sismiques et géoradar sont des outils importants dans la délimitation du mort terrain et la détermination des caractéristiques géomécaniques des massifs rocheux.

Dans l'axe économique, les travaux touchant les marchés et l'évaluation des paramètres économiques se feront plus quantitatifs, en préparation du stade suivant. Dans les trois axes, la quantification de la marge d'erreur des résultats des estimations est essentielle.

2.2.5 STADE 7: ÉTUDES ÉCONOMIQUES

Les prix des métaux et la demande, les investissements requis et les frais qu'ils impliquent ainsi que les coûts d'exploitation déterminent la rentabilité du projet et ils ont une influence directe sur l'établissement des réserves minières. Ces facteurs influencent encore plus directement l'exploitation minière en cours.

L'établissement des inventaires des minéralisations et des réserves minières se fait à partir d'une teneur de rentabilité et d'une teneur de coupure associée, qui sont dérivées de ces facteurs technico-économiques. Les études économiques s'intègrent avec les études de géologie et de génie et sont en rétroaction avec elles, particulièrement pour les critères et les repères reliés aux teneurs: ceux de teneur de coupure, de teneur marginale et de teneur économique, etc. L'évolution subséquente des prix des métaux d'une part, des coûts d'autre part, influencera la teneur coupure qui est un repère essentiel pour l'estimation des réserves de minerai d'un gisement.

L'entrepreneur minier ne contrôle pas les coûts des métaux et des minéraux (ni les taux d'intérêt). Par contre, il peut et doit s'assurer, par une préparation, une conception et une planification appropriées, de contrôler le mieux possible la justesse des estimés des coûts de la réalisation du projet. La réalisation du financement et ensuite l'exécution appropriée des travaux d'aménagement de la mine des étapes essentielles, autant que l'exploitation efficace.

Les aspects économiques d'un projet seront explicités dans les états financiers prévisionnels qui s'appuieront sur les évaluations géologiques et d'ingénierie. Ces états financiers, établis dans une perspective réaliste d'investissement et d'exploitation, permettent d'anticiper la situation financière du projet pendant la période projetée d'exploitation et d'en évaluer la rentabilité. La détermination de la faisabilité et la décision de mise en production du projet minier au stade suivant en dépendent, de même que sa rentabilité éventuelle.

2.2.6 STADE 8: FAISABILITÉ ET DÉCISION

Au stade 8, l'étude de faisabilité constitue le BILAN quantitatif du projet, autant au point de vue géologie, ingénierie, environnement, socio-politique qu'au point de vue financier: le but est d'établir que le projet justifie une décision d'investissement dans un contexte industriel et financier. En tant que BILAN du projet, l'étude de faisabilité doit être axée sur les acquis! Par exemple, les réserves possibles, selon la définition usuelle, n'ont pas de place dans l'étude de faisabilité.

Le Guide a déjà souligné que l'étude de faisabilité du Stade 8 devra avoir été précédée et planifiée par des études plus succinctes (ou études de pré-faisabilité) qui font le point sur l'état actuel du dossier et permettent de planifier les travaux et les essais nécessaires pour atteindre l'étude formelle du Stade 8. L'étude de faisabilité du Stade 8 doit être faite dans un contexte strict d'ingénierie et d'économique. Elle constitue à la fois le bilan du projet tel que réalisé à date et la proposition formelle d'un développement minier rentable.

La décision de mise en production qui complétera le stade 8 constituera un autre "saut quantique" et confirmera le "gisement minier". Il arrive souvent que l'entrepreneur minier n'ait pas tenu compte de l'évolution des objectifs et des méthodes en progressant du stade 4 de la découverte au stade 8 de la faisabilité, ni de la quantification croissante requise des travaux de mise en valeur, ni de l'évolution des objectifs financiers. En effet, l'exploration et les travaux du stade 4, la découverte, s'appuient sur un investissement spéculatif de capital de risque, provenant par exemple d'actions accréditives (où une partie importante du risque est assumée par l'État), tandis qu'au stade 8, l'étude de faisabilité a pour but d'établir si le projet de développement est devenu un projet industriel, justifiant une décision d'investissement de capital dont la rentabilité est assurée.

2.2.7 STADE 9 - AMÉNAGEMENT

Il est nécessaire de continuer l'acquisition de l'information géologique durant la phase d'aménagement de la mine, pour assurer l'efficacité de l'exploitation du gisement (Grimley, 1986⁸). Cette phase à venir de l'exploitation demandera en effet des informations plus détaillées que les phases d'évaluation et de planification qui l'ont précédée.

2.2.8 STADE 10 - EXPLOITATION

Une fois l'exploitation engagée, les perspectives quant à l'évaluation du gisement et l'estimation des réserves se modifient graduellement. Il faut garder à l'esprit les objectifs parallèles que doit poursuivre l'équipe géologique, du court terme au long terme. En effet, lors de l'exploitation, les activités du géologue/ingénieur géologue peuvent se situer sur quatre paliers différents: le contrôle de la production, la mise en valeur et la définition des gisements et des zones déjà connus, la découverte de nouveaux gisements à partir des gisements, des gîtes et des indices connus et finalement l'exploration dans des secteurs encore vierges. Ces activités se recoupent et se chevauchent assez souvent dans la pratique (Lafleur, 1989⁹, Vallée, 1986,¹⁰).

Lors de l'exploitation, les perspectives changent du point de vue de l'ingénierie et de la planification. Le travail de planification systématique que nécessitent l'étude de faisabilité et la décision de mise en production doit s'accroître pour rencontrer les besoins de l'exploitation minière. Ces activités amènent une phase de rétroaction en accroissant la base d'information sous tous ses aspects. Il faut toujours garder bien distinctes à tous les stades les différences fondamentales entre les dimensions et la richesse anticipées du gisement et le niveau actuel de probation géologique. Il faut distinguer aussi entre les connaissances géologiques sur le gisement et le niveau d'ingénierie et planification du projet minier. Il faut distinguer entre la connaissance de géologie, d'ingénierie et d'économie et, d'autre part, le niveau de développement de la mine, l'accessibilité des gisements et des zones qui la constituent.

La figure 2-3, à la fin du texte présente une perspective intégrée de la démarche du Guide dans les divers domaines et disciplines. On pourra y référer tout en parcourant l'un ou l'autre des chapitres du Guide.

2.3 CARACTÉRISTIQUES DES CLASSIFICATIONS _____

La classification des réserves et des ressources doit répondre aux exigences du processus de développement minéral que le Guide vient de décrire. Le but des systèmes de classification des réserves et des ressources est de caractériser le bilan de l'actif minéral sur lequel s'appuie le projet de développement en cours, la mise en production projetée, l'exploitation minière déjà engagée, pour en faciliter l'évaluation.

Le Tome III du Guide, Classification des réserves et des ressources, présente une revue et une analyse critique détaillées des principales définitions et classifications utilisées ou proposées dans les contextes miniers nord-américain et australasien. Le Guide y fait ressortir les éléments essentiels, les apports et, s'il y a lieu, les lacunes et les contradictions de ces schémas, pour finalement en dégager une synthèse plus appropriée aux besoins.

Tout d'abord, on observe la transition au début du siècle, à partir d'une classification antérieure du **minerai**, axée sur des critères concrets, mais d'application très subjective, vers le système proposé par Hoover en 1909¹¹ et comprenant des classes actuelles de prouvé, probable, possible. On constate l'évolution, depuis cette époque, vers des systèmes qui mettent l'accent sur le mot **réserve** plutôt que de **minerai**, qui définissent des axes de connaissance et qui aussi expriment l'intention de quantifier la précision ou la marge d'erreur des estimés, sans bien y arriver cependant.

Il y a lieu, avant de proposer une classification révisée, de décrire comment les conditions et les besoins d'inventaire minéral diffèrent à l'étape de la mise en valeur, à l'étape de la faisabilité, de la décision et lors de l'exploitation. Ceci permettra d'intégrer les éléments pertinents des systèmes existants dans un système d'inventaire minéral plus pertinent, plus cohérent et plus fonctionnel.

2.3.1 EXPLORATION ET MISE EN VALEUR

A l'intérieur d'une organisation minière, le processus de gestion de l'exploration et de financement des nouvelles phases des projets s'accomplit dans un contexte technique, à partir de budgets internes. Par contre, pour les compagnies juniors, la gestion de l'exploration minérale dans un contexte de financement public est beaucoup plus complexe. Outre l'aspect technique, l'entrepreneur et le promoteur en exploration minière doivent valoriser et vendre un produit à un public investisseur non initié, pour assurer le financement de l'exploration et de la mise en valeur des découvertes. Dans ce dernier contexte, l'évolution d'un projet d'exploration vers un projet de mise en valeur et ensuite de mise en production est caractérisée par le chevauchement des situations de promotion et de développement avec les situations d'ingénierie et d'investissement.

L'emphase mise, dans les classifications actuelles des organismes de réglementation, sur l'utilisation du terme réserve aux stades de la faisabilité et de l'exploitation laisse aux stades antérieurs un vacuum terminologique qui empêche de caractériser de façon appropriée les premiers résultats de la valorisation d'un gisement. D'autre part, le schéma du US Geological Survey s'adapte facilement aux besoins d'inventaire des organismes gouvernementaux mais ne fournit pas suffisamment de critères concrets pour son application aux conditions et aux besoins très diversifiés de l'industrie.

Il faut donc que l'entrepreneur minier qui dépend du public pour financer ses activités, ait à sa disposition un système et un vocabulaire appropriés pour présenter à ce public les résultats des travaux d'exploration et de mise en valeur, même si les circonstances ne permettent pas la même rigueur qu'aux stades de la faisabilité et de l'exploitation. La classification proposée devra permettre de bien caractériser les résultats de la délimitation et de la mise en valeur des découvertes.

2.3.2 ÉTUDE DE FAISABILITÉ

Il ressort du paragraphe précédent et de l'analyse du Guide au Tome III que les réglementations actuelles des Commissions des valeurs mobilières quant aux définitions et à la classification des réserves ont été conçues surtout pour les cas de sociétés de développement minéral qui sont au stade de l'étude de faisabilité et de la décision de mise en production. Ces réglementations peuvent également convenir aux sociétés minières qui envisagent des financements publics ou des transactions qui impliquent des actions émises dans le public; c'est particulièrement le cas pour les règlements du Security and Exchange Commission des USA (SEC). Cependant, ces classifications ne sont pas assez détaillées ni assez spécifiques pour permettre des inventaires appropriés et quantifiés des minéralisations sur lesquelles s'appuie le projet minier.

2.3.3 EXPLOITATION MINIÈRE

Un système approprié de classification des réserves doit aussi viser à répondre aux conditions d'exploitation des sociétés minières et servir à la gestion des **réserves** de ces sociétés. Les classifications actuelles présentent plusieurs lacunes par rapport à ces objectifs.

Dans une exploitation minière, les conditions économiques affectent directement, par le biais des variations des prix des métaux/minéraux et des variations du coût de revient du minéral, la teneur de coupure, donc la composition des réserves **rentables**. La portion des réserves "temporairement" non rentables demeure aussi bien connue⁵, aussi accessible que celle qui est exploitée et elle est souvent susceptible de redevenir exploitable économiquement à court ou moyen terme. Ces catégories de matériel ne doivent pas disparaître dans les "limbes" pour renaître à la prochaine hausse des prix, car ces réserves marginales demeurent un élément de la planification minière et corporative. Les systèmes actuels sont insatisfaisants, faute de catégories et de classes en nombre suffisant, pour fournir un inventaire suffisamment détaillé et nuancé des réserves et gisements minéralisés d'une exploitation minière pour répondre aux besoins décrits. La planification des activités des sociétés minières en est affectée, car **plusieurs exploitations minières n'ont pas à leur disposition un inventaire adéquat de leur principal actif.**

⁵ Autant dans l'axe géologique que dans l'axe ingénierie et dans l'axe économique. Il faut donc distinguer entre la rentabilité marginale établie à partir de connaissances appropriées et les carences de connaissance qui caractérisent les stades antérieurs.

Le chapitre 7 du présent Tome suggère des normes pour l'inventaire et la classification des réserves minières et des gisements, tandis que le système développé par le Guide sera présenté au chapitre 3 du Tome III.

CHAPITRE III

LES LIMITES DE L'ÉVALUATION

DES GISEMENTS

3. LES LIMITES DE L'ÉVALUATION DES GISEMENTS	27
3.1 LE PROCESSUS D'ÉVALUATION	27
3.2 LA NATURE DES LIMITES	28
3.3 LES CAUSES D'ERREURS	32
3.3.1 LES CAUSES D'ERREURS "GÉOLOGIQUES"	32
3.3.2 LES CAUSES D'ERREUR: INGÉNIERIE ET RÉALISATION	34
3.3.3 LES CAUSES D'ERREURS: L'ÉCONOMIQUE	35
3.4 L'EFFICACITÉ DE L'INDUSTRIE	36
3.4.1 LE CONTEXTE DES ACTIONS ACCRÉDITIVES	36
3.4.2 LES CAUSES PLUS PROFONDES	37
3.4.3 UN CONSTAT QUANTITATIF	38
3.5 LA RECHERCHE DE LA QUALITÉ	39

3. LES LIMITES DE L'ÉVALUATION DES GISEMENTS

"..La mine ABC a établi des réserves prouvées de 175,662 tonnes à 0.17 oz/t Au... , des réserves probables de 168,005 tonnes à 0.18 oz/t Au... et des réserves potentielles de 513,887 tonnes à 0.19 oz/t Au...

Avec une production de 450 tonnes par jour (~ 150,000 tonnes par an) "Nous avons des réserves pour fonctionner pendant au moins six ans et l'histoire des mines de la région nous incite à croire que nous pourrions facilement doubler la vie de la mine..." a ajouté le représentant de la compagnie XYZ."

Finance, le 21 avril 1986.

"Neuf mois après son inauguration officielle, Mines XYZ a décidé de suspendre temporairement la production à sa mine ABC...Même au prix actuel de l'or, la faible teneur du minerai ne permet pas une exploitation rentable du gisement..

..Du 1^{er} novembre 1987 au 31 mars 1988, la teneur en or récupéré de 22,000 tonnes de minerai a été de 0.097 oz/t.. ...

..Dans le milieu minier de l'Abitibi, on s'interroge sur la pertinence de la mise en production de cette mine et sur l'investissement de 35 millions \$ qui aura finalement permis de se rendre compte que le gisement ABC n'était pas une mine.."

Finance, le 16 mai 1988.

Le présent chapitre circonscrit les limitations du processus d'évaluation des gisements en décrivant les erreurs qui lui sont inhérentes.

3.1 LE PROCESSUS D'ÉVALUATION

La démarche du Guide d'évaluation des gisements d'or s'est articulée autour d'une perspective des modes de travail et des objectifs du processus de développement minéral aux divers stades du développement, dans les axes de la géologie, de l'ingénierie et de l'économique (figure 2-3, en fin de texte). Cette analyse fait ressortir les caractéristiques du processus de développement minéral. Ce sont la quantification croissante des connaissances, le caractère itératif des travaux, le contexte probabiliste du processus de l'évaluation d'un gisement minéral et l'aspect multidisciplinaire des travaux et des intervenants, une fois que la présence et les principales caractéristiques du gisement minéral ont été confirmées (figure 3-1).

La quantification des connaissances requiert des procédures de vérification et la présentation du niveau de confiance et de la marge d'erreur des résultats des estimations ou "estimés". En corollaire à la quantification, le caractère itératif des travaux de développement minéral est

imposé par la nécessité de procéder à des phases de travail complétées par des études synthèses dont les résultats doivent justifier les travaux et les investissements requis pour s'engager dans le stade suivant.

3.2 LA NATURE DES LIMITES

Le caractère probabiliste de l'évaluation des gisements vient du fait que chaque étape de l'évaluation quantitative et chaque étape de l'exploitation contribuent à une erreur soit d'estimation, soit de réalisation. La connaissance exacte de ces erreurs est souvent difficile, parfois impossible, dans le contexte géologique et minier. En effet, à tous les stades du développement minéral, on observe des divergences entre les prédictions des estimations de la phase précédente et les résultats des travaux en cours. Ces divergences sont de la nature même de ce processus, mais elles peuvent être réduites par une analyse rigoureuse, ce qui permet de réduire les implications économiques de ces situations sur les investissements requis pour la mise en production autant que les effets sur la rentabilité de l'exploitation.

Ce contexte probabiliste implique que les chiffres que nous utilisons sont, pour la majorité des estimés. En effet, la plupart du temps, nous ne savons pas avec certitude les teneurs vraies extraites d'un chantier, d'une zone minéralisée ou même, dans plusieurs cas, la teneur vraie de l'alimentation de l'usine. Le Guide reprend en les adaptant et en les intégrant, les analyses de cette problématique qui ont été présentées dans les articles de Elbrond, 1986¹², de Grace, 1986¹³, de Vallée, Belisle et David¹⁴ (1976) et de Gilfillan¹⁵, 1986.

La démarche de Elbrond est illustrée dans un diagramme schématique (Figure 3-2). A partir d'un gisement réel mais incomplètement connu et délimité, toutes les étapes de connaissance, de modélisation (interprétation ou estimation), la décision sur la teneur coupure, la conception de l'exploitation, l'extraction minière et métallurgique entraînent des pertes. En parallèle, la dilution ajoute du matériel stérile et réduit la récupération effective du minerai dans la mine, réduit la quantité de métal récupérée dans l'usine et affecte le rendement économique. Finalement, le concentré produit par le concentrateur et le métal produit par la raffinerie sont des portions encore plus réduites du matériel contenu dans le gisement "réel". Ces considérations font ressortir les possibilités d'optimisation dans le champ de l'estimation des réserves et du contrôle géologique, du rendement minier et minéralurgique. La Figure 3-3 présente, dans cette perspective, un diagramme d'interrelations entre les diverses étapes et les axes de connaissance, de perte de minéralisation et de dilution du minerai.

STADE OBSERVATION	4	5	6	7	8	9	10
	DÉCOUVERTE DU GITE	DÉFINITION DU GISEMENT	INGENIÉRIE D'EXTRACTION	ÉTUDES ÉCONOMIQUE	FAISABILITÉ DÉCISION	AMÉNAGEMENT	EXPLOITATION
GÉOLOGIE	—————						
Sondages / Échantillonnages	—————						
Vracs / Pilotes		—————					
GÉOSTATISTIQUE	—————						
INGENIÉRIE	—————						
ENVIRONNEMENT	—————						
ÉCONOMIQUE	—————						
Marchés Financement				—————			
FAISABILITÉ	—————						

— — — Mode qualitatif

————— Mode quantitatif

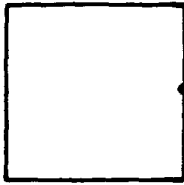
Fig. 3.1

**COMPOSANTES DU
DÉVELOPPEMENT MINÉRAL**

AXE

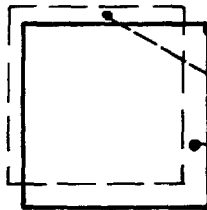
STADES 0 à 3

1.



Le gisement réel mais indéterminé

2.



L'estimation

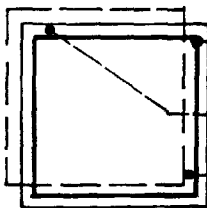
La perte

La dilution

GEOLOGIQUE

STADES 4 à 6

3.



Après la teneur de coupure

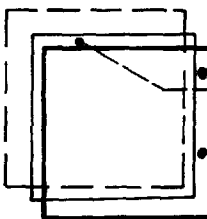
La perte

La dilution

ÉCONOMIQUE

STADE 7

4.



La réserve de minerai

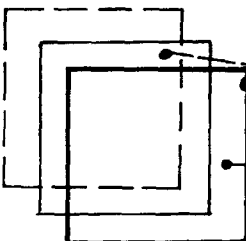
Minéralisation non extraite

Dilution du design

INGÉNIERIE

STADE 8

5.



Minerai extrait

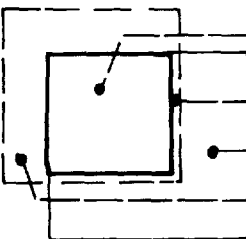
Minerai perdu

Dilution extraite

EXPLOITATION
MINIÈRE

STADE 10

6.



Portion du gisement récupérée

Perdu dans les rejets

Dilution usinée

Perte totale

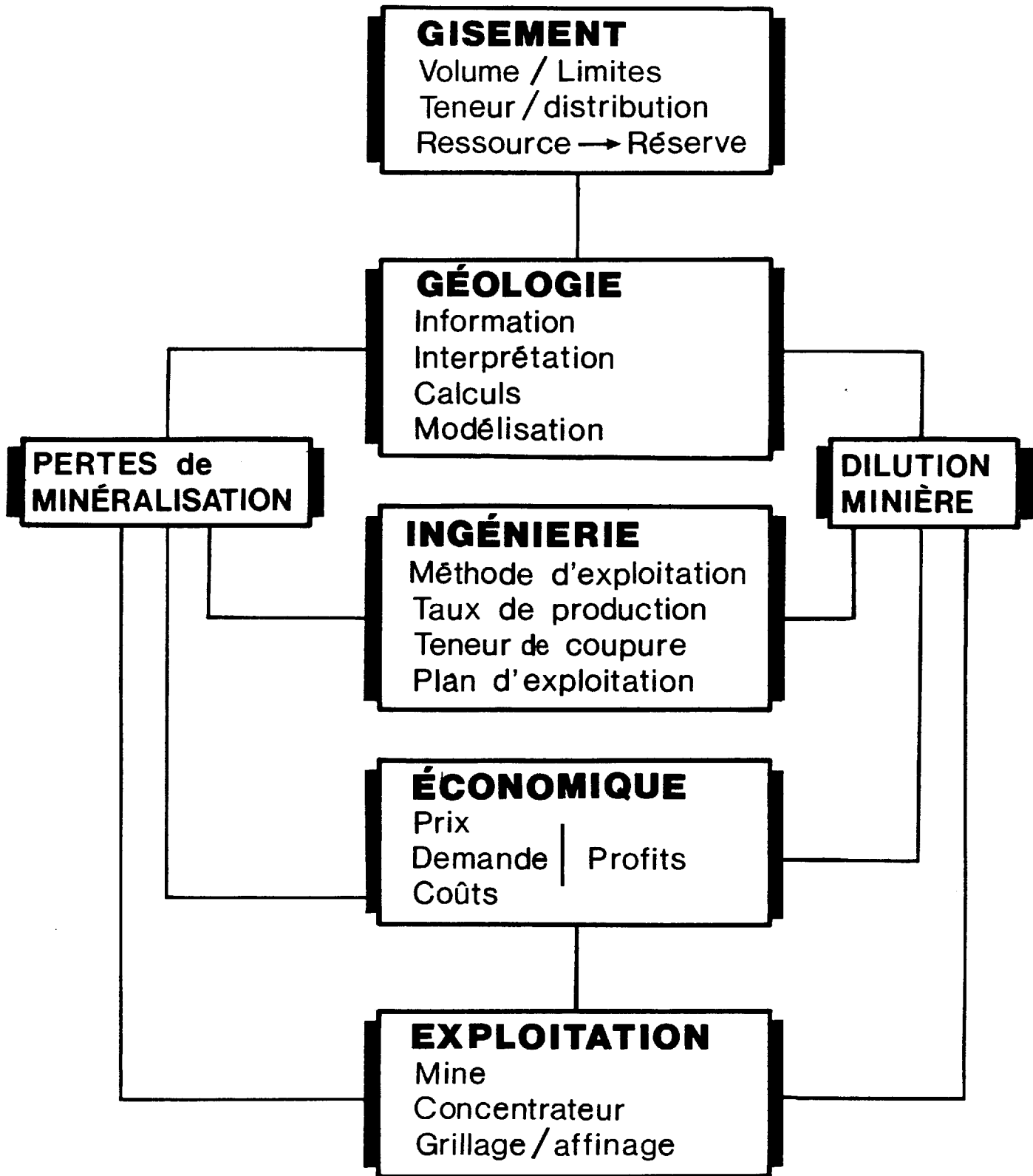
EXPLOITATION
MINÉRALURGIQUE

STADE 10

D'après: ELBROND 1986

Fig.3.2

PERTES ET DILUTION
DANS L'EXPLOITATION



Inspiré de : ELBROND 1986

Fig. 3.3

3.3 LES CAUSES D'ERREURS

Les causes d'erreur dans l'évaluation des gisements sont multiples et l'énumération qui suit ne prétend pas être exhaustive.

3.3.1 LES CAUSES D'ERREURS "GÉOLOGIQUES"

A) Géologie: interprétation versus réalité

Les différences entre la géologie et la minéralisation, telles qu'interprétées par le géologue/ingénieur géologue et la situation réelle du gisement sont une cause d'erreur dans l'évaluation des gisements. Ces différences sont d'une part reliées à la morphologie du gisement évalué: la dimension la forme et la variabilité des limites extérieures. Elles sont, d'autre part, reliées au mode de distribution de la minéralisation d'intérêt dans la masse définie par le géologue. Ce sont, en particulier, les effets de stratification et de litage, le contrôle structural et l'effet de pépite pour l'or.

B) Échantillonnage du gisement

La connaissance du gisement dépend de la densité de la maille d'échantillonnage, de la nature et du volume des échantillons prélevés et des analyses et essais auxquels ils ont été soumis. La variabilité des conditions géologiques ne permet pas de se reposer sur des règles arbitraires: il faudra donc voir comment adapter les méthodes et les mailles d'information aux conditions spécifiques de chaque gisement.

Par exemple, la dimension de maille de sondage requise dans un gisement, pour définir la minéralisation suffisamment pour la qualifier de mesurée ou prouvée, n'amènerait un autre gisement, de géologie plus variable ou de distribution plus pépétique du (ou des) minéral d'intérêt, qu'à la catégorie probable. Les problèmes d'évaluation des gisements d'or sont accrus quand ce sont des gisements de type veine, de petites dimensions et qui montrent plus de variabilité physique, en plus de l'effet de pépite.

C) Procédures analytiques

L'évaluation des gisements dépend essentiellement des valeurs analytiques. Trop souvent on ne se préoccupe pas de la marge d'erreur des résultats par rapport à la valeur probable du volume de départ (la vraie valeur est à peu près impossible à connaître), que ce volume soit un échantillon en vrac, une quantité usinée, une carotte, ou un échantillon provenant d'un panneau ou d'un rainurage.

C'est une partie importante du travail du géologue ingénieur/géologue de s'interroger sur la véracité des résultats analytiques qui lui sont fournis. Plus particulièrement il doit vérifier si les procédures pour réduire l'échantillon et préparer une portion pour analyse sont appropriées à la dimension et à la distribution des minéraux et des particules d'intérêt. Il doit également s'interroger sur les procédures et méthodes analytiques utilisées. Le chapitre 6 du Guide traite de ces questions.

D) Poids spécifique

La variation de la quantité de métal contenu dans un volume donné est reliée au poids spécifique du minerai. Cette caractéristique d'une roche variera selon la lithologie et selon le contenu en minéraux métalliques plus lourds que la roche mère, telle la pyrite, la magnétite, etc.. Ce facteur pourrait ainsi fausser les estimés du métal contenu dans un volume donné par un facteur qui peut varier de 5 à 50%. Ce sujet sera traité en détail dans le chapitre 4.

E) Inventaires des gisements

Les estimés des réserves des gisements sont des variables qui dépendent de paramètres géologiques (et géostatistiques), d'ingénierie et d'économique. Ces variables changent de gisement en gisement et elles varieront également dans le temps. L'étude de ces problèmes recoupe l'ensemble des chapitres 5 à 10 et particulièrement les chapitres 7 et 10.

Malgré l'efficacité des méthodes géostatistiques, peu de géologues/ingénieurs géologues accepteraient aveuglément le niveau de confiance et la marge d'erreur des résultats d'une estimation géostatistique sans connaître le contexte géologique et la maille de sondages / échantillonnages qui supportent cet estimé (chapitres 4, 5, 6 et 7 du Guide).

a) Normes et repères

Les hypothèses de travail, les paramètres et repères utilisés varient habituellement de gisement en gisement. Ils varient également selon les perspectives et les préférences des responsables. Comment peut-on évaluer ou réviser des évaluations de gisements si l'on ne connaît pas les hypothèses de travail et les repères utilisés: teneur(s) de coupure dimensions de mailles, longueurs des échantillons, méthodes analytiques, etc? Il en va de même pour les méthodes de travail et de calcul, les méthodes d'exploitation minière et minéralurgique envisagées ou utilisées, la provenance et la nature des échantillons usinés, etc. L'étude de cette problématique recoupe presque tous les chapitres du Guide.

b) Portée des estimés

"XYZ A << SURESTIMÉ >> LA TENEUR DE SES RÉSERVES. La teneur est passée de 0,175 à 0.125 on/t Au"... FINANCE, 1 /7/1985.

Autant l'administrateur que le professionnel qui exécute le travail doit réaliser les caractéristiques des ESTIMÉS sur lesquels s'appuient ses décisions, qui ne sont pas des chiffres exacts et dont la marge d'erreur doit être établie. Quelle que soit la méthode d'estimation, une erreur est engendrée quand la teneur d'échantillons linéaires est appliquée au volume, chantier, lentille ou gisement dont nous les considérons représentatifs. Les méthodes de krigeage ont été développées pour minimiser (sans pouvoir l'éliminer) cette erreur en prenant en compte l'influence des échantillons autour d'un volume donné (Matheron¹⁶, 1963 et David¹⁷, 1982). Le chapitre 7 est consacré plus particulièrement à ces problèmes géostatistiques, tandis que les chapitres 4 et 5 traitent des aspects géologiques et de l'échantillonnage des gisements d'or.

3.3.2 LES CAUSES D'ERREUR: INGÉNIERIE ET RÉALISATION

"POURQUOI UNE MISE EN PRODUCTION ANTICIPÉE?

WXYZ: LE DÉVELOPPEMENT DE LA MINE ÉTAIT INSUFFISANT.

C'est le développement insuffisant des galeries de la vieille mine d'or ABCD qui a forcé WXYZ à cesser ses opérations, cinq mois seulement après une mise en production qui s'est faite en grande pompe."

FINANCE, le 14/1/85

A) Les facteurs miniers

Dans le contexte variable des gisements, il faut s'interroger sur les causes du rendement de l'extraction minière. Quelle est l'influence de la méthode d'extraction, du taux d'extraction et de la forme des chantiers en relation avec la forme, les limites de la lentille minéralisée et/ou du gisement? Peut-on identifier l'effet des diverses conditions et contraintes sur la sélectivité possible et les contrôles applicables à l'extraction: la méthode choisie permet-elle le suivi requis pour tenir compte des variations locales des limites de la minéralisation et minimiser la dilution et les pertes? Le chapitre 8 sur les aspects miniers analyse ces problèmes qui dépendent également des sujets discutés aux chapitres 4 à 7.

B) Les pertes et la dilution

Dans la pratique minière, la **dilution** au sens large comprend à la fois les pertes, l'apport de stérile au matériel exploité et toutes les erreurs de diverse nature, autant d'échantillonnage que d'estimation ou de réalisation. Une telle définition synthétique permet de simplifier l'étude mathématique du rendement global, mais elle est un obstacle majeur à

l'optimisation des diverses étapes d'évaluation et d'exploitation des gisements. Trop souvent on ne fait pas la distinction essentielle entre pertes et dilution. Le chapitre 8 sur les aspects miniers s'attache à la dilution au sens strict, tandis que les chapitres 4 à 9 touchent les divers aspects de la dilution au sens large.

C) La minéralurgie

L'efficacité de l'extraction du métal dépend d'abord des caractéristiques du minerai et du procédé de concentration choisi et de son application dans une usine donnée. Souvent le rendement de l'usine est relié à la minéralogie du gisement (nature des minéraux, granulométrie, associations). Les altérations de diverses natures sont une cause fréquente de problèmes. Trop souvent cependant, les travaux de valorisation n'ont pas prêté suffisamment d'attention à la nature de ces variations ni aux effets de zonage. Des programmes déficients d'échantillonnage et d'essais, ou des lacunes dans la réalisation ou la surveillance des essais ont des effets directs sur le rendement des procédés. Plusieurs exploitations ont rencontré des problèmes imprévus et ont soit subi des pertes, soit fait faillite suite à de telles situations.

A l'exploitation, en l'absence de mesures de contrôle systématique de la masse, de la teneur de l'alimentation, du concentré et du rejet, il sera plus difficile d'optimiser le rendement, d'établir un bilan métal réaliste qui soit un outil de gestion et de surveillance et qui permette une rétroaction avec l'extraction minière du gisement. Ces divers facteurs et leurs influences sont analysés dans le chapitre 9.

a) Les pertes occultes

Les pertes occultes touchent à la minéralurgie mais il est justifié d'en discuter séparément. Ce terme de pertes occultes, que l'on pourrait également qualifier de "piraterie" ou de vol, est une initiative souvent individuelle qui, de par sa nature, est peu documentée. Cette pratique peut prendre place plus particulièrement dans les exploitations d'or, d'argent, de platine, de diamant et est favorisée par la distribution pépitique de ces éléments et peut affecter la récupération réelle des exploitations. Le chapitre 9 décrit certains de ces problèmes et suggère des mesures de contrôle de caractère quantitatif et de caractère objectif.

3.3.3 LES CAUSES D'ERREURS: L'ÉCONOMIQUE

Le travail des professionnels géologues/ingénieurs géologues et ingénieurs miniers est relié directement aux facteurs économiques par le biais de la teneur de coupure, de diverses teneurs coupures en fait, selon les étapes de l'exploitation. L'administrateur est placé face à une perspective encore plus complexe. Citons, parmi les facteurs économiques affectant l'évaluation des gisements, les coûts des investissements, les coûts d'exploitation, les prix des métaux sur les marchés, la demande pour les métaux produits.

La variation et les incertitudes des facteurs économiques sont par conséquent une cause majeure d'incertitude et même d'erreur dans l'établissement des réserves de minerai et dans l'évaluation de tous les gisements, non seulement des gisements d'or. Ces facteurs sont l'objet du chapitre 10.

3.4 L'EFFICACITÉ DE L'INDUSTRIE

Les limites à l'estimation des gisements et les causes d'erreur décrites restreignent évidemment l'efficacité des intervenants en développement minéral. Cependant, l'efficacité de l'industrie est souvent moindre que les conditions le permettraient dans ce contexte, pour diverses causes. L'analyse de ces causes pourrait aider, en améliorant l'efficacité de l'industrie, à accroître le rendement de l'exploration pour l'investisseur et ainsi faciliter le financement de ces activités de haut risque.

3.4.1 LE CONTEXTE DES ACTIONS ACCRÉDITIVES

Durant les années 1983-1988, le financement de l'exploration minérale a été très actif suite au système d'émission d'actions accréditatives qui étaient l'objet de fortes déductions fiscales. Dans ce contexte, l'évaluation des gisements d'or a été la cause de grandes difficultés pour nombre de compagnies, malgré des succès notables. Le Guide ne veut pas minimiser les réalisations importantes associées à ces financements, mais recherche les causes des difficultés rencontrées.

Le Northern Miner Magazine de juin 1989 fait une revue de la performance des projets de mise en valeur et des mises en production des cinq dernières années (Knoll¹⁸, 1989). Une conférence était présentée au congrès 90 de l'ICM sur ce même sujet (Clow¹⁹, 1990). L'article de Knoll rapporte que, pour quinze mises en production qui fonctionnaient bien au moment de la rédaction de ce texte, on comptait 5 fermetures de nouvelles exploitations après quelques mois de "production", 6 exploitations laborieuses qui fonctionnaient en deçà des prévisions et 7 projets qui ont fermé en cours de route. Avec quelques mois de recul, la liste des opérations abandonnées ou en difficulté s'est allongée. Selon Clow, des 25 projets miniers observés de façon suivie durant cette période, seulement 3 sont des succès commerciaux qui rencontrent les attentes des responsables.

L'article de Knoll s'efforce, à partir de commentaires du milieu de faire ressortir les divers éléments et causes déterminants de cette piètre performance. Les éléments suivants sont reliés directement au contexte des actions accréditatives:

- une hâte induite dans les travaux et les décisions:
 - . courts délais des financements et de la période des dépenses,
 - . fortes pressions des milieux financiers pour des études positives de faisabilité (bankable feasibility study), des décisions rapides de mises en production;
- des conditions de financement trop faciles qui privilégient l'importance des montants dépensés plutôt que l'obtention de résultats.

3.4.2 LES CAUSES PLUS PROFONDES

La conférence de Clow élargit la problématique. Clow reconnaît l'influence du contexte des actions accréditives dans la piètre performance constatée mais attribue ces faiblesses à des causes plus profondes que ces conditions artificielles de financement⁶. Selon Clow, les causes profondes des échecs rencontrés dans la mise en valeur et la mise en production des gisements d'or sont les **faiblesses techniques déjà présentes dans l'industrie**. Les résultats les plus fréquents en sont la surestimation de la teneur qui peut être amenée au concentrateur et la surestimation de la productivité du gisement et du système minier qui y peut être implanté. Ces résultats dépendent, selon Clow et Knoll:

- des lacunes dans l'expérience des problèmes de la mise en valeur et de la mise en production chez plusieurs organisations d'exploration;
- des lacunes des études de géologie, d'ingénierie et d'économique:
 - . informations incomplètes et insuffisantes;
 - . estimations trop optimistes des teneurs et tonnages des gisements;
 - . application de modèles informatisés et de programmes non appropriés à la situation sous étude, sans s'appuyer sur les techniques traditionnelles d'interprétation;
 - . estimations sommaires et optimistes des coûts des investissements et des coûts d'exploitation à partir d'exploitations existantes;
 - . estimations trop optimistes de la productivité prévue, sans tenir compte des conditions différentes ni de la période d'apprentissage requise dans une nouvelle exploitation;

⁶ "We believe technical weaknesses within certain sectors of our industry were the prime cause of most of the disappointing results and that the artificial time constraints merely exacerbated these problems.
... Why were so many people wrong so often?...The answer.. can be reduced to two items:
Lower mill head grade than expected, lower productivity than expected...(Clow, 1990).

- des pressions indues sur les consultants pour des études justifiant des décisions déjà prises de mise en exploitation ⁷.

Grace (1986) soulignait que les deux principales causes d'insuccès dans les nouveaux projets d'exploitation minière sont, d'une part, la trop faible teneur du matériel extrait de la mine (et de l'usine) par rapport aux prédictions et, d'autre part, l'incapacité de la mine (et/ou de l'usine) de produire le tonnage et/ou la qualité qui a (ont) été planifié(s) et budgété(s). On oublie trop souvent de la différence entre ressource minérale en place et réserve. Le terme réserve implique que tous les paramètres techniques et économiques reliés au gisement et à son exploitation ont été établis avec la certitude requise pour garantir les résultats escomptés.

3.4.3 UN CONSTAT QUANTITATIF

La majorité des études du rendement et de la performance de l'industrie minière n'ont pas en général l'approche nécessaire pour répondre aux problèmes cités, malgré d'autres mérites. On se préoccupe généralement du rendement financier global de l'industrie ou d'un secteur, mais sans traiter des aspects spécifiques des réussites et des échecs individuels. C'est le cas par exemple de l'étude de Mackenzie, Bilodeau et Dogget²⁰, (1988) sur l'exploration faite en Ontario pour la période 1946 à 1985. Il y a relativement peu d'études disponibles sur le rendement de l'industrie en fonction de la dimension et de la nature des gisements. Ces sujets, par leur ampleur, dépassent largement le cadre du Guide.

Grenier, 1964²¹, a compilé, à partir des statistiques de l'industrie de 1950 à 1961 au Québec des chiffres sur les caractéristiques des gisements (or et métaux usuels) mis en exploitation durant cette période. Les chiffres et les commentaires font ressortir que la réussite du projet est reliée directement à la dimension et à la teneur du gisement:

"In the case of the base metal mines, 92 % of the unsuccessful operations had less than one million tons in pre-production reserves... 72% of the successful producers had known ore reserves of more than one million tons of ore at the beginning of their operation..

The value per ton of the pre-production reserves of the successful mines was better than 14\$, and in the case of the unsuccessful mines and known unmineable deposits, 85% had "ore" whose dollar value was less than 14\$ per ton..

7

"It doesn't take an expert to see that most of the mines which have run into these problems are being put into production by junior companies with little in-house mining experience. There can be a great deal of pressure put on these consultants to come up with a positive study. Otherwise, the company would simply go and find another consultant (Knoll, 1989).

The average preproduction reserves for the successful group of gold mines was found to be 500,000 tons having an average grade of 0.23 on/t Au; the corresponding figure for the less successful mines was 245,000 tons grading 0.197 on/t Au."

Le chiffre de 14\$ par tonne, qui semble constituer un palier de rentabilité pour la décade 1950-60 équivaldrait à environ 70\$ la tonne en dollars actuels! L'appréciation appropriée du contexte géologique du gisement peut avoir des conséquences directes sur la rentabilité du projet minier envisagé, à témoin cette observation:

"Successful gold mines .. (showed) 11 (times) the initial tonnage and 8 times the amount of gold was recovered as shown in the preproduction reserves... The corresponding figures for the less successful mines (which operated less than five years) were... 1.57 and 1.08."

3.5 LA RECHERCHE DE LA QUALITÉ

Les constatations de Grenier pour la période 1950-1960 sont étonnamment similaires à celles que l'on peut faire pour la décade 1980. Cette situation démontre qu'une partie de l'industrie de l'exploration minière n'a pas encore adopté des procédures appropriées pour la mise en valeur des gisements ni pour l'évaluation requise au stade de la faisabilité et de la décision de mise en production. La principale recommandation de Clow pour améliorer les lacunes observées recoupe la philosophie du Guide:

"Il y aura toujours des échecs d'exploitations minières, certains évitables, d'autres non, mais les chances d'éviter les échecs peuvent être augmentées en suivant une démarche systématique, logique pour évaluer chaque gîte minéralisé ⁸."

Une telle perspective permet de concilier les caractéristiques du processus du développement minéral avec l'approche de **qualité totale** maintenant populaire dans l'industrie manufacturière (Deming, 1982²², Walton 1986²³). L'approche préconisée par Deming dans l'industrie manufacturière s'appuie sur le contrôle statistique. Il ne s'agit pas ici cependant d'un contrôle à **posteriori**, mais d'un contrôle qui s'appuie sur la **connaissance et la compréhension des caractéristiques du procédé en question, en vue d'atteindre son optimisation.**

⁸ "There will always be mine failures, some avoidable, others not, but the chances of avoiding the failures can be increased by following a systematic, logical approach to analyzing each mineral occurrence."

Méthode d'évaluation

Il va sans dire que les procédés manufacturiers permettent une plus grande optimisation que l'évaluation des gisements, mais des procédures d'évaluation plus systématiques permettront d'améliorer le rendement de l'industrie minière, autant dans l'exploration que dans l'exploitation.

Il faut reconnaître qu'une meilleure compréhension des composantes et étapes du processus de développement minéral est nécessaire à l'efficacité de l'évaluation des gisements autant qu'à l'optimisation du rendement des exploitations minières et minéralurgiques. Le développement de systèmes experts appropriés exige cette étape préalable. Le Guide souligne que nombre d'exploitations minières et plusieurs entreprises de développement minéral utilisent déjà l'approche décrite, approche dont l'application n'est pas toujours suffisamment systématique ni, malheureusement, suffisamment généralisée.

CHAPITRE IV

LE CONTRÔLE GÉOLOGIQUE

4. LE CONTRÔLE GÉOLOGIQUE	43
4.1 LE CHAMP D'ACTION DU GÉOLOGUE	43
4.1.1 MISE EN VALEUR	43
4.1.2 EXPLOITATION	44
4.2 LA GITOLOGIE DE L'OR	46
4.2.1 CONTRÔLE STRUCTURAL	46
4.2.2 DISTRIBUTION DE LA MINÉRALISATION	46
4.2.3 MORPHOLOGIE DES GISEMENTS	47
4.3 LES MÉTHODES CARTOGRAPHIQUES	50
4.3.1 CARTOGRAPHIE GÉOLOGIQUE	50
4.3.2 CARTOGRAPHIE GÉOTECHNIQUE	52
4.3.3 MINÉRALOGIE	53
4.3.4 CARTOGRAPHIE GÉOPHYSIQUE	54
4.4 LE POIDS SPÉCIFIQUE	55
4.5 TOPOMÉTRIE ET ASPECTS LÉGAUX	57
4.5.1 TOPOMÉTRIE	57
4.5.2 ASPECTS LÉGAUX	59
4.6 L'ENVIRONNEMENT	60
4.7 LA GESTION DE L'INFORMATION	60
4.7.1 ÉCHELLES ET MAILLES	60
4.7.2 VÉRIFICATION	61
4.7.3 INTERPRÉTATION ET MODÉLISATION	62
4.7.4 INFORMATISATION DES DONNÉES	64
4.7.5 SYSTEMES EXPERTS	65
<u>4.8 GUIDES D'APPLICATION</u>	65
4.8.1 TOPOMÉTRIE ET ASPECTS LÉGAUX	66
4.8.2 STRATÉGIE GÉNÉRALE	66
4.8.3 CONTRÔLE GÉOLOGIQUE DES TRAVAUX	67
4.8.4 L'ANALYSE COUT/BÉNÉFICE	67

4. LE CONTRÔLE GÉOLOGIQUE

"Un propriétaire prudent, avant d'acheter une participation, devrait visiter la mine et examiner attentivement la nature de la veine, car il est très important qu'il soit sur ses gardes pour ne pas être la victime de vendeurs d'actions fraudeurs qui chercheraient à le tromper.

Agricola, De Re Metallica, 1531.

4.1 CHAMP D'ACTION

L'importance de l'évaluation géologique dans la valorisation des gisements a été reconnue de longue date comme le montre la recommandation d'Agricola. Ce travail se situe sur plusieurs paliers autant à la mise en valeur qu'à l'exploitation. Il se situe également et de façon croissante aux stades plus avancés, dans le cadre d'une équipe multidisciplinaire.

Le Guide souligne que, de fait, **dans le développement minéral, les activités des autres professionnels, de l'entrepreneur et du dirigeant partagent plusieurs des caractéristiques décrites pour le travail du géologue/ingénieur géologue**: à chacun de ces intervenants de tracer les comparaisons et les parallèles et de tirer les inférences appropriées par rapport à sa spécialité.

4.1.1 LA MISE EN VALEUR

Lors de l'exploration, le géologue/ingénieur géologue est le principal intervenant technique, s'appuyant sur la géochimie et la géophysique. Lors de mise en valeur, il le demeure aux stades 4 et 5, mais en s'appuyant sur les disciplines minières et minéralurgiques. A partir du stade 6, le leadership est partagé, sinon passé aux professionnels du génie minier et minéralurgique. Au stade 7 les intervenants des disciplines financières contribuent de façon marquée à ce leadership. Cependant le contrôle de la présence et de la qualité de la matière première demeurera une priorité à tous les stades du développement minéral et de l'exploitation.

Lors de la mise en valeur, le travail du géologue/ingénieur géologue se répartit sur plusieurs plans ou paliers de priorités. Ce sont successivement:

- **l'obtention des informations géologiques** essentielles;
- **l'établissement** de la banque de données, constituée des plans et des cartes et la constitution des fichiers informatiques qui codifieront la connaissance du gisement;
- **la corrélation, la vérification des données obtenues, l'interprétation et la modélisation**, en vue de leur utilisation pour les estimations de la géologie, de l'ingénierie et l'économique;

- le choix de **méthodes et de normes d'inventaire et de contrôle géologique** en fonction des besoins de la mise en valeur du gisement cible, mais également en fonction des besoins futurs du projet minier.

Cette description montre que l'art du géologue/ingénieur géologue, c'est également de **savoir prévoir les besoins**. Le Guide se doit de souligner ici l'importance de l'acquisition, aux premiers stades de la mise en valeur, d'informations géologiques qui seront essentielles aux stades ultérieurs: géologie, minéralogie, géotechnique, hydrologie, variations minéralogiques, etc. Souvent, des informations importantes doivent être recueillies dès les premiers stades de l'exploration et de la définition d'un gîte pour être disponibles plus tard, sous peine de retards et de frais beaucoup plus importants, sinon d'erreurs de réalisation ⁹.

Les premiers stades d'exploration requièrent de la parcimonie dans l'application des moyens, étant donné le caractère extensif des travaux. A partir de la découverte du gisement, les travaux de mise en valeur s'intensifient sur un espace plus restreint et les critères d'orientation des travaux doivent évoluer en fonction des besoins croissants de quantification qui sont l'essence de la mise en valeur. L'art du géologue/ingénieur géologue c'est aussi de savoir quand il est possible et quand il est approprié ou requis de passer d'un mode analogique, qualitatif ou semi-quantitatif à un mode quantitatif de travail.

Le géologue/ingénieur géologue efficace ne peut se contenter seulement du court terme, même s'il est bien évident qu'il y a toujours des jugements de valeur et des choix à faire, en fonction des budgets et des priorités. Dans cette perspective, il est important que le géologue / ingénieur géologue ait une expérience antérieure de mise en valeur et de production minière, pour apprécier les besoins futurs d'information. La figure 4-0 établit de façon schématique les diverses étapes de la démarche du géologue/ingénieur géologue.

4.1.2 L'EXPLOITATION

A l'exploitation, les priorités évoluent et les activités du géologue/ ingénieur géologue englobent tous ces aspects et se situent en pratique sur quatre paliers différents et distincts par leurs priorité, sinon par leur exécution. Du court terme au long terme, ce sont:

⁹ Par exemple, le RQD (rock quality designation) doit être mesuré sur des carottes vierges. Une fois les carottes échantillonnées, on ne peut plus obtenir cette mesure de la fracturation d'une roche qui sert à la géomécanique.

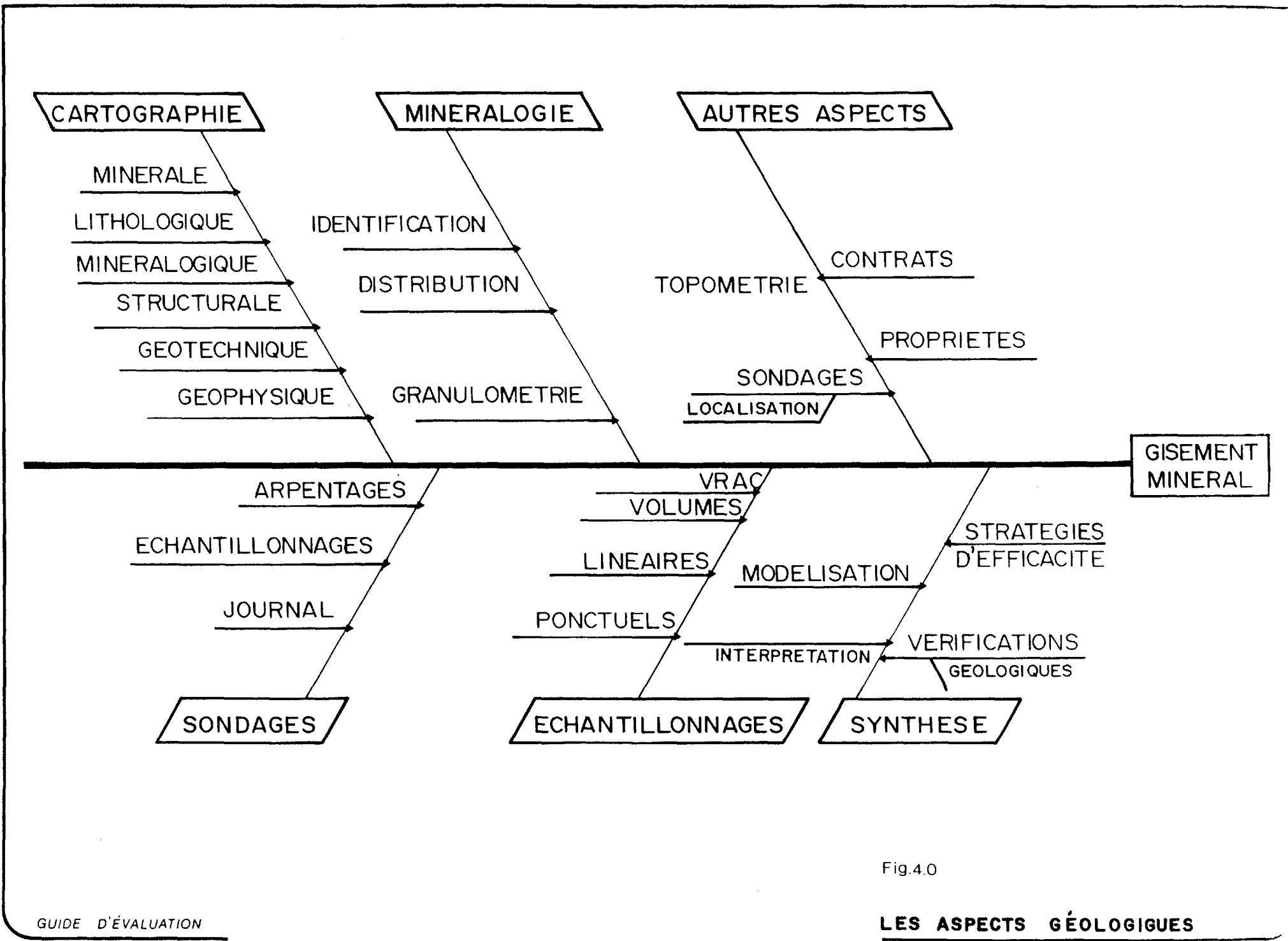


Fig.4.0

- **contrôler la teneur du minerai extrait**, pour le contrôle de qualité et le rendement de l'exploitation minière; **définir en détail les contours et les teneurs du minerai** et des minéralisations adjacentes, pour la planification des chantiers dont le développement est en cours (Lafleur, 1989);
- **établir les réserves minières** à partir des gisements délimités; c'est à dire définir et développer ces gisements pour établir la faisabilité géologique, technique et économique de l'exploitation éventuelle de ces zones;
- **délimiter les gisements inférés** et découvrir de nouveaux gisements à partir des indices connus, par l'exploration à proximité des gisements exploités;
- **découvrir de nouveaux gisements** à partir des ressources hypothétiques des propriétés minières.

4.2 LA GÎTOLOGIE DE L'OR

L'efficacité dans l'estimation des gisements d'or demande de souligner les facteurs géologiques et gîtologiques qui influencent la forme des gisements, les variations de leurs limites, la distribution des métaux, dans le but d'améliorer l'évaluation quantitative de la masse et de la teneur de ces gisements.

4.2.1 LE CONTRÔLE STRUCTURAL

Le contrôle structural est d'une grande importance dans les gisements de type veine. Plusieurs publications récentes ont mis l'accent sur les relations entre l'aspect structural et la morphologie des veines. L'Association géologique du Canada a présenté, en mai 1989, un cours intensif sur le thème "Mineralisation and Shear Zones"²⁴. Les notes préparées pour ce cours constituent un exposé assez poussé de l'origine et de la morphologie des minéralisations associées aux zones de cisaillement. Quelques passages plus pertinents pour l'évaluation des gisements d'or seront cités plus loin.

Le texte "Archean Lode Gold Deposits in Ontario"²⁵ est également à lire pour tout géologue / ingénieur géologue impliqué dans l'estimation des gisements d'or et qui cherche à améliorer sa compréhension de ces phénomènes géologiques. Il faut citer également le chapitre intitulé "Archean Lode Gold Deposits" par R.G. Roberts dans "Ore Deposit Models" publié par l'Association géologique du Canada.

4.2.2 LA DISTRIBUTION DE LA MINÉRALISATION

Il y a lieu de considérer, toujours dans une perspective géologique et morphologique, l'effet des modes de localisation de l'or sur la précision des estimations. Ce sont plus particulièrement:

- les types géologiques;

Méthode d'évaluation

- les dimensions et les relations volume/surface;
- la dispersion de la minéralisation / l'effet de pépité;
- les effets structuraux:
 - de type litage (périodiques?);
 - lenticulaires ou de type gigogne (imbriquées);
- la localisation de la minéralisation en des lieux spécifiques, sous l'influence de diverses structures;
- le caractère et le degré de régularité des surfaces limites de la minéralisation ⁽¹⁰⁾;

4.2.3 LA MORPHOLOGIE DES GISEMENTS

A partir des considérations gîtologiques ci-avant mentionnées, le Guide propose la classification suivante des gisements, dans la perspective de l'évaluation des gisements d'or: les amas, les zones tabulaires, les veines, les placers, les concentrations locales.

A) Les amas

VOLUME:	important;
DIMENSIONS:	relativement égales;
SURFACE/VOLUME:	très bas à bas;
SURFACES LIMITES:	primaires ou secondaires;
EFFET DE PÉPITE:	bas à élevé, selon le contexte;
TYPES GÉOLOGIQUES:	- minéralisation disséminée (limites secondaires): porphyres, skarns; - minéralisation massive (limites primaires): gîtes stratiformes, gîtes magmatiques.

B) Les zones tabulaires

VOLUME:	de modéré à important;
DIMENSIONS:	deux importantes, une plus faible;
SURFACE/VOLUME:	modéré (à quantifier ?);
SURFACES LIMITES:	faibles à importantes comme facteur d'erreur;
EFFET DE PÉPITE:	bas à élevé, selon le contexte;
TYPES GÉOLOGIQUES:	gîtes stratiformes; gîtes de types divers; veines de grandes dimensions;

¹⁰ Sauf pour les minéralisations disséminées sans limites explicites.

C) Les veines

VOLUME:	de modéré à faible;
DIMENSIONS:	deux modérées, la troisième faible à très faible;
SURFACE/VOLUME:	élevé (à quantifier);
SURFACES LIMITES:	primaires ou secondaires selon les types; Variabilité très importante pour certains types;
EFFET DE PÉPITE:	de modéré à extrême;
TYPES GÉOLOGIQUES:	gisements filoniens du type veine de quartz - veines de types plus complexes associés aux zones de cisaillement, veines de dilatations, veines obliques veines imbriquées de type arborescent ou "horse tail";

Les systèmes de veines qui présentent le plus de difficultés géométriques pour l'évaluation du volume du système et de la quantité d'or contenu sont ceux dans lesquels les veines sont obliques ou perpendiculaires avec la dimension principale de la zone minéralisée (ou avec les limites des chantiers). Une figure de ce texte, reproduite ici montre des systèmes de veines ouvertes, (extension gash veins, de veines sygmoïdales, d'ensembles conjugués (conjugate arrays)). Il est important de noter au journal des sondages les angles entre les veines, les cisaillements, les litages, si on veut avoir des chances de reconstituer le casse-tête (Figure 4-1). Certaines organisations ont utilisé des appareils permettant le prélèvement de carottes orientées pour établir l'orientation des structures minéralisées (projet Monique de la Société minière Louvem).

Les systèmes de veines en échelons présentent plus ou moins de difficultés selon l'étape de travail et selon la dimension des structures. Aux stades initiaux, des veines en échelons peuvent donner l'impression de structures continues et des sondages sur maille plus serrée seront nécessaires pour confirmer ces continuités.

D) Les placers

Les gisements d'or de type placer, associés aux alluvions ou éluvions, causent des difficultés particulières d'évaluation à cause de la conjoncture de la minéralisation très pépitique, des contrôles sédimentaires très variables, de l'allure très lenticulaire de la minéralisation. On trouvera une description des types géologiques des placers dans Wells²⁶, 1969 et Johnston and Uglow²⁷, 1926.

Les caractéristiques des placers sont les suivantes:

VOLUME:	de modéré à faible;
DIMENSIONS:	deux dimensions modérées à faibles, la troisième faible à très faible;
SURFACE/VOLUME:	fort à élevé;
SURFACES LIMITES:	primaires ou secondaires selon les types; variabilité très importante;
DISPERSION:	de très haute à extrême;
TYPES GÉOLOGIQUES:	associés à divers phénomènes sédimentaires, à diverses époques. situés en bonne partie dans les sédiments non consolidés; aussi "placer fossiles";

Les problèmes d'échantillonnages sont très accentués à cause de la dispersion, de l'effet pépitique accentué et des effets lenticulaires. Les problèmes d'estimation sont en conséquence très ardues, les forages sont peu représentatifs et l'évaluation dépend beaucoup des échantillonnages en vrac.

E) Les concentrations locales

Un facteur important à souligner est la concentration de l'or dans certaines portions des structures: les cheminées riches ou "ore shoots" ou "cheminées" qui sont allongées dans une direction, à l'intérieur de structures planaires. Ce phénomène, qui se rencontre plus souvent dans les systèmes de veines et dans les placers mais peut également être présent dans les amas et les gîtes stratiformes, complique fort l'évaluation des gisements d'or, par rapport aux métaux usuels par exemple.

Les crénulations dans le cisaillement ou dans le litage agissent également comme contrôle des concentrations d'or en cheminées linéaires. Le lecteur intéressé trouvera plus d'informations dans Hodgson²⁸. Les exemples suivants de concentrations d'or sont tirés des textes cités plus haut:

- à l'intersection de structures ou zones planaires (Yellowknife)
- à l'intersection de cisaillements entrecroisés avec le cisaillement principal,
- à l'intersection de cisaillements subsidiaires à un cisaillement principal (Lac Short),
- dans les fractures d'extension associées à un cisaillement principal (Mine Sigma);
- dans des structures locales d'origine sédimentaire ou dans les irrégularités de la surface sous-jacentes des placers;

4.3 LES MÉTHODES CARTOGRAPHIQUES

4.3.1 LA CARTOGRAPHIE GÉOLOGIQUE

Le travail du géologue et de l'ingénieur géologue dans l'évaluation des gisements se caractérise par l'importance de l'**observation des faits géologiques**.

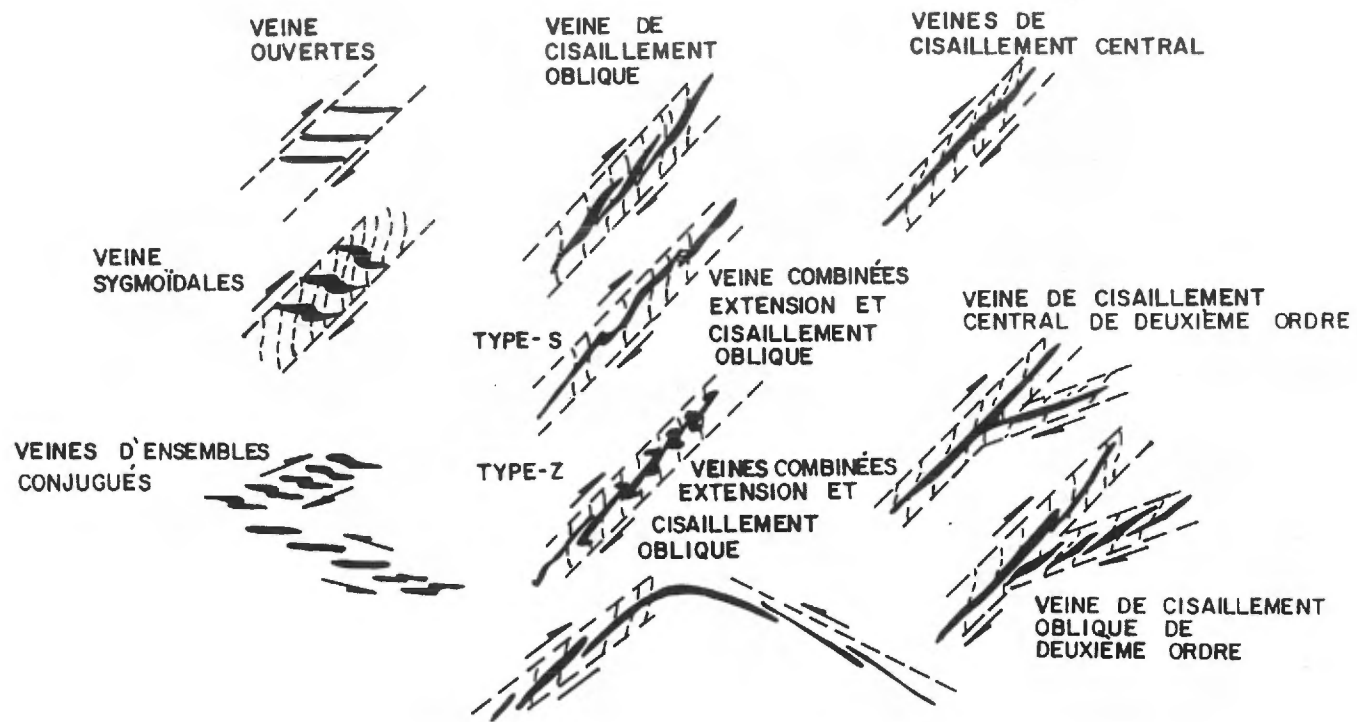
A) En surface

La cartographie géologique du terrain et des excavations minières doit se faire à une échelle appropriée à celle des autres travaux en cours. On ne peut se contenter de cartographie au 1:10,000 ou au 1:5,000 lorsque l'on fait des sondages sur une maille de 40 ou 20 mètres.

La cartographie comprend, outre les observations pétrographiques et l'identification des lithologies, l'observation de tous les phénomènes structuraux. La granulométrie, la minéralogie de la roche et des minéralisations demandent attention et une description détaillée mais non prolixe, qui doit rechercher la quantification. La cartographie est également une opération topologique: le géologue/ingénieur géologue doit établir des contacts entre les unités lithologiques décrites, ce qui implique souvent prise de décision dans l'incertitude!

B) Le journal des sondages

Le journal des sondages est essentiellement une opération de cartographie géologique doublée d'une opération d'échantillonnage. Les commentaires sur la cartographie s'appliquent compte tenu du contexte qui rend plus limitées et plus difficiles les observations structurales. Les observations structurales sont particulièrement importantes pour l'étude des gisements d'or. Plusieurs techniques et appareils spécialisés ont été développés pour utilisation dans les sondages, mais leur application est plutôt onéreuse. Les méthodes géophysiques permettent de prolonger la zone d'influence des sondages et/ou des galeries et d'acquérir des informations structurales et lithologiques additionnelles (sismique, méthodes EM, géoradar, etc).



ZONES DE CISAILLEMENT (Hodgson , 1989)

Fig. 4.1

**GÉOMÉTRIE FRÉQUENTE
DES VEINES**

Des logiciels spécialisés facilitent la collecte de données et la confection du journal des sondages. Il faut choisir le logiciel qui offre à la fois systématisme et flexibilité et qui permet le transfert automatique des données pour les étapes suivantes de mise en plan et d'interprétation.

La récupération des carottes est essentielle à l'échantillonnage des gisements diraient les disciples de M. de La Palisse. En corollaire la localisation exacte des intervalles perdus est essentielle. La puissance et la haute performance des foreuses actuelles contribuent souvent à augmenter les pertes et à accentuer la déviation des sondages; ce dernier fait rend aléatoire l'atteinte de cibles profondes. La supervision du géologue / ingénieur géologue doit inclure une surveillance assidue des divers aspects du forage lui-même, sous peine de manquer les objectifs fondamentaux. Nonobstant l'inventivité des fabricants de matériel, très peu de recherches formelles ont été faites sur ces facteurs, ce qui est dommage, considérant l'importance de l'exploration par sondages profonds dans les camps miniers.

4.3.2 LA CARTOGRAPHIE GÉOTECHNIQUE

La cartographie géotechnique doit compléter la cartographie géologique, autant en surface que dans les sondages. Il faut également recueillir toutes les observations du mort terrain qu'il est possible d'obtenir, car ces données seront importantes au stade de l'ingénierie minière. C'est pourquoi on fera appel à l'ingénieur géologue spécialisé en géotechnique pour la cartographie des tranchées et autres excavations dans le mort terrain et on notera aux journaux des sondages toutes les informations recueillies avant d'atteindre le socle rocheux.

La fracturation de la roche est reliée à la stabilité et la sécurité de l'opération minière éventuelle. C'est pourquoi, lors des sondages, on observera les paramètres facilement observables et mesurables, tels le RQD, qui peuvent être corrélés avec la géomécanique. Ces paramètres ne sont plus observables lorsque la carotte a été fendue ou autrement échantillonnée! On référera au Guide d'ingénierie pour la conception des piliers de surface²⁹ du Centre de recherches minérales pour les procédures appropriées. Les méthodes géophysiques peuvent prolonger l'information géotechnique accessible dans les sondages ou en affleurement. Citons, par exemple, les diverses méthodes sismiques, particulièrement les méthodes de tomographie qui peuvent contribuer à la connaissance des différences de lithologie, de fracturation de diverses zones, pour aider à localiser les zones de fracture, aider à estimer le RQD, le module de Young, etc..

La fracturation et la porosité de la roche influencent également, outre le poids spécifique, la perméabilité de la roche aux eaux souterraines. Il sera approprié de noter toutes les venues ou les pertes d'eau observées durant les sondages ou les excavations car ce facteur a passablement d'importance dans l'exploitation minière. Des infiltrations même minimales peuvent rendre plus dispendieux le forage et le sautage des chantiers, en plus de réduire la résistance

mécanique des murs. Aux stades de la découverte et de la définition du gisement, le géologue/ingénieur géologue doit donc se préoccuper de ces problèmes et il doit s'assurer de l'accessibilité future des sondages pour cimentation en laissant en place les tubages, sinon il DOIT procéder immédiatement à la cimentation si les venues d'eau sont susceptibles d'être obstruées. Le **Guide d'ingénierie des piliers de surface** publié par le CRM propose diverses normes et méthodes adaptées à ces problèmes.

4.3.3 LA MINÉRALOGIE

La minéralogie est un outil essentiel du géologue/ingénieur géologue, autant pour la valorisation des gisements que pour leur découverte. Dans le système multimodal qu'est une roche, nombre de phases minérales sont possibles à partir d'une composition chimique donnée. Pour les minéraux d'intérêt économique et plus particulièrement pour l'or, la situation est plus complexe, à cause de l'importance de la dimension et de la dispersion des diverses phases minérales. C'est le cas autant pour l'analyste, le minéralurgiste, le métallurgiste que pour le géologue/ingénieur géologue, car le rendement recherché exige de comprendre les caractéristiques des minéralisations du gisement sous étude.

Des méthodes quantitatives ont été développées, même au stade de l'exploration et de la mise en valeur; Botbol, 1970³⁰, présente un système simple, d'application facile. Le système d'informatisation des données géologiques développé par International Geosystems est un outil très approprié pour la quantification des caractéristiques lithologiques et minéralogiques d'une roche; nombre de chercheurs universitaires et de compagnies minières l'utilisent.

Dans cette perspective, il apparaît que les études minéralogiques doivent être considérées et utilisées systématiquement comme un outil d'inventaire pour les divers stades de l'évaluation de tout gisement, donc des gisements d'or. Dans ces études, l'aspect quantitatif a été développé de façon poussée pour répondre aux besoins des travaux des minéralurgistes et des métallurgistes. Pour l'or, les faibles teneurs et la distribution pépitique de ce métal obligent à des observations nombreuses et le petit nombre de particules limite souvent les observations. L'importance et le détail des études minéralurgiques varieront selon le stade atteint, selon les conditions et selon les problèmes qui apparaîtront, mais il est important qu'on les entreprenne de façon systématique, comme un élément essentiel de la valorisation du gisement.

La tendance habituelle est de sous-évaluer les besoins d'études minéralogiques qualitatives et quantitatives nécessaires pour la minéralurgie d'un minerai. On allègue alors qu'on ne sait pas si de telles études sont vraiment nécessaires et qu'il sera toujours temps de les exécuter si des problèmes se présentent. **Le Guide considère inacceptable d'entreprendre des essais minéralurgiques sans études minéralogiques préalables.** De fait, s'il y a problème, les délais seront plus longs et les frais plus élevés pour trouver une solution au jugé que si on avait procédé

de façon planifiée, à partir des connaissances minéralogiques. C'est particulièrement vrai si c'est lors d'essais en usine pilote ou en usine commerciale que des problèmes imprévus se manifestent.

Une bibliographie importante décrit l'importance des études minéralogiques et leur rôle dans la solution des problèmes de minéralurgie et de métallurgie extractive. Citons les comptes-rendus du Symposium de l'AIME sur la minéralogie appliquée, 1981³¹ ceux du Symposium de 1985³², ainsi que de l'article de Wilhelmy, 1988³³.

4.3.4 LA CARTOGRAPHIE GÉOPHYSIQUE

A) A l'exploration

Le Guide passera rapidement sur les applications de la géophysique au stades de l'exploration (1 à 3) qui débordent son mandat. On notera que les méthodes géophysiques sont souvent utilisées comme outils d'exploration, à la façon du prospecteur qui cherche des anomalies. Cependant, ce mode d'emploi n'utilise pas toutes les ressources de la géophysique. Les méthodes magnétométriques et électromagnétiques et la polarisation provoquée sont les plus utilisées à ces stades. La pénétration et les possibilités d'utilisation des méthodes géophysiques ont été fortement augmentées par le développement des méthodes à grande pénétration comme l'UTEM et des sondages géophysiques en forages, qui permettent une utilisation beaucoup plus poussée pour la recherche de cibles profondes.

De façon plus ponctuelle, les méthodes sismiques peuvent servir à délimiter des structures telles les failles et les cisaillements, ainsi les contacts géologiques entre roches de caractéristiques sismiques différentes. Ces méthodes sont donc susceptibles d'une certaine application pour l'exploration de l'or, en l'absence de propriétés magnétiques ou électromagnétiques de la roche minéralisée. La sismique peut également être utilisée comme outil pour mieux connaître l'épaisseur du mort terrain et les profils du socle rocheux, mais seulement lorsqu'elle est accompagnée et calibrée par des forages.

B) A la mise en valeur et à l'exploitation

A l'étape de la **délimitation et de la définition d'un gisement** (stade 4 et 5), les méthodes électromagnétiques à grande pénétration et les méthodes géophysique en forages seront encore utilisées pour cibler les forages; la sismique est également susceptible d'utilisation. Avec l'avancement du projet, les objectifs changeront et les méthodes sismiques pourront être utilisées de façon croissante pour évaluer les qualités mécaniques de la roche dans les zones minéralisées, les épontes et les zones où des puits et galeries doivent être foncées. Ces méthodes permettent d'investiguer les volumes importants situés entre les sondages et autres points d'échantillonnages et ainsi, d'augmenter la portée des informations concrètes.

Lors de la mise en valeur, les exigences accrues d'information amenées par la géotechnique pour l'estimation du RQD, du module de Young et du coefficient de Poisson et, de façon générale pour la planification des mesures de contrôle de la stabilité des masses rocheuses feront appel aux méthodes sismiques pour compléter les méthodes cartographiques et les divers forages géotechniques. La tomographie est une technique d'analyse sismique systématique qui aide à déceler les zones de roc de vitesse sismique différente, soit par leur fracturation, soit par leur propriétés différentes, comme les sulfures. Le géoradar est une méthode électromagnétique qui permet également de détecter les fractures et zones poreuses dans le roc.

Lors de l'exploitation, le contrôle méthodique des vibrations produites par les sautages permettra de mieux doser l'emploi des explosifs et les séquences de tir, pour optimiser la fracturation du minerai tout en limitant les bris hors profils et en réduisant les coûts. Le géoradar peut également servir à établir les limites d'un chantier après l'extraction du minerai.

Les méthodes géophysiques sont donc susceptibles d'applications beaucoup plus large que ce l'on constate actuellement. Ce ne sont pas des panacées cependant! Leur emploi sera profitable en autant que l'on saura bien calibrer et vérifier, à partir des informations géologiques concrètes, les informations que l'on en tirera, afin de bien les intégrer dans les interprétations et les modèles géologiques et miniers.

4.4 LE POIDS SPÉCIFIQUE

Le poids spécifique des minerais varie considérablement selon le poids spécifique et la proportion des minéraux constituants. Pour les roches "non minéralisées", le poids spécifique est de l'ordre de 2.6 à 2.7 pour les roches acides, et de 3.1 à 3.3 pour les roches mafiques. Pour quelques minéraux d'intérêt: le poids spécifique de la pyrite est de 5.0, de la chalcopirite de 4.2, de la pyrrhotine de 4.6, de la sphalérite de 3.9 à 4.1 de la pentlandite de 5.0 celui de la magnétite de 5.2, l'ilménite de 4.5 à 5.0 (et l'or de 15 à 19.2). Les proportions variées de ces minéraux d'intérêt ou minéraux usuels sont caractéristiques de la majorité des gisements.

Dadson 1967³⁴, a souligné la faiblesse, sinon le ridicule, de recourir à des analyses "précises", mais de se contenter d'un poids spécifique "global" et approximatif, quand le poids et le contenu métal d'un volume donné, lentille ou zone peuvent varier de 5 à 50%, à cause de variations du poids spécifique. Pour un gisement d'or, la présence de pyrite est fréquente et ses proportions sont souvent variables.

Citons quelques cas concrets. A la Société Minière Louvem durant les années 1970 à 1980, le poids spécifique du minerai des diverses zones de métaux de base variait entre 3.1 et 4.2, selon le contenu de pyrite. Dans tous les cas similaires, cette mesure est donc nécessaire à l'évaluation du métal contenu dans un gisement ou dans un chantier donné.

Un exemple plus récent est celui du gisement de graphite de Mazarin Inc: le contenu soufre (pyrite) et le contenu en carbone graphitique (Cg), le premier plus lourd, le second plus léger, font varier dans des directions inverses le poids spécifique de la roche. Dans les roches lixiviées, la porosité est plus importante et des minéraux fins, bauxites, argiles, limonites ou autres peuvent facilement être lavés par les procédures de forage, ce qui ne donne pas un échantillon représentatif, ni en teneur, ni pour les caractéristiques minéralurgiques. Le Northern Miner³⁵ décrit des problèmes d'estimation reliés au poids spécifique dans le cas d'une mine récemment mise en production et dont l'exploitation a été suspendue⁽¹¹⁾.

La conclusion qui s'impose est que le poids spécifique est une caractéristique d'une minéralisation qui doit être quantifiée systématiquement, avec des méthodes appropriées, au même titre que le contenu en éléments d'intérêt, et ce, à partir du début des travaux de mise en valeur. Cette quantification requiert que dans les cas de minerais poreux/altérés, tous les facteurs significatifs soient également inscrits aux journaux des sondages.

Les solutions à ce problème sont techniquement simples et relativement peu dispendieuses. Plusieurs opérations minières mesurent de façon routinière le poids spécifique des intersections minéralisées en pesant, dans l'air et dans l'eau, des échantillons types (5 fragments) de chaque intersection. Cette procédure a été utilisée à Louvem ainsi qu'à SOQUEM pour l'évaluation de gisements de métaux usuels et de gisements d'ilménite. Cette méthode est peu dispendieuse par comparaison aux analyses chimiques, mais l'expérience a montré une dispersion parfois importante des valeurs individuelles. C'est pourquoi des mesures nombreuses et systématiques sont nécessaires pour obtenir des moyennes représentatives.

Une autre façon d'obtenir le poids spécifique d'une roche est de le calculer à partir des éléments constituants. Dans le cas déjà cité de la Société Minière Louvem, ceci a été fait en utilisant l'analyse du soufre pour reconstituer la pyrite et les teneurs des métaux usuels déjà disponibles pour les autres minéraux et un abaque permettait d'obtenir rapidement la densité spécifique. A SOQUEM, ceci a été fait pour des gisements d'ilménite, en parallèle avec la mesure du poids spécifique. Les poids spécifiques ainsi obtenus étaient inscrits au fichier des échantillons au même titre que les analyses, pour servir au calcul des réserves. Il est probable que d'autres compagnies minières aient suivi des procédures similaires.

Une étude récente de CANMET, Boyer³⁶, applique systématiquement des considérations similaires, pour l'établissement de la densité spécifique à partir des teneurs en métal (Ni et U) de trois gisements d'uranium de Saskatchewan. Ce travail présente une méthodologie

¹¹ "The study was commissioned after company XX revealed that the wrong specific gravity level had been used to determine (deposit) reserves prior to production start up. Company XX brought the mine into production last June thinking that it was an operation with 460,000 tons grading 0.45 oz gold per ton. The SMS study later revealed that mineable oxide reserves were actually 250,000 tons grading 0.35 oz per ton."

détaillée et souligne les problèmes méthodologiques rencontrés. La porosité de la roche peut affecter les déterminations, également les variations minéralogiques possibles avec un même contenu métal. Une présentation résumée du même sujet est faite dans Boyer et Billette, 1989³⁷.

4.5 TOPOMÉTRIE ET ASPECTS LÉGAUX

L'évaluation d'un gisement doit comprendre tous les aspects qui touchent à la qualité de l'information, telle la topométrie, et tous les aspects qui touchent à la valeur des titres de propriété ou d'option par lesquels ce gisement est détenu.

4.5.1 LA TOPOMÉTRIE

La quantification qui est caractéristique de l'étape de la mise en valeur doit s'étendre aux aspects de topométrie (arpentage) du terrain et également à la localisation de toutes les données en trois dimensions.

A) Contrôle topométrique

Au moment de la découverte, le contrôle topométrique des informations de surface est en général fait à partir d'un réseau de lignes coupées, dont la rigueur et la précision dans le plan horizontal varient beaucoup; aucun contrôle vertical n'est en général disponible à ce stade. Aussitôt la découverte assurée ⁽¹²⁾, il faut songer à établir un contrôle topométrique approprié, par l'intermédiaire de personnel spécialisé. Il faut un contrôle horizontal et vertical de la position des sondages. Il faut aussi distinguer la position du collet du sondage (repère des foreurs et des mesures des carottes) de la position du forage au sol. On rencontre encore trop souvent des dossiers d'indices et de gisements pour lesquels aucune mesure de la position verticale du collet des sondages n'est disponible et ce, dans des conditions topographiques relativement accidentées.

B) La course des sondages

La précision de la trajectoire des forages est un sujet complexe qui dépend de l'équipement utilisé et également de nombreux paramètres d'exécution: ce sujet dépasse le cadre du présent Guide. Par contre, le relevé de la course d'un sondage est une mesure essentielle pour situer la position dans l'espace des informations et échantillons prélevés. Pour ce faire, il faut mesurer l'inclinaison et l'orientation du forage systématiquement, à des espacements qui varieront selon les besoins et les conditions. Diverses méthodes sont disponibles et seront décrites

¹² En d'autres termes, aussitôt qu'on a placé plus de six ou sept sondages sur un site et qu'on continue les travaux!

sommairement quant à leurs paramètres essentiels. Il n'y a pas d'excuse acceptable pour justifier l'absence de tests à l'acide comme mesure standard de contrôle, l'absence d'essais au compas ou au gyroscope pour les sondages plus longs, surtout dans un programme de mise en valeur.

a) Les levés à l'acide

C'est une méthode rapide qui ne donne que l'inclinaison de l'axe du sondage et qui sert avantagement de contrôle d'exécution durant le forage. L'angle du ménisque tracé par l'acide fluorhydrique sur l'éprouvette demande d'être ajusté par une courbe de correction, à cause de la tension superficielle qui déplace le ménisque lorsque le tube est incliné. Étant donné l'interprétation que comporte la lecture, il est nécessaire de se calibrer par des mesures faites en surface, à des angles mesurés. Il faut également utiliser des éprouvettes standard et la concentration d'acide recommandée.

b) Les levés au compas magnétique

Il y a deux types d'appareils incorporant un compas magnétique équilibré placé dans un système repère. L'utilisation de ces appareils est plus élaborée que pour les tests à l'acide, mais ils permettent, en l'absence de minéraux magnétiques, de mesurer la direction du forage dans le plan horizontal, en plus de sa plongée.

Les appareils mécaniques de type Tropari ou Pajari consistent en un système de cercles universels contrôlé par un mouvement d'horlogerie qui le bloque après le délai fixé. Cet appareil mécanique est vulnérable dans les conditions brutales des sondages, c'est pourquoi plusieurs organisations utilisent deux appareils en série pour une mesure donnée, afin de s'assurer de la fiabilité des mesures obtenues. Dans ces conditions, les mesures sont en général moins nombreuses que celles obtenues par les tests à l'acide. Un système plus récent consiste en un compas équilibré, doté de repères visuels, avec une mini-caméra qui enregistre l'orientation et l'inclinaison du forage en un point donné.

c) Les levés au gyroscope

Cet appareil est plus dispendieux mais plus précis que les précédents et les observations sont recueillies en général par des lectures en continu sur l'instrumentation ad hoc. Jusqu'à récemment, le gyroscope était limité au calibre BQ comme format minimum, mais ils sont maintenant disponible en calibre AQ. Il permet un arpentage plus précis de la course des sondages profonds.

4.5.2 LES ASPECTS LÉGAUX

Les aspects légaux font partie intégrante de l'évaluation des gisements d'or. Ce sont d'abord les contrats par lesquels une organisation ou un individu détient des droits sur une propriété. La certification du droit de propriété et sa délimitation sur le terrain constituent d'autres aspects essentiels de toute évaluation.

A) Les contrats

La négociation des contrats est un art en soi et plusieurs textes ont été écrits sur ce sujet. Il faut évidemment s'assurer des services légaux appropriés à la situation. De façon pragmatique, il faudrait que les signataires envisagent bien toutes les implications futures des clauses des contrats lors des négociations, avant la signature et **avant une découverte!** Trop souvent, les contrats d'acquisition de propriétés ou d'ententes d'exploration conjointe sont négociés et signés sans tenir compte de l'éventualité de l'objectif de ce contrat: la découverte d'un gisement. En conséquence, lors d'une découverte, on se retrouve souvent avec des clauses qui ne sont pas appropriées aux conditions de mise en valeur, de mise en exploitation, ou d'exploitation et qui réduisent la valeur marchande du projet, à cause des frais ou des inconvénients qu'elles entraînent. Les facteurs légaux font donc partie de l'évaluation des gisements d'or.

Une règle pratique simple serait de se demander, avant de signer un tel contrat: "Si on découvrait sur cette propriété un **gros (ou petit) gisement riche (ou marginal)**, qu'est-ce qui se passerait? Quelle clause de gestion, quels frais de gestion ne seraient plus acceptables? A partir de quelle clause du contrat proposé un procès serait susceptible d'être engagé contre nous, etc..?"

B) L'arpentage des propriétés

Le Guide, sans s'immiscer dans le domaine légal, croit nécessaire de suggérer quelques règles pratiques concernant la localisation des propriétés minières. Sauf dans un nombre restreint de régions, les lois minières au Canada séparent les droits miniers des droits de surface. L'acquisition des droits miniers se fait souvent dans un contexte de compétition qui favorise les contestations, surtout autour de, ou après les découvertes ¹³. Il apparaît donc essentiel d'assurer, chaque fois que les lois ou les règlements le permettent, le titre de propriété en recourant aux services des officiers légaux que sont les arpenteurs-géomètres, pour délimiter au sol, avant les contestations, les limites des propriétés minières d'intérêt. De tels arpentages et les certificats de localisation qui les accompagnent sont d'ailleurs, la plupart du temps, requis d'ailleurs dans les transactions et dans les contrats des financements.

¹³ Au Québec, la nouvelle Loi des mines limite à un an après l'acquisition les contestations sur les droits miniers acquis par piquetage.

4.6 L'ENVIRONNEMENT

La société contemporaine est très sensibilisée à la nécessité de protéger et conserver l'environnement. La législation et les réglementations afférentes sont de plus en plus exigeantes sur ces questions. Cette situation oblige tous ceux qui s'impliquent aux divers paliers du développement minéral à se préoccuper des implications des lois et règlements sur les travaux d'exploration, de mise en valeur et d'exploitation. Ceci veut dire par exemple qu'il est nécessaire:

- 1) de vérifier, au moment du choix d'un projet d'exploration, les contraintes vis à vis l'environnement reliées à certaines substances, certains types d'exploitation;
- 2) de s'efforcer, au moment des travaux d'exploration, à minimiser les traces de leur passage, l'impact des travaux et les dommages qui pourraient en résulter;
- 3) de commencer la collecte de données sur l'environnement dès les travaux d'exploration, pour accumuler une base de données appropriée. Ce travail doit être guidé par des spécialistes du domaine;
- 4) d'augmenter la collecte de données et les études spécialisées au stade de la mise en valeur, faute de retarder la préparation des études d'impact et d'empêcher l'obtention des permis requis;
- 5) de considérer, qu'au stade de la faisabilité et de la décision de mise en production, les mesures de protection de l'environnement, les permis et les divers frais afférents sont des éléments techniques essentiels à l'étude de faisabilité et au processus de décision.

4.7 LA GESTION DE L'INFORMATION

4.7.1 ÉCHELLES ET MAILLES

Le choix des échelles de travail et des mailles d'information et d'échantillonnages appropriées est un élément essentiel du travail du géologue/ingénieur géologue dans l'évaluation des gisements.

A) Échelles de travail

L'échelle de travail de la cartographie et des levés contrôle jusqu'à un certain point la densité et la quantité des informations qui peuvent être recueillies lors d'une campagne de valorisation. Un rapport d'échelle trop élevé ne permet pas l'expression d'un détail suffisant (ex:

1:10,000). A l'inverse, un rapport d'échelle trop bas (ex: 1:100) ne facilitera ni l'interprétation ni la synthèse des informations.

La cartographie géologique d'une propriété doit être exécutée à une échelle appropriée avec celle des autres travaux. On ne saurait se satisfaire d'une échelle de 1:5,000 ou 1:10,000 pour la cartographie géologique et structurale d'une propriété sur laquelle on fait la délimitation d'un gisement sur maille de 30m: une échelle de l'ordre de 1:500 à 1:1,000 serait plus adéquate.

En règle générale, les échelles des plans de travail doivent être uniformes. Il est fort peu recommandable d'avoir une carte géologique à 1:500 et les plans d'échantillonnage à 1:200, car ceci ne permet pas les corrélations appropriées.

B) Les mailles d'information

Dans le cas de la collecte de données à caractère ponctuel, comme les échantillonnages ou la maille des forages, la maille d'information structure à la fois le travail de collecte et l'information obtenue. Le choix de la maille d'information appropriée influence également l'efficacité de la campagne de délimitation ou de définition d'un gisement.

Pour un gisement et une phase de travail donnés, il y a avantage à choisir la maille de forage qui permet d'atteindre les objectifs de ce stade avec le minimum de frais. Par exemple, sur un indice minéralisé, les travaux commencent souvent avec une maille de l'ordre de 60 m, ensuite réduite à 30m. Pour la délimitation d'un gisement, on devra choisir une maille qui donnera au moins 4 à 5 intersections sur la longueur de la zone cible et deux à quatre sur la profondeur. Les mailles sont réduites de moitié à l'étape suivante. La maille finale de détail dépendra des caractéristiques géologiques et géostatistiques du gisement; elle dépendra également des caractéristiques de la méthode d'extraction minière choisie. Ce sujet sera discuté de nouveau aux chapitres 5 et 7.

4.7.2 LA VÉRIFICATION

Vérifier: 1^o Examiner la valeur (de qqch.), par une confrontation avec les faits ou par un contrôle de la cohérence interne;

2^o Examiner (une chose) de manière à pouvoir établir si elle est conforme à ce qu'elle doit être, si elle fonctionne correctement;

3^o Reconnaître ou faire reconnaître une chose pour vraie par l'examen, l'expérience.

Dictionnaire Robert.

Le Guide tient à souligner que, particulièrement dans l'axe géologique, mais également dans les axes de l'ingénierie et de l'économique, la vérification des faits et des interprétations doit constituer une attitude, un ensemble de procédures qui doivent imprégner toute la démarche du

géologue/ingénieur géologue et aussi, celle de tous les autres intervenants en développement minéral.

Pour rencontrer les objectifs de vérification, il faut réaliser la nécessité d'une redondance appropriée d'informations qui, seule, permettra d'établir les comparaisons et les recoupements nécessaires. On ne peut concevoir une vérification véritable sans un minimum de redondances dans l'information. Celui qui veut, par économie à courte vue, éviter toute duplication, se place dans une situation où une vérification réelle est impossible. C'est une lapalissade nécessaire de souligner que **la seule façon d'établir si on a assez d'informations, c'est de réaliser qu'il y a suffisamment de duplications de données pour établir des recoupements**. C'est particulièrement important pour les informations quantitatives ou qualitatives qui viennent de l'extérieur. Les vérifications se feront autant au niveau des calculs et des interprétations qu'au niveau des mesures physiques.

Le terme "vérification" est utilisé ici au sens large, pas seulement dans un sens de critique négative par rapport à des résultats ou projections imprécises ou trop optimistes, mais également avec l'objectif de déceler des opportunités cachées: les erreurs peuvent avoir des effets autant à la baisse qu'à la hausse!

4.7.3 INTERPRÉTATION ET MODÉLISATION

L'interprétation géologique et structurale est à la fois un outil et une étape essentielle de la valorisation des gisements. L'essence de l'interprétation, c'est de prolonger la portée des informations factuelles disponibles en utilisant les concepts géologiques et les modèles géologiques pour établir de nouvelles relations et formuler des hypothèses qui orienteront les prochains travaux. L'interprétation et la modélisation sont des étapes essentielles de l'estimation des limites, des volumes, des masses et des teneurs.

A) L'interprétation

L'interprétation est, comme la cartographie, une opération topologique. Les relations géométriques ou analogiques que le géologue/ingénieur géologue d'expérience établira ainsi graphiquement, en deux dimensions d'abord, ensuite et surtout en trois dimensions, sont encore très difficiles à émuler sur les systèmes informatisés.

L'essence de cet art qu'est l'interprétation géologique est le systématisme éclairé. Descartes dirait peut-être que l'interprétation efficace requiert l'esprit géométrique dirigé par l'esprit de finesse (d'analyse). Le systématisme devra s'exercer tout d'abord dans la préparation des bases de données informatisées qui recueillent les informations géologiques et analytiques. Ici le systématisme doit être imprégné de flexibilité pour anticiper les besoins et permettre les développements imprévus que le futur amène souvent.

Le systématisme est également essentiel dans la présentation des données, sur plans et sections, pour établir des relations physiques, en deux et en trois dimensions. Le systématisme dans l'interprétation s'exercera dans la façon de **poursuivre et de compléter la réflexion jusqu'à des conclusions**. Expliquons nous: a) parfois, les données géologiques sont relativement uniformes et les conclusions apparaissent faciles à tirer; b) parfois, les données moins complètes ne permettront d'arriver à des conclusions logiques et acceptables qu'à ceux qui poussent la réflexion jusqu'à sa limite; c) parfois, les données sont fragmentaires, même contradictoires, etc. Ce qui est relativement facile dans le premier cas est plus complexe dans le second et beaucoup plus difficile dans le troisième: il est toujours plus facile d'arrêter le cheminement en cours de route. Le but du systématisme demandé est d'**optimiser l'emploi des informations obtenues par l'emploi des investissements de capitaux de risque**, capitaux qui sont, règle générale, rares et difficiles à obtenir.

Le systématisme consiste à **ne pas se contenter de demi-réponses, en invoquant la complexité géologique**: il faut analyser la situation, élaborer des hypothèses alternatives et utiliser les faits disponibles, les uniformités et les contradictions pour orienter les prochaines étapes de recherches. Il faut surtout **éviter de conclure trop vite et se satisfaire de modèles simplistes** qu'on essaie ensuite de confirmer en négligeant les faits qui n'y entrent pas, autrement dit d'avoir **un coup de foudre pour une interprétation, un modèle**. Les biologistes et les géographes lisent et citent beaucoup plus souvent que les géologues les réflexions du géologue Chamberlain³⁸, (1968) sur les méthodes de travail et les **hypothèses (et modèles) multiples que le géologue / ingénieur géologue mature doit savoir entretenir en parallèle** pour guider son travail (comme en comparaison, l'homme / la femme du monde pour ses maîtresses / amants!).

B) Modélisation et Géologie

Dans la pratique de l'évaluation des gisements d'or, l'interprétation des données et la modélisation des gisements s'appuieront sur la compréhension des phénomènes qui contrôlent la distribution des métaux présents. Ce sont:

- 1) la forme, les dimensions, les contrôles structuraux et la distribution des masses minéralisées;
- 2) la minéralogie (nature et dimension) et la distribution physique des particules minéralisées à l'intérieur des secteurs minéralisés. La minéralogie touche également à l'effet de pépité des métaux précieux que la géostatistique analyse et quantifie par les variogrammes. Ceci est relié directement à la minéralurgie et au rendement de l'extraction des métaux.

La modélisation appropriée du gisement et l'interprétation de ses limites sont des prérequis au calcul des masses et des teneurs sauf dans quelques gisements de type disséminé (chap 7).

a) La probation des modèles

Platt³⁹ (1964), dans un texte axé sur la recherche efficace, souligne l'importance de l'élaboration de modèles qui permettent la vérification et l'importance de la probation de ces modèles. La vérification doit se faire d'abord sur les aspects importants des hypothèses de travail mais il faut également vérifier les aspects négatifs. Par exemple, si un modèle géologique prédit des minéralisations dans des conditions données, c'est à vérifier en priorité, mais il faut également vérifier au moins sommairement les endroits où le modèle prédit l'absence de minéralisation. La probation de l'hypothèse posée, du modèle tracé, augmente le degré de confiance sur la validité des informations disponibles et permet en rétroaction un modèle amélioré.

Dans cette perspective, les analyses de sensibilité exécutées lors de l'étude de faisabilité sont des vérifications des modèles et de la solidité des conclusions sur la rentabilité. Ces conclusions dépendent des faits et des interprétations dans les axes de la géologie, de l'ingénierie et de l'économique.

4.7.4 INFORMATISATION DES DONNÉES

Il n'est pas dans le rôle du Guide de recommander un système commercial plutôt qu'un autre. Son rôle est plutôt de faire ressortir les critères qui doivent guider l'utilisateur dans le choix d'un système adapté à des besoins qui évolueront et deviendront plus rigoureux et plus complexes. Les comptes rendus d'un Atelier tenu à Toronto en mars 1990 fournissent de multiples exemples de l'application des ordinateurs à la géophysique, la géochimie, aux systèmes d'information géographiques, aux forages, à l'estimation des gisements ainsi qu'à la conception et la planification minière (CAME⁴⁰ 1990).

Au niveau de l'acquisition des données, du journal des forages, de la cartographie, des échantillonnage, plusieurs logiciels commerciaux sont disponibles. Ils permettent de systématiser l'acquisition des données, une transcription et une mise en plan très rapides des informations géologiques, des échantillonnages et de leurs résultats. D'autres logiciels sont disponibles pour les opérations ultérieures de calcul des réserves, de planification. Dans le choix de logiciels, l'on devra être guidé par une perspective systémique: il faut qu'un logiciel donné s'intègre dans un système global de traitement d'information et éventuellement de système expert. Il faudra tenir compte des éléments suivants pour orienter ses choix:

- 1) la flexibilité d'un logiciel pour l'acquisition de l'information dans des contextes différents, systématisation et possibilités de quantification des données géologiques et minéralogiques;
- 2) la facilité d'utilisation du logiciel (user interface) et la durée de l'apprentissage requis;

- 3) l'intégration des diverses étapes dont la collecte sur le terrain et le transfert aux systèmes résidents;
- 4) les facilités de transfert et d'utilisation directe des informations pour les étapes suivantes:
 - a) mise en plan/section de l'information géologique, des échantillonnages et de leurs résultats;
 - b) possibilités de travail interactif, d'interprétation et d'enregistrement des données ainsi dérivées
 - c) possibilités de transfert et d'utilisation des données dans les systèmes informatisés de calcul des masses et des teneurs et dans les systèmes de planification minière.
- 5) le niveau d'interrelation, sinon d'intégration des diverses étapes / opérations décrites ci-haut et les possibilités d'expansion pour incorporer de nouvelles informations, permettre de nouvelles applications;
- 6) dans le cas de l'utilisation de logiciels/systèmes privés qui demandent à la fois entretien, programmation et des liens exclusifs avec un seul fournisseur et/ou consultant, il faut s'assurer de la qualité de la formation et du support fournis ainsi que des frais futurs.

4.7.5 LES SYSTÈMES EXPERTS

Le Guide considère que l'informatique est une nécessité et un outil très utile, dont nous n'avons que débuté les applications. La démarche du Guide est un préalable essentiel à la formulation de systèmes experts pour l'évaluation des gisements. Dans cette perspective, le système expert dont nous avons besoin se situe, pour l'instant, au niveau de l'analyse des problèmes, de la formulation de procédures de travail, de procédures d'analyse et modélisation, non dans l'application automatique de modèles simplistes ou erronés.

Le plus grand danger dans le développement de systèmes experts dans un domaine aussi complexe, peu propice au systématisme de courte vue, serait d'essayer de faire faire par l'ordinateur des travaux et des décisions qui peuvent être faits beaucoup plus efficacement par un expert assis devant l'écran ou qui dirige les techniciens assis devant l'écran. Les systèmes experts dont nous avons besoin maintenant doivent d'abord viser à permettre aux géologues/ingénieurs géologues, ingénieurs des mines et autres spécialistes de travailler comme des experts. L'analyse systématique, l'interprétation et la modélisation ne sauraient être remplacées par un système expert: au contraire ce sont les étapes essentielles à l'implantation d'un système expert.

4.8 GUIDES D'APPLICATION

Les procédures et les normes recommandées ici ne sont pas des règles absolues, mais un guide des pratiques minimales qui doivent être adaptées aux circonstances particulières des gisements. D'une part on vise l'emploi optimum des fonds disponibles mais une carence d'information ou de l'information erronée serait nuisible. D'autre part, il faut une **redondance minimum d'informations pour permettre des vérifications.**

4.8.1 TOPOMÉTRIE ET ASPECTS LÉGAUX

La localisation exacte, dans les trois dimensions, des informations géologiques et des échantillonnages est essentielle pour atteindre les objectifs de mise en valeur, de mise en exploitation et d'exploitation minière. Cet objectif requiert:

- 1) des arpentages topométriques;
- 2) la mesure de la course des sondages;
- 3) des vérifications des titres miniers et l'arpentage légal des limites des propriétés;
- 4) des vérifications des implications légales et financières des contrats d'option des propriétés ou d'association entre compagnies.

4.8.2 LA STRATÉGIE GÉNÉRALE

Le Guide propose les éléments de stratégie suivants pour les campagnes de valorisation et d'échantillonnages des gisements:

- 1) l'échelle de travail et la dimension de la maille d'information sont associées pour pondérer la densité, le détail de l'information avec la surface à explorer ou à développer, avec les besoins du stade atteint. Ceci veut dire que la première maille est choisie en fonction de la longueur escomptée de la zone minéralisée, pour donner au moins 4 à 5 intersections. La dimension de la maille la plus rapprochée devra être choisie en fonction des caractéristiques du gisement et du système minier envisagé pour optimiser la sélectivité de l'extraction;
- 2) l'utilisation systématique des méthodes géophysiques pour augmenter la portée des informations géologiques: méthodes électromagnétiques, méthodes sismique réflexion et sismique réfraction, tomographie, géoradar etc;
- 3) toute l'information facilement disponible à partir de la surface doit être recueillie avant d'entreprendre des travaux beaucoup plus dispendieux (en général) sous-terre;
- 4) il faut évaluer la dimension d'un indice sur la maille actuellement en vigueur avant d'aller le vérifier par des sondages ou échantillonnages plus rapprochés. L'exécution d'une campagne de valorisation doit être régie par une discipline de travail qui maintient, sans

rigorisme excessif, les objectifs et la maille du travail en cours. C'est particulièrement important pour les sondages et les travaux miniers;

- 5) l'interprétation systématique avec l'explicitation sur plan et sections des hypothèses de travail, des lithologies et de leurs contacts, des structures, de l'étendue et des limites des zones minéralisées individuelles;
- 6) L'utilisation de l'informatique dans une perspective de flexibilité et de croissance, pour répondre aux besoins futurs au delà des exigences immédiates.

4.8.3 LE CONTRÔLE GÉOLOGIQUE DES TRAVAUX

Le contrôle géologique approprié des travaux de valorisation et des échantillonnages requiert les étapes suivantes:

- 1) une cartographie géologique et structurale de la surface rocheuse et/ou un journal des forages qui comportent:
 - un levé systématique et détaillé, sans être prolix,
 - la délimitation des unités lithologiques, en s'appuyant sur les observations pétrographiques et minéralogiques;
 - des observations structurales, autant dans les sondages qu'en surface;
 - des observations géotechniques du socle rocheux et des matériaux non consolidés;
 - des observations/levés géophysiques appropriés pour compléter et prolonger les informations géologiques;
- 2) un échantillonnage couvrant tous les types géologiques et minéralogiques des minéralisations d'un gisement. Cette règle s'appliquera également, en autant que possible, aux échantillonnages en vrac. Ces derniers devront être accompagnés d'un rapport justificatif comportant plans géologiques, données des échantillonnages précédents et une description géologique et minéralogique appropriée.
- 3) l'étude minéralogique des minéralisations d'intérêt. Ces études sont nécessaires pour la caractérisation des minéralisations, pour la modélisation du (des) gisement(s) et elles seront essentielles pour l'étape minéralurgique.
- 4) la quantification systématique du poids spécifique des minéralisations, avec des méthodes appropriées, au même titre que le contenu en éléments d'intérêt, et ce, à partir du début des travaux de mise en valeur. On utilisera des méthodes de mesures en direct et, lorsque justifié, on utilisera la composition chimique pour le calculer. Lorsque le poids spécifique varie sensiblement ($> 5\%$), on l'utilisera au même titre qu'une donnée analytique pour le calcul des masses.

4.8.4 L'ANALYSE COÛT/BÉNÉFICE

Il faut expliciter les bénéfices recherchés par des travaux additionnels de contrôle géologique (incluant la géophysique), et ce, même et surtout dans l'exploitation minière. Trop souvent, l'argument d'économie est utilisé en invoquant les limitations de budget, de personnel, de temps mais souvent sans pondérer les frais additionnels ou les manques à gagner causés par les pertes et la dilution. L'importance des manques à gagner que l'on pourrait réduire ou même éviter requiert que l'on chiffre les estimés des bénéfices potentiels de telles mesures par rapport aux coûts impliqués, afin d'évaluer l'opportunité d'obtenir des informations additionnelles.

CHAPITRE V

L'OPTIMISATION

DES ÉCHANTILLONNAGES

5. L'OPTIMISATION DES ÉCHANTILLONNAGES	71
5.1 LE PROCESSUS D'ÉCHANTILLONNAGE	71
5.1.1 DÉFINITIONS	71
5.1.2 FORMULE DE PIERRE GY	72
5.1.3 FORMULE DE INGAMELLS	74
5.2 ÉCHANTILLONNAGES GÉOLOGIQUES ET MINIERS	75
5.2.1 CARACTÉRISTIQUES	75
5.2.2 TYPES D'ÉCHANTILLONS	76
5.2.3 FACTEURS A OPTIMISER	81
5.3 CAS TYPES D'ÉCHANTILLONNAGES MINIERS	84
5.3.1 LA REPRÉSENTATIVITÉ	84
5.3.2 LE GISEMENT GOLDEN POND	84
5.3.3 LE PROJET NEW PASCALIS	87
5.3.4 VÉRIFICATIONS À EQUITY SILVER	88
<u>5.4 GUIDES D'APPLICATION</u>	89
5.4.1 REPRÉSENTATIVITÉ	89
5.4.2 STRATÉGIE DES ÉCHANTILLONNAGES	92
5.4.3 ÉVALUATION (GÉO)STATISTIQUE	93
5.4.4 FORMATION DU PERSONNEL ET SUPERVISION	93
5.4.5 ANALYSE COUT/BÉNÉFICE	94

5. LES ÉCHANTILLONNAGES

Échantillon:.....

du latin populaire, "scandaculum" <jauge>, de scandere" <monter> et "scala" <échelle>;

1^o Étalon de mesure, type réglementaire de certains matériaux....

2^o Petite portion d'une marchandise qu'on montre pour donner une idée de l'ensemble....

3^o Fraction représentative d'une population, choisie en vue d'un sondage (stat);

Dictionnaire Le Petit Robert.

5.1 LE PROCESSUS D'ÉCHANTILLONNAGE

5.1.1 DÉFINITIONS

Sur tout projet de définition et de mise en valeur d'un gisement, ce sont les procédures d'échantillonnage qui permettent d'établir la teneur de la masse d'intérêt. Il faut donc s'assurer de la représentativité du matériel prélevé durant les travaux. La distribution pépétique de l'or obligera à plus de compréhension des conditions géologiques, à des procédures plus rigoureuses et à plus de soins et d'efforts que pour l'échantillonnage des autres éléments, si l'on veut estimer la teneur de la masse d'intérêt. La figure 5-0 présente de façon graphique les divers éléments du processus d'échantillonnage.

L'échantillon du géologue/ingénieur géologue se rapproche de celui du statisticien défini ci-haut: c'est **une portion tirée d'une masse avec le but de la représenter**. L'échantillon est donc un **représentant** à partir duquel (plus souvent desquels) on établira un **estimé** de la propriété recherchée dans la masse d'intérêt.

On peut présumer que la valeur de représentation de l'échantillon est reliée à la procédure selon laquelle dont il a été prélevé, à la façon dont il a été réduit en volume en diminuant la dimension des fragments et en le divisant en fractions (ou sous-échantillons), dont l'une seule servira, en général, à estimer la teneur de l'échantillon primaire.

De façon intuitive, on peut percevoir que la représentativité d'un échantillon donné est d'abord reliée à l'hétérogénéité de la masse primaire. De fait, lorsque la masse est d'une grande homogénéité, il est plus plausible que l'échantillon représentera la masse échantillonnée avec un bon niveau de confiance et une marge d'erreur étroite. Par contre, si la masse primaire est hétérogène, l'échantillon aura, dans des conditions identiques, moins de représentativité. La

représentativité de l'échantillon dans un tel cas dépendra du nombre et de la dimension des particules hétérogènes qu'il contient.

A une teneur donnée, plus les particules sont grossières dans la masse, moins elles seront nombreuses, plus vulnérables seront l'échantillon et ses sous-échantillons à des variations de teneur reliées aux variations dans la proportion de particules hétérogènes présentes dans l'échantillon. A partir de ces considérations, on percevra maintenant qu'il y a relation entre:

- la dimension de la masse;
- la dimension de l'échantillon;
- la teneur en un élément (d'intérêt ou délétère);
- la dimension des fragments par rapport à la masse de l'échantillon ou du sous-échantillon;
- la dimension des particules dans la masse;
- le poids spécifique des particules hétérogènes dans la masse, par rapport à celui de la masse.

Il est donc de sens commun que chaque opération d'échantillonnage, de réduction de la granulométrie d'un échantillon et de réduction de la masse par division entraîne une erreur. Ces erreurs sont cumulatives et ce sont les variances, (écart type au carré) qui s'additionnent. C'est à partir de considérations similaires que Pierre Gy et C.O. Ingamells ont établi des formules mathématiques permettant de prédire la valeur d'un échantillonnage. La formule de Pierre Gy a été développée à partir d'expériences sur l'échantillonnage systématique des minéraux en vrac, tandis que celle de Ingamells l'a été dans des conditions géologiques. La différence fondamentale entre les deux formules vient de leur origine. Gy mesure la dimension du tamis qui laisse passer 95% des particules de la masse échantillonnée, tandis que Ingamells utilise la dimension du tamis qui laisse passer 100% des fragments.

On pourra donc conclure, à partir des origines de ces formules, que celle de Ingamells est préférable dans les échantillons géologiques tandis que celle de Gy l'est dans les échantillonnages systématiques des usines. Une présentation synthèse de ces formules et de leur application aux problèmes est faite dans Billette (1978⁴¹) et ceux qui veulent approfondir l'étude pourront consulter Gy, (1967⁴², 1971⁴³, 1979⁴⁴) et également Ingamells, 1974⁴⁵.

5.1.2 FORMULE DE PIERRE GY

Pierre Gy a développé la formule d'échantillonnage qui porte son nom à partir de son expérience prolongée de l'échantillonnage des minerais en vrac. Selon cette formule, si le prélèvement de l'échantillon n'a été accompagné d'aucune erreur de conception ou de

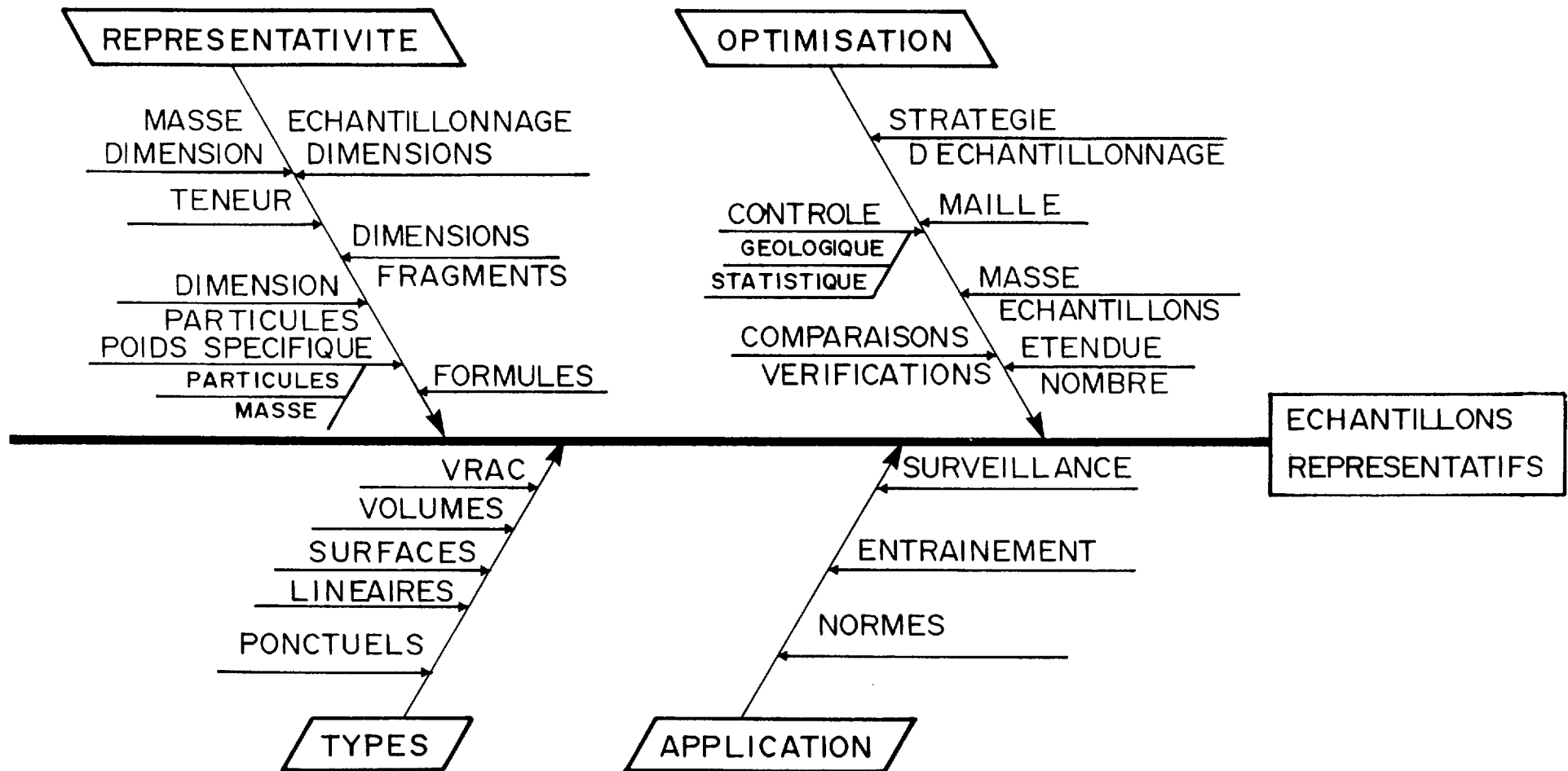


Fig. 5.0

**ASPECTS DES
ECHANTILLONNAGES**

réalisation, il est possible de calculer la dispersion des valeurs fournies par plusieurs analyses successives par rapport à la valeur vraie du lot primaire:

$$\frac{\sigma^2(\ddot{a}_g)}{\ddot{a}_g^2} = \frac{Cd^3}{\underline{m}_g}$$

σ^2 : variance des échantillons

\ddot{a}_g : teneur moyenne (inconnue) du lot $i=1$

\underline{m}_g : masse moyenne(g) de l'échantillon prélevé

d : dimension (cm) du plus gros fragment retenu sur un tamis retenant 95 % des fragments du lot;

C : constante d'échantillonnage en g/cm^3 ou $C = c f g \xi$

c : facteur de composition minéralogique (g/cm^3)

$$c = \frac{(1-a)}{a} ((1-a) \delta_m + a \delta_g)$$

a : estimé de la teneur du minéral d'intérêt, en décimale;

δ_m : poids volumique du minéral de valeur (g/cm^3);

δ_g : poids volumique de la gangue (g/cm^3);

f : paramètre de forme des grains: 0.5 en général, 0.2 pour minéraux en plaques ou paillettes;

g : paramètre de distribution granulométrique, sans dimension;

ξ : paramètre de libération, sans dimension;

5.1.3 FORMULE DE INGAMELLS

La formule de Ingamells, développée dans le contexte géologique, est axée plus sur la valeur de l'analyse individuelle que sur l'ensemble des mesures, étant donné les conditions moins systématiques de l'échantillonnage et le nombre plus restreint d'échantillons. Elle s'appliquera donc mieux dans les conditions analytiques. La formule s'exprime ainsi (les unités utilisées doivent être uniformes):

$$\frac{\sigma^2(a_g)}{\ddot{a}_g^2} = \frac{\sqrt{C_1}}{\sqrt{w}}$$

$\sigma^2(a_g)$: la variance des échantillons;

\ddot{a}_g : teneur moyenne du lot;

w : masse moyenne de l'échantillon prélevé (g);

C_1 : constante d'échantillonnage;

$$C_1 = 10^4 d^3 (\ddot{a}_g - \ddot{a}_s) (\ddot{a}_m - \ddot{a}_s) \xi_m / \ddot{a}_g^2$$

- d : dimension des plus gros fragments, en cm;
- \bar{a}_g : teneur de la gangue en élément d'intérêt;
- \bar{a}_m : teneur du minéral d'intérêt en élément d'intérêt;
- ρ_m : poids volumique du minéral d'intérêt en élément d'intérêt.

5.2 LES ÉCHANTILLONNAGES GÉOLOGIQUES ET MINIERS

Une revue des diverses étapes et procédures contribuant aux erreurs dans les échantillonnages miniers sera faite, à partir des caractéristiques de ces échantillonnages. La figure 5-0 illustre les différents aspects des échantillonnages géologiques et miniers.

5.2.1 CARACTÉRISTIQUES

Les échantillonnages géologiques et miniers sont de divers types, en fonction de leur(s) dimension(s), de leurs modalités et de leurs objectifs. Que la prise d'échantillons se fasse en surface ou sous-terre n'est pas un facteur diagnostique, ce n'est qu'un facteur circonstanciel.

Le facteur essentiel est la caractérisation des échantillons dans le contexte géologique du gisement, selon leur nature et selon leurs dimensions. Les échantillons peuvent être classés en fonction de ces facteurs en cinq groupes principaux:

- A) les échantillons ponctuels;
- B) les échantillons linéaires;
- C) les échantillons en panneaux;
- D) les échantillons de roche cassée;
- E) les échantillons en vrac.

Il faudra aussi évaluer les effets suivants des échantillonnages lors de la mise en valeur d'un gisement:

- i) la représentativité d'un échantillon par rapport à la masse dont il témoigne et l'erreur produite par tout procédé d'échantillonnage. Le cas le plus important est celui de l'échantillon linéaire, carotte ou rainurage par rapport au bloc tri-dimensionnel qu'il doit représenter;
- ii) les procédures d'échantillonnage sur les piles de roche ou les murs et les dimensions requises des échantillons (qui sont le plus souvent trop petits!);
- iii) les manutentions de la roche minéralisée et du stérile;
- iv) l'échantillonnage de la roche concassée pour représenter l'alimentation lors d'essais en vrac.

5.2.2 TYPES D'ÉCHANTILLONNAGES

A) Les échantillons ponctuels

L'échantillon ponctuel typique est le "grab" du prospecteur, par exemple, ou l'échantillon type du géologue. Cet échantillon qui est en général choisi pour être typique d'une minéralisation, non d'un volume, n'a pas de dimension linéaire. On ne peut donc projeter à des volumes les valeurs qui le caractérisent, ni l'utiliser dans la caractérisation d'un gisement.

B) Les échantillons linéaires

Les échantillons linéaires sont typiquement les forages de diverses natures, les rainurages et les grappillages linéaires: tous ces échantillons n'ont essentiellement qu'une dimension. Les deuxièmes et troisièmes dimensions sont fournies par l'espacement entre les échantillons et/ou la dimension de la maille utilisée pour les projections.

a) Les grappillages linéaires

Les grappillages linéaires consistent en un prélèvement de fragments par écaillage, de façon linéaire ou par une série de prélèvements ponctuels sur une surface rocheuse. Ces échantillons sont très vulnérables aux biais introduits par l'opérateur.

b) Les rainurages

Par définition, les rainurages sont des échantillons linéaires prélevés en traçant une rainure ou canal dans la roche au moyen d'un ciseau. En théorie, si la prise est continue et systématique, l'échantillon est représentatif et correspondrait plus ou moins à la carotte d'un sondage. Cependant, l'expérience montre que souvent il est difficile de prélever cet échantillon en continu à cause de la dureté de la roche ou du minerai. Les échantillons qualifiés de rainurages ne sont alors que des grappillages pris linéairement et de façon plus ou moins systématique. La représentativité de tels échantillons est difficile à maintenir lorsqu'une des phases minérales (comme les sulfures) est plus friable que le matériel encaissant. Les seuls rainurages qui méritent une comparaison avec les sondages sont ceux faits avec une scie à roche, en prélevant une carotte systématiquement.

Des comparaisons systématiques, faites par SOQUEM et TECK Corp lors de l'échantillonnage en vrac de la carbonatite niobifère de St-Honoré en 1971, ont indiqué que les rainurages pris dans une roche facilement échantillonnée ($0.40\% < \text{Nb}_2\text{O}_5 < 1.0\%$) donnent, sur le grand nombre, la même moyenne que les sondages au diamant faits en parallèle. Cependant, les corrélations des paires d'échantillons et les écarts types des populations montraient que la dispersion des valeurs est beaucoup plus forte pour les rainurages. Même dans ce cas de

minéralisations peu pépétiques, la précision des déterminations individuelles des rainurages est moindre que celle des sondages au diamant (SOQUEM, rapport interne). Les rainurages sont donc d'une fiabilité relative pour l'échantillonnage de détail et le contrôle minier.

c) Les forages

Les sondages par forages sont la méthode la plus efficace pour délimiter une zone propice, pour rechercher les extensions et les limites d'un amas minéralisé: ils donnent une information lithologique et structurale en plus de l'information analytique. Les forages sont de calibre variable et exécutés par diverses méthodes et on peut les diviser selon l'échantillon obtenu en carottages (au diamant surtout) et en échantillons brisés (percussion, trépan, etc).

Les forages au diamant donnent des échantillons dont la représentativité est optimale, sauf lorsque des problèmes de récupération des carottes se rencontrent. Pour les forages à la percussion ou au trépan, il est souvent possible de recueillir un échantillon représentatif des rognures en utilisant des méthodes appropriées. Il est aussi possible, dépendant de la dimension des particules recueillies, de faire un journal de la lithologie et de la minéralogie des échantillons brisés; cependant toute information structurale est perdue. Les plus sérieux problèmes d'échantillonnages se rencontrent en général dans l'évaluation des gisements de type placer, à cause du matériel non consolidé et de la distribution très pépétique de l'or.

C'est en général dans une perspective d'optimisation et d'économie que l'on tendra à utiliser les forages donnant un échantillon brisé. Cet usage se rencontre surtout dans les forages de détail, une fois connues la lithologie et la structure. A l'occasion, cette décision est dictée par la difficulté de recueillir des carottes par forage au diamant. A l'exploitation, l'échantillonnage des forages de production est une façon économique de fournir un échantillonnage plus détaillé pour le contrôle des teneurs. Les utilisateurs ont tendance à minimiser l'importance des problèmes d'échantillonnage qui peuvent se rencontrer lors de l'usage de ces méthodes de forage comme méthodes de sondage. Des **essais systématiques d'orientation et des vérifications répétées** sont particulièrement importants avec ces échantillonnages moins systématiques. Le *Globe and Mail*⁴⁶ ¹⁴ rapporte des difficultés d'échantillonnage qui ont sérieusement affecté l'évaluation d'un gisement aurifère. Un cas type de vérification des échantillonnages et des analyses des forages dans un contexte d'exploitation est présenté à la section 6.3.4.

¹⁴ XYZ lowered the estimated proved and probable reserves at its ABCDE mine ...by 11 percent, a reduction representing a gold and silver content equivalent to 603,000 ounces of gold. ... XYZ blamed the reduction on the unreliability of assay results obtained by reverse circulation drilling below the water table. ... soft rock washed away around the outer circumference of the hole, a spokesman said.

Les forages de développement exécutés en surface diffèrent des forages sous-terre, surtout par l'orientation et la régularité de la maille; celle-ci est en général plus irrégulière dans les forages sous terre à cause du patron en éventail utilisé, à partir des galeries.

C) Les échantillons en panneaux

Ce sont des échantillons répartis sur une surface, les échantillons en panneaux (panel samples) des mineurs. Ces échantillons sont constitués, par exemple, de prélèvements multiples et systématiques (ou en grappillage non systématique) sur un mur ou le toit d'une galerie ou d'un chantier, ou sur un front de taille. Dans tous les cas où un véritable rainurage est difficile ou impossible, il y aurait avantage à faire des échantillons en panneaux avec un patron systématique, pour augmenter la surface échantillonnée, le volume de l'échantillon et surtout diminuer le biais de sélection du matériel sur la base de la friabilité.

Dans le contexte de l'exploitation souterraine, ces échantillons sont à l'occasion l'objet de la même confusion que les rainurages puisqu'on les assimile plus ou moins parfois avec les échantillons de roche cassée des volées, oubliant que ces derniers représentent des volumes plutôt que des surfaces.

D) Les échantillons de roche cassée

Il s'agit ici une catégorie intermédiaire d'échantillons constituée par des prises sur la roche cassée dans la mine, sur un volume minier, même restreint. A cause du matériel cible et de la méthode d'échantillonnage, ils sont regroupés séparément des échantillons en vrac. En surface, il s'agit des échantillons des tranchées; sous-terre, ce sont les échantillons des volées des galeries et de monteries, des entailles. Dans une exploitation, on prélève également des échantillons dans les points de soutirage, les wagons des trains, les camions ou les bennes des chargeuses navettes.

Le problème est d'obtenir des échantillons représentatifs dans les conditions minières où le volume des fragments varie et où il y a souvent ségrégation des minéraux d'intérêt selon la dimension: le plus souvent, les sulfures se retrouvent dans les fines. Pierre Gy⁴⁷ nous met en garde quant à la difficulté d'obtenir un échantillon représentatif dans ces conditions et quant à la quasi-impossibilité de calculer la précision de tels échantillonnages, même lorsque prélevés avec soin. Trop souvent, les méthodes utilisées ne permettent pas de tenir compte de l'hétérogénéité décrite. Néanmoins, divers palliatifs sont utilisés, avec des niveaux variables de succès. Nous mentionnerons la méthode de la corde à noeuds et celle de la pondération des fragments.

a) La corde à noeuds

La méthode de la corde à noeuds, utilisée pour l'échantillonnage des wagons de minerai de fer, consiste à guider l'échantillonnage sur les noeuds faits à intervalle régulier, le long d'une corde placée sur le matériel à échantillonner. L'espacement, donc le nombre des noeuds, doit être choisi pour obtenir un nombre suffisant de fragments. La dimension des fragments prélevés est fonction du volume désiré (et de la dimension des concasseurs du laboratoire). La règle essentielle est qu'un fragment de la dimension fixée doit être prélevé de la pièce située verticalement sous le noeud; s'il s'agit de fines, un volume égal au volume du fragment prescrit sera prélevé.

b) La pondération des fragments

La pondération des fragments est utilisée à la mine Opémiska pour l'échantillonnage des points de soutirage. C'est une méthode adaptée aux conditions locales. On exploite à cette mine des veines étroites (2 à 3 pieds) minéralisées en chalcopryrite et en or, dans des chantier "longs trous" de largeur planifiée à 6 pieds; une dilution des murs de 30 à 40% s'ajoute au minerai dans ces conditions. Les murs sont massifs et non minéralisés contribuant surtout de gros fragments qui doivent être envoyés au stérile, tandis que les veines sont plus fracturées et friables et que la minéralisation tend à se concentrer dans les fines.

L'échantillonnage des points de soutirage se fait à Opémiska en pondérant les échantillons selon la grosseur et la proportion des fragments. Les fragments sont classés selon les normes suivantes:

- Petit: pris avec la main facilement, dimension maximum de 125mm;
- Moyen: pris avec deux mains difficilement, moins que 50 kg;
- Gros: ne peut être soulevé de terre à deux mains, plus de 50 kg;
- Blocs: "monstres", trop gros pour soulever avec le chargeur
> 5-6 pi.cu.

On prend au moins un échantillon de chaque classe, 4 à 6 au total, souvent de 1 à 3 sacs de fines, 1 sac chacun du matériel moyen et du gros, tandis que les blocs ne sont pas échantillonnés. On pondère la proportion de chaque classe volumétrique pour calculer une moyenne. C'est une façon de procéder qui peut être appropriée pour d'autres exploitations.

E) Les échantillons "en vrac"

Les échantillons en vrac sont les échantillons de volume important, qui se mesurent en centaines ou en milliers de tonnes en général. Ces échantillonnages ont en général plusieurs buts. Le but final de l'échantillon en vrac est d'obtenir les facteurs qui caractérisent le passage d'échantillons linéaires à l'estimation de la teneur des volumes/masses pour l'ensemble du gisement. Cette information est nécessaire autant pour les paramètres d'estimation du gisement que pour les paramètres minéralurgiques et miniers.

L'échantillon en vrac vise d'abord à confirmer la (ou les) teneur(s) estimée(s) pour une zone minéralisée à partir des échantillons linéaires ou de roche cassée lorsque les conditions géologiques, en particulier la distribution pépétique de l'or ou d'un autre élément ne permettent pas des estimations suffisamment fiables. Le deuxième but est d'établir les paramètres minéralurgiques, la récupération, la teneur recouvrable d'une zone définie par les forages et les autres échantillonnages. En parallèle les paramètres miniers des zones étudiées seront précisés, en particulier les paramètres géomécaniques. Le but ultime est **d'obtenir les données quantitatives requises pour l'évaluation du gisement dans une étude de faisabilité, en vue d'une décision d'implantation d'une exploitation rentable.**

Typiquement, un échantillon de l'ordre de 5,000 à 25,000 tonnes sera prélevé à partir des volées d'abattages et souvent des entailles et des monteries, etc. Le choix des volées à inclure dans le vrac sera fait à partir des échantillonnages des volées et des murs adjacents. A partir de ceci, on choisira les portions représentatives qui seront envoyées à l'usine pour concassage et usinage. La dimension et le nombre des échantillons dépendent, en particulier, de la dimension, de la variabilité du gisement et des problèmes anticipés suite aux études préliminaires.

L'échantillon en vrac n'a pas en lui même de valeur magique: son utilité dépendra des liens et des contrôles établis dans les divers domaines:

- a) sur les relations avec les conditions géologiques et minéralogiques du gisement;
- b) sur les relations bien établies entre les données d'échantillonnage et les échantillons linéaires tels les forages et les rainurages sur lesquels s'appuient la procédure d'estimation du gisement ou du chantier;
- c) sur le systématisme et la pertinence de l'acquisition des données d'échantillonnage dans le gisement: est-ce que l'échantillon en vrac représente l'ensemble du gisement que l'on voudra exploiter, quelle portion de la minéralisation représente-t-il?
- d) sur la masse de l'échantillon et sur le systématisme de l'échantillonnage à l'usine, du contrôle minéralurgique et du bilan des essais;
- e) sur la pertinence des informations recueillies par rapport aux besoins d'une exploitation future.

Pour la plupart des métaux autres que l'or, les paramètres commerciaux du produit sont également importants et ils le sont encore plus pour les minéraux industriels: des échantillons appropriés sont souvent requis par le client éventuel dans ces cas. Ces divers aspects seront discutés dans les sections suivantes d'une façon beaucoup plus élaborée et seront illustrés dans les cas types et complétés dans les Règles de procédure. Le Guide reviendra également sur ces questions dans le chapitre 9, qui traite des aspects minéralurgiques de l'estimation.

5.2.3 LES FACTEURS A OPTIMISER

A) La stratégie des travaux

Le Guide a présenté (sect. 4.8.2) des règles d'optimisation de la stratégie de délimitation et de mise en valeur d'un gisement. Il y a avantage à utiliser une méthode d'échantillonnage moins dispendieuse, comme les forages, pour délimiter les continuités et établir les teneurs; dans de nombreux cas, ces travaux ne suffisent pas pour évaluer les teneurs du gisement. Les problèmes d'évaluation des gisements d'or sont accrus quand ce sont des gisements de type veine, de petite dimensions et qui montrent plus de variabilité physique, en plus de l'effet de pépite. Yuill, 1985⁴⁸, a bien résumé ces problèmes d'estimation:

"Dans les gisements de type filonien, comme dans tous les gisements minéraux, le problème essentiel est d'arriver économiquement à une estimation raisonnable de la teneur et du tonnage. Le principal problème, avec les gisements filoniens ainsi qu'avec quelques autres types, est la variabilité des teneurs et des épaisseurs de la masse, que l'on parle en terme de la nature du filon ou de la rentabilité. Certainement, au début, les forages au diamant sont essentiels pour déterminer la continuité sur l'alignement (strike) et en profondeur de la structure de la veine minéralisée... (souvent) ... il serait difficile sinon impossible de déterminer la teneur et le tonnage sans l'appui d'importants travaux de mise en valeur sous-terre. ... Le problème principal dans la mise en valeur d'un gisement filonien est donc de tirer la ligne et de dire: "Finis les forages, on va sous-terre"."

A l'inverse, on sait que passer trop vite à l'échantillonnage en vrac avant d'avoir défini l'étendue et les caractéristiques de la zone minéralisée n'est pas une façon efficace de gérer l'exploration (Vallée, 1989). En pratique, c'est l'appréciation de la géométrie et des limites du gisement (sect 4.2) et l'appréciation de la variabilité des teneurs par le variogramme qui permettront d'évaluer la précision accessible par les échantillonnages linéaires (ou de surface) avant d'entreprendre des travaux miniers et des échantillonnages en vrac. Les problèmes décrits pour les gisements filoniens sont beaucoup plus aigus pour les gisements de type placer. L'échantillonnage en vrac et la production pilote tiennent une place beaucoup plus grande dans la valorisation de ce dernier type.

B) La dimension de la maille

Les dimensions de la maille d'échantillonnage de détail varieront selon diverses contingences. La section 5.8 présente des normes sommaires pour la maille d'ensemble de l'échantillonnage d'un gisement (par forage par exemple) et la section 7.4 traite également cette question. Ce type de maille est relativement peu souple puisque les seuls choix sont la dimension de la maille initiale et la dimension de la maille finale, les étapes de réduction étant à la demie en général, très rarement au tiers.

Les diverses méthodes d'échantillonnage utilisées dans la valorisation minière montrent des options différentes mais également limitées. Les échantillonnages en surface sont en général plus flexibles, avec moins de contraintes que les échantillonnages miniers. Les contraintes qui accompagnent ceux-ci sont en général reliées au cycle d'excavation. Les volées ont en général une longueur de 3m, sauf si des foreuses mécanisées de grande capacité sont utilisées. Ceci fixe automatiquement l'espacement minimum des échantillonnages en panneaux des fronts de taille; en fait dans certaines exploitations, l'espacement est aux deux volées, faute d'échantillonneurs pour accompagner l'équipe de nuit. Une situation similaire prévaut souvent dans les monteries. Pour faciliter les corrélations, les échantillons des murs sont pris pour correspondre aux volées.

C) La masse des échantillons

Pour tous les échantillons, la représentativité est fonction de leur masse et ce facteur est d'autant plus important pour l'or, à cause de sa distribution pépitique. La façon la plus simple d'améliorer la précision des échantillonnages est donc d'augmenter, chaque fois que faire se peut, la masse des échantillons. La facilité et l'économie amènent en général à restreindre la masse des échantillons et également le nombre des prises (fragments plus gros, moins nombreux) pour obtenir une masse donnée.

Par exemple, on se contente trop souvent d'échantillons de 0.5 kilogramme ou moins quand, pour un peu d'effort additionnel, on peut prendre des échantillons beaucoup plus volumineux, d'une meilleure représentativité. Les rainurages faits en surface dans les tranchées sont en général plus volumineux, à cause de la facilité d'accès. Pour la raison inverse, *la masse des rainurages sous-terre tend à être inversement proportionnelle à l'étendue de la mine*, nonobstant l'effet de cette diminution sur la représentativité des échantillons, surtout pour l'or ! Trop souvent, l'équipement des laboratoires n'est approprié qu'à la comminution de fragments de petite dimension et qu'aux échantillons de faible masse.

Pour les carottages, le facteur volume est aussi important. Pour l'or, la représentativité des plus petits diamètres comme le EXT(19mm) est insuffisante. Plusieurs considèrent que le calibre minimum acceptable pour le forage d'un gisement d'or est le AXT (26mm) et que le BQ (36.3mm) est préférable. La division des carottes pour analyse diminue leur volume, donc leur

représentativité et augmente les causes d'erreur. La plupart des exploitations ne divisent pas les carottes des forages de définition sur maille serrée.

D) Ligne vs surface

Une façon simple d'améliorer la représentativité d'un échantillon est de le prélever sur une surface plutôt que sur une ligne, pour diminuer sa vulnérabilité à l'effet de pépite et de prélever un nombre respectable de fragments pour le constituer. Trop souvent on se contente d'une technique de prise d'échantillon simplifiée dont la représentativité pourrait être améliorée à peu de frais, mais avec un peu plus d'effort. Les rainurages/grappillages simples peuvent être remplacés par des rainurages/grappillages multiples ou par des échantillons en panneaux pour améliorer le nombre des prises (et la masse de l'échantillon), donc la représentativité.

E) Le nombre des échantillons

Augmenter le nombre des échantillons est une autre façon d'augmenter la précision d'un échantillonnage. Par exemple, lors de travaux en surface, on néglige souvent d'établir la densité de la maille des échantillonnages à un niveau équivalent à celui que l'on juge normal dans les échantillonnages en galeries minières. Pourtant les conditions en surface permettent de situer des échantillonnages de façon beaucoup plus souple que les conditions des travaux en galeries souterraines.

F) Contrôle géologique et statistique

L'importance et les méthodes du contrôle géologique des échantillonnages ont été établies au chapitre 5, particulièrement aux sections 5.2 et 5.8. Le contrôle statistique et géostatistique des échantillonnages est essentiel. Il doit comprendre des vérifications, des comparaisons et des standardisations et s'étendre à tous les aspects des résultats des échantillonnages, dans le cadre d'une méthode donnée et aussi entre les différentes méthodes. Les cas type de Equity Silver et de Inco Casa Berardi, donnés plus loin, sont des exemples à suivre. Une discussion plus générale des problèmes de contrôle d'échantillonnage et de contrôle est présentée dans Sinclair, 1978⁴⁹.

Podolski, 1986⁵⁰ souligne l'importance de déterminer les causes des différences observées et de déterminer également ce qu'il appelle le "human nugget effect": l'effet de pépite humaine, dû à des variations ponctuelles ou cycliques dans les procédures ou les méthodes d'échantillonnages. Les exemples qu'il cite montrent l'utilisation de variogrammes et d'autres techniques statistiques et géostatistiques relativement simples. Il y en a aussi des plus compliquées!

Souvent, l'on néglige d'établir les procédures de vérification qui demanderaient un nombre additionnel d'échantillons. Le chiffre de dix pour cent d'échantillons de vérifications (duplicata et standards ou étalons) est utilisé par beaucoup de compagnies comme un minimum dans le cas de vérifications d'analyses chimiques. Le chapitre suivant, qui traite des analyses reviendra sur le sujet des vérifications.

5.3 CAS TYPES D'ÉCHANTILLONNAGES MINIERS

Dans les cas où l'on dépense des montants importants pour obtenir des échantillons en vrac, il est essentiel d'en tirer le maximum d'information. Les volées soutirées sont trop rarement échantillonnées adéquatement, même la technique de la corde à noeuds est rarement utilisée. La seule méthode suffisamment fiable pour obtenir les teneurs des volées individuelles est de concasser et d'échantillonner les volées individuelles à la sortie de la galerie d'échantillonnage comme, par exemple, la compagnie Inco Ltée l'a fait au projet de Casa Berardi.

5.3.1 LA REPRÉSENTATIVITÉ

Les échantillons en vrac doivent être représentatifs de l'ensemble du gisement. S'ils ne le sont pas, on doit en tenir compte dans les projections techniques et financières. Le Guide rappelle ici l'échec technique et financier qui a résulté de la mise en exploitation d'un gisement de molybdène en Abitibi, il y a quelques décennies (Anglo American Molybdenite Ltd).

Le noeud d'une situation difficile et complexe est que les minéralisations de molybdénite étaient distribuées dans des veines de quartz et également dans des schistes à séricite. Les essais en usine pilote avaient porté sur la minéralisation située dans les veines de quartz, tandis que les 3/4 des réserves (et les plus riches) se situaient dans des schistes à séricite. L'extraction à l'usine de la molybdénite contenue dans ce dernier matériel a présenté des problèmes minéralurgiques qui n'avaient pas été évalués et qui se sont avérés insurmontables. Ces problèmes techniques ont amené la faillite financière de l'entreprise, malgré tous les efforts de redressement.

5.3.2 LE GISEMENT GOLDEN POND

Podolski, 1986, ⁽⁴¹⁾ décrit la procédure suivante utilisée pour une campagne d'échantillonnages sous terre dans un gisement aurifère situé dans une formation ferrifère. Notons que la minéralisation d'or est: "*fine grained and relatively uniformly distributed*" (finement grenue et de distribution relativement uniforme).

Echantillonnage des volées

" Toute la roche prélevée de chaque volée (dans la galerie située dans la zone minéralisée) a été concassée en deux étapes jusqu'à -19mm (3/4") et transportée par convoyeur à une tour d'échantillonnage où un échantillonneur de type C a

fourni un échantillon de 1/10, réduit de nouveau à 1/5 pour obtenir un échantillon de 725 kg. Cette portion a ensuite été réduite à la dimension de -3.2mm dans un concasseur à rouleau et un diviseur Vezin a prélevé 1/10 de cet échantillon, soit environ 7.25 kg, soit environ 1/500 du matériel de la volée. Ce produit a été séché et concassé à -10 mailles dans un concasseur Gy-roll, divisé en deux portions qui ont chacune été réduites à 4.5 kg (10lbs) dans un diviseur Gilson. Chacun de ces derniers échantillons a été divisé sur rifles en deux portions de 300g qui furent ensuite pulvérisées à -100 mailles (plaques ou Bueller ??) et tamisées à 150 mailles. Pour chaque échantillon, les portions furent pesées, la portion de +150 m analysée au complet et une prise d'un assay ton prélevée et analysée, également par pyroanalyse. Une moyenne pondérée a été calculée pour chaque échantillon individuel et la moyenne des quatre échantillons individuels appliquée à la volée.

Echantillonnage des bennes des chargeuses

"Lors du chargement de la roche cassée dans la galerie, un échantillon de 36 kg (80 lb) a été constitué à partir de pelletées de roche de -100mm prélevées de chaque benne du chargeur. Cet échantillon a ensuite été concassé à -10 mailles, divisé à 4.5kg (10 lb) et deux portions de 300 grammes prélevées pour analyse. Une portion a été tamisée pour les métalliques (-150 et +150 mailles et l'autre analysée par méthode conventionnelle.

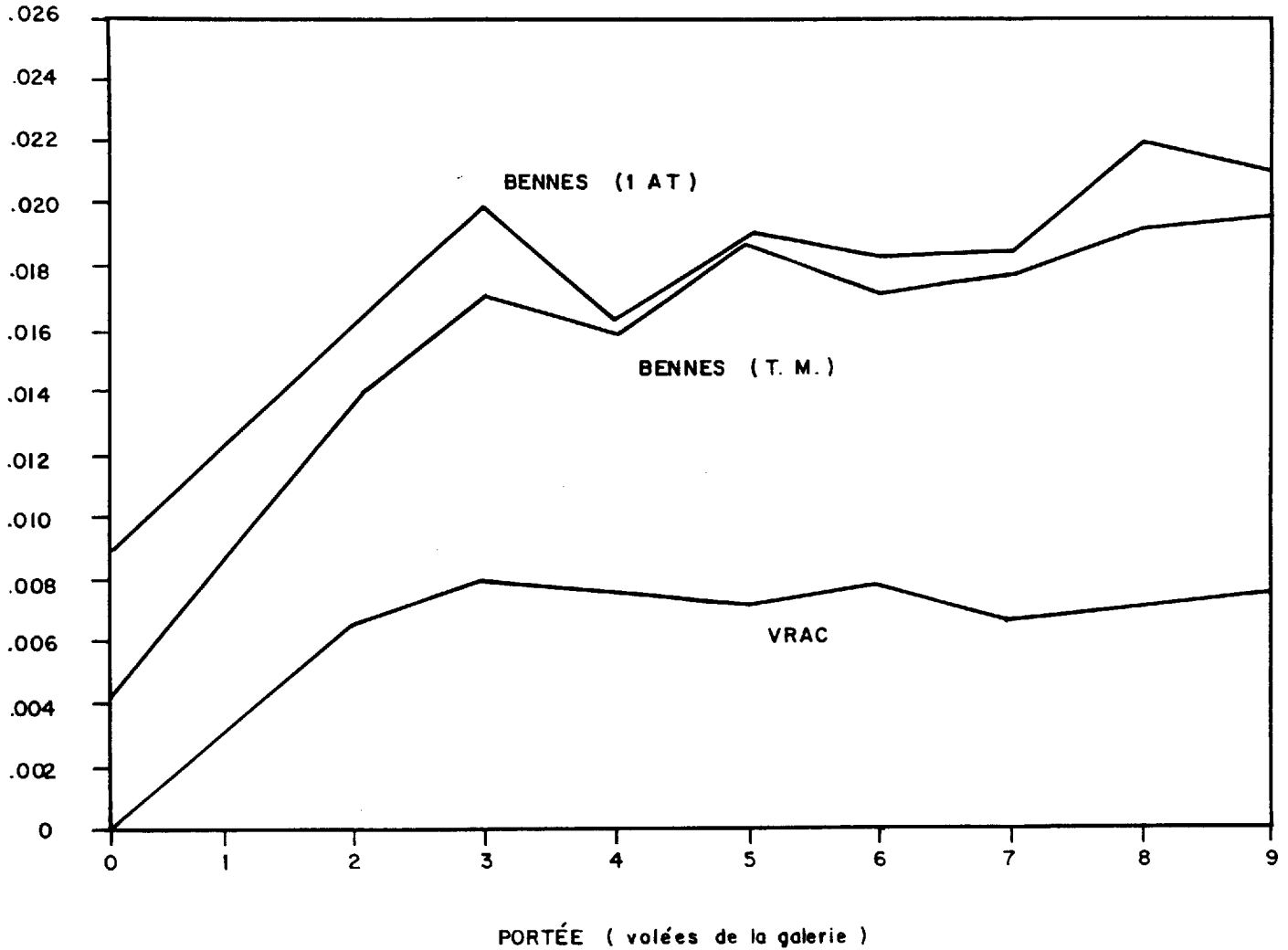
Rainurages

"Des échantillons de 9 à 14 kg ont été pris au moyen d'un ciseau pneumatique, dans le toit de la galerie, le long de l'axe central de la galerie.

Podolski compare ensuite les résultats de ces trois procédures pour 36 volées consécutives. Ces résultats sont compilés au tableau 5-1, tandis que la figure 5-1 présente les semi-variogrammes des échantillons des volées.

SEMI-VARIOGRAMME
DES ÉCHANTILLONNAGES
DES VOLÉES

SEMI-VARIOGRAMME



TIRÉ DE: Podolski, 1986
Gisement de Golden Pond Est.

Tamisaie
T. M.: Tonnage des métalliques

Fig. 5.1

TABLEAU 5-1

COMPARAISONS DES MÉTHODES D'ÉCHANTILLONNAGE DES VOLÉES

	<u>Moyenne</u> on/t Au	<u>Effet de pépité</u>	<u>Portée</u>	<u>Variance</u> globale
Echantillons en vrac	0.312	Nul	3 rondes	0.009
Bennes, tamisées	0.295	Oui	3 rondes	0.0178
Bennes non tamisées	0.283	Oui	3 rondes	0.0185
Bennes combinées	0.289	0.06	3 rondes	0.0172
Rainurages	0.35#		Non corrélés	0.08

les rainurages montrent un biais à la hausse de 20% par rapport aux échantillons en vrac.

Les frais additionnels investis dans la tour d'échantillonnage sont très justifiés, du point de vue du géologue/ingénieur géologue autant que de celui de l'ingénieur ou du dirigeant. Dans ce cas-ci, l'échantillon en vrac donne des valeurs plus élevées, il est vrai, mais l'inverse pourrait se produire. L'échantillonnage en vrac montre un effet de pépité nul, une moindre variance globale, donc il permettra des estimations plus précises au niveau de l'étude de faisabilité. On notera la faible fiabilité des rainurages: ils montrent un biais important par rapport aux données des volées, en plus d'une forte dispersion des données individuelles.

5.3.3 LE PROJET NEW PASCALIS

Ce gisement est devenu la mine Lucien Béliveau de Cambior inc. Les résultats d'un projet d'échantillonnage minier sur la partie supérieure alors connue, (Vallée, Gilbert, Dagbert, 1986⁵¹), montrent les limites des méthodes non systématiques d'échantillonnage des roches brisées, malgré des procédures méthodiques et une supervision assidue.

Ce gisement est de géométrie complexe: son expression coïncide avec un filon de diorite étroit, vertical, allongé sur un axe nord-sud. La minéralisation est associée à des veines de quartz alignées d'est en ouest et d'allongement variable par rapport au mur du filon de diorite; les veines plongent vers le sud à -40°. La zone minéralisée a été échantillonnée par des forages à diamant sur maille 20m, d'inclinaison variable et orientés sur sections transversales. Des forages verticaux sur maille 10m ont été placés dans les galeries d'échantillonnage.

L'échantillonnage minier s'est fait par galeries, travers-bancs, entailles et monteries. Toute la roche provenant de volées considérées comme faisant la continuité de la minéralisation dans les galeries ou entailles horizontales a été échantillonnée par volée individuelle selon la méthode de la corde à noeuds, après transport à la surface, tandis que le matériel des monteries a été échantillonné dans la galerie.

Les murs et les fronts d'attaque des galeries et des monteries ont été échantillonnés par la méthode "en panneau", par prélèvement systématique d'écailles (chips/grappillage) sur toute la surface. Cette méthode a été considérée comme étant plus représentative que la méthode conventionnelle des rainurages et plus facile d'application dans une roche très dure. Tous les fronts d'attaque et les murs des ouvertures ont été cartographiés en détail.

Un échantillon en vrac de 25,000 tonnes a été constitué à partir des volées minéralisées jugées représentatives du gisement. Les valeurs analytiques des volées sont supérieures de 20% par rapport à celles du bilan de l'usine. Voici quelques comparaisons:

COMPARAISONS, MISE EN VALEUR / GISEMENT NEW PASCALIS

<u>MÉTHODE</u>	<u>Or, g/t</u>
Veines de quartz, individualisées	6.77g
Forages verticaux, maille 10m	3.87g
Murs et fronts de taille	3.90
Volées constituant le vrac	4.15
Bilan minéralurgique de l'usine	3.32

On pourrait faire l'hypothèse qu'un biais s'est introduit dans l'application de la procédure suivie pour l'échantillonnage des volées (corde à noeuds). Cette interprétation considérerait les valeurs du bilan de l'usine comme absolues! Le chapitre 9 discute des problèmes d'échantillonnage des minerais d'or en usine et des problèmes du bilan métal. Ces difficultés de corrélation justifient la dépense additionnelle du concassage et de l'échantillonnage systématique de toutes les volées, comme Podolski le décrit plus haut.

5.3.4 VÉRIFICATIONS À EQUITY SILVER

Un cas type de vérification élaborée de l'échantillonnage et des analyses prélevés sur des forages de production a été présenté par Giroux, Sinclair et Miller, 1986⁵². C'est dans une perspective d'amélioration du contrôle de la qualité dans l'exploitation minière, que ces vérifications des analyses et de la préparation des échantillons ont été entreprises. Elles ont consisté en quatre étapes:

- 1) analyses en duplicata pour l'argent,
- 2) échantillonnages en duplicata des rognures des forages pour les sautages,

- 3) essais sur diverses procédures d'échantillonnages des rognures,
- 4) évaluation des résultats.

L'interprétation des données s'est faite selon un cheminement systématique et les étapes de travail utilisées sont citées dans les Guides d'application en section 5.4. comme procédure-type. Cette procédure a permis d'identifier les erreurs aléatoires, les biais stables et les biais proportionnels, comme l'indique la figure 5-2 tirée de Moreau, Sinclair, Miller.

Les résultats ont indiqué les éléments suivants:

- 1) un biais d'importance entre deux laboratoires sur les analyses d'argent;
- 2) une erreur aléatoire importante causée par la méthode d'échantillonnage par tube utilisée pour l'échantillonnage des rognures des forages de production;
- 3) une relation directe entre la reproductibilité des teneurs et le volume de l'échantillon obtenu des rognures des forages de production;

Une analyse économique a été effectuée pour établir, par un bilan de masse sur une surface restreinte, le résultat d'une meilleure sélection. Pour une teneur coupure de 30g/t Ag, les erreurs observées amenaient la sélection comme minerai de 5 blocs de stérile et la perte de 3 blocs de minerai (bloc de sélection minière de 341 tonnes). Cette situation, résultant en un manque à produire de 43,546 g d'argent, entraînerait un manque à gagner de près de 1M\$ sur une année de production.

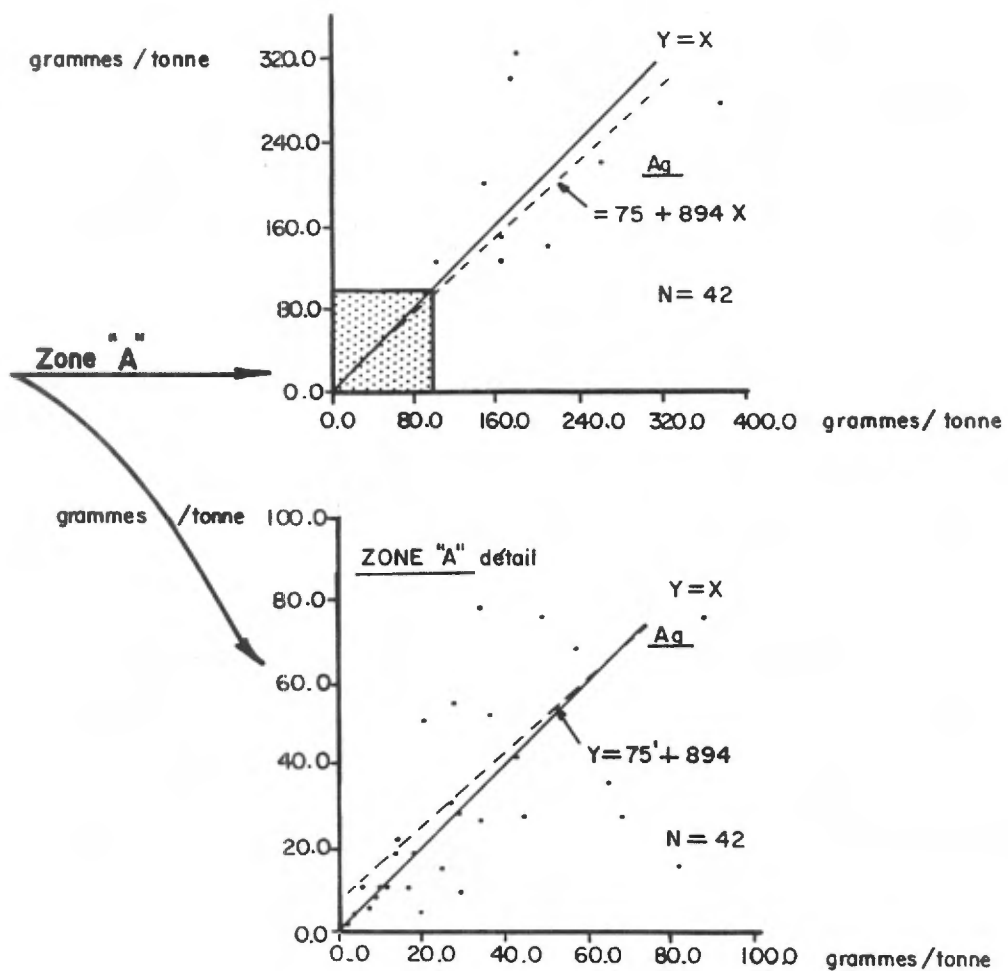
5.4 GUIDES D'APPLICATION

Plusieurs facteurs doivent être optimisés pour assurer des évaluations plus précises des teneurs des échantillons prélevés. Ces facteurs sont la stratégie des échantillonnages et les procédures de prélèvement des échantillons linéaires, de surface, de vrac. Des procédures rigoureuses de vérification, de contrôle et de surveillance des échantillonnages sont également requises.

5.4.1 LA REPRÉSENTATIVITÉ

L'objectif est d'améliorer la représentativité des échantillons prélevés, donc la précision des résultats des estimations qui s'appuient sur les résultats des analyses faites sur ces échantillons, à partir d'une meilleure compréhension des phénomènes en présence:

ÉCHANTILLLLONS DANS LA MINE vs ÉCHANTILLONS DE CONTRÔLE



FORAGES DE PRODUCTION
VÉRIFICATIONS DES ÉCHANTILLONNAGES

EQUITY SILVER MINES.

TIRÉ DE : Moreau, Sinclair, Miller, 1986

Fig. 5. 2

- 1) La représentativité des échantillons est reliée directement à la masse totale, au nombre des fragments et à la dimension de ces fragments. La masse optimale est la plus grosse possible, le nombre de fragments devant être le plus élevé possible et leur dimension limitée, étant donné l'interrelation avec la masse totale. Il peut être requis **d'augmenter le gabarit des équipements des laboratoires pour traiter des échantillons plus volumineux**, lorsque nécessaire.

Les normes suivantes sont proposées pour la prise des échantillons:

i) les masses minima:

- rainurages: un minimum de 2.5 kg;
- forages: le calibre AQ ou AXT est le minimum acceptable, les carottes entières seront utilisées dans les phases de détail;

ii) le nombre de fragments dans les échantillons miniers:

- un minimum de 20 fragments;
- des prises multiples, sur plusieurs lignes, surtout lorsque les structures ou (masses) échantillonnées sont étroites;

iii) la dimension des fragments:

- une dimension maximale de 25mm pour les fragments individuels, dans les échantillons dont la masse **doit être limitée** à cause de considérations pratiques (distances etc);
- à défaut d'uniformité dans les fragments, on prendra une masse équivalente à chaque point de grappillage contribuant à un échantillon;

iv) la longueur:

- une longueur minimum de 250mm, sauf lorsqu'il s'agit d'individualiser une structure très riche; à ce moment, les échantillons adjacents seront mesurés de façon à permettre de reconstituer la longueur usuelle utilisée dans ce gisement;

v) les procédures de prélèvement:

- Utiliser des procédures qui réduisent les biais de sélection telles:
 - .véritables rainurages, chaque fois que c'est possible, ou utilisation d'une scie à roche;
 - .grille systématique pour les grappillages sur les murs ou toits, corde à noeuds pour les échantillons de roche cassée;

.pondération des fragments, en prenant plusieurs échantillons représentant des classes granulométriques différentes, les teneurs des échantillons étant pondérées selon la proportion de la classe.

5.4.2 STRATÉGIE DES ÉCHANTILLONNAGES

La représentativité des échantillons en vrac est essentielle, compte-tenu des frais et de la portée de ces informations. Plusieurs points cités demanderont une attention particulière pour atteindre les buts recherchés. Ce sont:

- 1) un contrôle géologique suivi et serré pour obtenir toute l'information accessible dans les travaux d'échantillonnage et pour bien caractériser les échantillons prélevés;
- 2) le contrôle des procédures des échantillonnages: contrôle des prélèvements, contrôles statistiques des résultats (Sinclair, 1978⁵³);
- 3) l'utilisation appropriée des échantillons linéaires qui sont la façon la moins dispendieuse de définir l'étendue d'une zone minéralisée d'intérêt économique; l'étude de la géométrie du gisement et des variogrammes indiquera si des échantillonnages en vrac sont requis pour l'estimation du contenu métal des minéralisations (sect 5.2.2);
- 4) l'utilisation des échantillonnages en vrac et des travaux miniers pour confirmer la continuité des minéralisations établies par les échantillons linéaires et surtout la teneur des masses et les paramètres minéralurgiques, ainsi que les caractéristiques géotechniques et minières;
- 5) la maille finale des échantillonnages doit être reliée à la zone d'influence des échantillons telle qu'établie par géostatistique et par expérience;
- 6) des comparaisons appropriées entre méthodes de forages/échantillonnages; ceci implique la duplications des prises et des essais, avec des contrôles statistiques et géostatistiques des résultats;
- 7) l'échantillonnage systématique des volées, pour établir la variabilité de la minéralisation selon les valeurs des volées individuelles; des échantillonnages et forages de contrôle pour établir la portée du vrac;
- 8) le bilan rigoureux de l'usine de traitement pour permettre une corrélation appropriée avec les données de l'échantillon; cet objectif requiert le contrôle de la masse, de la teneur, de la nature (lithologie, minéralogie) de l'alimentation, du produit et des rejets de l'usine de traitement. Les problèmes de l'échantillonnage et du bilan des usines sont discutés au chapitre 9;

- 9) la justification de la projection des données de l'échantillon traité à l'ensemble du gisement, en situant dans l'ensemble l'échantillon limité traité, en tenant compte de toutes les variations lithologiques et minéralogiques observées.

5.4.3 ÉVALUATION (GÉO)STATISTIQUE

La procédure type d'évaluation qui suit couvrira la majorité des cas de vérification d'échantillonnages et pourra être adaptée aux cas particuliers (Giroux, Sinclair, 1986):

- 1) évaluation en parallèle des données brutes et des valeurs logarithmiques;
- 2) graphiques log/probabilité comme vérification de distributions multi-modales;
- 3) tests en paires des valeurs brutes ou de leurs logarithmes (test de Students) et tests non paramétriques (Wilcoxon) lorsque suggérés par la forme de l'histogramme;
- 4) Examen de graphiques en x/y des données brutes et des données logarithmiques, pour une évaluation subjective des erreurs ou variations présentes en fonction de la concentration;
- 5) Ajustement de courbes, surtout de modèles linéaires pour quantifier les erreurs;
- 6) Calcul et comparaison des variogrammes des résultats des diverses méthodes dans le cas de valeurs distribuées spatialement.

5.4.4 LE PERSONNEL ET LA SUPERVISION

La distribution pépétique de l'or oblige à prendre (ou recommander) toutes les mesures requises pour optimiser, par des essais et des comparaisons appropriés, les procédures d'échantillonnage de l'or dans le gisement sous étude. Dans une perspective d'optimisation, il faut éviter les "économies" mal avisées dans ce qui constitue l'essentiel d'un projet de mise en valeur:

- 1) **l'échantillonnage ne doit pas être "délégué" aux mineurs** car les objectifs des mineurs ne sont pas ceux des géologues et des ingénieurs géologues! Sur un projet de mise en valeur, cette délégation constitue un dangereux abandon de responsabilité de la part des géologues et des ingénieurs chargés des aspects techniques d'un tel projet. Dans une exploitation minière, l'échantillonnage par les mineurs n'est acceptable que si les résultats sont semblables à ceux des échantillonnages de contrôle par le personnel géologique;
- 2) **les échantillonneurs doivent être présents 24 heures par jour, 6 (ou 7) jours par semaine**: surtout lors de la mise en valeur, il est nécessaire que les échantillonneurs soient présents avec les mineurs, pour bien contrôler la manutention de la roche et la qualité de l'échantillonnage;
- 3) **le contrôle de la qualité de l'échantillonnage** doit être établi et maintenu par la formation, la sensibilisation et la supervision du personnel impliqué.

5.4.5 L'ANALYSE COUT/BÉNÉFICE

Comme il a déjà été recommandé dans le cas du contrôle géologique, il faudrait plus souvent expliciter les coûts des efforts et des travaux additionnels par rapport aux gains/pertes que les imprécisions peuvent entraîner dans l'exploitation minière. Chiffrer les bénéfices possibles en conséquence de l'application de telles mesures, par comparaison aux risques plus grands lors des décisions et aux pertes possibles ou probables, fournirait des critères additionnels de décision pour orienter les choix.

CHAPITRE VI

LES ANALYSES

6. LES ANALYSES	97
6.1 PRÉCISION vs EXACTITUDE	97
6.2 PRÉPARATION ET ANALYSE DE L'OR	100
6.3 LES PROBLEMES D'ÉCHANTILLONNAGE DE L'OR	102
6.3.1 CAUSES D'ERREUR	102
6.3.2 CONTAMINATION	103
6.3.3 RAPPORTS ET PROCÉDURES	103
6.3.4 VÉRIFICATIONS	104
6.4 CAS TYPES	105
6.4.1 VÉRIFICATIONS À MINE DOYON	105
6.4.2 CAS TYPE EQUITY SILVER	105
6.5 <i>GUIDES D'APPLICATION</i>	106
6.5.1 RÈGLES GÉNÉRALES	106
6.5.2 PROCÉDURES STANDARDS	107
6.5.3 VÉRIFICATIONS ET ESSAIS	107

6. LES ANALYSES

Le présent chapitre portera sur les procédures d'échantillonnage de l'or au laboratoire en vue des déterminations. Nous verrons quelques exemples d'utilisation des techniques statistiques dans l'établissement des méthodes et des procédures d'échantillonnage et d'analyse. Il convient de rappeler que la détermination de la densité spécifique des échantillons des minéralisations est une étape essentielle de l'évaluation du contenu métal d'un volume: ce sujet a été discuté au chapitre 4. La figure 6-0 illustre les démarches requises pour obtenir à la fois la précision et l'exactitude des déterminations analytiques

6.1 PRÉCISION vs EXACTITUDE

Les résultats d'analyses sur les échantillons de roches minéralisées ou stériles doivent être l'objet de vérifications pour s'assurer de leur fiabilité. La fiabilité s'appuie sur leur exactitude (accuracy) et leur précision. Dans la pratique, on utilise souvent le terme précision au sens large, incluant la précision "stricto sensu" et l'exactitude.

Une définition officielle est fournie par le Standard ASTM E-177 (1971), qui définit ainsi ces deux termes:

"Precision of measurement processes refers to the degree of mutual agreement between individual measurements, while accuracy refers to the degree of agreement of such measurements with an accepted reference level of the property in the material measured."

Le Houillier⁵⁴ (1987) démontre clairement, à partir d'illustrations des placements de tirs sur des cibles, la différence entre ces deux concepts. Des tirs groupés sur le centre de la cible sont précis et exacts. Des tirs groupés mais décentrés sont précis mais inexacts, des tirs mal groupés mais centrés sont imprécis mais exacts en moyenne.

La précision (au sens restreint) dépend de la représentativité du matériel soumis au processus analytique d'une part et de la reproductibilité des déterminations d'autre part:

- l'échantillon soumis au procédé d'analyse doit être représentatif du matériel ou du lot dont il provient. La prise d'une portion (échantillon) d'un matériel hétérogène est susceptible d'une certaine erreur: cette erreur peut être minimisée en choisissant adéquatement les procédure de broyage, de pulvérisation et de division. La granulométrie et la masse des portions sont les paramètres qu'il faut surveiller.
- la reproductibilité des déterminations réfère à la capacité du procédé analytique de répéter les mêmes chiffres sur du matériel identique.

Les formules et les procédures développées par Gy (36, 37, 38) et Ingamells (39) permettent d'établir le pourcentage d'erreur prévisible dans l'échantillonnage d'un matériel hétérogène. Ces formules s'appuient sur la (les) dimension(s) et la teneur des particules de la substance visée dans l'échantillon d'origine ainsi que sur la quantité de matériel retenu aux étapes successives de réduction et de division de cet échantillon.

La variabilité des lectures d'un procédé analytique peut être chiffrée à partir d'échantillons identiques, mais de préférence non identifiés comme tels par l'analyste, suffisamment nombreux pour permettre un traitement statistique.

L'exactitude d'une détermination, soit la conformité entre le contenu mesuré et le contenu réel d'un élément dans un échantillon, peut être assez difficile à établir dans les cas où la précision est affectée par des problèmes d'échantillonnage ou des problèmes analytiques. Plus généralement l'exactitude est atteinte au moyen de la standardisation qui comprend les opérations d'étalonnage et de calibration. Il existe dans le domaine géologique des standards de divers minéraux et roches; des standards synthétiques sont aussi préparés: citons, en particulier, la série de standards de roches et minerais offerte par la Commission géologique du Canada à l'industrie et aux chercheurs.

Un étalon est un échantillon type de matériel dont les propriétés sont connues à un niveau donné de précision; l'étalon peut servir de standard si ses propriétés sont connues avec grande exactitude. Un étalon peut aussi servir de repère relatif. Par exemple, un étalon composé d'une roche type ou minéral type établi, comme homogène par un grand nombre de déterminations, peut servir de repère entre plusieurs séries de déterminations, plusieurs campagnes d'échantillonnages, même si le contenu en valeur absolue de l'élément d'intérêt n'est pas établi avec la plus grande exactitude.

Il faut distinguer entre les étalons et les duplicata d'échantillons. Des échantillons étalons introduits dans les échantillons des campagnes courantes donnent un repère et une vérification de la calibration. Cependant, les duplicata ont un rôle différent, puisque leur concordance peut dépendre autant de la qualité de la préparation des échantillons à un moment donné, que de la précision des déterminations. Il va de soi que les duplicata ne nous disent rien de l'exactitude elle-même. Il va de soi également que pour être efficace et objective, la vérification exige que la présence des étalons et des duplicata soit ignorée du laboratoire qui fait les déterminations. Ceci présente des difficultés lorsque la préparation des échantillons est confiée au groupe qui exécute les analyses. **Comme les espions, les étalons, les standards et les duplicata sont efficaces en autant qu'ils voyagent incognito!**

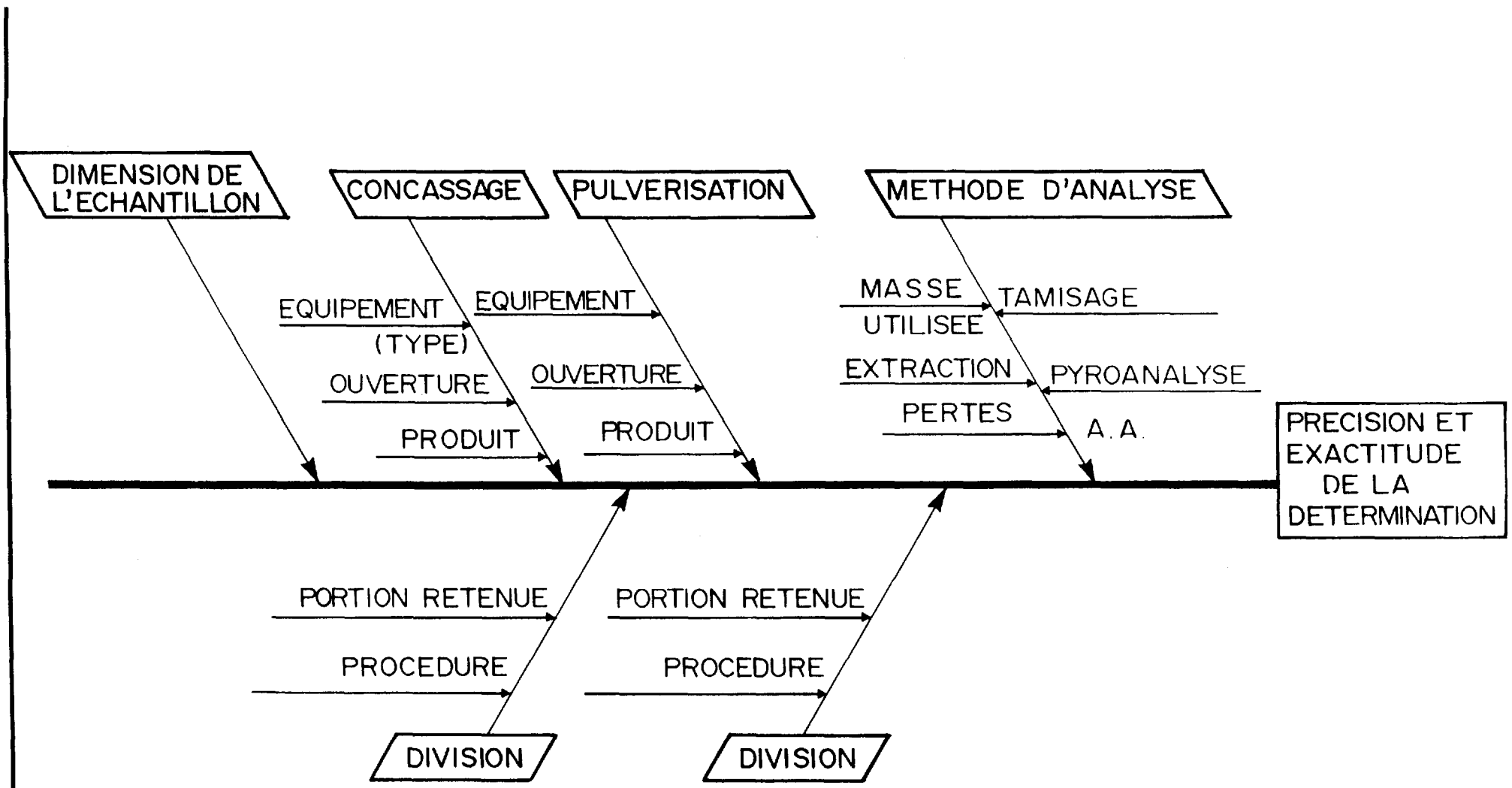


Fig. 60

Nombre d'organismes gouvernementaux et de compagnies minières appliquent la règle selon laquelle il est requis d'exécuter des vérifications au moyen de standards/étalons et de duplicata en nombre équivalant à 10% ou plus de l'ensemble des analyses et ce, autant dans les campagnes de géochimie d'exploration que dans les campagnes de valorisation des indices et des gisements.

6.2 PRÉPARATION ET ANALYSE DE L'OR _____

Nous passerons en revue les procédures du laboratoire pour la préparation des échantillons et la procédure d'échantillonnage. Ceux qui désirent des informations plus élaborées pourront référer à l'étude de Palmer et Wright⁵⁵ sur les procédures types de la pyroanalyse. Coxon et Sichel⁵⁶ (1959) font, dans le contexte minier sud-africain, une revue détaillée de toutes les procédures et des vérifications à différentes étapes en vue d'en optimiser le rendement et la précision. L'article de Bloom⁵⁷ (1989) offre des mises en garde pour le personnel d'exploration.

Les procédures standard présentées ici comportent le minimum requis. La qualité des résultats, qui doit être mesurée au moyen de vérifications et d'essais, dépendra des paramètres spécifiques de la minéralisation concernée. Pour une minéralisation comportant de l'or grossier, il sera approprié d'utiliser la méthode du tamisage des métalliques.

A) La pyroanalyse conventionnelle

Pour assurer la représentativité des portions (ou prises) prélevées des échantillons pour fins d'analyse, la procédure suivante, qu'utilisent plusieurs laboratoires réputés, doit être exigée du laboratoire d'analyse comme standard minimum de préparation:

- 1) broyage du matériel à 100% moins 20 mailles (0.85mm) avant tout quartage;
- 2) prise d'au moins 300 grammes pour pulvérisation après quartage;
- 3) pulvérisation à 100% moins 100 mailles (0.15mm);
- 4) prise d'au moins un assay ton (29.166 g) pour pyroanalyse;
- 5) la détermination de l'or dans la bille de plomb obtenue peut être faite par absorption atomique (plus sensible et plus précise) ou par méthode conventionnelle à ce stade. On verra les méthodes de titration dans Brindamour et Le Houillier⁵⁸ (1988).

Coxon et Sichel concluent l'étude citée plus haut en faisant état d'une amélioration de l'ordre de 50% dans la fiabilité (précision+justesse) des analyses, suite aux diverses améliorations apportées. Ils recommandent tout de même d'utiliser des échantillons d'un poids minimum de 30 grammes pour la pyroanalyse et mais jugent que des prises de 60 grammes préférables. Ceci

contraste avec la tendance des laboratoires d'utiliser des prises de 15 ou 10 grammes pour la pyroanalyse, afin de réduire les frais, sans parler de l'usage de prises de 3 ou 5 grammes avec la spectrométrie d'absorption atomique.

B) Le tamisage des métalliques

Cette procédure peut réduire les problèmes d'échantillonnage causés par la présence d'or en grains et en paillettes dans l'échantillon soumis à l'analyse. Les premières étapes de préparation sont les mêmes: broyage à -10 mailles ou -20 mailles (1.7mm ou 0.85mm) et prise d'un échantillon d'au moins 300 g pour pulvérisation après quartage. Ensuite, il s'agit, en broyant dans un pulvérisateur à anneau et à rondelle, de s'assurer d'aplatir les particules d'or libre en évitant de les réduire et de les tamiser à -150 mailles (0.075mm ou 75 microns) pour les séparer du reste de l'échantillon. L'échantillon constitué du sur-verse est analysé directement par pyroanalyse, tandis que la partie plus fine est divisée, pulvérisée et divisée à nouveau pour enfin prélever une portion d'un assay ton qui sera analysée par pyroanalyse de façon conventionnelle. Les résultats des deux portions sont pondérés suivant leurs poids.

Une variante économique, mais moins efficace, de cette méthode consiste à utiliser un pulvérisateur à plaque au lieu du pulvérisateur à anneau et palet pour la réduction de l'échantillon. Le Guide ne recommande pas cette procédure, qui n'offre pas autant de garanties d'efficacité que la première, étant plus sujette aux pertes et à la contamination.

Il est à noter que le rejet de l'échantillon d'or ainsi traité ne peut être réutilisé pour fins de vérification, ni pour essais minéralurgiques, puisqu'il n'est plus représentatif de l'échantillon original.

C) L'absorption atomique

La place qu'ont prise les déterminations par absorption atomique d'abord dans la géochimie d'exploration, ensuite dans les déterminations pour les métaux usuels, à cause de leur rapidité et de leur sensibilité, a amené le développement de procédures d'une fiabilité acceptable pour les métaux usuels. Les mêmes raisons de rapidité et de sensibilité ont amené l'application de ces mêmes méthodes aux analyses pour l'or et pour l'argent, à partir des mêmes prises que pour les métaux de base. Ces prises sont de 3 grammes en général, parfois de 5 grammes. Ces masses sont nettement insuffisantes pour assurer la représentativité des échantillons d'or et amènent des problèmes de détection autant que des problèmes de variabilité extrême entre les valeurs obtenues.

6.3 LES PROBLÈMES D'ÉCHANTILLONNAGE DE L'OR

La discussion qui suit s'applique surtout à l'or, étant donné l'importance de l'effet de pépité et des problèmes de distribution statistique, mais nombre des remarques peuvent également s'appliquer à d'autres éléments. Cette discussion se situe dans la continuité des considérations du chapitre précédent sur la représentativité des échantillons. Nous avons relié la représentativité de l'échantillon prélevé à sa masse et, dans le cas d'un échantillon de matériel brisé, au nombre des fragments et à leur dimension.

Dans le cas de l'or (et d'autres minéraux de basse teneur et de distribution pépitique), le problème fondamental est le petit nombre de particules présentes dans un échantillon minéralisé. Ce nombre varie à l'inverse de la dimension des particules. Plus grossier est l'or, plus petit est le nombre des particules et plus variables seront les résultats des analyses prélevées; de même, plus petites seront les portions, plus variables et moins fiables seront les résultats (voir les cas types du chapitre 6). Nous ne contrôlons pas la dimension des particules d'or, mais nous pouvons essayer d'optimiser l'échantillonnage et l'analyse de l'or.

6.3.1 CAUSES D'ERREUR

Le procédé d'analyse requiert une nouvelle étape d'échantillonnage qui introduit de nouvelles marges d'erreur. La précision de la teneur rapportée par le laboratoire dépend des conditions suivantes:

- i) les procédures de préparation de l'échantillon soumis pour l'analyse:
 - finesse de concassage de l'échantillon primaire: il y a avantage à broyer plus fin pour assurer une meilleure distribution des particules minéralisées en vue de l'étape suivante. Il n'y a aucune raison valable d'accepter un échantillon broyé dans un concasseur à mâchoire ouvert à 6mm, ce qui fournit souvent des fragments atteignant 10 ou 12 mm. **A cette étape, tout échantillon devrait être broyé à -2mm dans un concasseur à rouleaux ou giratoire.** On constatera à l'usage que cette procédure facilite considérablement l'étape suivante de la pulvérisation.
 - masse de l'échantillon après division: la division de l'échantillon, en général sur un diviseur à rifle, introduit une nouvelle erreur qui est d'autant plus forte que la portion retenue est plus petite. Le format de 300 g utilisé par les meilleurs laboratoires est un minimum, qui devrait être haussé lorsque de l'or en pépites est fréquent, allant même jusqu'à pulvériser tout l'échantillon après un broyage approprié.
 - procédure de pulvérisation: les pulvérisateurs à plaques sont plus susceptibles de contamination que les pulvérisateurs à rondelle et à anneau (type Bueller). La méthode du tamisage des métalliques prend avantage de la moindre réduction et de l'apla-

tissement des particules d'or pour en faire la ségrégation et réduire ainsi le problème de l'effet de pépite.

- pertes et contamination: l'or étant friable et malléable, il est nécessaire de vérifier le comportement des divers minerais dans les procédures, en variant les normes et les paramètres. A cette étape, une pulvérisation trop poussée entraîne parfois des pertes et de la contamination. Par exemple, il pourrait être plus approprié pour certains minerais de pulvériser à -100 mailles (0.15mm) qu'à -150 mailles (0.106mm).

- masse de matériel utilisé pour la détermination par pyroanalyse. L'extraction par pyroanalyse est en général considérée comme plus complète que celle des attaques à l'acide. Le volume de la prise influence directement la marge d'erreur probable, comme le démontrent les cas types. Même avec la méthode du tamisage des métalliques, il sera préférable de rester avec des prises d'un assay ton pour la portion de -150m (mm).

6.3.2 CONTAMINATION

La contamination des échantillons est une possibilité contre laquelle tout professionnel, tout responsable de programme d'exploration et tout entrepreneur doit être sensibilisé. La contamination peut être une contamination accidentelle, elle pourrait être aussi une contamination malicieuse ou salage (salting). La règle de base est le **doute méthodique**. Il faut tout vérifier, se méfier de toute personne qui pourrait tirer parti de résultats analytiques plus élevés (ou plus bas!). Ceci implique des mesures de surveillance, de contrôle aux diverses étapes.

6.3.3 RAPPORTS ET PROCÉDURES

Il est essentiel que les laboratoires utilisent des procédures bien établies et bien rodées pour les déterminations. Les rapports analytiques doivent avoir un caractère professionnel: ils doivent donner les résultats des analyses en indiquant les paramètres essentiels des méthodes de préparation et des méthodes analytiques utilisées.

Trop souvent, les résultats des analyses sont fournis sans indication ni de la procédure de préparation des échantillons, ni de la procédure analytique qui a été utilisée. Récemment, l'utilisation de la méthode du tamisage des métalliques a contribué à rendre plus spécifiques les rapports des analyses. Ces remarques sont cruciales pour l'or, mais elles sont applicables également à tout autre élément.

Il faut aussi se garder de ce que l'on pourrait appeler la dérive des procédés. La pyroanalyse est bien standardisée comme méthode d'analyse mais des erreurs de procédure peuvent se produire n'importe quand, surtout avec du personnel moins expérimenté ou moins bien

formé. Certains ont découvert avec surprise que le souci d'efficacité et d'économie amenait certains laboratoires à utiliser des portions de 1/2 et même de 1/4 d'assay ton au lieu de l'assay ton (29.166g) traditionnel (Vallée et al, (1976). Les méthodes de géochimie analytique ont été appliquées à la détermination de l'or en faisant abstraction des conséquences de la prise d'un échantillon de 3 ou 5 grammes (au lieu de l'assay ton traditionnel ou de 30 g) avait de sérieux effets sur la détection de l'or autant que sur la précision des déterminations.

Dans un autre cas vécu, on a constaté, suite à des vérifications, le transfert à des fins de déterminations quantitatives, de procédures de préparation propres à la géochimie d'exploration. Ces procédures, qui consistaient à n'analyser que la portion la plus fine de l'échantillon, telle le -80 mailles, ont été appliquées par du personnel inventif et expéditif, à l'analyse d'une roche contenant des sulfures. Les sulfures étant en général plus friables que les silicates, on imagine l'effet d'enrichissement d'une telle procédure et la difficulté de reproduire, à partir du rejet à +80 mailles, les analyses faites à partir de la première coupe.

6.3.4 VÉRIFICATIONS

Le professionnel responsable de l'évaluation d'un gisement d'or, soit à l'exploration, soit à l'exploitation, se doit d'effectuer des vérifications entre laboratoires et des reprises d'analyses en nombre suffisant pour permettre des comparaisons statistiquement valables. Trop souvent le personnel géologique prend pour acquis les résultats fournis par les laboratoires, sans se poser des questions sur la précision ou sur l'exactitude, ou en se contentant de vérifications sommaires qui n'ont pas de valeur statistique.

L'intérêt financier est en jeu dans ces situations, autant que la responsabilité professionnelle, surtout lorsque des transactions ou des décisions financières dépendent de ces informations. Ces considérations obligent à toujours agir comme si on soupçonnait des possibilités de contaminations malicieuses.

A) Les valeurs faibles

Le professionnel responsable doit faire vérifier également les échantillons à valeurs négatives ou très faibles, s'ils sont situés dans des contextes favorables où l'or pourrait être présent. G. M. Moreau (communication personnelle) utilise l'expression "effet de pépité inversé" (reverse nugget effect) pour décrire la situation qui résulte de la non détection de l'or à cause du trop petit nombre de grains dans la portion analysée par rapport à l'échantillon initial. La conclusion à tirer est que la pratique habituelle, consistant à ne vérifier que les échantillons où de l'or a été détecté à un niveau intéressant, est déficiente. Des vérifications des basses valeurs s'imposent dans tous les cas où le contexte géologique est prometteur, surtout aux premiers stades de l'exploration où le nombre d'échantillons est faible.

B) Or fin / or pépitique

La nature pépitique de la minéralisation d'or impose ces précautions, même dans le cas d'un gisement dont la distribution de l'or est peu pépitique telle la zone 2 de Mine Doyon, qui est décrite plus loin. Dans cette perspective, des vérifications systématiques sont d'autant plus nécessaires que l'or est visible. Les cas types qui suivent fourniront les procédures et les normes qui seront énoncées dans les Guides d'application qui termineront ce chapitre.

6.4 CAS TYPES

6.4.1 VÉRIFICATIONS À MINE DOYON

Le Guide citera ici l'essentiel des conclusions d'un rapport de vérifications faites sur la préparation d'échantillons de minerai de la partie centrale de la zone #2 de Mine Doyon (Vallée, Filion et David⁵⁹ (1976) . Rappelons tout d'abord que ce matériel contenait peu d'or grossier (> 1mm), même si des effets pépitiques s'y rencontrent.

Les vérifications consistaient en des analyses en duplicata et quadruplicata sur des assay tons, des demies d'assay ton et des quarts d'assay ton. Elles ont aussi comporté des essais pyramidaux. Il ressort de ces vérifications que le fait de prélever une portion après broyage à - 6.6mm entraîne une erreur relative d'échantillonnage de 35% ¹⁵, erreur qui est ramenée à 20% si on prélève un échantillon après broyage à -2mm. De même, le fait de prélever un échantillon de 1/2 assay ton pour détermination par pyroanalyse comporte une erreur relative de 18%, tandis que l'erreur statistique est réduite à 8.5% lorsque l'on utilise des portions de 1 assay ton (29.166g) pour la pyroanalyse.

6.4.2 CAS TYPE EQUITY SILVER

On se rappellera que la vérification des échantillonnages d'argent à la Mine Equity Silver qui est citée au chapitre précédent comporte également une vérification des analyses entre deux laboratoires; la procédure utilisée est un bon exemple d'utilisation des techniques statistiques. Ces vérifications et ces comparaisons ont indiqué un biais important entre les deux séries de déterminations.

¹⁵ Ecart type relatif, ou écart type divisé par la moyenne. Pour une succession d'opérations, les variances de chaque opération d'échantillonnage s'additionnent.

6.5 GUIDES D'APPLICATION

6.5.1 RÈGLES GÉNÉRALES

La préparation des échantillons pour la détermination de l'or est soumise aux contingences suivantes;

A) Effet de pépite

Les déterminations de l'or ou d'autres éléments précieux sont soumises aux limitations imposés par le petit nombre de particules dans les échantillons ce qui constitue l'aspect pépitique de ces minéralisations.

B) Caractérisation

Chaque étape de manipulation et de réduction de poids d'un échantillon engendre une erreur spécifique et ces erreurs (variances) s'additionnent. A chaque étape, l'erreur peut être quantifiée à partir de vérifications systématiques en nombre suffisant pour compenser le comportement pépitique de la minéralisation sous étude. Il faut particulièrement établir le comportement des particules d'or dans diverses conditions de broyage au moyen d'essais systématiques et d'analyse statistique des résultats.. Des procédures de caractérisation et de vérification sont proposées à la section 6.5.3.

C) Formules d'échantillonnage

On appliquera ensuite les formules de Gy et Ingamells aux cas sous étude, pour préciser les paramètres, faire ressortir les besoins et aider à concevoir les procédures requises pour résoudre les problèmes rencontrés.

D) Déterminations analytiques

L'extraction du métal est une étape essentielle qui peut contribuer aux erreurs, si elle est incomplète: la fusion par la pyroanalyse est normalement plus efficace que la dissolution à l'acide en AA. La détermination du métal sur la bille de plomb, à l'étape finale de la pyroanalyse, est plus sensible et plus précise par absorption atomique que par les méthodes traditionnelles.

Les laboratoires doivent utiliser des procédures bien établies, bien rodées et explicitées pour la préparation des sous-échantillons et les déterminations. Les rapports analytiques doivent avoir un caractère professionnel: ils doivent donner les résultats des analyses en indiquant les paramètres essentiels des méthodes de préparation et des méthodes analytiques utilisées. Le

laboratoire doit avoir des procédures internes de vérification de la manipulation des échantillons et des déterminations analytiques.

E) Vérifications

La vérification est une étape essentielle de toutes les phases du travail du professionnel impliqué dans l'évaluation des gisements de toute nature et plus particulièrement des gisements d'or. Les vérifications doivent se faire systématiquement, autant sur les basses valeurs que sur les hautes et impliquer environ 10% du nombre des analyses.

Le fait que les responsables des laboratoires font habituellement des vérifications internes ne restreint en aucune façon la portée des commentaires ou des règles pratiques énoncés ici et à la section 6.5.3.

F) La responsabilité professionnelle

C'est la responsabilité professionnelle et légale du géologue, de l'ingénieur géologue et du minéralurgiste responsables des aspects techniques d'un tel projet, d'établir les spécifications pour les déterminations, les vérifications et d'effectuer la surveillance requise pour les faire respecter par son personnel et par les fournisseurs. La responsabilité légale des intervenants est aussi engagée, particulièrement dans le cadre des Lois des valeurs mobilières.

6.5.2 PROCÉDURES STANDARDS

A) Préparation conventionnelle

La procédure suivante, qu'utilisent plusieurs laboratoires réputés, doit être exigée du laboratoire d'analyse comme standard minimum de préparation pour la pyroanalyse:

- 1) broyage du matériel à - 10 mailles ou plus fin, avant tout quartage;
- 2) prise d'au moins 300 grammes pour pulvérisation, après quartage;
- 3) pulvérisation à 100% moins 100 mailles;
- 4) division et prise d'au moins un assay ton (29.166 g) pour pyroanalyse;
- 5) la détermination de l'or dans la bille est avantageusement exécutée par spectrométrie d'absorption atomique AA, à ce stade.

NOTES:

- i) les déterminations sur des prises de moins d'un assay ton sont donc déconseillées et l'utilisation de prises de 3 à 5 grammes, pour dissolution acide en vue de déterminations par absorption atomique, est à proscrire dans l'évaluation de l'or. On trouvera dans

Brindamour et Le Houillier (1988) les spécifications des méthodes standard de détermination des métaux précieux .

B) Tamisage des métalliques

La procédure type de la méthode de tamisage des métalliques est la suivante:

- 1) procédures de concassage identiques à celles de la pyroanalyse conventionnelle soit à - 2 mm;
- 2) broyage dans un pulvérisateur à "anneau et rondelle", en s'assurant d'aplatir les particules d'or libre, en évitant de les réduire ou de les plaquer sur les parois;
- 3) tamisage à -150 mailles ¹⁶, la surverse est pesée et analysée directement par pyroanalyse;
- 4) la portion fine ou sous-verse est divisée à nouveau pour prélever une portion d'un assay ton qui sera analysée par pyroanalyse de façon conventionnelle.
- 5) les résultats des deux portions sont pondérés suivant leur poids pour obtenir la teneur réelle;

C) Notes

- 1) la procédure dite "double métallique" développée pour les cas d'or très pépitique prévoit deux étapes de tamisages, à + 28 mailles et - 28 mm + 200 mailles, les deux surverses étant analysées au complet et la sous-verse à - 200 mailles analysée par une portion de 30 g;
- 2) une variante de la méthode du tamisage des métalliques consiste à utiliser un pulvérisateur à plaque au lieu du pulvérisateur à "anneau et palet" pour la réduction de l'échantillon, pour améliorer les résultats de la méthode conventionnelle à moins de frais. Cette procédure modifiée est un palliatif qui n'offre pas autant de garanties d'efficacité que le tamisage des métalliques, même si elle semble plus efficace que les procédures conventionnelles;
- 3) le rejet de l'échantillon d'or ainsi traité ne peut être réutilisé pour fins de vérification, ni pour essais minéralurgiques, puisqu'il n'est plus représentatif de l'échantillon original.

¹⁶ Ce paramètre est à déterminer pour chaque gisement ou type d'échantillon, dans la perspective de réduire les pertes et d'optimiser la précision et l'exactitude des résultats.

6.5.3 VÉRIFICATIONS ET ESSAIS

Chaque minéralisation ayant des caractéristiques distinctes, des essais et vérifications spécifiques sont requis pour établir son comportement dans les procédures d'échantillonnage. En pratique, la présence de particules d'or visible assure presque des difficultés d'échantillonnage, mais celles-ci ne sont pas limitées à ces cas.

A) Caractérisation minéralogique

Il faut d'abord établir, sur des échantillons types du matériel sous étude, les caractéristiques granulométriques et particulièrement le nombre de grains d'or qui seront présents dans l'échantillon avant la coupe pour l'analyse et dans cette coupe elle-même. Cette information sera obtenue à partir d'examen visuels (cartographie et journal des forages) et d'études minéralogiques. L'interprétation de ces observations sera complétée par les autres procédures décrites ici.

B) Analyse (géo)statistique

Les histogrammes des teneurs et des logarithmes des teneurs et les distributions cumulées sont une façon simple de vérifier la présence de plusieurs classes granulométriques de grains d'or et la présence de hautes valeurs qui divergent de la courbe type. On détectera ainsi les distributions multimodales et la présence de pépites qui divergent de la courbe type. Le variogramme des échantillons indiquera également les effets de pépite.

C) Vérifications

La première étape des vérifications utilisera les duplicata des échantillons. Il faut bien établir et spécifier la procédure en vue de distinguer le sens des informations obtenues: par exemple une deuxième prise de la poudre pulvérisée (procédure standard seulement), ou prise d'une deuxième portion de roche concassée pour pulvérisation. Une autre étape pourra consister en des analyses plus nombreuses dirigées à des étapes spécifiques des procédures. Ces vérifications doivent être en nombre suffisant (minimum de 30 à 40) pour permettre des contrôles statistiques (test de Students, X carré, etc).

CHAPITRE VII

L'ESTIMATION DES VOLUMES, DES MASSES ET DES TENEURS

7. L'ESTIMATION DES VOLUMES, DES MASSES ET DES TENEURS	113
7.1 LA PROBLÉMATIQUE DE L'ESTIMATION DES GISEMENTS	113
7.1.1 INVENTAIRES, PERTES ET DILUTION	113
7.1.2 MÉTHODES D'ESTIMATION	116
7.1.3 TENEURS REPÈRES	117
7.1.4 POIDS SPÉCIFIQUE	118
7.1.5 INTERPRÉTATION ET MODÈLE	119
7.1.6 MAILLES D'INFORMATION	119
7.1.7 RELATIONS GÉOMÉTRIQUES ET LIMITES	119
7.2 LES MÉTHODES TRADITIONNELLES D'ESTIMATION	121
7.2.1 CALCUL DES VOLUMES	121
7.2.2 ESTIMATION DES TENEURS	123
7.2.3 APPRÉCIATION / PERSPECTIVES	124
7.3 L'ESTIMATION GÉOSTATISTIQUE	125
7.3.1 CONTEXTE DES ESTIMATIONS	126
7.3.2 INFORMATISATION	126
7.3.3 ANALYSE STATISTIQUE DÉTAILLÉE	127
7.3.4 INTERPRÉTATION ET MODÉLISATION	127
7.3.5 CHOIX DES ÉCHANTILLONS	131
7.3.6 CALCUL DU VARIOGRAMME	136
7.3.7 KRIGEAGE	137
7.3.8 COMPILATION DES INVENTAIRES	138

7.4	MAILLES, MARGES D'ERREUR, BLOCS D'ESTIMATION	139
7.4.1	MAILLES D'INFORMATION	139
7.4.2	MARGES D'ERREUR	141
7.4.3	BLOCS D'ESTIMATION	142
7.4.4	NORMES DE CLASSIFICATION	145
7.5	LE CALCUL DES MARGES D'ERREUR	148
7.5.1	CHOIX DU MODÈLE	148
7.5.2	MARGE D'ERREUR GLOBALE	148
7.5.3	MARGES D'ERREUR DES BLOCS	150
7.6	RÉSERVES ET CONTRÔLE DE PRODUCTION	150
7.7	INFORMATION ET VÉRIFICATION	151
7.7.1	LIMITES DE L'INFORMATION	151
7.7.2	ÉCHANTILLONNAGES EN VRAC	151
7.7.3	RÉCONCILIATION DES INFORMATIONS	151
7.7.4	VÉRIFICATIONS	153
7.7.5	EXPLOITATION	153
7.8	CAS TYPES D'ESTIMATION	154
7.8.1	MINE DOYON, ZONES 1 & 2	154
7.8.2	MINE McBEAN	166
7.8.3	MINE CHIMO	170
7.8.4	MINE ALLIGATOR RIDGE	172
<u>7.9</u>	<u>GUIDES D'APPLICATION</u>	173
7.9.1	PERSPECTIVES	173
7.9.2	RÔLE ACTUEL DE LA GÉOSTATISTIQUE	173
7.9.3	PERSPECTIVE SUR LES MÉTHODES UTILISÉES	173
7.9.4	BESOINS FUTURS	175

7. L'ESTIMATION DES VOLUMES, DES MASSES ET DES TENEURS

Ce chapitre traitera de tous les aspects géologiques et géostatistiques de l'estimation des masses et des teneurs des gisements délimités et des gisements miniers, en particulier la teneur de coupure, la notion de risque, les marges d'erreur des résultats des estimations, les normes d'ajustement des teneurs et des volumes et les relations avec les paramètres d'ingénierie et d'économique. Le Guide montrera comment la géostatistique prolonge les méthodes traditionnelles d'estimation et comment le calcul de la précision des estimés est relié aux dimensions des mailles et des blocs. Des cas types seront présentés pour illustrer la démarche et les caractéristiques de chaque application. Un survol de l'utilisation actuelle de la géostatistique dans l'industrie minière complétera ce chapitre. La figure 7-0 montre le cheminement proposé pour l'estimation des volumes, des masses et des teneurs.

Le Guide souligne que l'estimation des gisements est et demeurera encore longtemps l'application de connaissances et d'expertise professionnelles dans le cadre d'une équipe multidisciplinaire et ne saurait se restreindre à l'application de techniques standardisées par du personnel non spécialisé ou d'expérience limitée. Le Guide ne peut donc fournir des recettes faciles que les profanes ou le personnel junior pourraient appliquer sans supervision experte.

7.1 LA PROBLÉMATIQUE DE L'ESTIMATION DES GISEMENTS

Le Guide débute le présent chapitre par une perspective synthétique des stades des inventaires, des problèmes et des méthodes utilisées dans l'estimation des gisements, du risque et de la précision et des teneurs repères. Cet exposé vise autant les administrateurs et les dirigeants des compagnies, des organismes de réglementation et des organismes financiers, que les cadres techniques et les professionnels.

Quels que soient le stade de développement, le type de gisement, la quantité et la nature des échantillons disponibles, toutes les estimations de tonnage et de teneurs sont basées sur les mêmes principes et rencontrent des problèmes communs. La procédure consiste à attribuer à un volume la teneur et le poids spécifique d'un volume plus restreint, soit l'échantillon le plus proche, soit une moyenne d'échantillons voisins. Quelle que soit la méthode, cette estimation est entachée d'erreurs. Ces erreurs dans la délimitation du gisement et/ou l'estimation de la teneur contribuent à des **pertes** et de la **dilution** par rapport au gisement réel.

7.1.1 INVENTAIRES, PERTES ET DILUTION

Les inventaires que sont les estimations de masse et de teneur des gisements sont faits de façon itérative à diverses étapes du développement minéral, donc avec des informations de plus

en plus nombreuses, sur des mailles de plus en plus serrées. Ils sont faits également avec des objectifs variés et multiples.

Aux premiers stades de la mise en valeur (stade 4 et début du stade 5), l'inventaire du gisement se fait afin d'obtenir une estimation globale de sa dimension et de son contenu métal: c'est le gisement délimité. Pour nombre de métaux, il arrive même, lorsque les travaux au stade 4 ont établi les dimensions d'ensemble et les limites du gisement, que les teneurs ne varieront pas sensiblement ensuite malgré la masse importante d'information qui s'ajoutera aux stades suivants du développement minier. Dans un tel cas, l'inventaire à la fin du stade 6 comportera une plus grande précision des estimés, par l'information additionnelle sur les limites du gisement et sur la distribution des teneurs dans ses diverses parties.

Les gisements d'or montrent une distribution pépétique des valeurs qui, lorsqu'elle est forte, amène les échantillons à se comporter de façon aléatoire. Les premiers estimés seront souvent loins d'une estimation exacte des teneurs et même des masses. Il est souvent nécessaire dans ces cas, de compléter l'information des forages et des autres échantillonnages linéaires par des échantillons de volume important, pour des essais en usine pilote ou même en usine industrielle, dans le but d'assurer l'évaluation appropriée d'un gisement aurifère. Les pertes et la dilution qu'entraînent les erreurs dans l'interprétation et l'estimation à ces stades sont de caractère "passif". Même si elles influent sur les estimations, elles ne se traduisent pas directement par des pertes financières, sauf si elles affectent la progression du projet (figure 3-2).

A l'étape de la faisabilité et de la décision (stade 8), l'estimation des réserves minières ne dépend plus seulement de la géométrie et de la distribution des éléments d'intérêt du gisement. Cette estimation demande alors une interaction complexe de la géologie, de l'ingénierie et de l'économique et exigera des données quantitatives dans ces trois axes. **La géostatistique ne chiffre que l'incertitude de la distribution de la minéralisation, même quand cela est fait à partir de contours miniers: elle ne peut rien sur les incertitudes qui demeurent dans les domaines de l'ingénierie et de l'économique.**

A l'étape de l'exploitation, il faut réaliser le plan préétabli. Ceci demande dans la plupart des cas, des informations additionnelles, plus détaillées que celles qui ont servi à établir la faisabilité de l'exploitation. A l'extraction minière, la géostatistique pourra contribuer à réduire les pertes et la dilution, autant dans l'optimisation de l'extraction du gisement minier que dans le contrôle de la qualité de la production. **Aux stades de la décision et de l'exploitation, les erreurs d'estimation auront des conséquences économiques directes pour la rentabilité du projet, par le rendement métal moindre et par le manque à gagner qu'amèneront la dilution et les pertes.**

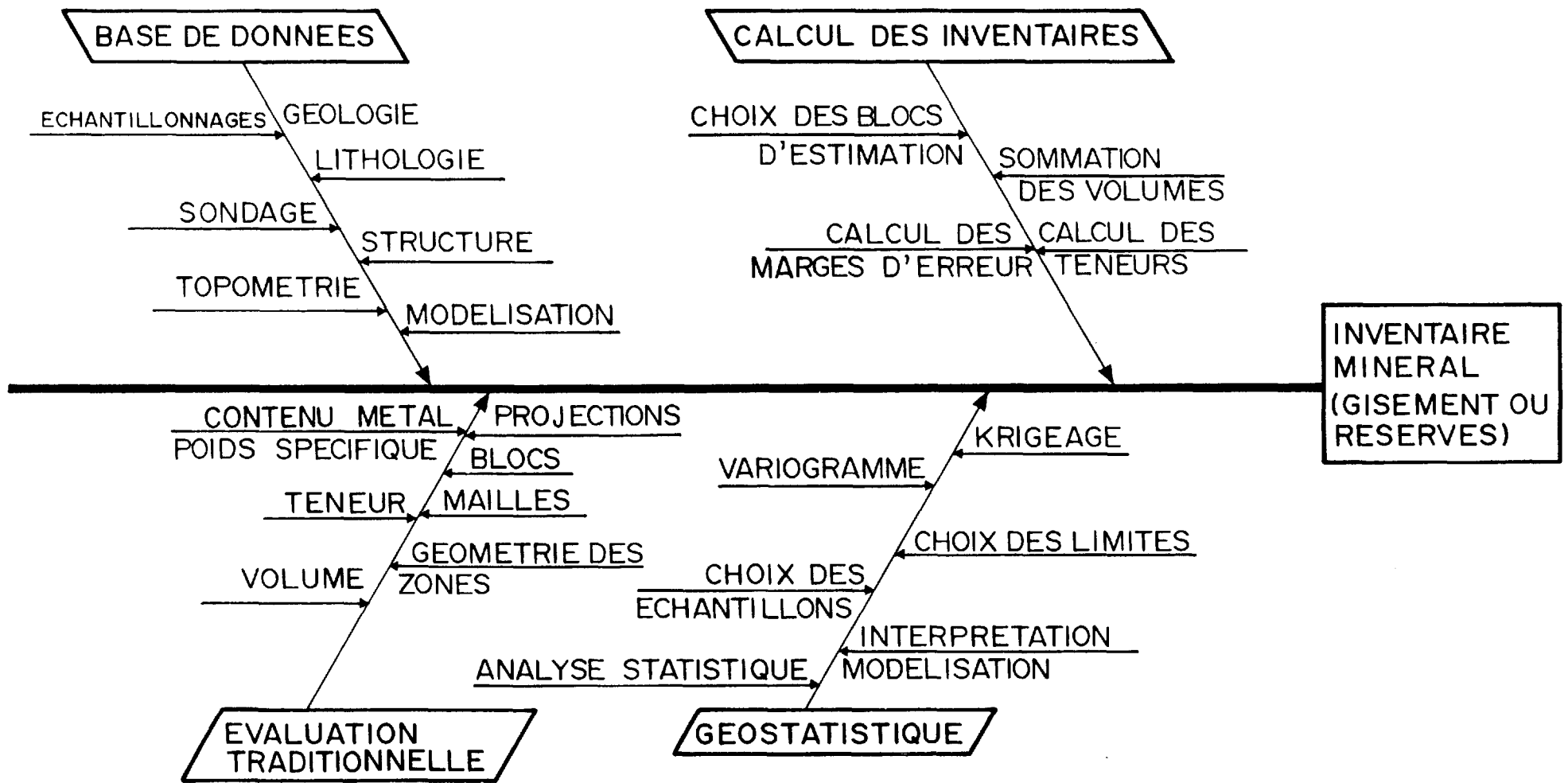


Fig.7.0

**ESTIMATION DES VOLUMES
MASSES ET TENEURS**

7.1.2 MÉTHODES D'ESTIMATION

Les méthodes traditionnelles gardent toujours une place dans l'estimation des gisements, même face aux méthodes plus sophistiquées. En général, le choix d'une de ces méthodes dépend de concordances avec certains paramètres géologiques et géométriques du gisement sous étude et elles fourniront des éléments de comparaison, de contrôle avec les résultats des estimations par les méthodes géostatistiques (section 7.9).

A) Méthodes traditionnelles

Les méthodes traditionnelles d'estimation correspondent essentiellement à une approche analytique et déterministe, puisqu'elles visent à établir des limites concrètes pour la détermination des réserves et l'exploitation minière. Les méthodes traditionnelles comprennent la détermination des volumes et des teneurs pour évaluer ensuite le métal contenu par l'intermédiaire du poids spécifique.

Le calcul des volumes d'un gisement se fait d'abord à partir de limites explicites fournies par la géologie et les teneurs des échantillons, suite aux travaux de géologie, d'échantillonnage et d'interprétation décrits aux chapitres 5, 6 et 7. A l'étape minière, les limites des chantiers établissent les volumes, toujours en relation avec le cadre géologique.

Le calcul des teneurs se fait par des méthodes d'abord simples, par moyennes arithmétiques ou pondérées alliées à diverses techniques de projection et de pondération des teneurs d'échantillons ou d'intersections aux volumes établis. Ces diverses méthodes, dites traditionnelles, seront décrites et évaluées plus loin.

Le calcul de la masse de minerai (tonnage) dans un volume donné demande, outre la teneur, le poids spécifique de la roche contenue dans ce volume. Les minéraux constituant des roches montrent des poids spécifiques souvent très variables.

B) Géostatistique

Les efforts pour appliquer la statistique aux données géologiques et aux estimés des gisements pour améliorer les méthodes d'estimations traditionnelles ont amené à reconnaître, qu'en général, ces données ne sont pas distribuées de façon aléatoire mais montrent une auto-corrélation. Cette caractéristique a amené le développement de la géostatistique, axée sur la **variable régionalisée**. Les méthodes de la géostatistique se sont ajoutées aux outils d'estimation des gisements, mais en introduisant une approche qui est souvent synthétique par contraste à l'approche analytique et déterministe des méthodes traditionnelles.

Le **variogramme** est l'instrument de base de la géostatistique et il est indispensable pour établir la continuité des teneurs, ce qui permet ensuite d'améliorer l'estimation et d'établir sa précision. Le variogramme est une fonction de corrélation des paires d'échantillons prises à des espacements croissants. Cette mesure de la continuité doit être faite dans toutes les directions principales du gisement car la continuité des teneurs varie de façon différente dans l'une ou l'autre des directions.

Le **krigeage** est l'opération de pondération et de correction des teneurs moyennes d'abord des gisements, ensuite des blocs d'estimation plus restreints. Le variogramme permet alors le calcul de meilleures moyennes pondérées pour les gisements, les chantiers et blocs d'estimation en utilisant l'influence des échantillons voisins. L'attribution de marges d'erreur des divers estimés pourra également être faite à partir de ces étapes.

7.1.3 TENEURS REPÈRES

Avant de passer à la description des méthodes d'estimation, il y a lieu de définir les teneurs repères qui sont les jalons essentiels de toute évaluation, autant à l'exploration qu'à l'exploitation d'un gisement. Ces teneurs repères sont typiquement la teneur de coupure, la teneur marginale et la teneur de rentabilité. Taylor⁶⁰ (1972) et Lane^{61 62} (1964 et 1989) ont discuté à fond de ces sujets. Les définitions proposées ici s'appuient sur leurs travaux.

L'à propos de cette section repose sur la différence fondamentale qui existe entre la teneur de rentabilité (ou teneur d'exploitation) et la teneur marginale considérée comme teneur de coupure :

la teneur moyenne exploitée doit fournir un certain profit par tonne usinée.....la teneur minimum exploitée doit faire ses frais...(Mortimer⁶³, 1950)

A) La teneur de coupure

La TENEUR DE COUPURE est toute teneur qui est utilisée, à partir de n'importe quel critère approprié, afin de distinguer entre deux alternatives de décision ou d'action (Taylor, 1972).

La teneur de coupure est, selon cette définition, un concept général qui peut s'appuyer sur n'importe quel critère, qu'il soit d'ordre géologique, géostatistique, économique, ou autre. Taylor fait dans ce texte une revue élaborée de l'évolution du concept de teneur de coupure.

L'évaluation des gisements s'appuie sur la teneur de coupure comme jalon et repère pour toute évaluation, même lors des premiers inventaires d'un gisement. A ce stade, on utilisera des teneurs de coupures d'ordre conceptuel ou basées sur des gisements de type ou d'allure similaire. L'estimation des ressources minérales se fait à partir de considérations géostatistiques,

pour établir des contours/limites à partir de la distribution "naturelle" des valeurs, ou encore en vue de choisir ou d'exclure des blocs. Lors de l'estimation des réserves, le concept de teneur de coupure prendra plus de complexité, lorsqu'on l'appuiera en plus sur des considérations d'ingénierie et d'économique.

La teneur de coupure **supérieure**, appliquée à des analyses ou des blocs pour corriger à la baisse les hautes valeurs considérées comme erratiques, n'a aucune relation directe avec la teneur de coupure dont nous venons de discuter. Cette pratique traditionnelle reliée à l'estimation des teneurs tend à être remplacée par des corrections statistiques ou géostatistiques.

B) Teneur marginale

La TENEUR MARGINALE (breakeven) est celle pour laquelle le revenu recouvrable est équilibré avec les coûts attribués à partir du point de décision, selon la définition de Mortimer. La teneur marginale devient une teneur de coupure lorsqu'on décide d'utiliser cette teneur marginale pour la sélection de limites ou de blocs.

Diverses teneurs de coupure peuvent être applicables à différents paliers de l'exploitation. Ainsi la teneur marginale d'un gisement ou d'une zone minéralisée est celle pour laquelle la valeur recouvrée des substances minéralisées vendues est égale aux coûts de développement, d'extraction, de traitement et d'administration. C'est alors une teneur de coupure globale qui sert à établir la limite concrète des zones ou des chantiers pour l'établissement des réserves et le calcul de la faisabilité d'ensemble. Des teneurs coupure plus ponctuelles peuvent être établies à des points spécifiques de l'exploitation, en fonction des coûts en aval.

C) Teneur de rentabilité

La teneur de rentabilité d'un gisement ou d'un bloc minéralisé est la teneur où la valeur réelle des substances minéralisées couvre le prix de revient de la production vendue, augmenté de la valeur du coût d'option¹⁷. Il va sans dire que la teneur de rentabilité est par définition différente de la teneur coupure qui lui est associée, puisque la teneur de rentabilité s'appliquera sur la moyenne d'un gisement ou d'un chantier, ou sur les objectifs de production d'une période donnée.

¹⁷ Le coût d'option est le profit minimum acceptable compte tenu du risque). C'est ce qui détermine la teneur palier minimum exigée pour une exploitation rentable (ou la teneur d'exploitation de Mortimer, cité ci-haut)

7.1.4 POIDS SPÉCIFIQUE

Le calcul du métal contenu dans un volume donné dépend de la teneur, du volume et du poids spécifique de la roche minéralisée. Ce dernier paramètre varie de façon marquée selon les variations de composition des roches minéralisées. C'est pourquoi le poids spécifique est une caractéristique d'une minéralisation qui doit être quantifiée systématiquement, avec des méthodes appropriées, au même titre que le contenu en éléments d'intérêt et ce, à partir du début des travaux de mise en valeur (Section 5.6 du Guide).

7.1.5 INTERPRÉTATION ET MODÈLE

Les conditions de création ou de constitution des gisements varient à l'intérieur de divers types géologiques et il en résulte des variations morphologiques affectant les limites et des variations dans la distribution des teneurs. C'est à partir du modèle géologique de la continuité et des minéralisations que l'on pourra entreprendre l'estimation des masses et des teneurs. Les méthodes dites traditionnelles d'estimation en dépendent pour leur efficacité tout autant que les méthodes géostatistiques.

Les chapitres 5, 6 et 7 ont traité des aspects géologiques de l'estimation des gisements. L'importance de la collecte, de la vérification et de l'interprétation systématiques des données et de la modélisation du gisement ont été soulignées à plusieurs reprises.

7.1.6 MAILLE D'INFORMATION

Le gisement type est connu par des échantillonnages systématiques, en général des forages sur une maille régulière. Dans le cas des gisements d'or, l'évaluation des réserves s'appuiera également sur des échantillonnages miniers, à cause des difficultés causées par la distribution pépitique de l'or. La dimension de la maille est un élément essentiel de l'évaluation de l'information disponible sur un gisement. Cette question est discutée plus longuement à la section 7.4 avec celle de la dimension des blocs.

7.1.7 RELATIONS GÉOMÉTRIQUES ET LIMITES

La délimitation du gisement, l'exactitude de la définition des volumes minéralisés, la précision de leurs limites, sont reliées à la forme et aux dimensions de ces volumes, que l'on utilise les méthodes traditionnelles ou les méthodes géostatistiques. Le chapitre 6 a insisté sur l'importance de la compréhension des caractéristiques des divers types de gisements: contexte géologique et structural, contrôles, distribution de la minéralisation, etc. Au delà de ces considérations, il faut regarder directement l'influence de la forme géométrique et de la dimension sur la précision de l'estimation.

Deux composantes géométriques influencent l'estimation: d'abord l'irrégularité des limites et ensuite le rapport surface/volume. Ces facteurs ne sont pas indépendants car une surface limite très irrégulière influencera directement le rapport surface/volume. La dimension relative du gîte influence directement la précision de l'estimation. Une série d'exemples simples montreront l'effet des variations de la largeur, de la longueur (implicitement de la masse globale) d'une zone minéralisée sur les marges d'erreur des estimés, sur la dilution et sur les pertes par rapport au gisement "réel".

A) Largeur

Plus une zone est étroite, plus l'influence de la surface limite est importante. Visualisons un gisement filonien de 1.5 mètre de largeur et dont la limite de teneur ou la limite minière est imprécise. Si l'exploitation était accompagnée d'une dilution mécanique des murs adjacents, chacun contribuant 0.3 mètre de roche stérile, ceci constituerait une dilution de 40%. Une veine de 3.0m de largeur, affectée du même apport de 0.3m de roche stérile provenant de chaque mur, ne serait affectée que de 20% de dilution mécanique.

Le rapport volume/surface pourrait servir à établir les caractéristiques des gisements et des repères d'estimation. Ce rapport se réduit essentiellement à l'épaisseur moyenne. Pour des veines étroites il est de l'ordre de 1.5, pour des amas importants il sera de l'ordre de 20 à 100 ou plus (en mètres).

B) Longueur

Les dimensions relatives des grands axes d'une zone minéralisée tabulaire influencent directement les marges d'erreur à maille donnée. Imaginons une zone tabulaire et rectangulaire de 100m de longueur et de profondeur indéfinie, forée au 20m; les zones mal définies aux extrémités du gisement constituent 20% du volume. Cinq sections au 20m couvrent 80m) et le 20m additionnel est constitué des demi-longueurs projetées à chaque extrémité¹⁸. Pour un gisement similaire de 200m de longueur foré sur la même maille, la zone mal connue constituera seulement 10% du volume du gisement. Si la zone est lenticulaire et équidimensionnelle dans deux dimensions, le même phénomène se produirait également au sommet et à la base, donc la zone "marginale" constituerait respectivement 36% et 19% du gisement pour les dimensions de 100m et de 200m. Cette relation pourrait être reliée avec les statistiques de Grenier (1964) sur le plus haut taux d'échec des mises en production des petits gisements (sect 3.4).

¹⁸⁾ Les techniques géostatistiques de Krigeage s'appliqueront à l'estimation d'une telle zone. Nous voulons faire ressortir ici les variations dans l'importance relative de ces zones dans les gisements en fonction des dimensions.

Dans la pratique, les méthodes traditionnelles ne pourront que classer les blocs périphériques dans une catégorie "inférieure", sur la base de l'appréciation de la situation décrite. Dans les estimations géostatistiques, les marges d'erreur calculées sur les teneurs des blocs périphériques seront plus importantes.

7.2 LES MÉTHODES TRADITIONNELLES D'ESTIMATION

Les méthodes traditionnelles d'estimation des gisements sont axées sur la mesure du volume selon des blocs de diverses formes géométriques et l'attribution à ces volumes, selon diverses méthodes de pondération, de teneurs d'échantillons situés dans ces blocs ou à leur périphérie. La mesure du volume se fait après une modélisation des données géologiques, structurales, minéralogiques et chimiques. Le calcul des masses se fait trop souvent à partir d'un poids spécifique global, même quand ce paramètre varie beaucoup à travers le gisement.

7.2.1 CALCUL DES VOLUMES

Les calculs des volumes se font surtout par les méthodes des sections longitudinales, des sections transversales, des triangles et des polygones. Les méthodes des courbes d'accumulation et des surfaces de tendance sont moins utilisées. Depuis la popularité des méthodes géostatistiques, on ne compte plus les cas types de comparaisons entre les estimations par les méthodes traditionnelles et les estimations géostatistiques.

A) Section longitudinale

La section longitudinale est utilisée typiquement pour la représentation et l'estimation d'une veine mince ou d'un horizon uniforme considéré comme mince. Cette méthode permet de regrouper et de synthétiser l'information des forages et des échantillonnages sur un seul plan, tant que la structure sous étude ne présente pas de complexité d'importance dans la troisième dimension. Sur la section, les zones d'influence peuvent être établies sous forme de parallélogrammes, de triangles, de polygones. Il faut toujours bien distinguer entre les longueurs des intersections obliques et les vraies largeurs. La méthode traditionnelle de calcul des teneurs est de pondérer les teneurs des échantillons et intersections par le volume des blocs qui les contiennent. Les méthodes de pondérations multiples sont aussi applicables.

APPRÉCIATION: La valeur des estimés qui résultent de cette méthode est affectée par l'interprétation des effets de zone. Il est essentiel d'orienter les zones d'influence d'après les alignements ou les plongées géologiques. Les évaluations de volumes peuvent être exagérées par la forme rectangulaire des blocs d'estimation.

B) Sections transversales

Les sections transversales sont l'outil de travail approprié aux amas, aux gisements complexes, aux veines multiples. Avant l'informatique, les sections transversales constituaient le dossier de base (le grand livre) de l'information géologique et minière et elles demeurent l'outil principal de travail. Idéalement, les sections sont placées à la perpendiculaire des alignements / structures et correspondent aux plans des forages inclinés. Les sections permettent l'interprétation des structures géologiques, la mise en plan des galeries minières et des chantiers projetés et des chantiers excavés.

L'estimation des volumes minéralisés se fait en général par des surfaces projetées sur les demi-distances aux sections adjacentes. L'estimation des teneurs des blocs se fait généralement par attribution des teneurs des intersections centrées dans les blocs.

APPRÉCIATION: L'estimation des volumes par les sections donne facilement des estimés surfaits quand les surfaces minéralisées varient en importance d'une section à l'autre. Il s'agit d'un effet géométrique simple car les contacts obliques sont remplacés par des volumes irréguliers, dont les arêtes amènent à exagérer les volumes réels. Cet effet est d'autant plus marqué que les différences de surface sont grandes entre deux sections voisines.

C) Triangles / Polygones

Les méthodes de calcul des volumes minéralisés par triangles et polygones s'appliquent typiquement à des amas, à des zones tabulaires très épaisses. Elles s'appliquent également sur un plan longitudinal pour délimiter les zones d'influence. Ces méthodes diffèrent par la façon d'attribuer les zones d'influences aux divers forages ou aux points d'échantillonnages.

Dans la méthode des triangles, ces surfaces sont tracées en reliant les points d'échantillonnage, les forages: chaque zone ainsi délimitée est pondérée par les valeurs à ses sommets, en utilisant souvent les demi-bissectrices pour délimiter les zones d'influence des échantillons.

Dans la méthode des polygones, on utilisera le forage situé au centre et à l'extérieur du polygone, en limitant la zone d'influence par diverses méthodes, en général par les bissectrices ou demi distances entre les forages. La pondération mathématique des zones d'influence des sondages adjacents a déjà reçu passablement d'attention.

APPRÉCIATION: Les polygones ont tendance à surestimer les tonnages, pour des raisons similaires à celles décrites pour les sections transversales, soit l'exagération des arêtes ou pointes lorsque des discontinuités se rencontrent. La précision de l'évaluation des teneurs est également variable dans ces deux méthodes. De plus en plus elles sont remplacées par les

techniques géostatistiques et les cas types de comparaison des estimés entre ces méthodes pullulent.

D) Courbes d'isoteneur / Surfaces de tendances

Le calcul de courbes d'isoteneur, de courbes d'accumulation, d'isoépaisseur a été un outil utile pour la modélisation et la caractérisation des gisements. Certains ont utilisé les courbes d'isoteneur pour le calcul des réserves. Cette technique est surtout applicable aux gisements tabulaires peu complexes et s'assimile, jusqu'à un certain point, aux sections longitudinales. C'est souvent une façon pour diminuer l'effet de pointes décrit plus haut pour les sections et les polygones.

La technique des surfaces de tendance est une variante plus sophistiquée des courbes d'isoteneur ou d'isoaccumulation. Diverses variantes font l'objet d'essais d'application aux gisements. Il s'agit d'appliquer des surfaces obtenues mathématiquement, généralement de caractère polynomial, aux données d'échantillonnages.

APPRECIATION: La méthode des surfaces de tendance est un outil d'analyse et de filtrage valable (comme les courbes d'isoteneur); plus récemment, l'intérêt pour cette méthode a décliné considérablement, car elle n'offre pas de critère objectif pour projeter les valeurs analytiques. La méthode des courbes d'isoteneur montre souvent une tendance à l'exagération des volumes et des quantités de métal.

7.2.2 L'ESTIMATION DES TENEURS

La principale lacune des méthodes de calcul traditionnelles est que les paramètres de calcul et les marges d'erreur sont axés sur l'expérience pratique, sans possibilité d'appui statistique réel. Ces méthodes ne permettent donc pas d'estimation a priori de la précision, ni du calcul du volume, ni du calcul de la teneur.

A) Hypothèses de projection et calcul

Toutes les méthodes traditionnelles de calcul des teneurs dépendent d'une hypothèse fondamentale: "qu'il est justifié de projeter la zone d'influence à la mi-distance de la maille d'échantillonnage autour de l'échantillon". Cette hypothèse a été modifiée empiriquement par l'application des méthodes de pondération de l'influence en fonction de la distance, ou de groupes d'échantillons.

Les facteurs de correction appliqués sur la distribution pépétique usuelle des minéralisations d'or amènent des problèmes particuliers. La caractéristique de cette distribution est qu'un nombre restreint d'échantillons peut représenter une proportion importante du contenu

d'or d'une zone. Les méthodes traditionnelles d'estimation ne peuvent traiter directement ce problème. L'expérience accumulée en exploitation amène à établir des facteurs de correction, telle la correction des hautes valeurs qui sont ramenées à une once d'or à la tonne courte, par exemple.

Les échantillonnages miniers sont souvent utilisés dans les gisements filoniens, lorsque les minéralisations d'or ou d'autre métaux précieux montrent une dispersion des valeurs telle que les échantillonnages linéaires paraissent insuffisants pour assurer l'information requise. Dans ce cas, on complétera la mise en valeur par des travaux et des échantillonnages miniers (section 5.2). Cette stratégie est également utilisée dans d'autres gisements filoniens, tels ceux de molybdène, d'étain, etc.

B) Méthode d'estimation

La méthode la plus simple d'estimation consiste à appliquer la moyenne pondérée d'une intersection de sondage au bloc auquel elle est reliée; la masse et la teneur ainsi obtenues sont ensuite cumulées et pondérées afin de les appliquer à l'ensemble du gisement. Les sections précédentes ont mentionné que, pour pallier aux erreurs observées, diverses procédures plus complexes de pondération et de correction des teneurs des blocs ont été développées. Ces méthodes palliatives utilisent les échantillons périphériques ou adjacents, mais avec des pondérations variables et décroissantes. C'est ainsi que l'on a développé la méthode de pondération à l'inverse de la distance ou d'une puissance (carré ou cube) de la distance.

Dans le cas de gisements filoniens où les sondages ne suffisent pas à la probation, typiquement, on procède par perçage d'une galerie dans l'axe de la veine, avec des échantillonnages en rainurages ou en panneaux. Parfois, mais pas toujours, on procède à l'échantillonnage des roches cassées des volées individuelles et/ou on procède à l'échantillonnage en usine et au traitement du matériel extrait, pour connaître sa teneur et ses caractéristiques minéralurgiques. Des monteries entre les galeries sont percées et échantillonnées, habituellement avec moins de détail, à cause des conditions plus difficiles. Pour le calcul des réserves, la teneur des échantillons des galeries est alors projetée vers le haut et vers le bas, pour une distance fixée en pratique d'après l'espacement des galeries et d'après la complexité observée, en intégrant les informations des forages dans ces évaluations.

7.2.3 APPRÉCIATION / PERSPECTIVES

Les zones d'influence établies par toutes les méthodes traditionnelles de calcul ne peuvent être évaluées, sauf à posteriori, quant à la véracité de l'hypothèse de projection. Parfois la teneur calculée pour un bloc n'est établie qu'en référence à un seul échantillon ou qu'à une seule intersection et ne tient pas compte de l'influence des échantillons adjacents. Parfois, l'esti-

mation des teneurs se fera à partir de pondérations empiriques, ce qui n'est pas une procédure optimale pour l'estimation des blocs individuels.

Les échantillonnages miniers ne règlent pas nécessairement les problèmes d'estimation: c'est le cas s'il y a carence de corrélations physiques et statistiques suffisantes entre les divers types d'échantillonnages, forages, rainurages, échantillonnages des volées, vrac. Ces carences influent sur la valeur et la portée des facteurs de corrections qui pourraient être tirés des échantillonnages, pour application aux estimés des forages sur l'ensemble du gisement.

Les facteurs de correction utilisés sont des facteurs de sécurité fondés sur l'expérience globale, qui justifient la correction des hautes valeurs pépitiques par le rendement minier (qui comprend cependant pertes et dilution minières). Ces corrections d'expérience ne sont pas nécessairement appropriées aux zones individuelles ou aux gisements différents. Aux stades initiaux de l'évaluation d'un gisement, ce ne sont que des facteurs approximatifs.

Le dilemme est la représentativité de ces hautes valeurs pépitiques: parfois elles déforment les estimations si elles ne sont pas atténuées ou corrigées. Parfois cependant, ces hautes valeurs sont nécessaires pour représenter adéquatement le contenu d'or de l'ensemble du gisement, ce que les coupures de correction déforment. L'évaluation des blocs individuels est particulièrement difficile dans ces conditions. Les sections qui suivent montreront que les méthodes géostatistiques, même si elles sont plus sophistiquées, ne réussissent pas à résoudre complètement ces problèmes.

Ces problèmes sont plus aigus pour l'or mais ils sont présents pour d'autres métaux. Le Guide cite, comme exemple de distribution irrégulière d'un métal plus abondant, les veines secondaires de chalcopyrite, qui, dans les gisements volcanogènes de métaux usuels d'Abitibi, se situent après remobilisation dans les fractures de tension perpendiculaires à la stratigraphie, mais parallèles à la course des sondages. Cette distribution des minéralisations amène des problèmes d'estimation décrits dans Vallée, Belisle, David, (1976).

7.3 L'ESTIMATION GÉOSTATISTIQUE

Cette section présente une revue sommaire des diverses étapes de l'estimation d'un gisement et des aspects géologiques et géostatistiques de ces inventaires. Les procédures géologiques décrites ici s'appliquent également dans le cadre des méthodes traditionnelles d'estimation.

L'application de la géostatistique se fera à partir des étapes suivantes:

- bases de données, analyse statistique, division en zones, limites;
- revue de la densité et de la régularité des échantillons, des types d'échantillons;

- interprétation et modélisation géologique;
 - définition des distributions statistiques, de la présence de teneurs-monstres etc;
 - calcul des variogrammes, choix des échantillons, choix des intervalles, choix des directions, identification des paramètres;
 - méthode de krigeage, choix des dimensions des blocs, choix du nombre des échantillons;
 - calcul de la marge d'erreur des estimés obtenus;
- Tous ces sujets sont couverts en détail dans David, 1988⁶⁴.

7.3.1 CONTEXTE DES ESTIMATIONS

L'estimation d'un gisement est d'abord un inventaire géologique appuyé par les techniques géostatistiques. Pour les inventaires des ressources minérales délimitées, ou gisements délimités, l'information demeure essentiellement de nature géologique. L'estimation des réserves des gisements s'appuiera de plus sur les aspects d'ingénierie et d'économique de l'exploitation minière.

La pratique des grandes sociétés minières, où des équipes multidisciplinaires de géologues/ingénieurs géologues, de géostatisticiens, d'ingénieurs des mines s'impliquent dans ce travail, répond à un besoin réel. Le Guide rappelle cependant qu'il est essentiel que les spécialistes de la géologie demeurent des intervenants actifs à toutes les étapes de ces travaux. L'application de la géostatistique au calcul des réserves exige un minimum de formation spécialisée. Idéalement elle se fera à l'intérieur d'une équipe multidisciplinaire. D'une part, le géologue / ingénieur géologue qui veut s'y adonner seul devrait avoir suivi plusieurs cours spécialisés en géostatistique, en plus d'être au courant des applications récentes. D'autre part, il est aussi nécessaire que le géostatisticien ait une formation géologique et l'expérience de l'interprétation des gisements.

7.3.2 INFORMATISATION

L'informatisation des bases de données des gisements a débuté bien avant la géostatistique, avec les méthodes traditionnelles d'estimation et la planification informatisée des exploitations à ciel ouvert, il y a une trentaine d'années. On peut appliquer les méthodes géostatistiques à un gisement comportant un nombre modéré d'échantillons avec une calculatrice programmable. Cependant, l'application des logiciels pour l'estimation des réserves implique l'informatisation de la base de données.

Le Guide a souligné, à la section 5.4.1, l'importance du choix de logiciels qui offrent la flexibilité requise pour permettre l'intégration de diverses étapes de collecte des données, d'estimation, de planification et d'exploitation minière. Par exemple, les logiciels utilisés pour la collecte des données géologiques devront établir des fichiers compatibles avec les exigences

des logiciels dont dépendront le calcul des réserves et la planification minière. Un relevé récent de Champigny et Grimley⁶⁵ fait le point sur l'application des méthodes informatisées à l'estimation des réserves de minerai des exploitations minières. Le lecteur intéressé pourra consulter les comptes-rendus de l'Atelier sur l'utilisation des ordinateurs en exploration et exploitation minière (CAME, 1990) pour des exemples additionnels.

Étant donné le grand nombre de logiciels géostatistiques disponibles maintenant dans le commerce, autant pour l'organisation des données que pour le traitement géostatistique, il n'est pas à propos de faire dans le Guide une revue de leurs caractéristiques. Ceci est une composante du travail d'évaluation qui doit être fait par tout professionnel géologue ou ingénieur qui envisage l'acquisition d'un de ces logiciels. Le Guide déplore l'application parfois mécanique et aveugle de ces logiciels, ce qui est dangereux étant donné la tendance à se fier parfois aveuglément à des résultats qui ont été obtenus sur ordinateurs.

7.3.3 ANALYSE STATISTIQUE DÉTAILLÉE

On calculera l'histogramme des échantillons recalculés en composites de taille appropriée et uniforme, par exemple de 1m ou 2m ou 3m, selon la dimension du gisement et le niveau de sélectivité de l'exploitation minière envisagée. Pour une étude statistique ou géostatistique, il est primordial que tous les échantillons aient à peu près la même taille. On recherchera ensuite une limite inférieure pour les basses teneurs, c'est à dire une "teneur de coupure inférieure". Toujours en regardant l'histogramme, on trouvera souvent un pic de basse teneur, suivi d'un creux et, enfin, la minéralisation elle-même (Figures 7-1 et 7-2). Il est très important d'analyser à ce stade le nombre et l'importance des hautes valeurs dans l'histogramme. Des essais et des simulations simples, tels la normalisation de la "droite" lognormale ou la méthode de Sichel, montreront l'effet de ces méthodes pour réduire l'influence locale des teneurs monstres.

7.3.4 INTERPRÉTATION ET MODÉLISATION

La modélisation du gisement comprend plusieurs étapes d'analyse et d'interprétation. Ce sont l'interprétation des données, l'identification des limites et l'interprétation des limites.

A) Interprétation des données

Cette opération commence par l'interprétation des données géologiques sur sections verticales et plans, pour expliciter toutes les continuités (et discontinuités) géologiques minéralogiques et structurales. Les informations géophysiques qui peuvent être utilisées dans un mode quantitatif, pour l'établissement du cadre géologique du gisement, seront également utilisées lors de cette étape (voir la section 4.3.4, qui traite de la cartographie géophysique).

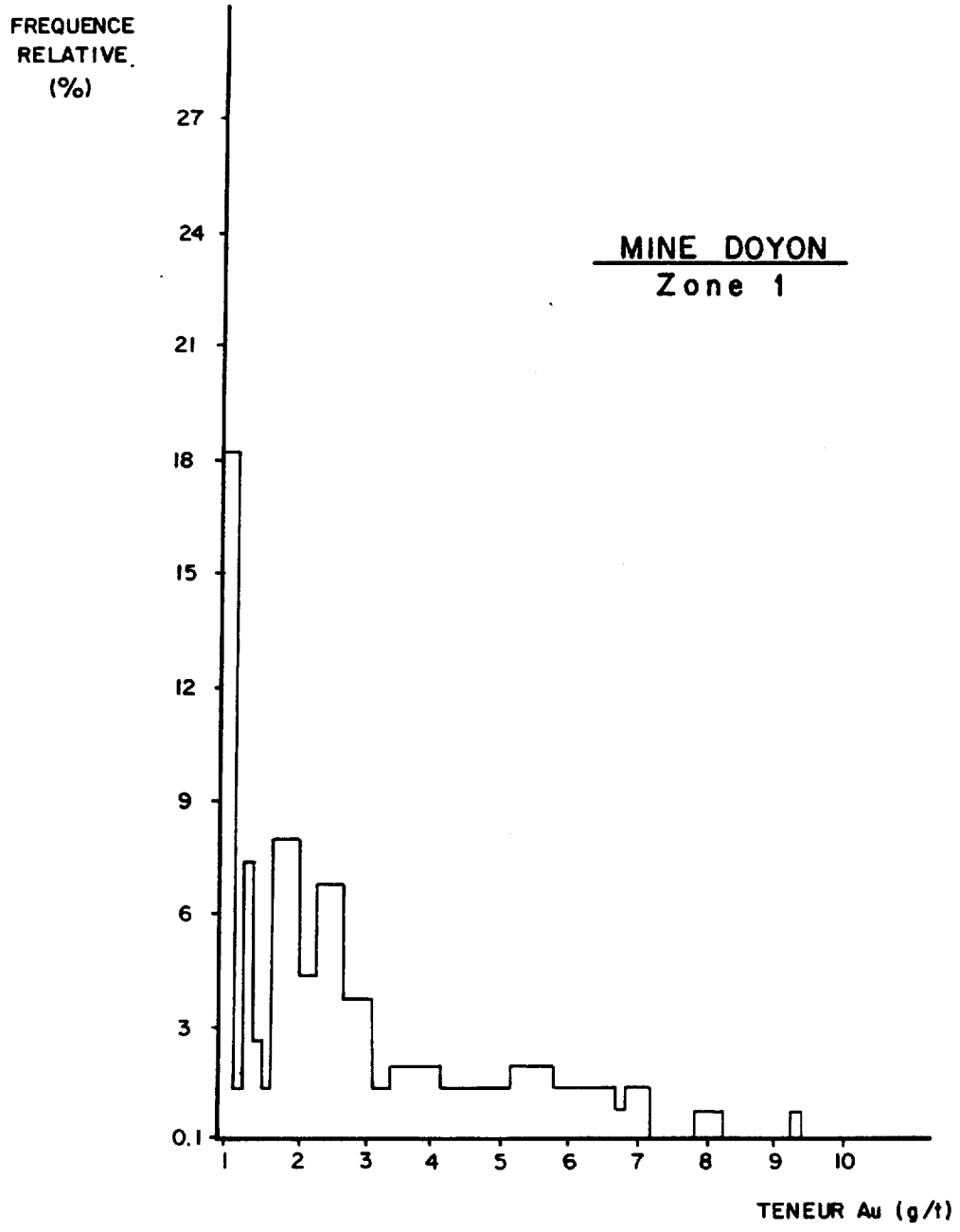


Fig. 7.1

HISTOGRAMME DES ÉCHANTILLONS DE FORAGE AU DIAMANT (1,5m) ZONE 1

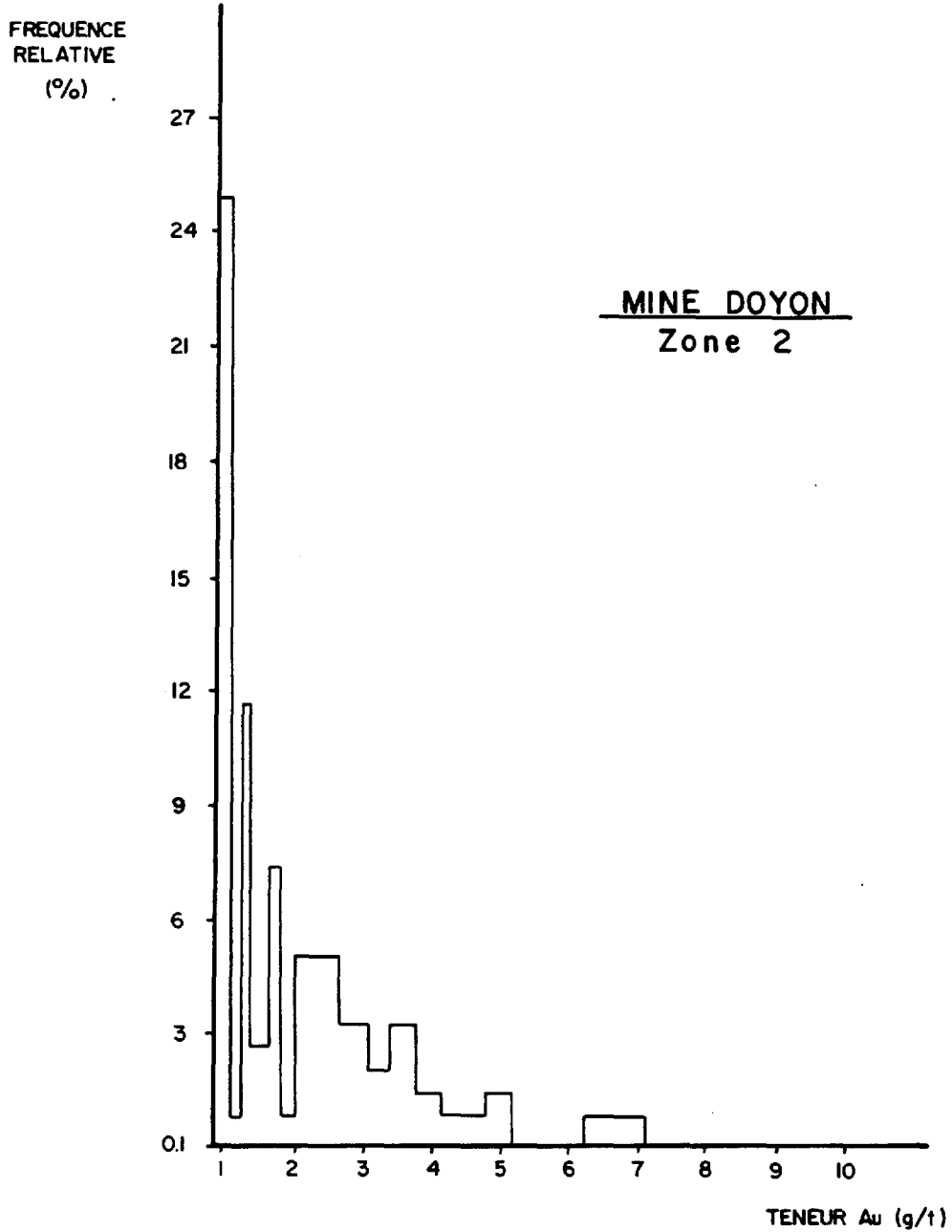


Fig.7.2

HISTOGRAMME DES ÉCHANTILLONS DE FORAGE AU DIAMANT (1,5m) ZONE 2

Quand on entreprend l'étude d'un gisement, il faut s'assurer d'abord de considérer des zones homogènes. Si l'on a des indications de la présence de plusieurs lithologies, de zones d'altérations ou de plusieurs patrons de minéralisation, on commence par les séparer, quitte à les regrouper ensuite s'il appert que les différences statistiques sont négligeables. Il faudra prévoir cependant autant les variations minéralurgiques (sect. 9.5) que les variations des teneurs.

L'interprétation de ces diverses informations doit être poursuivie de façon systématique, comme le décrit la section 4.5. Ce systématisme doit d'abord s'exercer sur chacune des sections (ou plans) et ensuite dans l'établissement des continuités géologiques géométriques d'une section à l'autre. Un deuxième palier d'établissement des continuités et des éléments de cohérence consiste dans l'interprétation de la géologie et de la minéralisation sur des plans (ou sections) dans la troisième dimension du gisement.

B) Identification des limites

Après avoir identifié les phénomènes géologiques et structuraux qui contrôlent la distribution des minéralisations d'or, il est plus facile d'explicitier les limites de la minéralisation. Ces limites peuvent être les limites franches établies par la lithologie, la stratification, les phénomènes structuraux ou par des gradations de teneurs très brusques, qui pourraient être qualifiées de primaires. Les limites floues (assay walls) où la teneur disparaît dans les murs pourraient être qualifiées de secondaires; dans ce cas il faudra recourir aux techniques géostatistiques décrites dans les sections qui suivent. Lors de la planification minière, les limites seront souvent arbitraires et établies à partir de paramètres miniers: largeur minimum de chantiers, contours optimisés, etc.

Les gisements de caractère disséminé se situent en général dans ce type secondaire. Les gisements de type veine qui sont constitués d'unités individuelles de faible dimension et/ou de disposition irrégulière peuvent également être de ce type. La détermination des limites pratiques de ces gisements sera particulièrement laborieuse et ceux-ci exigeront la plupart du temps des méthodes d'exploitation sélective (chapitre 8).

C) Établissement des limites

A partir du modèle géologique établi et en s'appuyant sur les teneurs de coupure choisies, on définira un contour sur chaque section: ce contour sera établi en excluant les intersections riches mais isolées, qui ne semblent pas avoir de continuité géologique. Les blocs minéralisés engendrés par ces intersections isolées seront considérés comme irrécupérables car, en général, ils disparaîtront au krigeage. Cependant, on aura à en tenir compte plus tard en établissant la teneur de la dilution minière de type mécanique. Comme exemple d'intersections de ce type, on comparera dans les figures 7-3 et 7-4, les intersections obtenues sur une section de Mount Isa estimée par pondération de la distance et par krigeage.

Selon que les basses teneurs se retrouvent à l'intérieur des zones en auréoles autour des coeurs minéralisés, ou parsemées à l'intérieur des zones minéralisées, on devra avoir recours, ou non, à un krigeage d'indicateur¹⁹ aux étapes ultérieures.

Les interprétations sur les sections sont ensuite digitalisées et un modèle de blocs approprié au volume du gisement est créé pour travailler en 3D, ou un modèle de surfaces sur section longitudinales pour travailler en 2D. On regardera l'histogramme des échantillons de taille compatible avec la taille des blocs estimés. Ces échantillons seront dégroupés pour ne pas biaiser les statistiques, en général du côté trop riche. (Figure 7-5)

L'irrégularité des limites des gisements peut être exprimée au moyen de diverses fonctions géostatistiques. On peut ainsi faire le variogramme des épaisseurs. Ces mesures auraient plus de valeur diagnostique pour les gisements minces que pour les amas.

7.3.5 LE CHOIX DES ÉCHANTILLONS

Avec la tendance moderne à l'informatisation de la banque de données, il faut faire attention à ne pas tout utiliser sans discernement. Il faut donc prêter attention aux facteurs divers que sont la densité de la maille, les teneurs monstres, les types des échantillons, les longueurs. Il faut également prêter attention au type d'information disponible. On travaillera d'abord à l'intérieur des limites établies selon la procédure décrite à la section 7.3.4 et que l'on aura ensuite digitalisées.

A) Calcul des composites

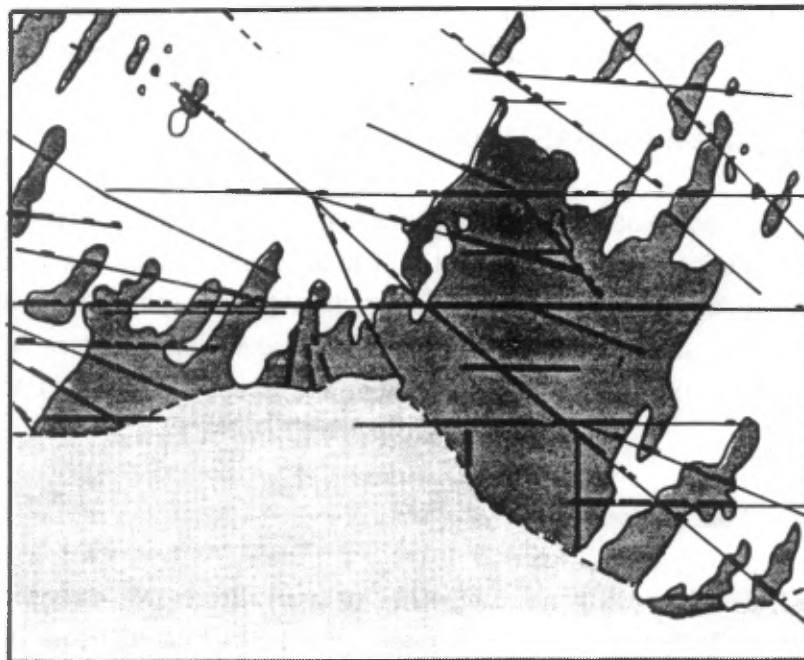
On recalculera les teneurs des composites en intervalles égaux, disons 1.5m dans les gisements filoniens au Québec, 5m dans les gisements en amas de forte taille, ou on choisira une autre dimension appropriée. Les teneurs de coupure seront appliquées à ces composites.

B) Maille irrégulière

Les données seront souvent plus abondantes dans une zone riche que dans la zone plus pauvre qui l'entoure. Il faut s'assurer, pour calculer les statistiques, que les données soient à peu près régulièrement distribuées. La maille de la distribution des sondages à Mine Doyon, à la figure 7-6 est acceptable, tandis que celle de la figure 7-3 ne l'est pas.

¹⁹ En résumé, la méthode de l'indicateur consiste pour le géologue faisant l'estimation géostatistique à attribuer à l'échantillon une valeur de 1 ou 0, selon que la teneur est au dessus ou non de la teneur de coupure de la minéralisation.

Mount Isa
Interprétation par pondération
sur section verticale






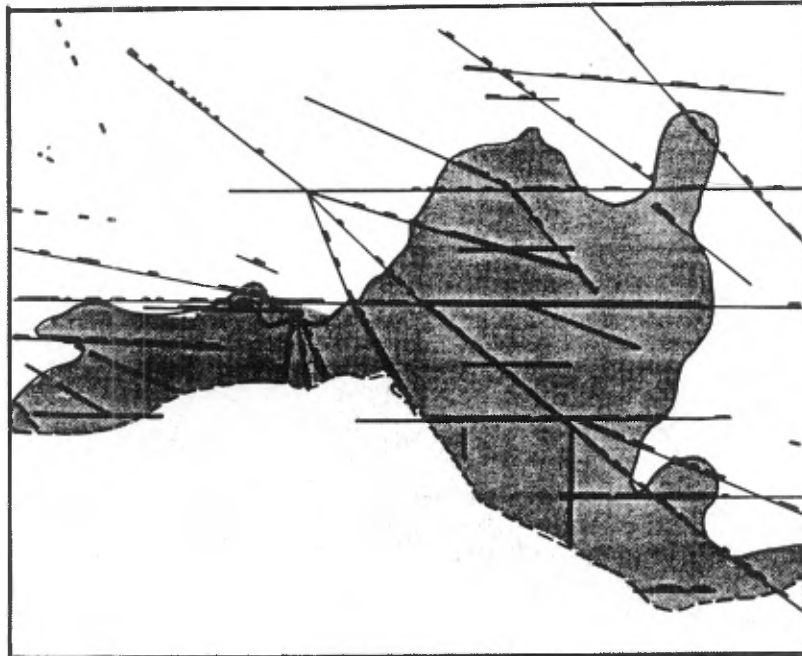
-  Limite
-  Sondage
-  Socle Stérile Section

Fig.7.3

**PONDÉRATION DE LA
DISTANCE: MOUNT ISA**

Mount Isa
Interprétation par krigeage
sur section verticale






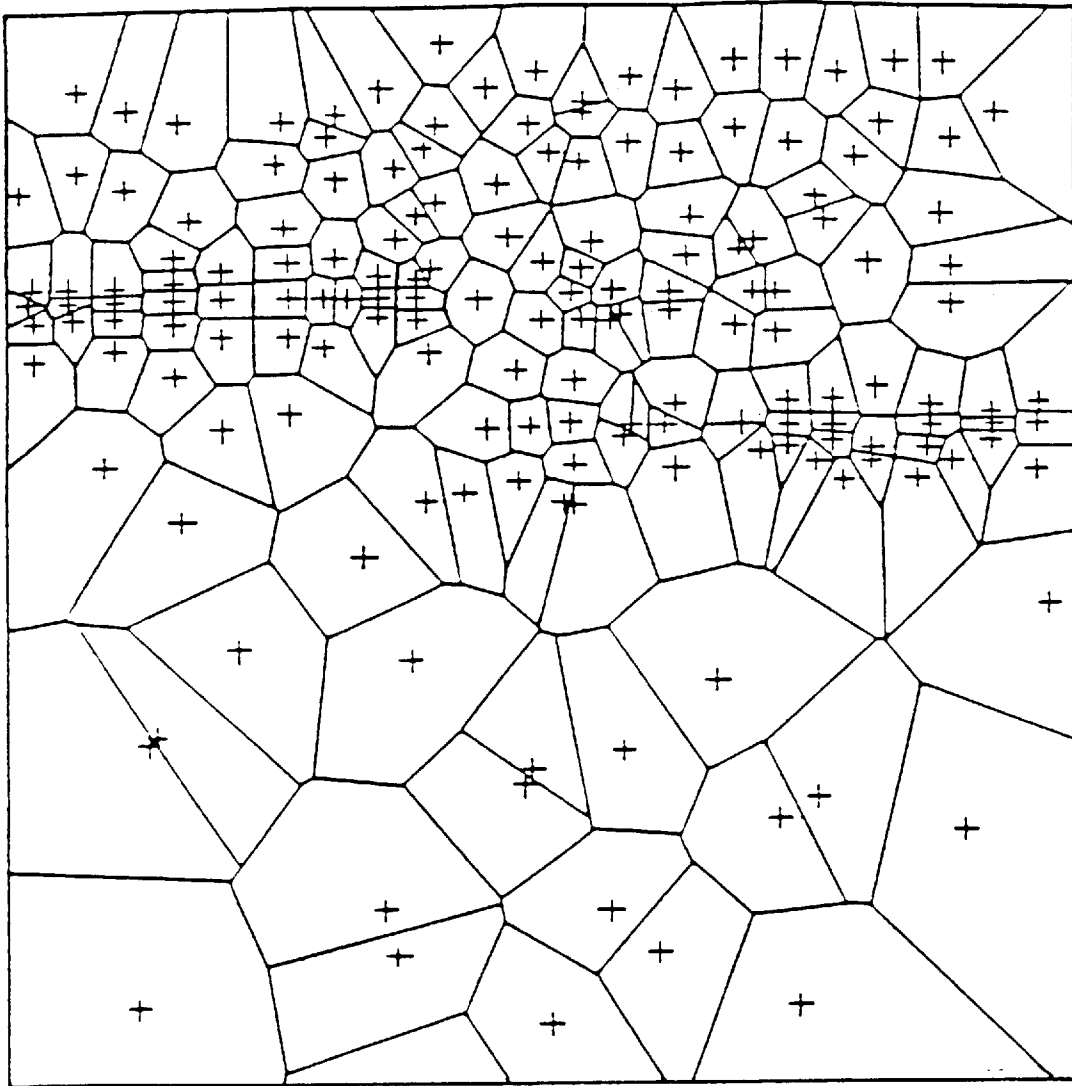
-  Limite du minerai
-  Sondage
-  Stérile Socle Section

Fig. 7.4

KRIGEAGE :
MOUNT ISA

MINE DOYON

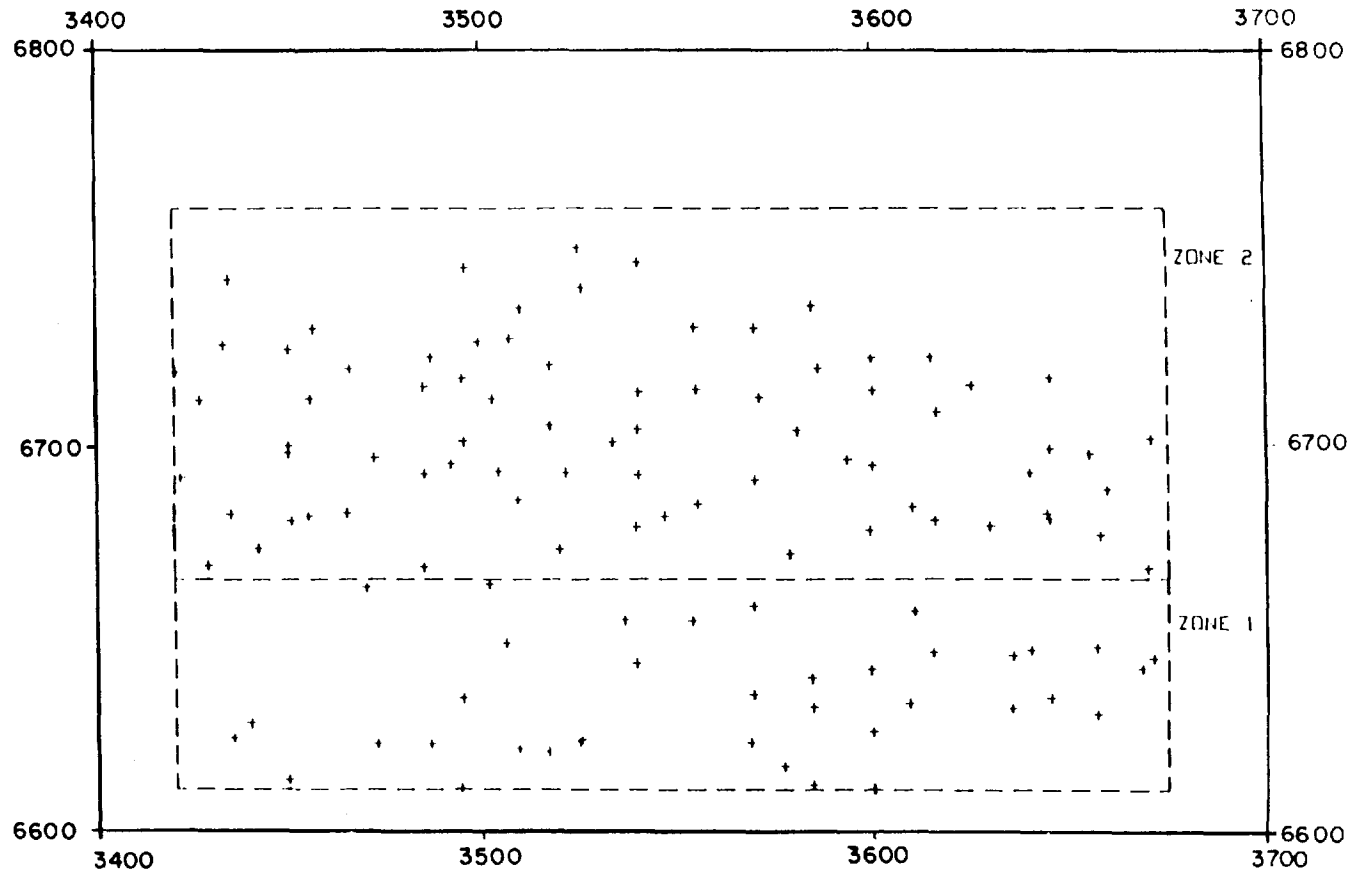


DISTRIBUTION TYPE DES FORAGES SUR PLAN
MONTRANT LES GRAPPES AUTOUR DES SECTEURS PLUS RICHES.

Fig. 7.5

**DISTRIBUTION TYPE
DES FORAGES**

MINE DOYON
Zones 1 et 2



SECTION LONGITUDINALE MONTRANT LA DISTRIBUTION DES FORAGES

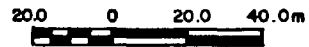


Fig.7.6

**DISTRIBUTION TYPE
DES FORAGES**

Par un programme de dégroupage ou dégrappage (declustering), on enlèvera les données redondantes par rapport à une maille "moyenne". Il va sans dire qu'on reprendra ces données pour le krigeage. De tels programmes font partie de tous les ensembles de programmes géostatistiques. Un exemple est fourni par l'étude de Boyer et al, 1989⁶⁶.

C) Teneurs monstres

Le traitement des teneurs monstres est complexe. D'une part, une estimation globale du gisement est recherchée; d'autre part, les résultats des estimations seront des teneurs moyennes applicables aux blocs d'estimation du gisement qui devront être réalisables en exploitation. Les teneurs monstres doivent être atténuées dans ces calculs. Différentes procédures sont disponibles pour ce faire. Par exemple, on appliquera à ces teneurs monstres une teneur de coupure haute qui servira pour le krigeage. Une autre solution élégante est le krigeage d'indicateurs qui "dilue" l'influence des teneurs monstres sur tout le gisement et non seulement sur les blocs proches de ces teneurs très hautes (Fytas, 1989⁶⁷). Le choix de la méthode de coupure appropriée est l'objet de beaucoup de discussions. Les questions fondamentales suivantes demeureront présentes: **"Quelle portion du contenu métal du gisement est de fait représentée par les teneurs monstres rencontrées? Est-ce que la méthode utilisée pour l'estimation des bloc respecte l'estimation de l'ensemble?"**

D) Types d'échantillons

Les différents types d'échantillons, linéaires (rainurages, forages de divers types), de surface, de roche cassée et les échantillons de volume des volées auront probablement des variances différentes. On les traitera donc séparément, dans le but de comparer leurs variogrammes, leurs moyennes, leurs variances.

7.3.6 LE CALCUL DU VARIOGRAMME

A) Les anisotropies

On a en général une idée des directions principales d'un gisement. On calculera d'abord le variogramme dans trois axes principaux afin d'établir les anisotropies. Si la distribution des teneurs est proche d'une lognormale, on calculera le variogramme logarithmique que l'on convertit par la suite en variogramme relatif pour le krigeage.

Pour calculer le variogramme, on choisira un intervalle entre les paires qui soit égal à la distance moyenne entre les trous ou les composites le long des trous. On ne calculera pas, en général, de variogramme pour une distance dépassant 8 à 10 intervalles. L'angle de régularisation sera de 22.5° s'il y a assez d'échantillons (100). Un angle de 180° est utile pour une meilleure définition de l'effet de pépite qui est le paramètre le plus important mais aussi le

plus difficile à établir. La détermination de l'importance de l'effet de pépite est directement reliée au choix des méthodes d'échantillonnages. Un effet de pépite important et une distribution quasi aléatoire des valeurs font partie des justifications des échantillonnages miniers en vrac.

Le Guide rappelle que plusieurs autres types de variogrammes peuvent être utilisés si ceux qui sont cités ici ne répondent pas aux besoins particuliers: élimination des teneurs monstres extrêmes, indicatrice, rang. On peut également calculer des covariances et/ou des corrélogrammes.

B) Paramètres et modélisation

La définition des paramètres peut se faire graphiquement mais c'est beaucoup plus facile de façon interactive. On se souviendra que tous les variogrammes ajustés dans différentes directions font partie du même modèle, ils doivent avoir le même effet de pépite. On utilisera aussi le même palier quitte à remplacer une anisotropie zonale par une deuxième composante sphérique avec une portée extrêmement longue qui donnera le même effet.

C) Base d'information et résultats

Souvent, dans un gisement tabulaire ou un amas foré par des sondages perpendiculaires aux grands axes, la seule dimension dans laquelle des informations concrètes détaillées sont disponibles pour établir un variogramme détaillé des minéralisations est l'axe des sondages qui, en général, recoupe les structures. Les informations dérivées dans la deuxième et la troisième dimension du gisement, dans l'axe et dans la plongée des structures, n'ont pas la même valeur factuelle puisqu'elles s'appuient sur la maille plus large des sondages. Il faut donc, dans les étapes ultérieures de développement, garder à l'esprit la nécessité de compléter la base de données par des échantillonnages dans ces axes.

7.3.7 LE KRIGEAGE

Il est recommandé de faire le krigeage avec un variogramme relatif dérivé du variogramme logarithmique. Le krigeage lognormal sera utilisé avec circonspection car il y a danger de surévaluation. Cette tendance est minimisée par l'utilisation du variogramme relatif.

On choisira d'abord, et de préférence, une taille de bloc avec une anisotropie comparable à celle du gisement, probablement des blocs cubiques pour un amas, des blocs de 15m x 10m x 5m pour un gisement d'allure stratiforme litée. Par exemple, pour la partie centrale de la zone 2 de Doyon (ciel ouvert), l'on utilise des bancs de 10m et des portées de 22m, 9m et 6m.

On évitera de kriger des blocs trop petits. Ces blocs seraient alors trop nombreux, ce qui complique l'estimation, mais surtout, ils s'éloignent trop de la maille d'échantillonnage. Les marges d'erreur ainsi calculées sont trop grandes, puisqu'elles augmentent quand la taille des blocs diminue. Enfin, le fait de calculer des blocs plus petits qu'il n'est justifié par l'échantillonnage peut donner une fausse impression de sécurité, particulièrement au personnel minier, surtout si on ne tient pas compte de la marge d'erreur de ces blocs (section 7.4).

Le nombre d'échantillons habituellement nécessaires sera d'environ 20 à 25 par bloc. On aura pris soin d'utiliser la banque de données complète, teneurs monstres comprises en général. En cas de teneurs monstres extrêmes, on envisagera le krigeage d'indicateur dont des exemples sont présentés dans Kwa et Mousset-Jones, 1986⁶⁸ et dans Fytas et al, 1989. On utilisera cette méthode aussi quand la minéralisation est très lenticulaire et mêlée à des parties stériles de faible longueur mais séparables au moment du minage.

Le Guide rappelle de nouveau qu'aucune technique de krigeage n'élimine l'influence des teneurs monstres (discuté en 7.3.6 A). Ces teneurs existantes et dans nombres de cas sont essentielles à la détermination du contenu d'or d'un gisement. Il faut établir leurs caractéristiques, reconnaître (s'il y a lieu) l'influence de pratiques d'échantillonnage déficientes et utiliser les méthodes appropriées en s'appuyant sur une bonne dose de bon sens et sur l'expérience pour l'estimation de la teneur du gisement ou de gisements similaires.

7.3.8 COMPILATION DES INVENTAIRES

Une fois que l'on a exécuté les travaux décrits ci-haut, la compilation des inventaires des gisements délimités et/ou des réserves de minerai devient un travail relativement simple. Il s'agira de compiler les masses des blocs (volumes par poids spécifique) et leurs teneurs et marges d'erreur en tenant compte des limites géologiques préétablies. L'estimation des réserves a débuté à partir d'une enveloppe définie d'après des considérations géologiques. En l'absence de limite géologique, le choix de la limite du gisement ou du chantier ne doit pas être abandonné à l'ordinateur. Les responsables devront revoir en détail les blocs périphériques, pour établir cette limite dans une perspective d'établir des continuités plausibles, surtout lorsque des intersections très riches et isolées sont rencontrées. Avec les techniques géostatistiques actuellement utilisées, l'incertitude sur l'enveloppe, donc sur le tonnage, se verra par les marges d'erreur plus fortes des blocs périphériques.

D'ordinaire, cette incertitude n'est pas chiffrée directement. Le Guide rappelle que, dans le contexte minier, la détermination de l'incertitude de l'enveloppe est, au delà de la géostatistique, directement reliée aux problèmes de sélection minière et de contrôle de la qualité qui seront rencontrés à l'extraction minière (chap. 9). L'étape finale de la compilation des inventaires est la vérification des résultats. Ce sujet est traité en section 7.7.

7.4 MAILLES, MARGES D'ERREUR, BLOCS D'ESTIMATION

L'efficacité dans les inventaires demande de clarifier les relations entre la maille d'information, les blocs d'estimation et les marges d'erreur. Ces éléments sont directement reliés aux critères de classification des ressources et des réserves établis dans le chapitre 3 du Tome III. Il va sans dire que tous les stades d'évaluation des gisements, particulièrement l'établissement des réserves et tous les critères ad hoc, s'orientent vers l'exploitation éventuelle.

7.4.1 LA MAILLE D'INFORMATION

Le gisement type est connu par des forages et autres échantillonnages systématiques, placés sur une maille en principe régulière. Dans le cas des gisements d'or, l'évaluation des réserves s'appuiera souvent sur les échantillonnages miniers, à cause des difficultés causées par la distribution pépitique de l'or. La dimension de la maille est un élément essentiel de l'évaluation de l'information disponible sur un gisement.

A) Évolution de la maille

La maille large des premiers sondages de confirmation au stade 4 est réduite par étapes, lors des stades qui suivent, pour améliorer la probation géologique. La première maille de sondages est en général choisie en fonction de la dimension estimée de la zone cible. Comme règle empirique, on cherchera en général à recouper une zone cible par environ 4 à 5 sondages sur sa longueur. Le choix des mailles offre peu de flexibilité puisqu'on procède en général, pour passer au stade suivant de valorisation géologique, en réduisant l'intervalle de moitié ⁽²⁰⁾. Les considérations d'ingénierie minière et minéralurgique et les exigences de l'exploitation contribueront également à justifier des mailles de plus en plus serrées.

B) Mailles types

Des mailles de gisements de dimensions variées, qui sont exploités à des rythmes variant de 700 à 3,000 tonnes par jour, sont présentées dans le tableau 7-1. Des mailles types successives seront, par exemple, de 60m, 30m, 15m, 7.5m (200, 100, 50, 25pi), ou plus rarement de 80m, 40m, 20m, 10m, 5m.

On voit que, dans ces exemples, la maille de probation varie de 15 à 7.5m, en fonction de la dimension des gisements. Lors de la mise en valeur et au début de l'exploitation c'est l'expérience empirique accumulée dans des gisements similaires qui permettra ce type de jugement. Dans chaque cas, la dernière maille est la maille acceptée pour classer le matériel

²⁰ Il serait possible de réduire la dimension de maille au tiers, mais cela est très rarement fait.

comme "Prouvé Classe II" ou "Prouvé par forages". La catégorie "Prouvé Classe I" ou "Prouvé développé" est atteinte après les développements miniers: coupes horizontales, monteries et échantillonnages. Trop peu d'entreprises minières explicitent ainsi les paramètres concrets et le niveau de certitude sur lesquels elles s'appuient pour la classification des réserves.

Au stade de la faisabilité, la maille utilisée pour la classe "Prouvé" correspond à ce que le géologue/ingénieur géologue croit nécessaire pour définir le minerai avec suffisamment d'assurance quant à la teneur et quant aux limites pour la planification minière détaillée, la planification des chantiers. Cette dimension à ce stade est reliée à l'échelle du gisement, à la distribution des particules minéralisées, à la forme et à la distribution plus ou moins irrégulières des zones minéralisées. Pour un gisement d'or, une telle maille de forages doit souvent être complétée par des échantillonnages en vrac et/ou par l'expérience minière.

TABLEAU 7-1
MAILLES TYPES

Mine	Élément	Type de gisement	Mailles (m)	Certitude
Mine Chimo Zone 5	Or	Stratiforme	30, 15, 7.5 Travaux miniers	(Pb2,Pb1,Pv2) (Pv1)
Mine Doyon Zones 1 & 2	Or	Stratiforme Disséminé/veines ⁽²¹⁾	60, 30, 15, Sondages	(Pb2,Pb1,Pv2) (Pv2)
Mine Doyon Zone Nord	Or Or	Veines Pyrite, Or	30, 15, 7.5, Travaux miniers	(Pb2,Pb1,Pv2) (Pv1)
Louvem Zones 1 à 4	Cu,Zn	Stratiforme Sulfures massifs	30, 15, 7.5 Travaux miniers	(Pb2,Pb1,Pv2) (Pv1)
Niobec	Nb ₂ O ₅ Disséminé	Amas lenticulaires	60, 30, 15, Travaux miniers	(Pb2,Pb1,Pv2) (Pv1)

Pb1= Probable Classe 1 Pb2= Probable Classe 2.
Pv1= Prouvé Classe 1 Pv2= Prouvé Classe 2.

Le géologue/ingénieur géologue utilisera en général une maille plus étroite pour la probation d'un gisement plus petit, selon l'exemple type suivant. La Division Opémiska de Minnova inc. exploite à Chapais, Qué. des zones tabulaires et des lentilles minéralisées avec chalcopirite et or, minces et de dimensions variables. Dans les zones types d'environ 35-45 mètres de longueur horizontale, la maille de forage la plus serrée utilisée est normalement de 15 m. A l'occasion, on rencontre des zones lenticulaires de petites dimensions, de l'ordre de

21 (1) Décision d'exploitation à partir de cette maille, avec information plus détaillée et contrôle additionnel en fosse.

15 à 30 m., qui sont facilement accessibles et dont les teneurs justifieraient l'exploitation. La maille standard de forage de 15 m ne donne tout simplement pas un nombre suffisant d'intersections (minimum de 3 dans l'horizontale) pour l'évaluation de ces zones en cheminées. On resserrera alors la maille d'évaluation des sondages à 7.5 mètres pour de telles zones, avant d'entreprendre des travaux de mise en valeur par galeries, avec échantillonnages et cartographie détaillée.

7.4.2 MARGES D'ERREUR

La précision est une notion commune, non un concept statistique. Le chapitre 6 du Guide présente les définitions acceptées par l'ASTM aux termes précision et exactitude. Dans le contexte de l'estimation des gisements, si on veut se rattacher à la statistique, on partira du fait qu'une teneur mesurée ou estimée est connue avec une marge d'erreur qui définit la qualité de la mesure ou de l'estimation. La marge d'erreur est cependant fonction du niveau de confiance requis. Dans le contexte d'un modèle simple pour la distribution des erreurs, le modèle normal, une marge d'erreur équivalente à l'écart-type de cette distribution est associée à un niveau de confiance de 68%. Pour cette même distribution, si on demande un niveau de confiance de 95%, la marge d'erreur est doublée à deux écarts types. Par contre, si on réduit le niveau de confiance à 50%, ce qui implique un probabilité de 50% d'être dans l'erreur, la teneur minimum assurée est la teneur calculée.

Le Guide recommande d'utiliser le niveau de confiance de 90% pour estimer la marge d'erreur des estimés obtenus. Utiliser ce chiffre de 90% mène à des paramètres réalistes, qui se rapprochent de l'expérience minière pour la marge d'erreur et pour la teneur minimum assurée. La marge d'erreur d'une estimation sera exprimée par le biais de la différence relative entre l'estimé et sa limite inférieure au niveau de confiance de 90%. Pour l'écart type logarithmique σ_L , la teneur minimum assurée sera alors à 90% de certitude égale à $T^{-1.28 \sigma_L}$ (ou t est la teneur calculée et t^{σ_L} à une certitude de 94%) et ce, pour chaque bloc calculé. A noter ici qu'on ne peut faire directement les moyennes de ces marges d'erreur⁽²²⁾.

Le Guide souligne qu'il est nécessaire d'uniformiser le chiffre du niveau de confiance (à 90%), pour assurer que les marges d'erreur soient comparables. Il est alors entendu que tout le risque est à gauche, puisque personne ne considérera que la possibilité d'avoir une teneur plus élevée soit un risque. Des marges d'erreur cibles ont été proposées par quelques auteurs, à partir de mailles de probation et des résultats d'exploitation, mais aucune ne s'appuyait sur la statistique sauf le schéma proposé par Harrison de Exxon et un schéma développé à l'intérieur du groupe Metallgesellschaft et proposé par Wellmer, 1983⁶⁹. Ce dernier schéma ne propose que les marges d'erreur des réserves globales, et varie les niveaux de confiance.

²² La moyenne des écarts types est la racine carrée des carrés des écarts types (ou la racine carrée de la somme des variances) .

7.4.3 BLOCS D'ESTIMATION

La dimension des blocs d'estimation est beaucoup plus variable depuis le développement de méthodes de calcul informatisées et surtout depuis le développement de la géostatistique. Antérieurement, le volume d'estimation était presque toujours directement relié à la maille d'échantillonnage.

Dans son travail d'évaluation des gisements, le géologue/ingénieur géologue resserre la maille d'estimation à mesure que la progression des stades demande des informations plus détaillées dans l'axe géologique, pour rencontrer les besoins des axes de l'ingénierie et de l'économique. Jusqu'au développement de la géostatistique, la maille d'information a été le cadre et la principale mesure des estimations et, même à l'âge de la géostatistique, les forages se font encore sur des mailles. Un échantillonnage stratifié est la plupart du temps l'approche la plus efficace dans le milieu géologique.

A) Estimation globale

Au début de la mise en valeur d'un gisement, la maille d'information est large et l'information peu détaillée par rapport aux limites et aux teneurs, ce qui ne permet que de calculer la marge d'erreur globale. Cette mesure de la précision d'une estimation s'appliquant à l'ensemble d'un gisement (ou d'une lentille), considéré comme un seul bloc d'estimation, est appropriée aux stades 4 et 5. La marge d'erreur globale n'exprime qu'une connaissance d'ensemble d'une masse minéralisée, elle n'implique pas la connaissance détaillée du gisement, la distribution interne des valeurs et la connaissance des limites, qui sont essentielles à la faisabilité et à l'exploitation. La marge d'erreur globale correspond aux critères distinctifs des Gisements Indiqués et, dans le contexte minier, des Réserves Probables.

B) Estimation par blocs

A partir de la fin du stade 5, définition du gisement, la maille d'information sera suffisamment resserrée pour permettre d'estimer la teneur et la marge d'erreur de blocs d'estimation qui subdivisent le gisement. On notera que la marge d'erreur globale n'est pas fonction de la taille des blocs d'estimation et en demeure indépendante (David, 1982, p 194 et 195).

Selon les définitions proposées au chapitre 3 du Tome III du Guide, **l'établissement des marges d'erreur des blocs d'estimation est nécessaire à la détermination des Réserves Prouvées et à la détermination des Gisements délimités Mesurés**, ces classes ne pouvant se satisfaire d'une maille d'information qui ne permet d'estimer que la précision globale.

La figure 7-6A présente, de façon conceptuelle et généralisée, les relations entre la marge d'erreur globale et la marge d'erreur de l'estimation des blocs aux divers stades de la mise en valeur d'un gisement.

C) Dimensions des blocs / Marges d'erreur

La dimension des blocs d'estimation subdivisant un gisement pourra d'abord s'établir en s'inspirant de la dimension de la maille ou des dimensions de l'ellipsoïde d'influence établies à partir des variogrammes. Au stade de la faisabilité, le bloc d'estimation idéal devrait être relié au bloc de planification minière dans l'exploitation envisagée, selon le niveau d'information requis pour cette étude. Lors de l'exploitation, la planification détaillée et le contrôle minier requièrent, en général, des informations additionnelles à celles requises à la faisabilité. A ce stade, le bloc d'évaluation idéal serait celui dont le volume peut être l'objet de sélection dans l'application de la méthode d'extraction choisie (David, 1988).

Les travaux subséquents amèneront, en corollaire avec la dimension plus restreinte de la maille, à utiliser des blocs d'estimation plus petits, en relation avec les objectifs des stades plus avancés de la faisabilité et ensuite face aux exigences accrues de la réalisation minière. On se rendra compte, lors de l'estimation, avec les mêmes échantillons, des teneurs et marges d'erreurs de blocs plus petits, qu'on obtient des incertitudes plus grandes. En effet, **la marge d'erreur sur l'estimé de teneur d'un bloc est fonction inverse du volume de ce bloc.**

Par exemple, selon les techniques des analyses de sensibilité, les marges d'erreur obtenues par des calculs de précision sur des blocs de dimensions décroissantes serviront à trouver la dimension de bloc à partir de laquelle la marge d'erreur devient excessive. De même, les chiffres des marges d'erreur indiqueront si les blocs choisis pour les simulations minières sont d'une dimension appropriée.

La classification des "Réserves prouvées" et des "Gisements Mesurés" à partir de la marge d'erreur serait difficilement réalisable dans la pratique si chacun était laissé libre de choisir la dimension de bloc d'estimation qui le situerait, plus ou moins artificiellement, dans le domaine de marge d'erreur recherchée.

D) Volumes repères

L'estimation des réserves doit se faire, par définition, en vue de l'exploitation minière, dans une perspective plus large que celle de la mise en valeur. Beaucoup de confusion vient du fait que la planification et l'exploitation minières s'appuient sur divers volumes repères qui ne sont pas toujours des blocs d'estimation. Il serait utile d'énumérer tous les volumes repères reliés aux besoins d'estimation et de planification d'une exploitation minière.

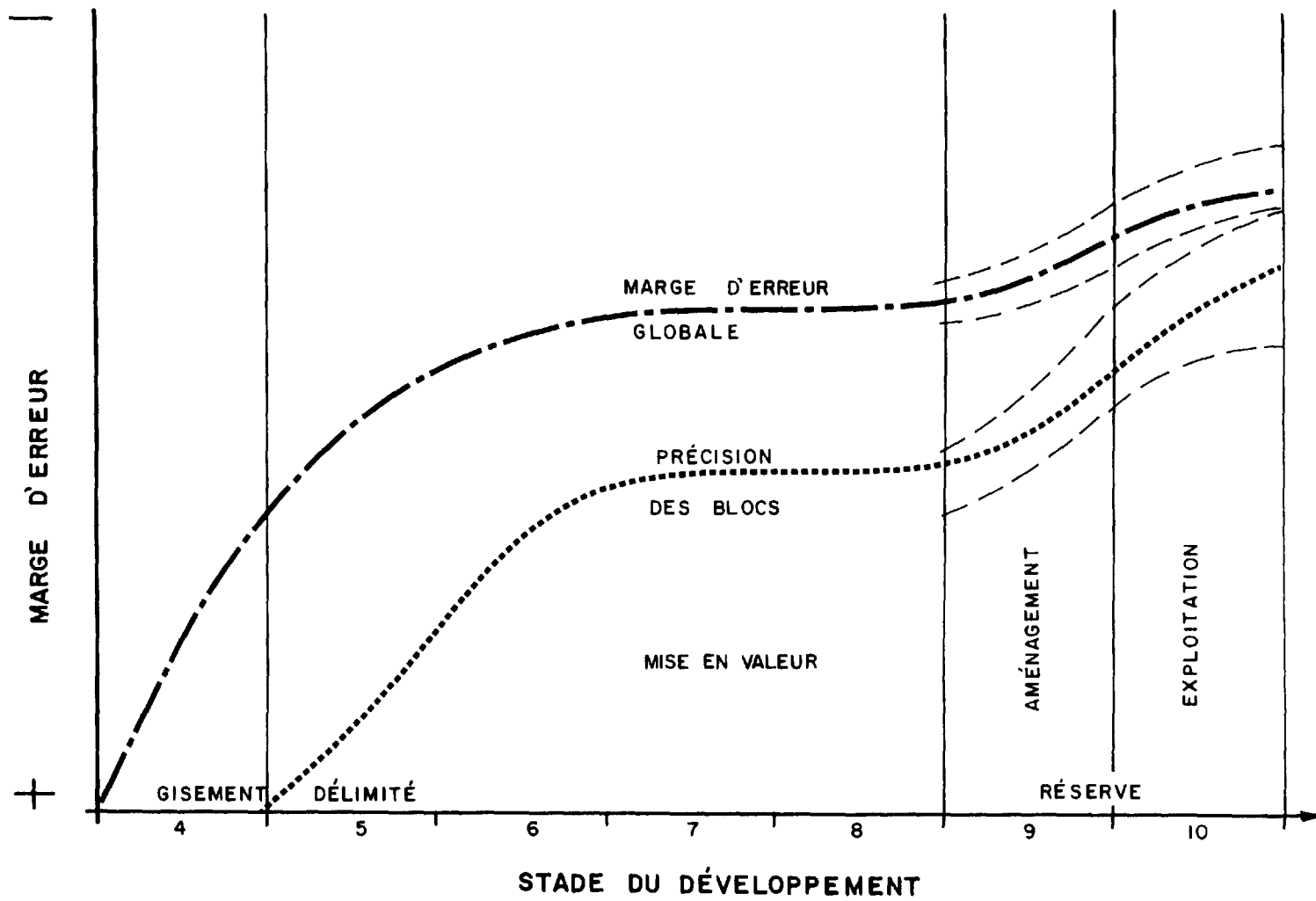


Fig.7. 6A

DIAGRAMME GÉNÉRALISÉ: MARGES D'ERREUR D'ESTIMATION

Ces volumes repères se regroupent dans les types suivants: blocs d'estimation (BE), blocs de cédules et budgets (CB) et blocs de planification et contrôle minier (CM). Voici comment ces blocs se distinguent:

- 1) la réserve globale du projet (BE, CB),
- 2) les gisements / lentilles individuels (BE);
- 3) la réserve requise pour assurer la période de remboursement bancaire (pay-back) dans le cas de mise en production ou d'expansion majeure (CB);
- 4) la réserve requise pendant le cycle de développement de la mine (pour le temps de développer de nouvelles zones, de développer les chantiers, etc.) (CB);
- 5) la réserve qui sera exploitée l'année prochaine, le plan et le budget qui en découlent (CB);
- 6) le bloc minimum de planification minière lors de l'étude de faisabilité du stade 8 (BE) (CM);
- 7) le volume minimum qui peut faire l'objet de sélection par l'opérateur dans la méthode utilisée pour un chantier donné (BE, CM);
- 8) le minerai planifié pour exploitation le mois prochain (CB, BE);
- 9) le minerai exploité dans les prochains jours (CM).

L'item 3) est associé à la quantité de minerai qui devrait être de calibre "Prouvé Classe I et II" et "Probable Classe I" au moment de la mise en production. Les item 6 et 7 sont reliés: ces dimensions varieront selon les méthodes minières, selon les caractéristiques du gisement et selon la maille d'information disponible. *Le Guide suggère de s'orienter sur la masse correspondant à une durée de un à trois mois de production (item 8) et sur le bloc de planification minière (item 7) pour établir la dimension du bloc d'estimation des réserves Prouvées au niveau de l'étude de faisabilité.* Si par exemple le bloc de planification minière utilisé était trop gros, les données minières et par conséquent l'étude de faisabilité pourraient être peu réalistes quant aux marges d'erreur des teneurs lors de l'exploitation. Le prochain chapitre, "Aspects miniers", élaborera sur les interrelations entre les méthodes d'exploitation et les gisements et sur les aspects d'efficacité et de contrôle minier.

7.4.4 LES NORMES DE CLASSIFICATION

Le tableau 7-2 qui suit présente les définitions de catégories et de classes pour la classification des réserves. Les critères sont formulés de façon objective en relation avec les besoins de développement et de contrôle minier. Des marges d'erreur appuyées sur l'expérience minière sont proposées au tableau 7-3. Cette classification peut donc être utilisée même sans les marges d'erreurs et les limites de confiance obtenues par la géostatistique (voir chapitre 3, Tome III u Guide).

Tableau 7-2

NORMES DE CLASSIFICATION

<u>Prouvé</u>	Classe I	la connaissance du minerai est à un niveau suffisant pour permettre la <u>planification minière détaillée des chantiers</u> mais pas nécessairement tout le contrôle géologique et minier de l'exploitation"
	Classe II	la connaissance des minéralisations est à un niveau de précision suffisant pour la <u>planification minière d'ensemble des chantiers</u> mais pas la planification minière <u>détaillée</u> des chantiers, ni le contrôle de l'exploitation.
<u>Probable</u>	Classe I	La connaissance des minéralisations est suffisante pour établir la dimension, les limites et les teneurs de façon appropriée à une planification minière de <u>type préliminaire</u> "
	Classe II	la connaissance des minéralisations est suffisante pour établir la dimension, les limites et les teneurs de façon appropriée à une planification minière de <u>type conceptuel</u> "

Les marges d'erreurs proposées au Tableau 7-3 se situent au niveau de confiance de 90%. Pour les Réserves prouvées et pour les Gisements mesurés, les marges d'erreur devront être rencontrées à la fois sur les marges d'erreur globales et sur les marges d'erreur des blocs d'estimation.

TABLEAU 7-3
MARGES D'ERREUR DES CLASSES DES RÉSERVES

<u>CATÉGORIE</u>		<u>MARGE D'ERREUR</u>	
		<u>Globale</u>	<u>Blocs</u>
Prouvé	{ Classe I	< 10%	< 25%
	{ Classe II	< 20%	< 50%
Probable	{ Classe I	< 30%	> 50%
	{ Classe II	< 40%	Extrême

Le Guide souligne en passant que, dans une mine polymétallique, les métaux usuels peuvent être connus sur une maille d'information donnée à faible marge d'erreur, disons de +/- 10%, tandis que l'or pourrait n'être connu qu'à une marge d'erreur de disons 20%, à partir de la même maille d'information et des mêmes échantillonnages. Il faudra donc présenter la marge d'erreur pour chaque métal contenu. Pour simplifier la présentation de la précision de l'ensemble du contenu métal, on utilisera une valeur composite, exprimée en dollars ou en teneur équivalente d'un des métaux contenus.

7.5 LE CALCUL DES MARGES D'ERREUR

7.5.1 LE CHOIX DU MODÈLE

Pour le calcul de la marge d'erreur, le Guide propose de déterminer la variance de l'erreur pour les estimés résultant de chaque étape d'estimation et de convertir cette variance en marge d'erreur relative, en supposant un modèle simple, normal ou lognormal, pour la distribution de l'erreur. Si on opte pour un modèle normal, la marge d'erreur relative est (en pourcentage): $100 \times 1.25 \times S/T$, ou S^2 est la variance d'estimation et T l'estimé de la teneur moyenne de la zone minéralisée ou du bloc d'estimation. Dans le cas d'un modèle lognormal, la marge d'erreur relative est (toujours en pourcentage): $100 \times T^{-1} \cdot 2B^V$ (V: variance d'estimation dans le modèle lognormal).

Les deux formules sont équivalentes quand la variance d'estimation (ou sa racine carrée, l'écart-type) est petite, puisque dans ce cas V est approximativement égal à S/T. Dans le cas où la variance ou l'écart type d'estimation est plus élevé, ($S/T > 0.3$), la première approche tend à fournir des marges d'erreur relative un peu trop élevées. Si le modèle de distribution des teneurs n'est pas lognormal, on devra peut-être déterminer la marge d'erreur par des méthodes non-paramétriques, sans passer par un calcul de variance d'estimation.

7.5.2 MARGE D'ERREUR GLOBALE

A) Pour un amas

Dans le cas où la maille est relativement constante, le Guide propose la méthode suivante, approximative mais simple. En voici les étapes:

- 1- établir le nombre de forages: par exemple 112;
- 2- établir la surface (volume) du gisement, par exemple 50000m^2 ;
- 3- diviser la surface par le nombre de trous, pour trouver la surface de l'unité moyenne de maille: ceci donne 446m^2 , soit $21 \times 21\text{m}$;
- 4- établir le modèle de variogramme des teneurs (logarithmique ou relatif);
- 5- chercher, à l'aide d'un abaque (par exemple, dans David (1977, ¹⁸, p. 203) ou d'un programme ad hoc, la variance d'extension d'un sondage de l'épaisseur du gisement, par exemple 150m, dans un bloc de $21\text{m} \times 21\text{m} \times 150\text{m}$;
- 6- diviser cette variance par le nombre de trous.

C'est la variance d'estimation de la moyenne qui peut être convertie en marge d'erreur relative selon la méthode décrite plus haut.

B) Pour une veine en 3D

La méthode suivante est proposée pour établir la précision de l'estimation de la teneur et du tonnage d'une veine en 3 dimensions. Il s'agit de se reporter sur deux dimensions, en traitant la veine épaisse comme une veine mince, à condition d'estimer la variabilité de l'estimation du volume selon les étapes suivantes:

- 1- établir le nombre de forages;
- 2- établir la surface de la veine sur la projection longitudinale;
- 3- diviser la surface de la projection longitudinale par le nombre de trous pour trouver la surface de l'unité moyenne de maille;
- 4- établir les modèles (2D) des variogrammes des épaisseurs et des accumulations;
- 5- chercher, à l'aide d'un abaque (par exemple dans David (1977, p. 207) ou d'un programme ad hoc, la variance d'estimation d'un sondage dans la maille moyenne, pour l'épaisseur du gisement σ_e^2 et pour l'accumulation σ_a^2 ;
- 6- considérer que l'écart type relatif d'estimation sera celui de l'épaisseur:

$$\sigma_t = \sqrt{(1/n) \times \sigma_e^2}$$

- 7- obtenir l'écart type d'estimation de la teneur par une formule plus élaborée car la teneur est le quotient de l'accumulation par l'épaisseur. Il faut tenir compte de la corrélation entre l'épaisseur et l'accumulation "r":

$$\sigma_t = \sqrt{((\sigma_a^2 + \sigma_e^2 + 2r\sigma_a\sigma_e)/n)}.$$

C) Pour une veine mince (2D)

Une veine dont les limites sont franches peut être estimée sur section longitudinale en 2 dimensions. Après avoir choisi une teneur de coupure pour les échantillons individuels, on définira une épaisseur minéralisée et une teneur pour chaque forage. On prendra soin d'obtenir une épaisseur horizontale et la teneur est celle de l'intersection. On aura alors un plan longitudinal des points centres de chaque intersection. Avant de calculer les statistiques, on prendra soin de vérifier la présence de hautes teneurs et, si présentes, d'appliquer une coupure appropriée²³ pour éviter de biaiser les histogrammes et les variogrammes. Également, si la densité de forage est irrégulière, on dégroupera les trous. Toutes les intersections enlevées pour le calcul des statistiques et des variogrammes seront remises pour le krigeage.

On calculera les variogrammes dans plusieurs directions pour l'épaisseur et le produit épaisseur x teneur. On ne calculera pas les variogrammes des teneurs, à moins d'avoir vérifié qu'il n'y a pas de corrélation épaisseur-teneur. Une fois les variogrammes modélisés, on procède de la même façon que pour les veines 3D.

²³ Voir section 8.3.3, Analyse statistique détaillée et 8.3.5, Choix des échantillons.

7.5.3 MARGES D'ERREUR DES BLOCS

Pour établir la marge d'erreur de l'estimé de la teneur moyenne d'un bloc, il suffit d'effectuer l'estimation par krigeage comme il a été décrit plus haut. En plus de l'estimé, le krigeage fournit la variance d'estimation. Si on fait du krigeage logarithmique, ce sera une variance d'estimation logarithmique, tandis que si on fait du krigeage ordinaire, ce sera une variance d'estimation absolue. Lorsqu'on réduit la dimension des blocs, la marge d'erreur globale ne change pas, mais la marge d'erreur de la teneur obtenue dans un bloc déterminé augmente.

Si on a procédé à l'estimation de plusieurs blocs sur une grille régulière, on peut représenter les marges d'erreur de chaque bloc sur un plan du gisement et ainsi établir des zones "d'isoprécision" pour une taille donnée de bloc. La marge d'erreur sur l'estimé de teneur moyenne de chaque zone n'est pas une simple combinaison des marges d'erreur des blocs à l'intérieur de la zone. Là encore, on doit utiliser une méthode approximative similaire à celle du calcul de la marge d'erreur globale. A partir des marges d'erreur sur les zones de blocs, on peut même remonter à la marge d'erreur globale par simple combinaison des variances d'erreur de chaque zone, pour autant que ces zones soient suffisamment larges.

7.6 RÉSERVES ET CONTRÔLE DE PRODUCTION

Les meilleures méthodes de calcul des réserves et de planification minière peuvent diminuer, mais non éliminer, les problèmes de l'étape suivante qui est la réalisation minière (sauf si la variance d'estimation est presque nulle). L'application de la géostatistique aux problèmes de sélection permet de mieux comprendre les variations des teneurs des blocs d'estimation et d'évaluer l'effet de divers patrons d'échantillonnage sur la sélection minière (David, 1988⁷⁰, David, 1989⁷¹).

Pour les fins de cette analyse, David utilise le terme dilution au sens large, pour regrouper les erreurs d'estimation, les pertes, la dilution par le stérile engendrée par l'extraction minière. Il propose des méthodes pour utiliser la variation statistique de l'estimation des blocs à partir des échantillons pour évaluer cette dilution.

Ainsi, un facteur d'erreur probable peut être calculé au moment du calcul des réserves et devrait servir à orienter la planification de l'exploitation: deux méthodes minières différentes doivent être évaluées et comparées sur cet aspect. Le facteur d'erreur possible dans l'extraction est un facteur qui devrait être utilisé dans les études de sensibilité de la rentabilité de l'exploitation minière proposée. Les échantillons en vrac et les essais d'usinage vont permettre de minimiser les facteurs d'erreur, sans les éliminer tous, cependant.

A l'exploitation proprement dite, la dilution peut être minimisée par le contrôle géologique, par l'échantillonnage additionnel. La qualité de l'échantillonnage dépendra du nombre des échantillons, du type des échantillons et de la dimension de la maille. La figure 7-7 montre quelques courbes types qui servent à expliciter les relations entre les divers paramètres géostatistiques et la dimension des blocs de sélection. Le chapitre 8 reprend cette discussion du point de vue des choix de méthodes minières qui s'offrent à l'exploitant.

7.7 INFORMATION ET VÉRIFICATION

7.7.1 LES LIMITES DE L'INFORMATION

Il faut toujours être conscient de la nature et de l'étendue de la base d'information sur laquelle reposent les estimés. Il n'y a en général qu'une direction dans laquelle nous pouvons calculer un variogramme appuyé sur un support détaillé d'échantillonnage: c'est l'axe des sondages ou des échantillonnages. Dans un tel cas, le variogramme défini dans les deux autres axes est moins bien défini, car la maille d'information dans ce plan est beaucoup trop large. Il faut tenir compte de cette condition et chercher à améliorer la base d'information factuelle par divers échantillonnages additionnels.

C'est la raison pour laquelle nous cherchons à obtenir des échantillons dans les autres axes par les travaux d'échantillonnages minières: la direction des galeries dans l'horizontale, celle des monteries dans la verticale. Ce seront les données de cartographie géologique celles des échantillonnages: soit des rainurages²⁴, soit des échantillons des camions, soit des échantillons des volées. Dans la verticale, les monteries pourront être échantillonnées par des rainurages et par les volées (voir la section 7.3).

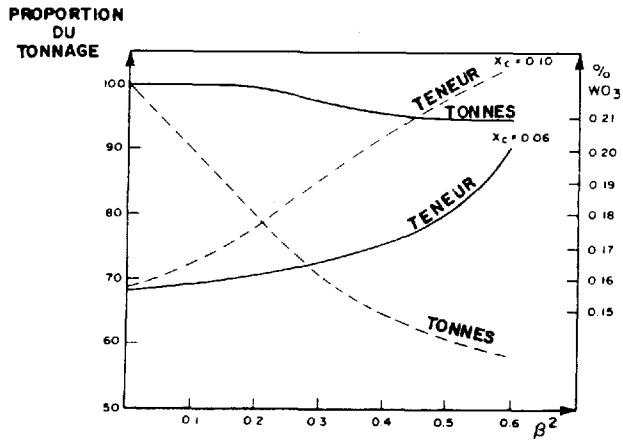
7.7.2 LES ÉCHANTILLONNAGES EN VRAC

Les échantillonnages en vrac sont souvent requis dans la mise en valeur des gisements d'or, pour aider à résoudre les difficultés d'estimation de la teneur d'or quand on rencontre une distribution pépitique du métal, une géométrie particulièrement complexe, ou qu'on anticipe des problèmes minéralurgiques à partir des essais. Ils permettent de vérifier les marges d'erreur calculées à partir des échantillons linéaires, de surface ou de roche cassée. (sect. 5.3 et 7.3).

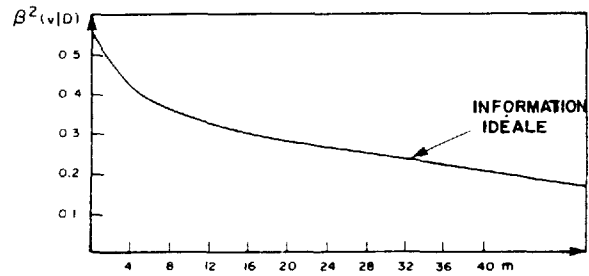
7.7.3 LA RÉCONCILIATION DES RÉSULTATS

Une fois ces nouvelles informations obtenues il faudra les réconcilier avec les estimés obtenus à partir des sondages et autres échantillonnages linéaires, en comparant les résultats

²⁴ Le chapitre 5 commente la confiance surestimée que l'on prête en général aux rainurages comme méthode d'échantillonnage.

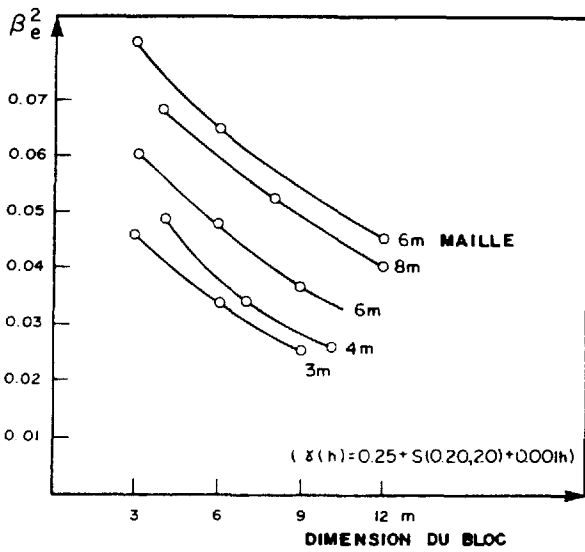


Variance logarithmique des blocs de selection

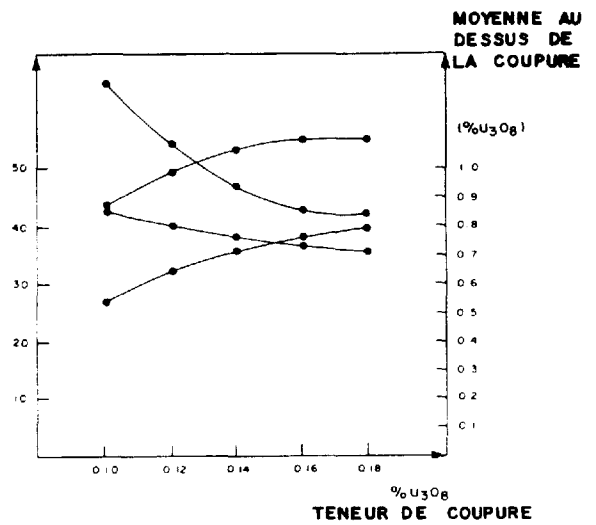


Variance logarithmique des blocs en fonction de leur dimension

$$B^2 = X = X \times X \quad (\times 10^1)$$



Proportion des tonnes au dessus de la coupure (% du total)



Tonnage et teneur moyenne en fonction des unités de selection

D' APRES: DAVID, 1988

Fig.7.7

de l'échantillonnage et du traitement du vrac, en évaluant leur représentativité quant aux types lithologiques et minéralurgiques présents dans tout le gisement. L'étape ultime sera de reprendre les estimations, pour réviser selon des nouvelles informations, les estimés faits à partir des échantillons linéaires et la pertinence des marges d'erreur établies.

Ces comparaisons devront être exhaustives et se faire sur tous les plans. Le Guide a présenté (sect. 5.3.3) un exemple comparant les résultats de différentes méthodes d'échantillonnages utilisées par Inco Ltée dans la mise en valeur d'un gisement aurifère. On y compare, au moyen de variogrammes, les échantillonnages des volées après concassage avec les échantillons prélevés des bennes des chargeuses et avec les rainurages. Cet article ne discute pas des résultats d'essais en usine pilote cependant, comme le Guide le suggère dans le paragraphe précédent. Lorsque de tels essais sont effectués, la comparaison avec les valeurs des autres échantillonnages du gisement est essentielle pour celui qui doit prendre une décision.

7.7.4 LES VÉRIFICATIONS

L'utilisation des méthodes géostatistiques n'exclut pas des calculs parallèles par d'autres méthodes. Au contraire, dépendant de la forme et de la nature de la (ou des) zones minéralisée(s) sous étude, on choisira au moins une des méthodes traditionnelles pour un premier essai de calcul des volumes, des masses et des teneurs. Cet essai s'appuiera sur le modèle géologique et géométrique retenu comme le plus plausible. Les résultats de ce premier inventaire serviront de repères et de comparaison par rapport aux divers calculs géostatistiques et aux estimations bloc par bloc.

Le Guide tient à souligner que la responsabilité professionnelle impose aux responsables des estimations des gisements de connaître les méthodes et les procédures de calcul qu'incorporent les logiciels utilisés pour les estimations. Ils doivent connaître les implications de ces méthodes quant à la portée et la précision des résultats obtenus. Cette responsabilité impose également aux professionnels de faire des vérifications, par des analyses de sensibilité qui font varier divers paramètres, des estimations des masses et des teneurs.

7.7.5 L'EXPLOITATION

La même exigence nécessite de vérifier et d'ajuster, lors de l'exploitation, les techniques d'estimation face aux réalisations. Le Guide rappelle que les praticiens de la géostatistique, même s'ils sont convaincus que c'est la meilleure méthode d'estimation, ne prétendent pas qu'elle est infallible. Cet exercice de vérification et de réconciliation fournira l'opportunité d'améliorer les méthodes d'estimation ou la sélection minière, afin d'augmenter la rentabilité. Plusieurs cas types de cette nature sont présentés dans les chapitres 6, 7, 8 et 9.

7.8 LES CAS TYPES D'ESTIMATION

Nous verrons dans les pages qui suivent trois cas types d'estimation dans des mines en exploitation, celui de la mine Doyon de Cambior/Minerais Lac, celui de la mine McBean de Queenston Mines Ltd et celui de la mine Chimo de Société minière Louvem et Cambior Inc. Le lecteur intéressé pourra consulter les comptes-rendus de l'Atelier sur l'utilisation des ordinateurs en exploration et exploitation minière (CAME, 1990) pour des exemples additionnels.

7.8.1 LA MINE DOYON, ZONES 1 & 2

Les zones 1 et 2 de la mine Doyon constituent un gisement de grandes dimensions (près de 1000m x 100m), exploité à ciel ouvert. Ce gisement situé dans des tufs dacitiques est d'allure stratiforme dans sa partie centrale et l'or y est d'allure disséminée ou en veinules, à l'intérieur de bandes allongées, mais des veines se développent dans sa périphérie et son extrémité est.

A) Les données de base

Le gisement minier est connu par une maille de sondage de 15 mètres et considéré comme "Prouvé" sur cette maille (ce serait du Prouvé Classe II selon les normes du Guide). L'échantillon moyen est de 1.5 mètre environ mais varie en pratique selon les minéralisations observées. Une description sommaire des dimensions de la maille aux divers stades de probation de ce gisement a été fournie à la section 7.4. Le gisement est constitué de deux coeurs riches entourés de minéralisations disséminées. Tous les échantillons pris à l'intérieur de ces limites physiques sont considérés comme faisant partie du gisement. Les collets des trous utilisés sont montrés sur la figure 7:3. Les échantillons originaux ont été regroupés en longueurs de 1.5m. Une étude statistique des 2 zones prises individuellement ne montre pas de différence dans la distribution statistique. La zone 1 et la zone 2 constituent un ensemble uniforme pour les fins de ce cas.

B) La distribution des échantillons

Les histogrammes sont donnés sur les figures 7-1 et 7-2 et les distributions cumulatives aux figures 7-8 et 7-9. Il s'agit de distributions lognormales typiques, montrant cependant un nombre anormal de teneurs élevées. Pour faire les statistiques subséquentes, les variogrammes, il faut corriger ces hautes teneurs individuellement, en les remplaçant par la teneur qui aurait la même fréquence théorique (David, 1988, ⁽⁵⁵⁾, figure 7-10. Puisque la distribution est lognormale, il faut s'attendre à un effet proportionnel: sa présence se vérifie en portant sur un diagramme par banc de 10m la moyenne et l'écart type des échantillons (figure 7-11).

TENEUR AU
(g/t)

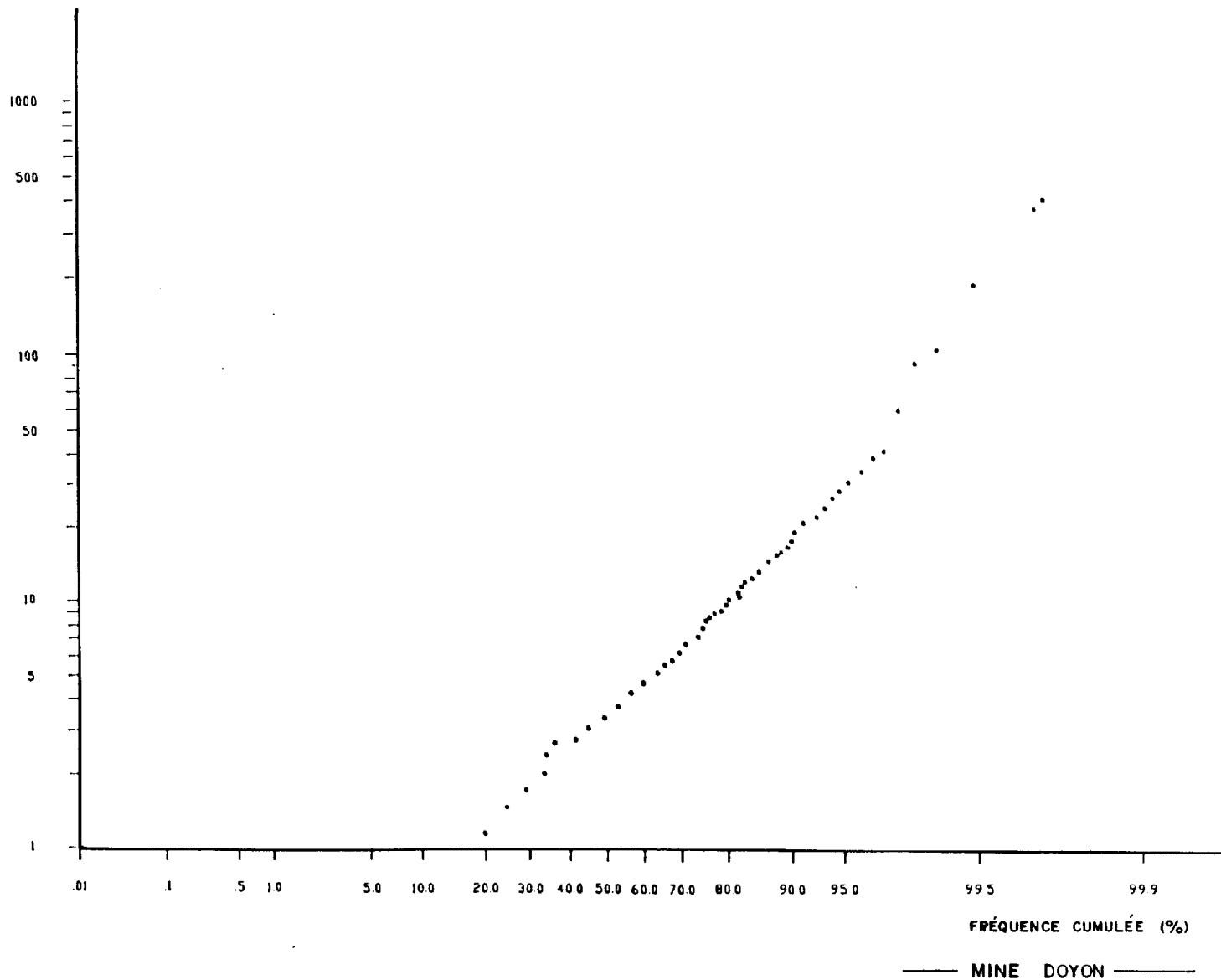
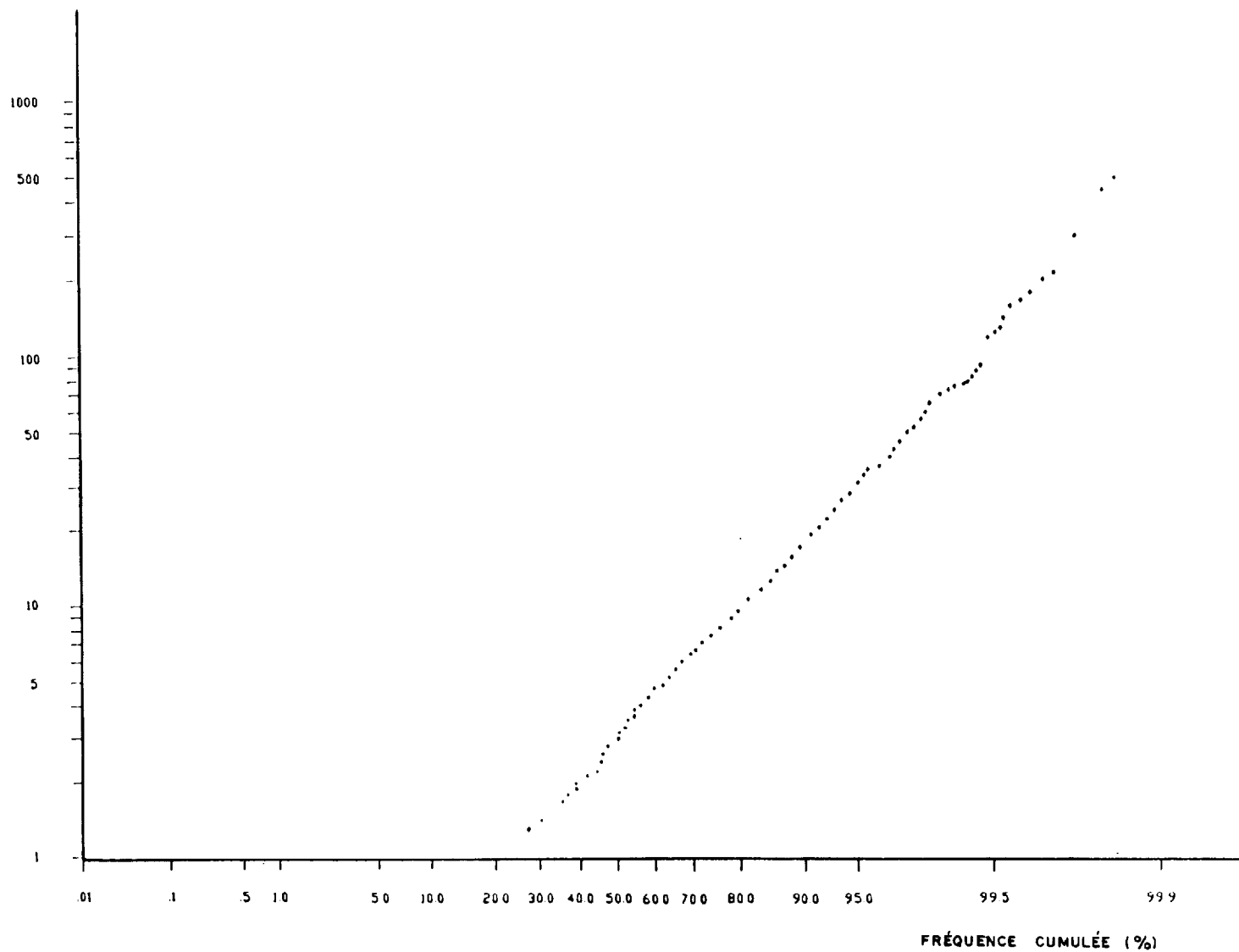


Fig. 7.8

**DISTRIBUTION DES ÉCHANTILLONS DE
FORAGE AU DIAMANT (1,5m) ZONE I**

TENEUR AU
(g/t)



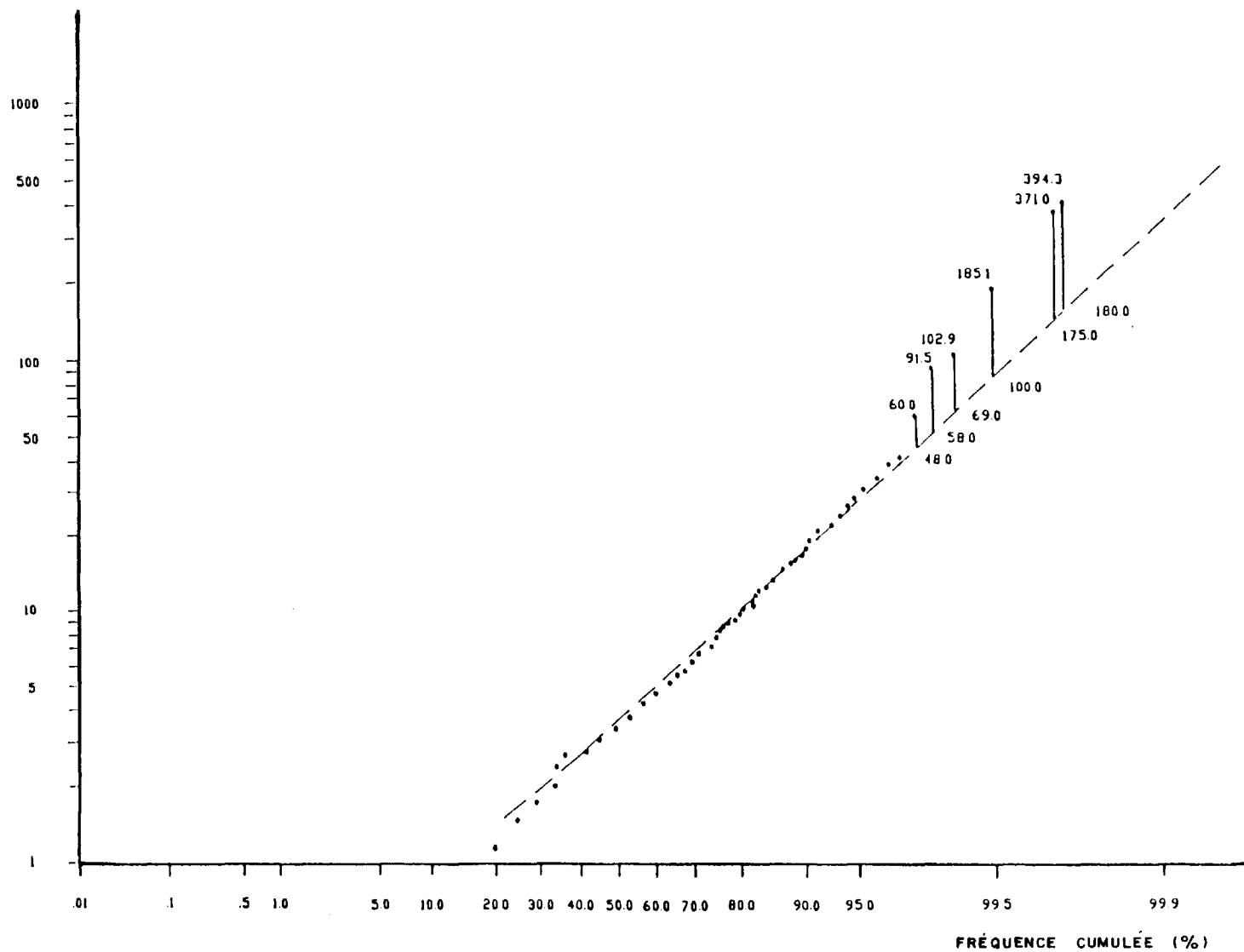
FRÉQUENCE CUMULÉE (%)

— MINE DOYON —

Fig. 7.9

DISTRIBUTION DES ÉCHANTILLONS DE
FORAGE AU QUANTIFIÉ À LA MINE

TENEUR AU
(g/t)



— MINE DOYON —

Fig. 7.10

**CORRECTION DES HAUTES
TENEURS - ZONE I**

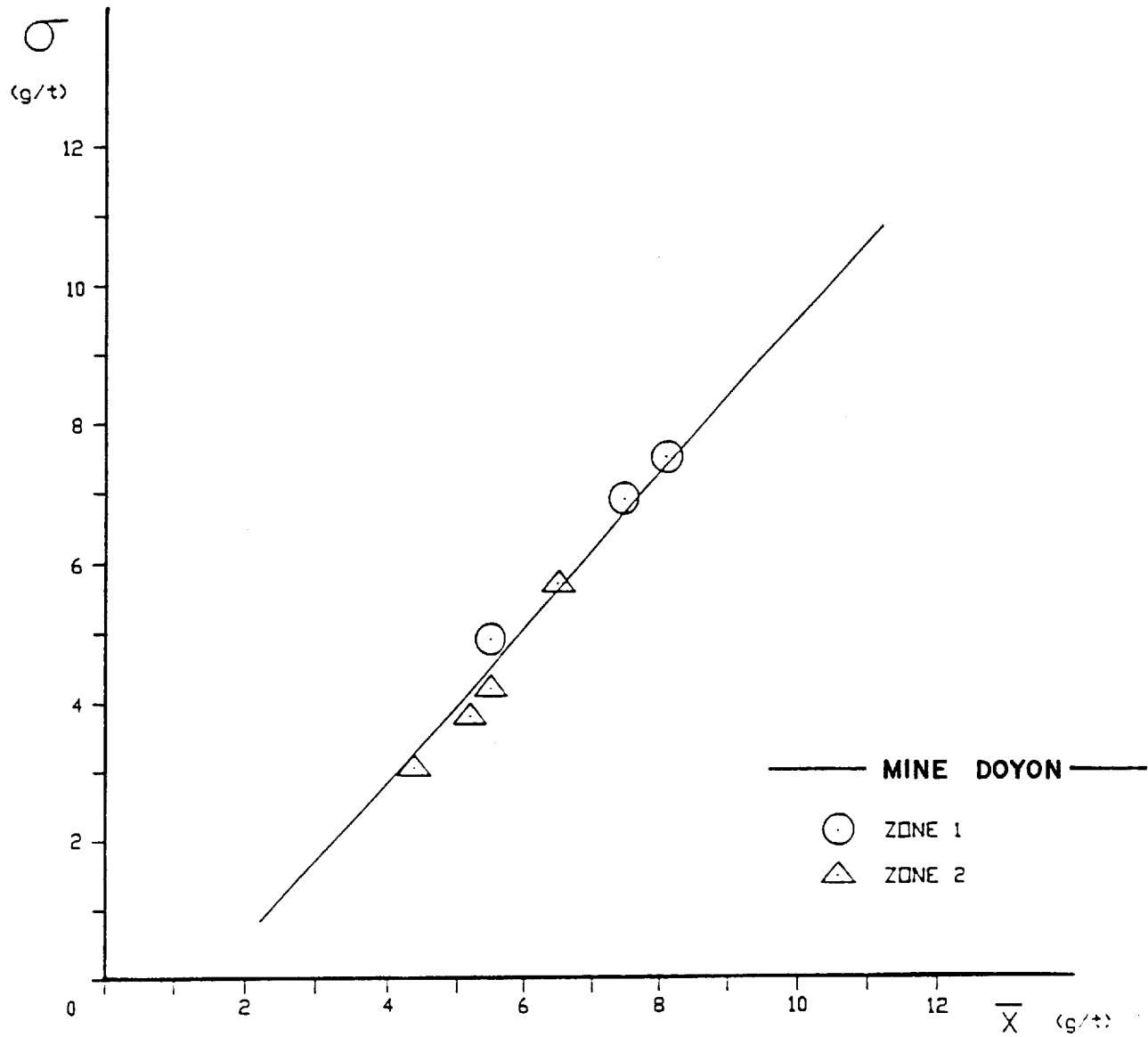


Fig. 7.11

C) Les variogrammes

Il faut calculer les variogrammes dans les directions d'allongement du gisement, figure 7-12. Les directions de la lithologie et du pendage sont connues. On calculera ainsi un variogramme dans la section longitudinale et on trouvera ainsi une direction principale qui plonge à 55° avec une portée de 22m de longueur (figure 7-13). Perpendiculairement à la direction de la zone tabulaire, la portée est de 9m verticalement et de 6m horizontalement.

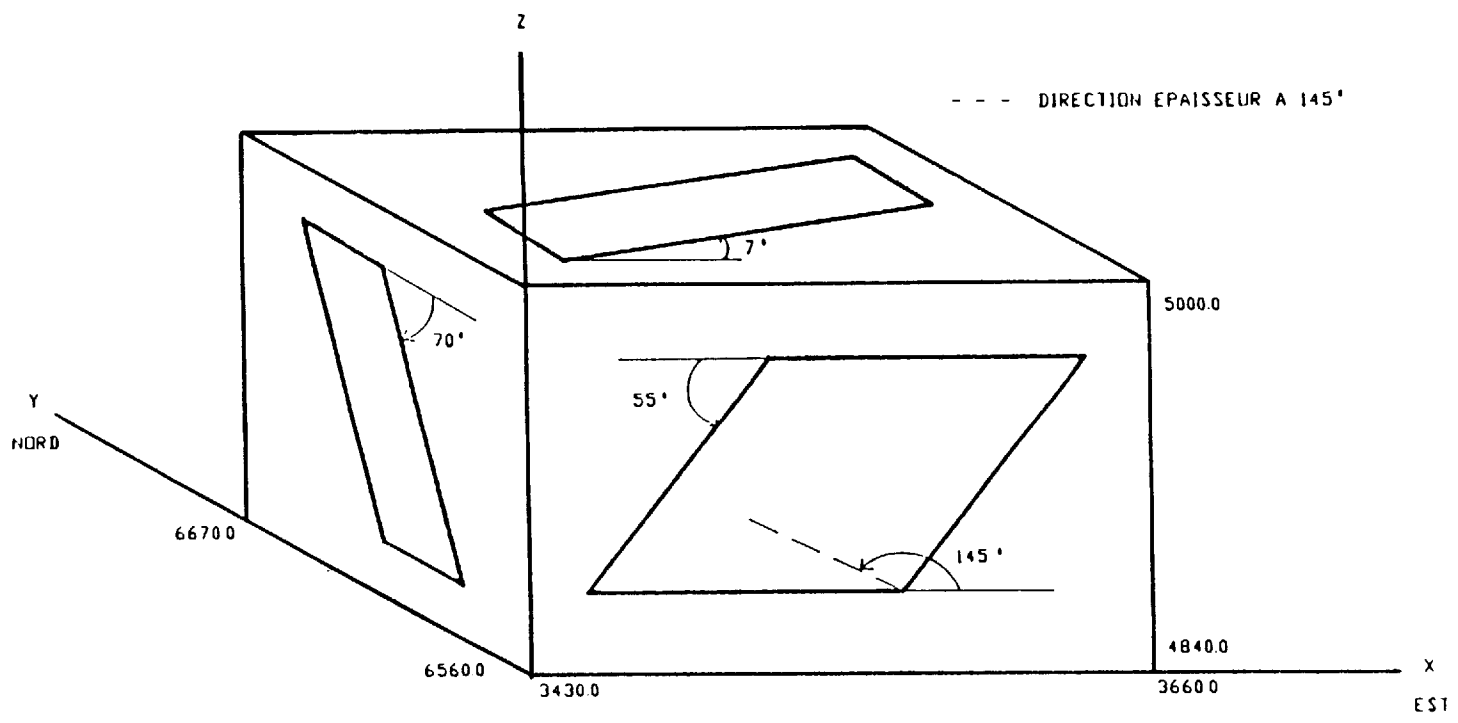
On calculera des variogrammes relatifs (figure 7-14) à cause de l'effet proportionnel. Dans ce cas-ci, ils ne sont pas bien bons mais on peut les corriger par les variogrammes logarithmiques qui ici semblent meilleurs (figure 7-13). L'ellipse d'influence établie d'après les portées montre graphiquement les portées établies. (figure 7-15).

D) Le krigeage

Pour effectuer le krigeage, on a corrigé le variogramme logarithmique et établi le variogramme relatif. On a ensuite effectué le krigeage de blocs de 15m x 10m x 5m sur les bancs de 10m de hauteur choisis pour l'exploitation (figure 7-16). Une comparaison avec les blocs minés, aussi montrés sur la figure 7-17 pour une section longitudinale, a donné des résultats exacts avec la même teneur de 4.76 g/t Au pour 470,000 tonnes.

E) Le contrôle des teneurs

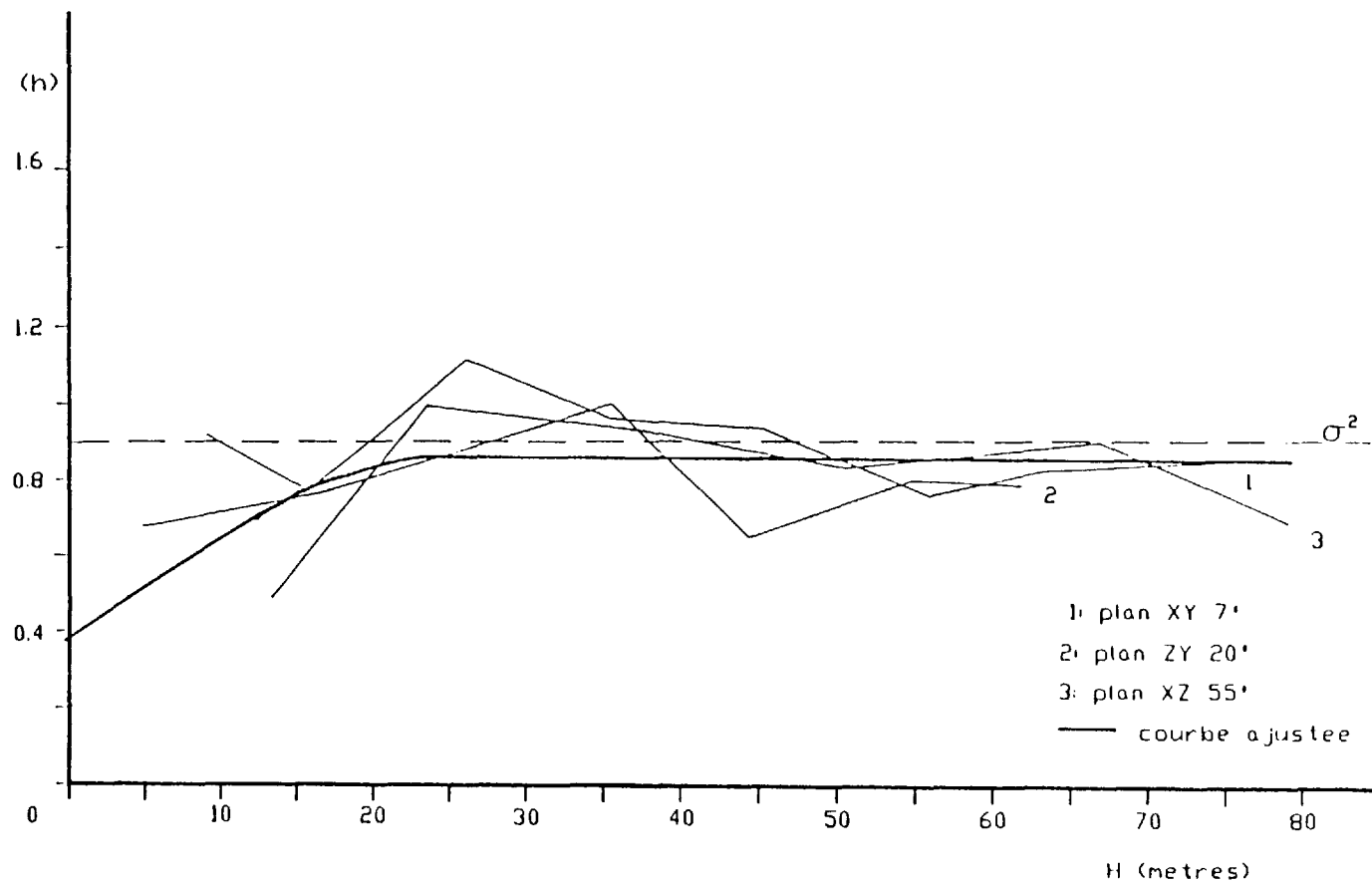
La réalisation à l'exploitation est une étape distincte de celles des estimés des réserves et de la planification plus détaillée de la mine. L'expérience de l'exploitation en ciel ouvert à la Mine Doyon, décrite à la section 9.6.2, a montré que des forages et échantillonnages additionnels et un suivi constant des informations obtenues étaient requis pour assurer le niveau d'efficacité prévu dans les estimations.



—— MINE DOYON ——

Fig. 7.12

DIRECTIONS D'ALLONGEMENTS
 — ZONE I —

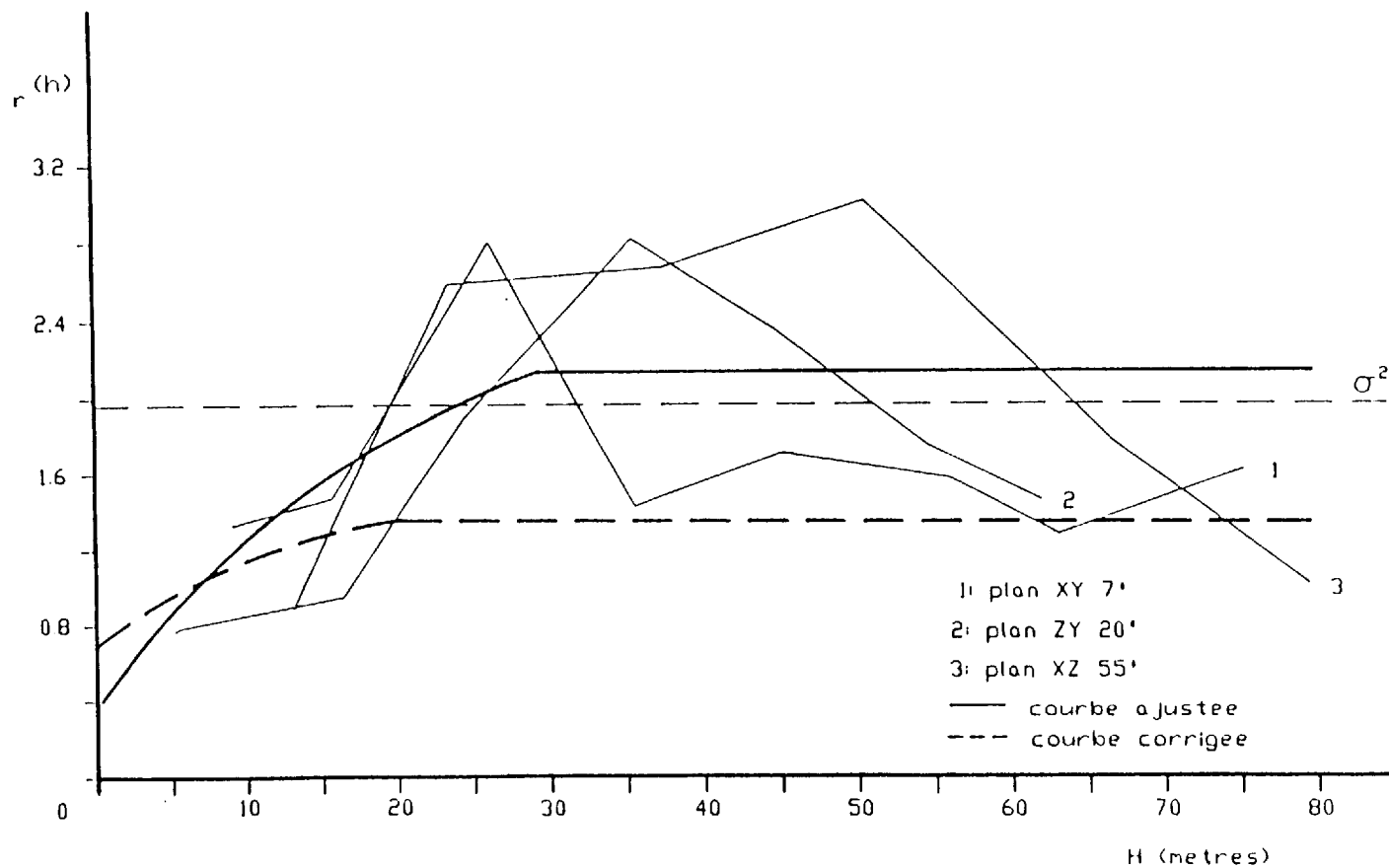


(FORAGES AU DIAMANT , ÉCHANTILLONS 1,5m)

———— MINE DOYON ————

Fig.7.13

VARIOGRAMMES LOGARITHMIQUES
 — ZONE I

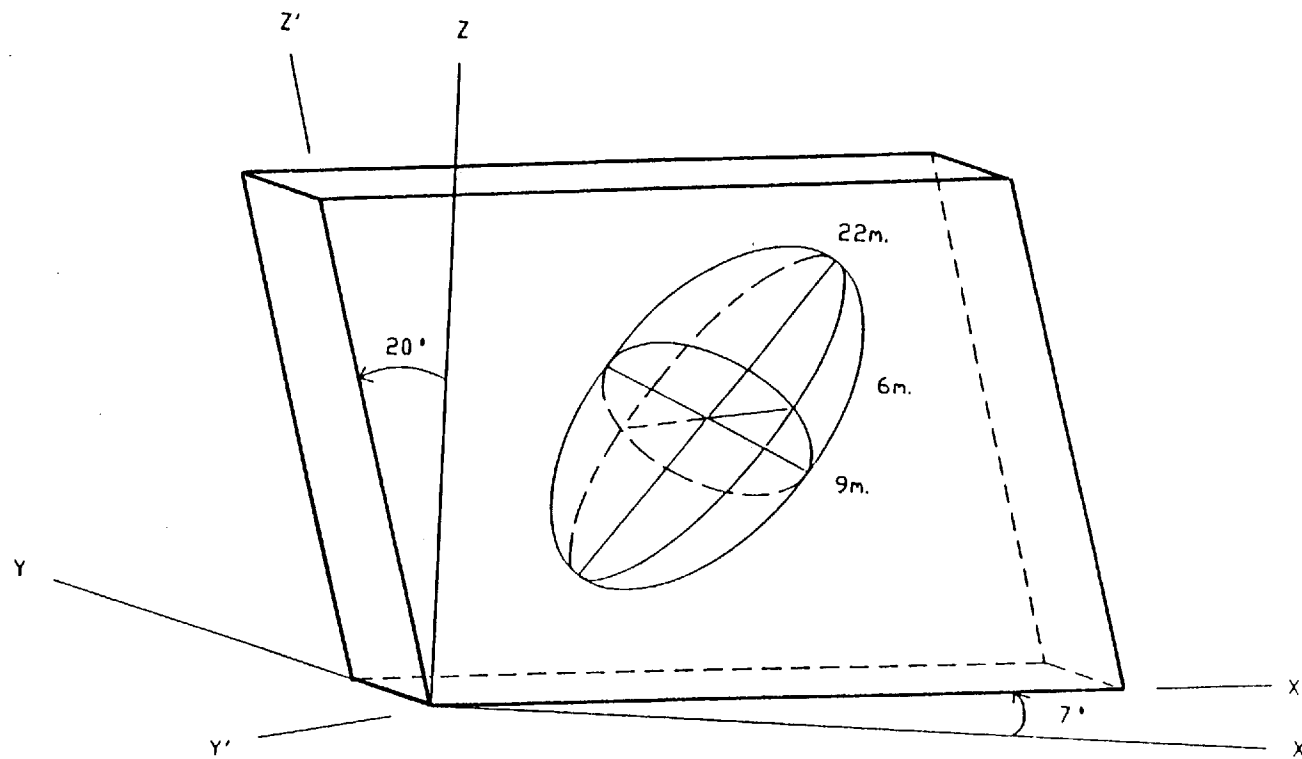


(FORAGES AU DIAMANT , ÉCHANTILLONS DE 1,5 m)

———— MINE DOYON ————

Fig.7.14

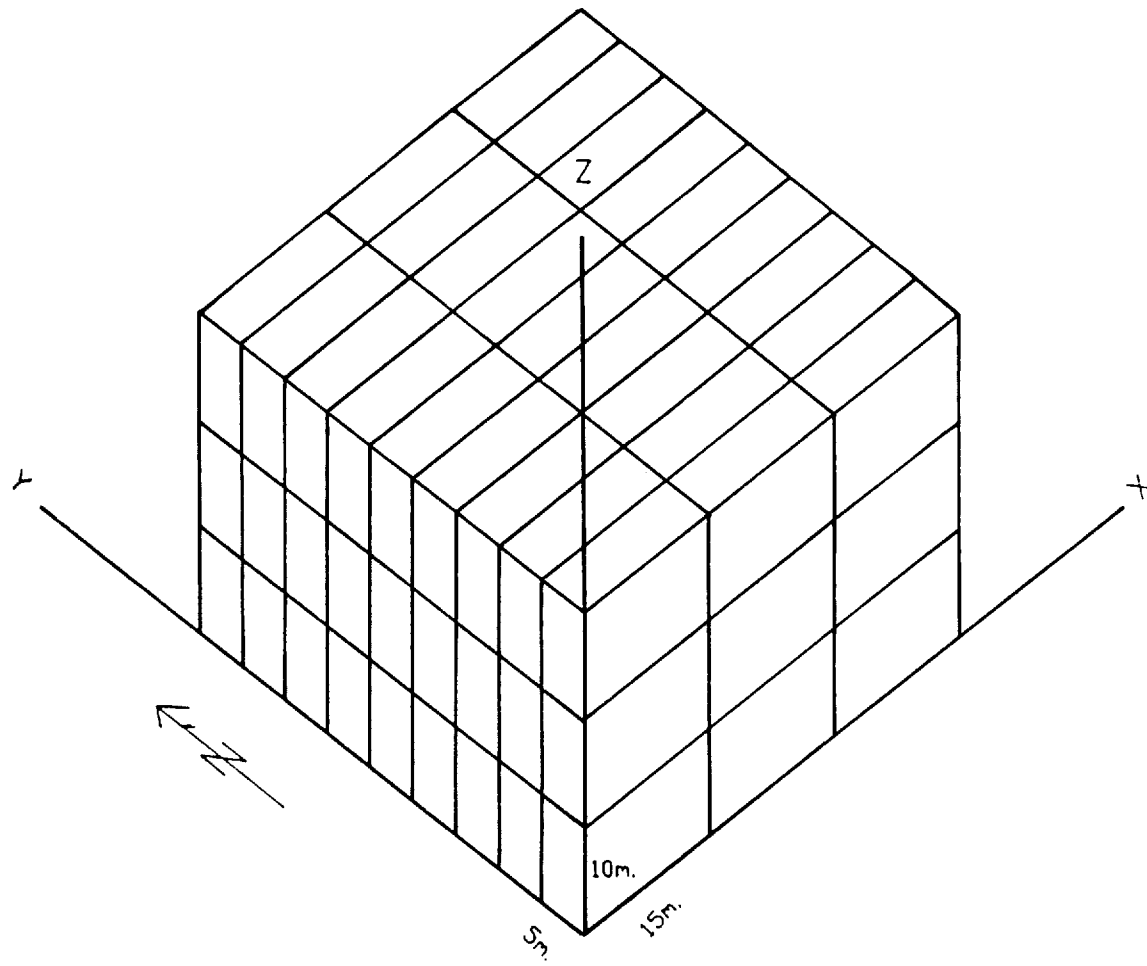
VARIOGRAMMES RELATIFS
— ZONE I



— MINE DOYON —

Fig. 7.15

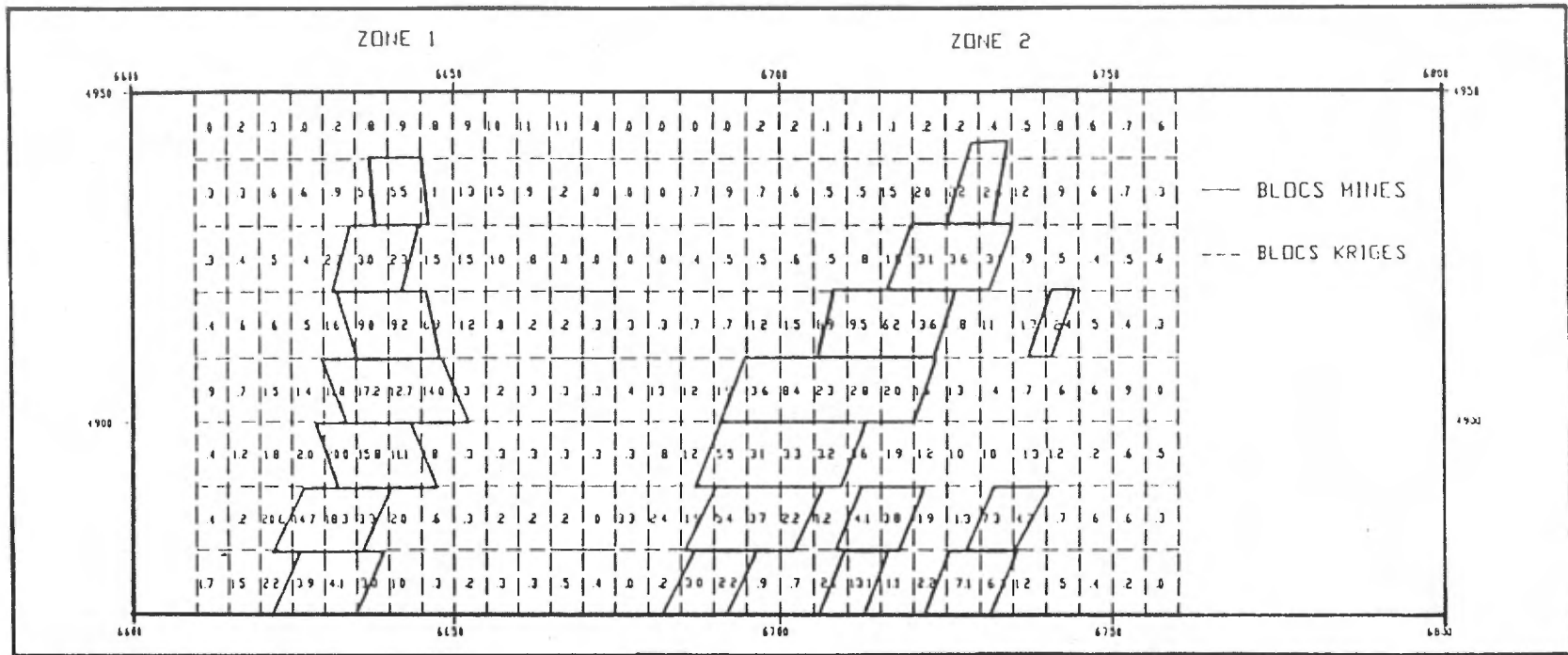
**ZONE D'INFLUENCE D'UN
ÉCHANTILLON DE LA ZONE I**



— MINE DOYON —

Fig. 7.16

SYSTÈME DE BLOCS
DE MINE DOYON



SECTION 3480
 INTERSECTION BLOCS KRIGES - BLOCS MINES
 ZONE 1 et 2



— MINE DOYON —

Fig. 7.17

SECTION DE BLOCS KRIGÉS
 AVEC BLOCS DE MINAGE

7.8.2 LA MINE McBEAN

La mine McBean de Queenston Mines, située près de Kirkland Lake, est un ensemble de veines qui a déjà été considéré comme un amas. Une exploitation à ciel ouvert était déjà planifiée et il s'est agi d'établir la réserve à l'intérieur de la fosse jusqu'à l'élévation 10672: la réserve a été calculée à 3,512,000 tonnes courtes.

A) L'information disponible

L'information disponible consistait en 6530 intersections minéralisées, provenant de 373 sondages au diamant, d'une longueur moyenne de 1.42m (4.66 pi). De plus, on disposait de 62 sondages d'exploration de surface, 48 forages pour sautages, 263 sondages sous-terre, 241 échantillons de roche cassée, 211 forages courts ainsi que d'échantillons d'écaillages (chip samples).

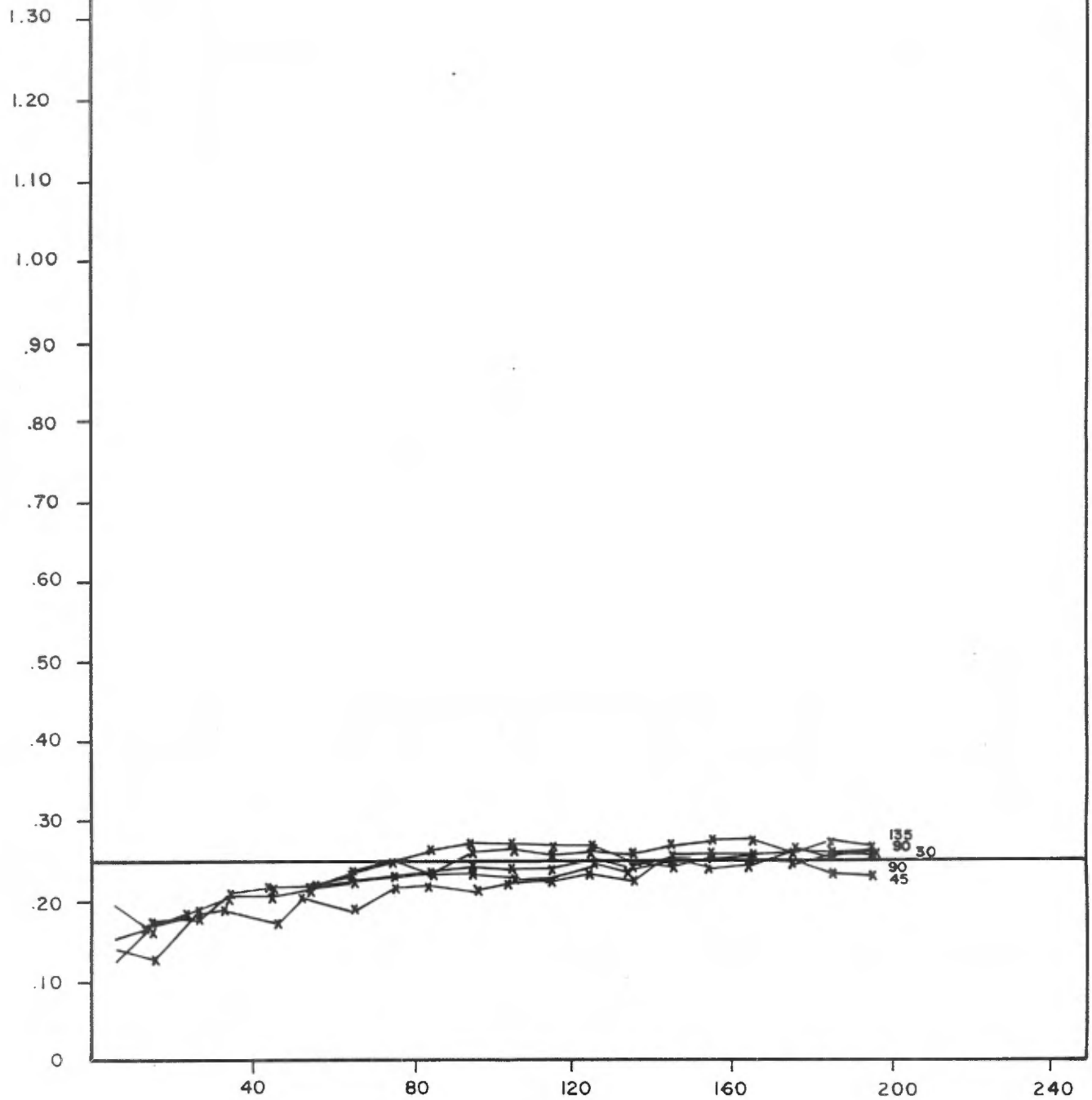
Les échantillons ont été recalculés en intervalles de 3 mètres pour une étude comparative et pour des usages ultérieurs. Les histogrammes de chaque groupe d'échantillons ont été établis. Il y a une coupure nette à 0.03 on/t Au pour chaque groupe de données. Les statistiques des divers groupes sont comparables sauf pour les écaillages qui montrent une moyenne beaucoup plus élevée. Ce dernier groupe n'a donc pas été utilisé dans les calculs, ce qui n'a pas causé de carence importante dans l'information, puisque les secteurs couverts par ces échantillonnages sont également couverts par des échantillons de roche cassée et par des forages courts.

B) Le variogramme

Considérant la coupure très nette entre la minéralisation et le matériel pauvre, on a calculé un indicateur de la minéralisation en utilisant 0.03 oz/t Au comme limite. Les variogrammes logarithmiques ont été obtenus pour la teneur et pour l'indicateur. Ils sont excellents et montrent un effet de pépite marqué; la zone d'influence de l'indicateur est circulaire et de 18.25m (60 pi), tandis que la teneur de la minéralisation montre une zone elliptique dans le plan vertical nord-sud de 9 à 40m (130pi) (figures 7-18 et 7-19).

C) Le krigeage

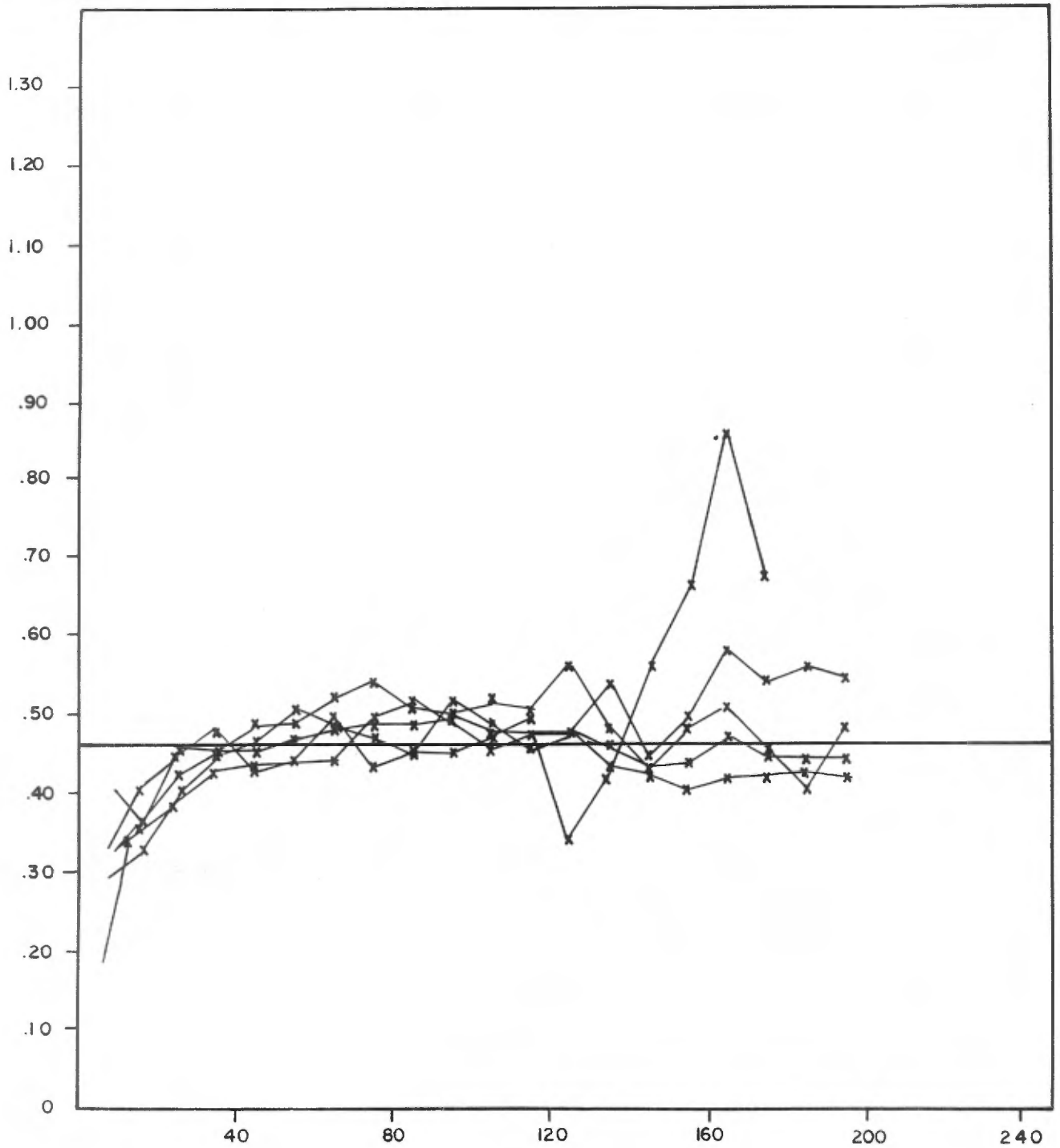
Le bloc de krigeage a été établi en fonction de la hauteur des bancs qui est de 11.6m (38'), avec des dimensions latérales de 3.8 x 3.8 m (12.5 x 12.5'). Le krigeage s'est effectué à l'intérieur des limites fournies par l'opérateur. Le krigeage a dû tenir compte de l'élévation



Variogramme de l'indicateur d'échantillons
de sondages de 10' dans 2 directions du plan
horizontal (0=est, 90= nord)
La courbe la plus basse est dans la direction E. O.

Fig. 7.18

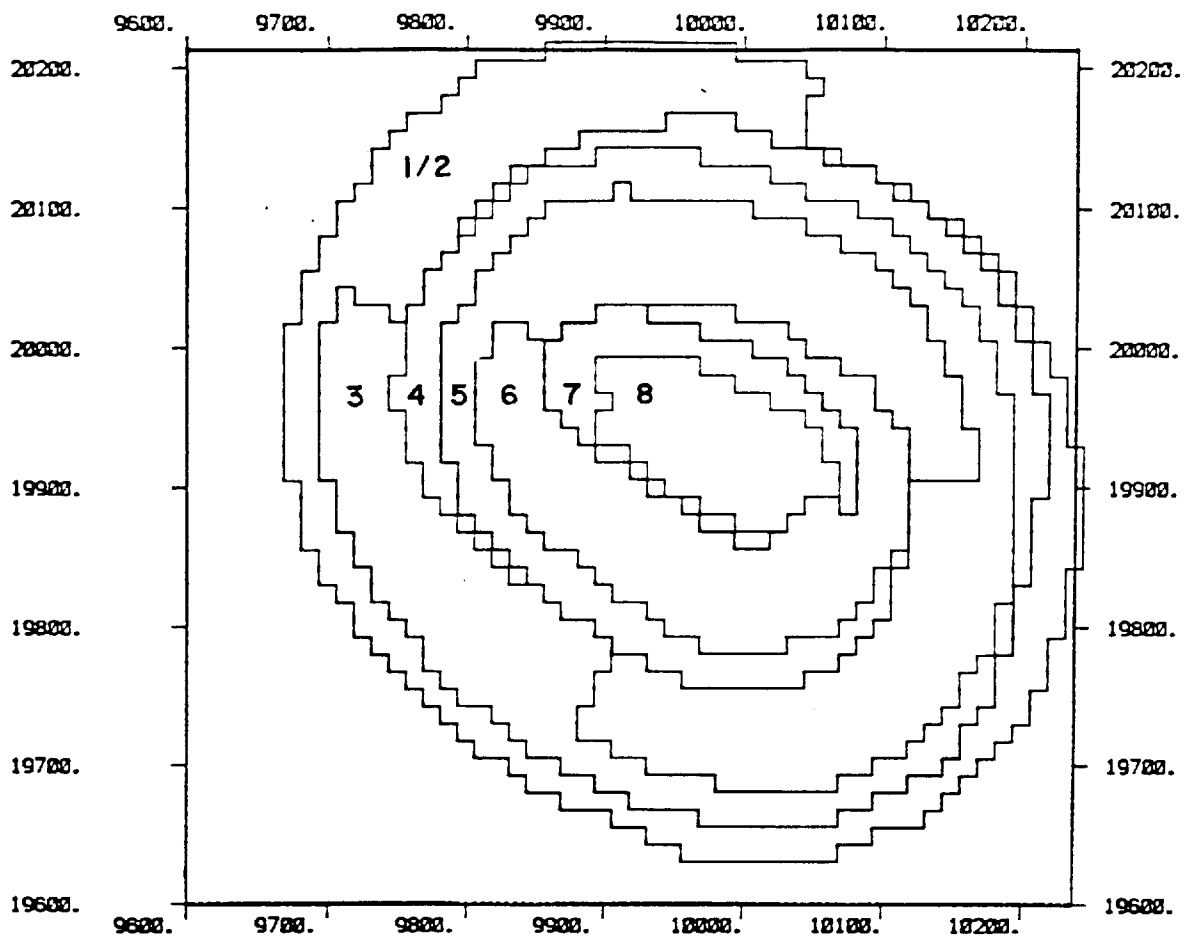
**VARIOGRAMMES
MINE Mc BEAN**



Variogramme des teneur d'intersections minéralisées de IO dans des sondages orientés dans plans verticaux N.-S. (0= nord ; 90 = élév)
 La courbe la plus basse se situe dans l'axe E.-W.

Fig. 7.19

**VARIOGRAMMES
 MINE Mc BEAN**



LIMITES DES BANCS 1 à 8
 PROGRAMME L3F PLOT
 Par: GÉOSTAT

100.0 0.0 100.0 200.0



ÉCHELLE= 100.0

———— MINE Mc BEAN ————

Fig. 7.20

LIMITES DU MODÈLE DE BLOCS
 SUR CHAQUE BANC

du socle rocheux fournie par 59 sondages de surface, ce qui a permis de "contrôler" le sommet des blocs situés à la limite du socle.

Le krigeage a été effectué en 2 étapes, le krigeage de la teneur et le krigeage d'indicateur. On a utilisé un rayon de recherche de 30m (100') dans un plan vertical orienté nord sud et de 15m (50') dans une direction est-ouest. La valeur krigée de l'indicateur nous indique la proportion d'un bloc qui est minéralisée. On établira que la teneur de la portion non minéralisée est la moyenne de tous les échantillons sous une teneur coupure: par exemple 0.03 ou 0.06 oz/t Au. Les teneurs krigées de la portion minéralisée et de la portion non minéralisée sont ensuite combinées pour obtenir la teneur du volume du bloc (figure 7-20).

7.8.3 LA MINE CHIMO

Les zones minéralisées de la mine Chimo sont sub-verticales, avec pyrite et arsénopyrite disséminée, au contact d'une formation de fer et d'un tuf, ceci donnant une définition simple d'une intersection. La maille des sondages ayant servi à l'estimation qui suit était de 15 mètres. Il faut souligner qu'en pratique dans l'exploitation, des échantillonnages plus élaborés ont été requis pour réaliser la récupération du minerai à l'intérieur des marges d'erreur décrites.

A) Les étapes du calcul géostatistique

a) Variogrammes

On calcule en 2 dimensions le variogramme relatif des épaisseurs et des accumulations. Les variogrammes obtenus sont isotropes et sont montrés aux figures 7-21 et 7-22. On voit qu'ils montrent des portées de 22m et un effet de pépité important de 0.6 pour un palier de 2.0, soit 30% pour l'accumulation et .2 pour un palier de 0.60, soit aussi 30% pour l'épaisseur.

b) Krigeage

On effectue le krigeage de l'accumulation et de l'épaisseur et un variogramme fait la division des deux et nous donne la teneur avec sa précision. On ne doit pas utiliser ces blocs pour estimer le tonnage minéralisé car on pourrait obtenir le tonnage que l'on veut. Il faut plutôt s'en tenir à l'enveloppe définie au préalable.

MINE CHIMO
Zone 5

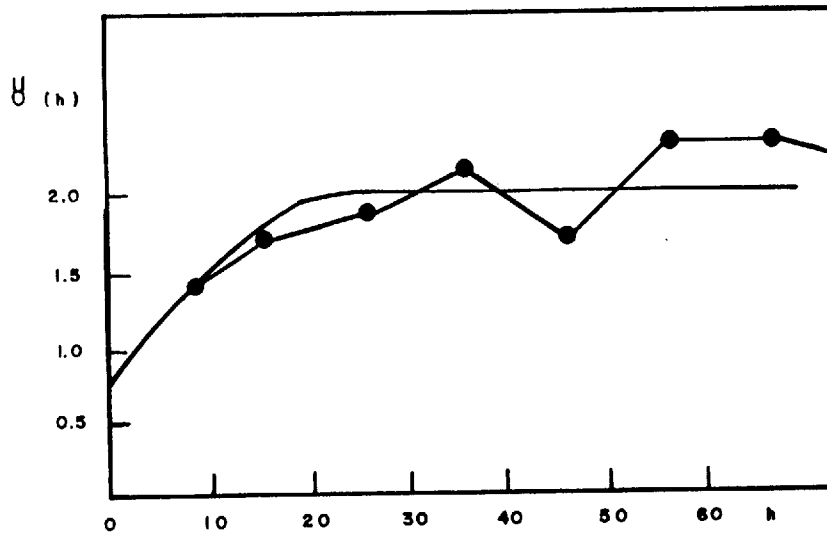


Fig. 7-21: Variogramme des teneurs pondérées

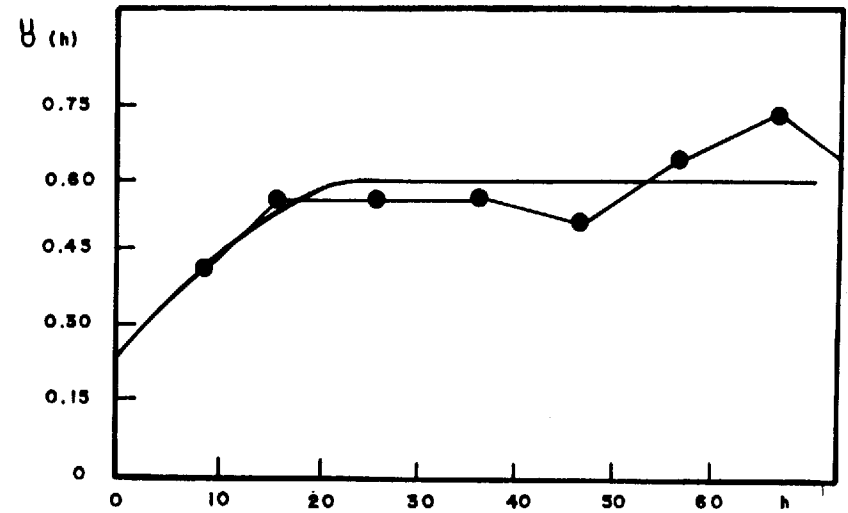


Fig. 7-22: Semi variogramme des épaisseurs

Fig. 7.21-7.22

c) Calcul de la marge d'erreur

La marge d'erreur peut être calculée de manière approximative, ce qui est suffisant pour nos besoins, en utilisant la méthode simple décrite au paragraphe 8.5.2. On trouvera que la marge d'erreur d'un bloc de 10m x 10m estimé par une(1) seule intersection est de 50%. On voit comme corollaire que la précision sur un bloc estimé par méthode polygonale est inexistante, ce qui correspond à l'expérience de la mine. On a vu que l'estimation par krigeage permet des estimés dotés de marges d'erreur relative de l'ordre de 25 à 30%.

B) Classification des réserves

Pour la classification des réserves, on superposera plutôt un plan des marges d'erreurs des blocs krigés (de 10x10M) au plan des sondages. Dans la zone densément forée, on peut choisir de dire que tous les blocs avec une marge d'erreur moindre que 30% seront des blocs prouvés. Dans les zones périphériques, les marges d'erreur s'élèveront jusqu'à 60%. On classera comme probables les blocs avec des marges d'erreur de 30% à 50%. On produit ensuite un contour de ces précisions. Ceci définit les réserves prouvées et probables. Les marges d'erreur de 30% à 50% se rapportent à des blocs de 10m. Ces marges d'erreur diffèrent des marges d'erreur globales. En effet, la marge d'erreur globale calculée pour les réserves prouvées est de 10.9%. A noter que les chiffres de marges d'erreur qui sont utilisés dans ce cas type ne correspondent pas tous à ceux suggérés par le Guide au tableau 7-3.

Pour estimer la précision mensuelle à partir des blocs établis, on s'appuiera sur une procédure simple qui fait appel au nombre de blocs extraits et à leur marge d'erreur. En un mois on mine environ 10 à 20 blocs, la précision mensuelle variera donc entre $50\%/\sqrt{10}$ et $50\%/\sqrt{20}$, soit de 15% à 11.2%. Ceci signifie qu'on peut s'attendre 1 fois sur trois à des écarts de ce type. Dans ce cas-ci, comme dans la plupart, il faut des échantillonnages additionnels pour assurer ce rendement à l'exploitation. Les chapitres 8 et 9 traitent des interactions entre les résultats des estimations, de la sélection minière et du contrôle de production. Les chiffres totaux des réserves sont:

130,980 tonnes prouvées à 4.38 g/t Au;

227,735 tonnes probables à 4.43 g/t Au.

Depuis le calcul de ces réserves, la découverte de la prolongation de la zone 5 a amené les réserves au chiffre total de 955,000 tonnes à 4.52 g/t Au. On a établi, en sus de ces chiffres, 165,000 tonnes de "réserves possibles".

7.8.4 ALLIGATOR RIDGE

Kwa et Mousset-Jones (1986) rapportent des comparaisons entre diverses estimations géostatistiques et les résultats d'exploitation dans la mine à ciel ouvert Alligator Rivage.

Diverses techniques de krigeage ont été utilisées mais les méthodes de krigeage d'indicatrice ont donné les meilleurs résultats selon ces vérifications.

7.9 GUIDES D'APPLICATION

7.9.1 PERSPECTIVES

L'estimation des réserves est difficile car on ne compte plus le nombre de cas où l'on n'a pas retrouvé à l'exploitation la teneur prédite. La géostatistique permet d'évaluer la marge d'erreur que comporte l'estimation des gisements et nous offre des méthodes pour la minimiser. Les méthodes géostatistiques ont pris une large place dans l'estimation des gisements et, en particulier, des gisements d'or. Même si la géostatistique est plus efficace que les méthodes traditionnelles, ce ne sera probablement jamais une technique d'application facile. Son application efficace demande un ensemble de conditions qui ne sont pas toujours présentes dans la pratique courante.

Des procédures améliorées, axées sur les caractéristiques géologiques des gisements, sur les procédés d'échantillonnage et sur une application judicieuse et systématique des méthodes de calcul sont nécessaires. Ces procédures devront être complétées et calibrées par les vérifications que permettent des cas types. Ces démarches nous assureront des estimations plus proches de la réalité, estimations dont les marges d'erreur seront connues explicitement. Plusieurs textes récents font le point sur la place actuelle de la géostatistique dans l'évaluation des gisements d'or. Pour aider à situer l'évolution des pratiques d'estimation des gisements, le Guide résumera deux enquêtes récentes.

7.9.2 LE RÔLE ACTUEL DE LA GÉOSTATISTIQUE

Kwa et Mousset-Jones en 1985⁷², Champigny et Armstrong en 1988⁷³, ont mené des enquêtes qui décrivent, à quelques années d'intervalle, le champ d'application de ces méthodes, ce qui permet de percevoir une évolution certaine, malgré les différences dans les populations échantillonnées. Le symposium 1986 de l'ICM: "Estimation des réserves: Méthodes modèles et réalité", contient plusieurs cas types d'estimation des gisements, qui montrent les avantages et la rentabilité de l'application de la géostatistique pour le contrôle de la qualité de l'exploitation.

7.9.3 PERSPECTIVE SUR LES MÉTHODES UTILISÉES

Kwa et Mousset-Jones ont reçu des réponses de 48 compagnies minières à leur questionnaire. Les types de gisements rapportés allaient des gisements hydrothermaux (61), aux gisements hydrothermaux disséminés (75), volcano-exhalatifs (36), placeriens (34), porphyres (10) et autres (3).

Une série de questions portent sur la réalisation de l'estimation des réserves aux divers stades soit le "target investigative" (stade 4), "target defining", (stade 5-6) et production (stade 10). Pour ces stades, l'estimation des réserves a été faite par des géologues/ingénieurs géologues dans respectivement 49, 36 et 35% des cas, par une équipe multidisciplinaire dans 29, 32 et 38% des cas, par les ingénieurs de la compagnie dans 5, 6 et 13% des cas et par des consultants, ou des consultants assistant le personnel de la compagnie, dans 17, 25 et 11% des cas.

Selon cette étude, pour les trois stades considérés, plus de la moitié des compagnies utilisaient plus d'une méthode: la méthode polygonale étant utilisée par plus de 46% des compagnies, la méthode des sections transversales par 52%, les méthodes géostatistiques par 32% et d'autres méthodes (triangulaires, rapport inverse de la distance, surfaces de tendance et autres) par 32%. Nombre de compagnies utilisent plus d'une méthode. On observe qu'en moyenne moins de méthodes sont utilisées au stade de production, soit 1.41, qu'au stade de la définition (1.78) ou au stade de la confirmation (1.65).

Champigny et Armstrong rapportent les résultats d'une enquête à laquelle ont participé 19 compagnies minières produisant environ 40% de la production mondiale d'or en 1988 dans 96 exploitations distinctes; de plus, ces compagnies détiennent 27 gisements à l'étape de faisabilité et 15 projets aux stades initiaux (stades 4 et 5), qui sont inclus dans l'enquête. Dix-sept des 19 compagnies utilisent, surtout depuis les dix dernières années, les méthodes géostatistiques dans l'estimation des gisements d'or aux divers stades de la mise en valeur et de la production minière.

Ces applications se font en parallèle avec celles de méthodes plus conventionnelles, à l'intérieur d'équipes multidisciplinaires. Ces équipes regroupent des géologues, des ingénieurs et des informaticiens; des géostatisticiens et autres conseillers externes se joignent à ces équipes aux stades de la faisabilité et de l'exploitation.

Les méthodes traditionnelles d'estimation utilisées par les compagnies en parallèle avec les méthodes géostatistiques sont: la méthode polygonale, les coupes transversales et les méthodes de pondération en rapport inverse à la distance. On observe que la géostatistique prend une place plus grande à mesure que les projets avançaient. L'accent demeure cependant sur *l'utilisation concurrente de plusieurs méthodes, comme procédure d'analyse, de filtrage et de vérification des résultats des estimations de tonnage et de teneur des gisements*. Le Guide souligne cette constatation qui paraît d'importance dans la méthodologie d'évaluation des gisements, plus particulièrement pour l'évaluation des volumes. Il n'y a pas cependant de chiffre explicite dans cette étude sur le nombre de méthodes utilisées.

Les méthodes géostatistiques d'évaluation des gisements impliquent le krigeage, mais diverses techniques sont utilisées selon les circonstances. Pour évaluer les réserves en place,

le krigeage ordinaire et le krigeage lognormal sont utilisés. Pour évaluer les réserves récupérables²⁵, l'utilisation du krigeage probabiliste, du krigeage disjonctif et du krigeage multigaussien a débuté. Le krigeage d'indicateur a été utilisé par plus de la moitié des compagnies. Champigny et Armstrong considèrent que la possibilité d'utiliser cette technique avec les logiciels développés pour le krigeage ordinaire contribue à étendre son application.

Le niveau de satisfaction suite à l'utilisation de la géostatistique est assez élevé lorsqu'on compare les estimés avec les résultats de production. Près de 80% des répondants rapportent une bonne correspondance (good agreement) entre les estimés et la production et indiquent leur intention de maintenir l'usage de la géostatistique. Ceux qui ont chiffré l'écart ont fourni des chiffres variant entre 1 et 7-15%.

Le travail de Champigny et Armstrong comporte nombre de graphiques des résultats de l'enquête ainsi qu'une bibliographie "géostatistique" regroupant les publications d'Afrique du Sud et celles du reste du monde minier. Les données recueillies confirment celles de Kwa et Mousset-Jones ainsi que diverses contributions au Symposium de l'ICM de 1986, "Ore Reserve Estimation: Methods, Models and Reality", mais montrent des différences et une évolution. Le Guide suggère que la plus grande importance accordée au travail en équipes multidisciplinaires pourrait être reliée à la plus grande dimension des compagnies participantes, ainsi qu'à une perception accrue des aspects multidisciplinaires des travaux d'évaluation des réserves.

La place de la géostatistique semble avoir augmenté durant cette période, plus particulièrement au stade de l'exploitation. La géostatistique est également utilisée par un grand nombre de compagnies minières impliquées dans l'exploitation de divers minéraux, mais cet aspect dépasse le cadre du Guide.

7.9.4 LES BESOINS FUTURS

Nous avons mentionné, au début de ce chapitre que la géostatistique ne répondait pas encore à tous les besoins, dans tous les cas. Champigny et Armstrong rapportent les problèmes perçus par les utilisateurs ayant participé à leur enquête. Ce sont les suivants:

- l'estimation des gisements d'or montrant une forte hétérogénéité géologique, une géométrie complexe et des distributions de teneurs déformées (skewed);
- l'estimation des réserves recouvrables et des teneurs locales;
- l'estimation des niveaux de confiance globaux;

²⁵ Selon la définition stricte des Commissions de valeurs mobilières, définition qu'endosse le Guide, toute réserve est par définition récupérable!

Méthode d'évaluation

- le développement de méthodes non-paramétriques pour des simulations conditionnelles;
- la prédiction de la variabilité métallurgique et des récupérations métallurgiques.

Tous ces sujets sont traités spécifiquement dans ce Guide, particulièrement l'influence des facteurs géologiques, de la géométrie des gisements, des intervalles de confiance. Le chapitre 9, qui traite des aspects minéralurgiques, abordera la prédiction des variabilités minéralurgiques et des variations du rendement.

La conclusion finale de l'enquête de Champigny et Armstrong converge avec l'orientation du présent Guide et la confirme:

" L'enquête suggère également que la géostatistique gagnera plus de popularité et d'acceptation dans le secteur de l'exploitation de l'or seulement si elle repose sur un usage maximum de l'information géologique et si elle s'appuie sur une collaboration étroite entre géostatisticiens, géologues et ingénieurs."

L'AXE DE L'INGÉNIERIE

CHAPITRE VIII

LES ASPECTS MINIERS

L'AXE DE L'INGÉNIERIE	179
8. LES ASPECTS MINIERS	179
8.1 L'INGÉNIERIE MINIÈRE	180
8.1.1 LES STADES DE L'INGÉNIERIE MINIÈRE	180
8.1.2 GISEMENT > RÉSERVES > EXPLOITATION	180
8.1.3 CRITERES D'INGÉNIERIE	183
8.2 POLITIQUES ET CHOIX D'EXPLOITATION	184
8.2.1 CIEL OUVERT / SOUS-TERRE	185
8.2.2 VOLUME OU SÉLECTIVITÉ	185
8.3 L'EXPLOITATION À CIEL OUVERT	186
8.3.1 DESCRIPTION	186
8.3.2 CONTRÔLE DE LA QUALITÉ	186
8.4 L'EXPLOITATION SOUTERRAINE	187
8.4.1 MÉTHODE PAR CHAMBRES ET PILIERS	187
8.4.2 MÉTHODE LONGS TROUS	190
8.4.3 MÉTHODE DES CHAMBRES-MAGASINS	191
8.4.4 MÉTHODE DES COUPES ET REMBLAIS	194
8.4.5 MÉTHODE AVOCA	195
8.4.6 MÉTHODE DE SOUTIRAGE PAR FOUROYAGE	199
8.4.7 MÉTHODE DES BLOCS FOUROYÉS	201

8.5 CARACTÉRISTIQUES DES MÉTHODES D'EXPLOITATION	201
8.6 CAS TYPES	204
8.6.1 LA MINE SISCOE	204
8.6.2 CAS TYPE: MINE DOYON	204
8.6.3 EQUITY SILVER MINES	205
<u>8.7 GUIDES D'APPLICATION: CONCEPTION</u>	205
8.7.1 GISEMENT ET MÉTHODE	206
8.7.2 GÉOMÉCANIQUE	206
8.7.3 PRÉVISIONS	207
8.7.4 CONDITIONS DE RÉALISATION	207
8.7.5 CONTRÔLE DE LA QUALITÉ	208
8.7.6 COÛTS ET IMPLICATIONS	209
8.7.7 SÉCURITÉ ET ENVIRONNEMENT	211
<u>8.8 GUIDES D'APPLICATION: LE BILAN RÉSERVES</u>	211
8.8.1 LE BILAN MÉTAL DANS L'EXPLOITATION	211
8.8.2 LE BILAN RÉSERVES / RESSOURCES	212

L'AXE DE L'INGÉNIERIE

L'axe de l'ingénierie couvre les aspects miniers et minéralurgiques de l'évaluation des gisements d'or. Les méthodes d'exploitation minière sont analysées en fonction des caractéristiques des gisements et en fonction des caractéristiques techniques et économiques de chaque méthode, en vue d'améliorer le rendement métal et la rentabilité par la réduction de la dilution et des pertes à l'exploitation minière et à l'extraction minéralurgique. L'évaluation minéralurgique des minerais d'or doit d'abord s'appuyer sur l'étude des caractéristiques minéralogiques des minerais; les essais de traitement progressent du laboratoire jusqu'à l'usine pilote et parfois jusqu'aux essais en usine industrielle.

Pour les aspects miniers, une attention particulière est apportée à l'optimisation par une conception et une planification appropriées à l'efficacité désirée, aux besoins de contrôle de la qualité dans l'exploitation minière. Pour les aspects minéralurgiques, les exigences de l'échantillonnage des usines, du bilan du procédé sont soulignées.

Plusieurs aspects de la protection de l'environnement touchent l'axe de l'ingénierie mais débordent le cadre du Guide et ne seront pas traités ici. Hormis les perspectives décrites, l'optimisation des procédés d'exploitation ou de traitement minéralurgique n'entre pas comme telle dans le cadre du Guide d'évaluation des gisements d'or.

8. LES ASPECTS MINIERS

Le Guide traitera du rendement de l'exploitation minière dans une perspective d'évaluation, en fonction du type de gisement et de la méthode d'extraction minière. La figure 8-0 illustre les diverses composantes de l'évaluation des aspects miniers d'un projet.

Il n'entre pas dans les objectifs du Guide de décrire en détail les méthodes d'exploitation minière habituellement utilisées au Canada ou ailleurs dans le monde. Des informations sur ces sujets sont disponibles dans le *Underground Mining Method Handbook* publié par la Society of Mining Engineers de l'American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers (AIME) ⁷⁴ et dans le *Manuel d'exploitation souterraine* publié par CANMET ⁷⁵. Un manuel de l'exploitation à ciel ouvert a également été publié par l'AIME.

8.1 L'INGÉNIERIE MINIÈRE

Les aspects miniers d'un projet s'appuient sur le travail de l'ingénieur des mines et de l'équipe multidisciplinaire qui l'entoure, pour la planification, l'évaluation et le choix de la méthode d'extraction la plus appropriée aux conditions d'un gisement ou d'une zone, dans une exploitation projetée ou en cours. Dans l'évaluation de la qualité du produit et du rendement de l'exploitation, l'approche d'analyse rigoureuse du Guide l'a éloigné de la démarche traditionnelle qui envisage la "dilution" de façon globale, comme l'ensemble des différences à la baisse entre les réserves des gisements et les plans de production, d'une part, et les résultats d'exploitation d'autre part. Cette approche synthétique ne permet pas les analyses des phénomènes qui sont nécessaires, ni n'offre les outils requis pour optimiser les procédures, le rendement et la rentabilité des exploitations.

8.1.1 LES STADES DE L'INGÉNIERIE

L'évaluation des aspects miniers d'un gisement dont on poursuit la mise en valeur en vue d'un développement minier éventuel se produit à des paliers successifs. Au stade 4, une fois le gisement confirmé, se situe une première évaluation de caractère conceptuel, pour orienter le caractère des travaux d'évaluation géologique que l'on envisage dans la phase suivante. A la fin du stade 5 de définition du gisement, une évaluation plus quantitative des aspects miniers sera faite en vue de planifier les prochains travaux. Le stade 6 développera les divers aspects de l'ingénierie minière et minéralurgique du gisement. Les informations techniques ainsi obtenues devront cependant être complétées par les études économiques du stade 7, pour le choix de la teneur de rentabilité, de la teneur marginale et de la teneur de coupure. L'établissement des réserves minières et l'étape finale de faisabilité s'appuieront sur l'ensemble de ces informations. Au stade de la mise en production et de l'exploitation, un niveau additionnel de planification plus détaillée sera requis.

8.1.2 GISEMENT > RÉSERVES > EXPLOITATION

Au chapitre 3, le Guide a adopté l'approche qui considère que le rendement physique global de l'exploitation d'un gisement minéral dépend des **pertes de métal** et de la **dilution** par rapport à un gisement réel mais déterminé de façon imparfaite, comme le démontre la Figure 3-1 (Elbrond, 1986). Il est donc nécessaire de revoir les définitions des facteurs de dilution et de pertes et les diverses facteurs et étapes qui y contribuent, afin de bien situer le rôle des teneurs repères dans les définitions des réserves.

A) Pertes et dilution

Les **pertes de métal** sont définies comme *l'absence dans le produit payé de tout métal présent dans le gisement minéral réel*. Elles se produisent en particulier:

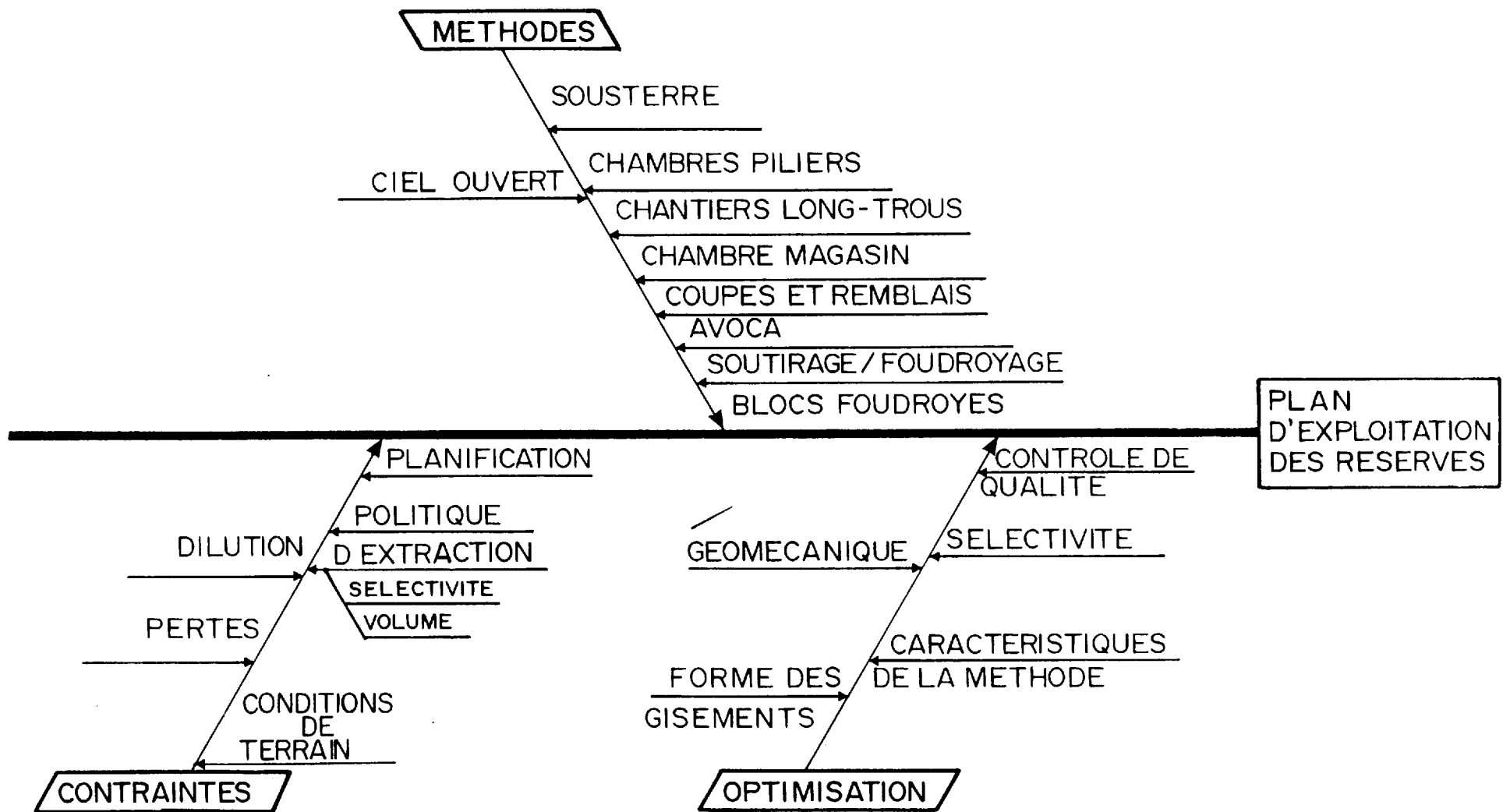


Fig. 8.0

- à l'interprétation géologique et à l'inventaire du gisement:
 - la minéralisation non incluse dans le contour interprété;
- à la conception détaillée de la mine:
 - la minéralisation exclue du chantier planifié, les piliers non-récupérés;
- à l'exploitation:
 - le minerai non extrait par rapport au chantier projeté.

La **dilution** est définie comme *l'ajout au minerai exploité de matériel stérile ou de matériel minéralisé à teneur plus basse que la teneur de coupure*. La dilution se produit en particulier:

- à l'interprétation / à l'inventaire du gisement:
 - la minéralisation sous la teneur coupure qui est incluse à l'intérieur des limites;
- à la conception détaillée de la mine:
 - la minéralisation sous la teneur coupure qui est incluse dans les chantiers projetés;
- à l'exploitation minière:
 - le matériel qui se détache des murs ou du toit pour s'ajouter au minerai cassé.

Il va sans dire qu'il y a certains phénomènes compensatoires d'une étape à l'autre, d'un processus à l'autre. Par exemple, la dilution au stade de l'exploitation pourrait se faire à partir de minéralisations au-dessus de la teneur coupure, déjà considérées comme perdues parce qu'exclues à l'étape de l'interprétation du minerai ou à celle du design du chantier.

B) Teneurs repères

Les pertes et la dilution s'évaluent en fonction des teneurs repères (définies à la section 7.1.3): ce sont la teneur coupure, la teneur de rentabilité et la teneur marginale. Le choix des limites des minéralisation, d'un contour de chantier ou d'excavation se fait à partir d'une **teneur de coupure**. A l'étape de la planification minière, la teneur de coupure sera une **teneur marginale** qui équilibre coûts et revenus. La **teneur de rentabilité** ajoute à la teneur marginale un coût d'opportunité, une marge de profit. Le choix de la marge de profit requise, du coût d'opportunité est en fonction d'une analyse économique élaborée (chap. 10). La planification de la méthode minière et l'établissement de la teneur de coupure sont des opérations reliées aux aspects économiques; ces travaux demandent des itérations répétées pour établir les conditions optimales pour un gisement donné, à un moment donné.

C) Planification et réserves

L'établissement d'un contour de chantier délaissera du minerai et inclura des zones marginales et/ou stériles à la limite ou à l'intérieur de la masse minéralisée. En deuxième étape, les résultats de l'estimation des masses et des teneurs faite à partir du contour de chantier

retenu seront ajustés par un "facteur de dilution" réaliste qui, en principe, doit tenir compte de la dilution mécanique et des pertes à l'exploitation minière proprement dite. Les **réserves de minerai** qui résultent de ces travaux sont **par définition des réserves minières**: le terme réserve implique faisabilité technique et économique et le terme minerai implique rentabilité.

Traditionnellement, un facteur de dilution globale, regroupant les pertes et la dilution, est appliqué. *Ce facteur de dilution globale fait, par définition, partie des réserves de minerai ou réserves minières.*

8.1.3 CRITÈRES D'INGÉNIERIE

Dans la perspective d'évaluation des gisements d'or, le Guide regardera le processus de la conception et de la planification des méthodes minières en fonction de leurs caractéristiques et de leurs coûts et en fonction des relations avec la géologie et la géométrie des gisements. Cette démarche se fait en fonction de l'efficacité globale ²⁶ du processus d'extraction du minerai, d'abord à la mine, ensuite sur l'ensemble de l'exploitation.

La démarche d'analyse du Guide n'exclut pas les méthodes de simulation, d'analyse mathématique poussée qui ont été appliquées à la planification minière. Le Guide considère cependant qu'il est nécessaire que ces méthodes soient appuyées sur une plus grande compréhension des conditions et des interactions qui se rencontrent dans l'évaluation et l'exploitation des gisements. C'est la démarche parallèle à celle de la **qualité totale** (Deming 1982), mais adaptée aux conditions du secteur minier.

A) Conception détaillée et planification

La conception détaillée (design) et la planification sont des opérations itératives qui doivent être menées systématiquement et de façon exhaustive. Il faut, avant de choisir une méthode d'extraction, avoir *intégré et évalué toutes aspects géologiques et d'ingénierie reliés au gisement et évaluer quantitativement toutes les alternatives plausibles*. Trop souvent, on appelle conception et planification un processus qui consiste à considérer diverses alternatives et à ne calculer les paramètres techniques et les coûts que pour celle qui semble la plus avantageuse. Dans le contexte minier, les situations sont toujours complexes. Cette approche trop sommaire ne permet pas d'évaluer tous les paramètres du dossier, d'établir les marges d'erreur des diverses composantes du projet.

L'informatisation des dossiers et la disponibilité de logiciels de traitement appropriés facilitent l'utilisation des ordinateurs pour la conception et la planification des exploitations

26

L'efficacité globale inclut, outre le rendement tonnage, le rendement teneur, donc le rendement métal global de l'exploitation.

minières. Le lecteur intéressé pourra référer aux Comptes-rendus de l'Atelier sur l'application des ordinateurs (CAME 1990) qui décrit 6 cas types d'applications.

Dans un contexte d'ingénierie et de gestion de projet, les étapes de conception et planification sont essentielles à l'optimisation des réalisations. L'expérience des aménagements dans l'ensemble de l'industrie est que les frais de conception constituent 2 à 5% des coûts d'un projet à réaliser, la planification 5 à 8% et la réalisation (incluant la surveillance) de 87 à 93%. Ces chiffres indiquent que des économies importantes sur les frais de conception et de réalisation réduisent peu le coût d'ensemble d'un projet. Par contre, des lacunes à ces stades sont susceptibles de se traduire par des frais additionnels beaucoup plus élevés (que les économies) lors de la réalisation du projet. Pour l'ingénieur ou l'exploitant, se complaire dans de telles économies, c'est être un piètre parieur.

Les enquêtes citées à la section 3.3 (Knoll, 1989 et Clow 1990), témoignent que l'ingénierie qui a précédé certaines décisions de mise en production a été trop sommaire et trop superficielle. Cette lacune, qui est considérée comme l'une des causes des échecs subis par plusieurs mises en production récentes, s'est rencontrée régulièrement dans les projets de développement minéral au Canada, et ailleurs. La période des actions accréditives n'a fait qu'accentuer les effets nocifs. On semble trop souvent oublier, dans la hâte d'arriver à une décision de mise en production, que le contexte de l'étude de faisabilité est celui d'un bilan des acquis (les réserves), en vue de justifier une décision d'investissement dans un projet de caractère industriel (Grace 1986). C'est une différence majeure avec le contexte d'exploration et de développement des stades précédents, caractérisés par l'investissement de capital de risque dans un contexte de développement, de croissance. Le chapitre 11, Faisabilité / Décision revient sur ces questions.

B) Exploitation

Le niveau de précision dans l'établissement de l'ingénierie minière qui est requis par les sociétés minières seniors pour une décision de mise en production n'est pas suffisant, en général, pour les besoins de l'exploitation. Cette nouvelle étape requiert une planification encore plus détaillée des cédules de développement minier et d'exploitation. L'expérience acquise dans une exploitation permettra de raffiner les méthodes et les procédures.

Il faut se rappeler que les décisions de l'exploitation se font dans un contexte économique qui évolue, à l'exclusion de tout changement extérieur dans l'indice des prix, dans les prix des métaux. En effet, la mine en exploitation qui doit rencontrer les paiements des intérêts et le remboursement du capital investi, requiert une teneur de coupure plus haute que la mine "adulte" ou que la mine en extinction dont les frais sont réduits (sect. 10.2.4).

8.2 POLITIQUES ET CHOIX D'EXPLOITATION

L'objectif fondamental d'une exploitation minière est le plus bas coût final à l'unité de métal produit, qui soit compatible avec les contraintes physiques, techniques et légales auxquelles sont (seront) soumis le gisement et l'exploitation envisagée. Les orientations fondamentales se présenteront dès les premières étapes de la planification d'une exploitation.

8.2.1 CIEL OUVERT / SOUS-TERRE

Chaque fois qu'elle est rendue possible par la proximité du gisement par rapport à la surface du sol, l'exploitation à ciel ouvert est préférée à l'exploitation souterraine. L'exploitation à ciel ouvert se fait en carrière, le minerai exploité par tranches horizontales étant le plus souvent transporté par camions, quoique les trains et les bennes sont également utilisées. L'exploitation souterraine se fait à partir de puits ou de galeries à flanc de colline.

Le démarrage d'une exploitation à ciel ouvert requiert des investissements moindres que ceux requis pour la mise en marche d'une exploitation souterraine, lorsqu'un gisement se situe près de la surface du sol. Cependant, la poursuite d'une exploitation à ciel ouvert à plus grande profondeur demande des investissements importants pour les décapages du stérile et du mort terrain et une planification méthodique. En effet, une planification systématique est particulièrement nécessaire lors de la conception du contour d'une excavation à ciel ouvert pour, d'une part, optimiser la récupération métal et minimiser le décapage de mort terrain et de roche stérile, d'autre part.

La productivité/homme est environ 5 fois plus grande dans les exploitations à ciel ouvert que dans les mines souterraines, car il y existe moins de restrictions quant à l'emploi d'équipements de grandes dimensions. Les coûts d'extraction sont inversement proportionnels. Ces coûts réduits permettent, entre autres avantages, d'exploiter à ciel ouvert des gisements à faible teneur qu'il ne serait pas rentable d'exploiter sous terre.

8.2.2 VOLUME OU SÉLECTIVITÉ

Certains gisements de petite dimension n'offrent que peu de choix, tandis que d'autres offrent des alternatives d'exploitation à l'ingénieur des mines, au responsable de l'exploitation. C'est, à un extrême, l'exploitation en vrac (à ciel ouvert ou sous-terre), à teneur coupure relativement basse, peu sélective, moins dispendieuse, moins exigeante en main d'oeuvre et contrôles, qui récupère plus de métal mais risque d'entraîner une dilution plus importante et des frais accrus de traitement. A l'autre extrême, c'est l'exploitation très sélective, dispendieuse, à teneur coupure haute, exigeante quant aux contrôles géologiques et miniers, qui réduira la dilution mais entraînera plus de pertes de métal.

Dans la pratique, les solutions ne sont pas simples. Les coûts plus élevés de la deuxième option entraîneront des teneurs de rentabilité et des teneurs coupures plus élevées qui réduisent le rendement de l'exploitation par rapport au gisement initial et réduisent l'utilisation de la ressource minérale. Il faut donc chercher à optimiser l'exploitation projetée d'un gisement par des choix qui s'établiront lors de la conception et de la planification détaillée. Ces orientations s'axeront sur les paramètres géologiques, telle la courbe cumulative de distribution des teneurs et sur les paramètres économiques (chap. 10).

Les considérations de géomécanique viennent compliquer cette perspective relativement simple. La compétence relative des murs et des toits des gisements, leur forme, leurs dimensions, leur profondeur, compliquent l'image. Le comportement anticipé des murs devient une variable essentielle de la conception et du choix de la méthode d'extraction minière. A un extrême, on trouvera les méthodes de chambres ouvertes, à l'autre les méthodes d'effondrement (caving), les méthodes à chambre remblayées occupant une zone intermédiaire. Le développement de la géomécanique a coïncidé avec le développement des techniques de boulonnages et d'ancrages par câbles. Ces techniques ont permis d'améliorer le comportement mécanique des murs et toits des excavations et de réduire proportionnellement la dilution "mécanique".

8.3 L'EXPLOITATION À CIEL OUVERT

8.3.1 DESCRIPTION

L'exploitation à ciel ouvert se fait habituellement en tranches ou paliers horizontaux. Leur épaisseur se situe autour de 9 à 11 mètres et varie selon les dimensions de l'équipement utilisé et les caractéristiques du gisement. Les murs des fosses sont dotés de "tablettes", à chaque banc ou à tous les deux bancs, et l'inclinaison globale des murs variera selon les caractéristiques géomécaniques du matériel qui les constitue, dans le but d'assurer la stabilité des pentes et la sécurité du personnel. L'angle d'inclinaison influence directement les quantités de matériel stérile à extraire pour dégager le minerai; la pente des murs influence également le coefficient de récupération de la minéralisation en place. Il est donc essentiel que ces paramètres soient établis avec précision au moment des décisions.

8.3.2 CONTRÔLE DE LA QUALITÉ

La méthode d'exploitation à ciel ouvert offre des conditions avantageuses, autant pour l'obtention d'informations additionnelles avant le sautage du minerai, que pour l'ajustement des contours minerai/stérile. Cette méthode offre également des possibilités de sélection/triage après sautage. Ces activités sont toutefois conditionnées par l'échelle du gisement et des structures, par le rythme d'exploitation et par les autres paramètres miniers. Une exploitation

à 25,000 tonnes de minerai par jour ne permet pas autant de sélectivité qu'une exploitation à 1,000 ou 3,000 tonnes par jour.

Les conditions à ciel ouvert sont souvent optimales pour placer des sondages additionnels sur maille plus serrée et pour obtenir de l'information sur maille serrée par l'échantillonnage des forages pour sautage. Pour optimiser la récupération, il faut que le forage et le sautage se fassent en respectant l'attitude, les limites et les dimensions des bandes minéralisées. Les bandes verticales permettent souvent une meilleure sélection et récupération que les bandes inclinées ou que les bandes horizontales. Le cas type de la Mine Doyon en section 8.7 illustre ces conditions.

8.4 L'EXPLOITATION SOUTERRAINE

L'évolution actuelle vise à l'utilisation de méthodes plus mécanisées, de procédures simplifiées. Dans chaque cas, il faut pondérer l'économie de coûts contre la dilution, les pertes, la baisse de teneur et le tonnage accru à traiter à l'usine. Les principales méthodes d'exploitation souterraines suivantes seront analysées:

méthodes à chambres ouvertes

- méthode chambres et piliers,
- méthode des longs trous,

méthodes à chambres remblayées:

- méthode chambres-magasins,
- méthode à déblais et remblais,
- méthode AVOCA,

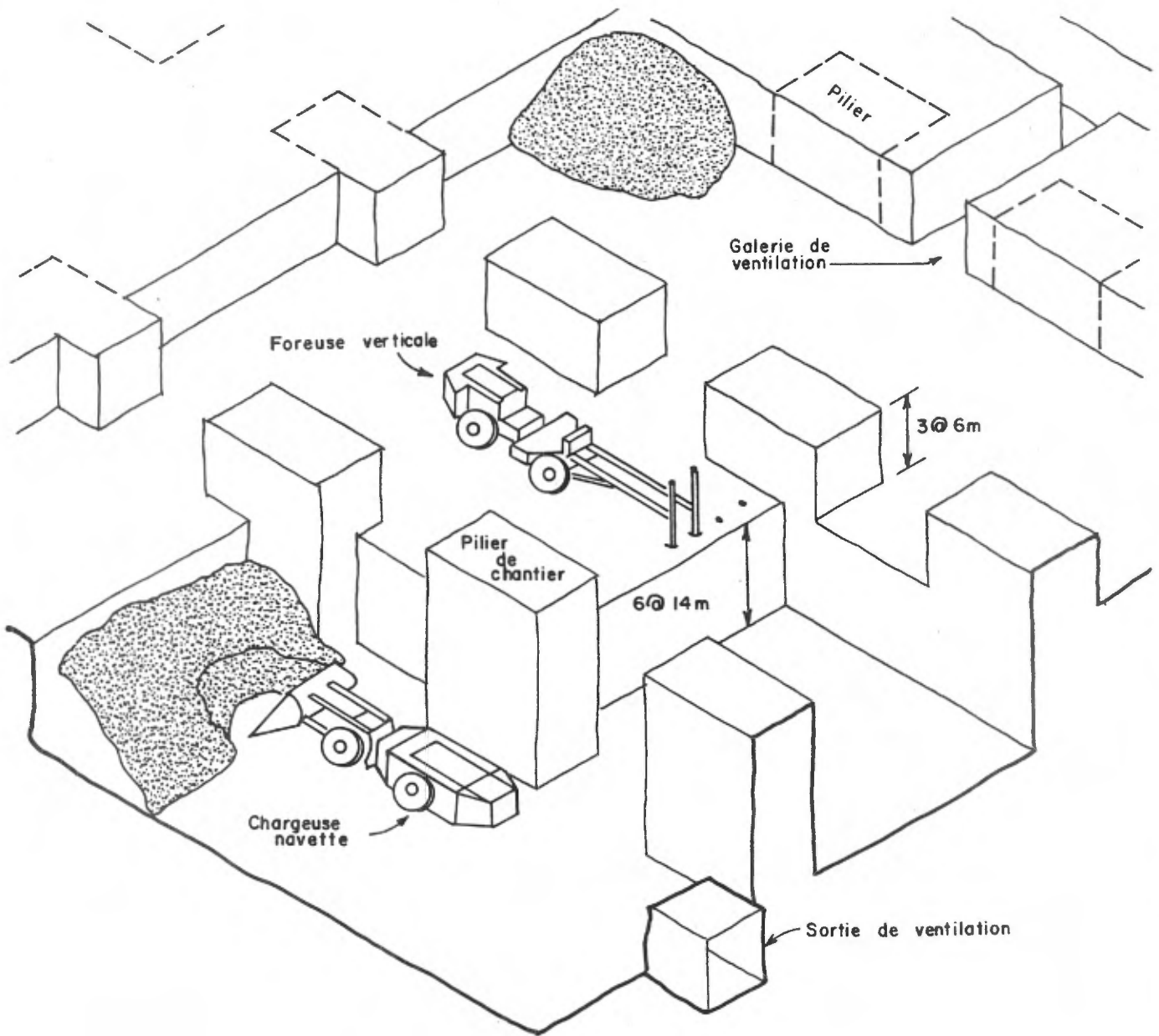
méthodes à effondrement:

- soutirage par foudroyage ou par bloc foudroyé.

8.4.1 MÉTHODE PAR CHAMBRES ET PILIERS

A) Description

Cette méthode consiste à excaver dans le gisement en laissant des piliers de minerai destinés à supporter l'éponte supérieure (Figure 8-1). La dimension du chantier et des piliers variera selon la stabilité de cette éponte, la stabilité du minerai, l'épaisseur du gisement et la pression de la roche. Les piliers sont espacés régulièrement et ils peuvent être ronds, carrés ou encore prendre la forme de murs longitudinaux qui séparent les chantiers. Suivant les cas et suivant que l'on doive maintenir la stabilité des couches ou que l'on prévoit un écrasement graduel, on abandonnera les piliers ou on les récupérera entièrement ou partiellement par défilage. On emploie la méthode de chambres et piliers pour exploiter des gisements à pendages horizontal, faible (en plan incliné), ou jusqu'à 40° par paliers.



PENDAGE MAXIMUM : 12°

Fig. 8.1

**MÉTHODE DE CHAMBRES ET
PILIERS : HORIZONTAL**

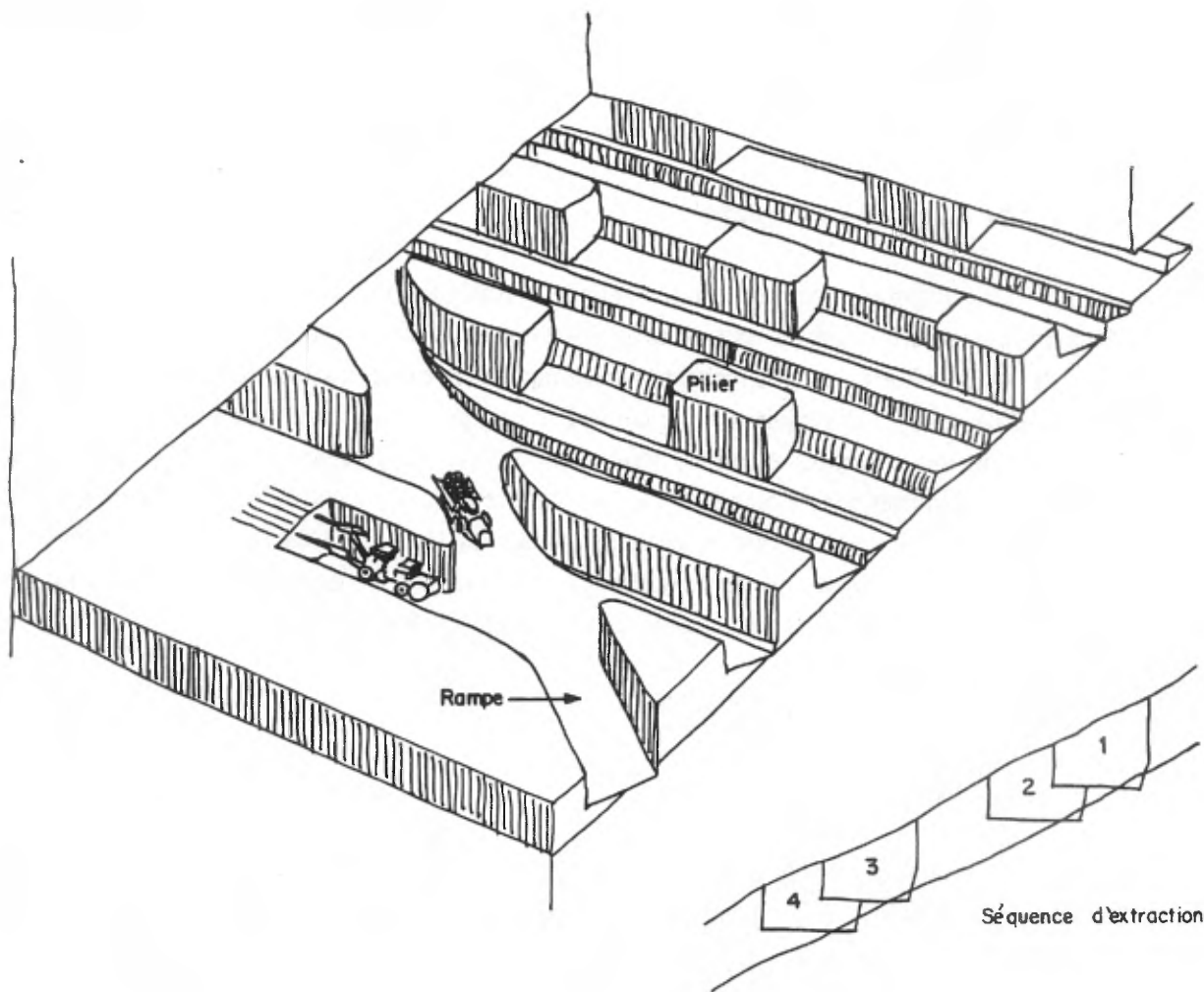


Fig. 8.2

**CHAMBRES ET PILIERS :
INCLINÉES A PALIERS**

L'exploitation horizontale permet d'exploiter des gisements étendus mais d'épaisseur restreinte tels les gisements de potasse de Saskatchewan. On utilise également cette méthode dans l'exploitation de gisements massifs comme les dômes de sel de Mine Seleine ou les gisements de Mine Gaspé, avec des chambres de hauteurs respectives de 20 m et 30m. Cette méthode, avec ses aires ouvertes d'accès facile, favorise l'emploi d'équipement mécanisé.

L'exploitation en plan incliné s'applique aux gisements de pendages faibles à moyens. La mécanisation est plus difficile et limitée aux pendages plus faibles. L'exploitation en paliers remplace de plus en plus souvent l'exploitation en plans inclinés (Figure 8-2), dans les cas où l'inclinaison du gisement est trop forte. Cette approche relativement nouvelle semble très prometteuse par son efficacité.

B) Contrôle de la qualité

La récupération varie selon le contour du minerai. Dans des couches uniformes, la récupération variera selon les exigences géomécaniques pour les dimensions respectives des chambres et des piliers, selon la résistance mécanique de la roche et selon les pressions lithostatiques. Dans ce type d'exploitation, le contrôle de la qualité est limité par les contraintes de la conception des chambres et piliers reliées aux formes du gisement et par les contraintes d'accès aux chambres plus éloignées. Ces contraintes sont importantes dans le cas de grands gisements comme ceux de potasse, ou dans les dômes salifères à cause des contraintes de géomécanique, tandis que plus de flexibilité est permise dans les gisements de plomb-zinc de type Mississippi, ou les gisements massifs comme ceux de Mine Gaspé.

8.4.2 MÉTHODE À LONGS TROUS

A) Description

La méthode à longs trous est généralement utilisée pour l'exploitation de gisements de bonnes dimensions, à fort pendage ($> 50^\circ$), où le minerai et les épontes sont de bonne qualité; en principe, le chantier demeure ouvert après l'extraction d'où le nom anglais: "long hole open stope". Un gisement de faible épaisseur se prête à cette méthode pourvu que son pendage permette le libre écoulement du minerai abattu vers les points de soutirage. L'épaisseur minimum pratique est de l'ordre de 3 mètres mais, avec l'amélioration des équipements de forage, on utilise cette méthode pour extraire des zones tabulaires de 1.75 mètres d'épaisseur, à condition de restreindre la longueur des trous à 15 mètres. Pour que le forage et le sautage du minerai soient possibles, il faut avoir accès au gisement à différents niveaux entre les galeries de soutirage supérieure et inférieure. Le minerai est ainsi abattu vers la zone ouverte et il descend par gravité jusqu'au point de soutirage (Figure 8-3). Lorsque l'utilisation de l'équipement est optimale, une bonne productivité peut être atteinte avec un minimum de main-d'oeuvre. La méthode à longs trous (de petits ou de grands diamètre) est sécuritaire et économique, lorsqu'appliquée de façon appropriée.

B) Contrôle de la qualité

La méthode des chantiers longs trous permet d'augmenter l'information géologique avant d'établir le contour final du chantier. Les coupes horizontales et les monteries d'ouverture permettent de cartographier et d'échantillonner le minerai pour ajuster les contours du chantier. Les forages des longs trous peuvent être échantillonnés en recueillant les rognures; cette procédure est en général utilisée de façon sélective, à toutes les quatre ou cinq rangées (tous les 7 à 8 m.) dans les chantiers de petite dimension. Dans les chantiers de plus grande dimension on tendra à échantillonner surtout la périphérie, pour optimiser les limites.

La méthode des chantiers à longs trous est vulnérable à la dilution, chaque fois que les limites du minerai sont irrégulières ou que la faible compétence des murs entraîne un apport additionnel de matériel. Cette dilution peut être réduite avec des procédures appropriées, en évitant de vider complètement le chantier avant le sautage d'une nouvelle rangée. La méthode des chantiers longs trous est à déconseiller avec des murs incompetents car elle peut s'accompagner de dilution élevée. L'article "Low Cost, High dilution"⁷⁶ décrit des conditions de dilution extrême (100%) qui sont reliées à l'utilisation de cette méthode en présence de murs incompetents constitués de schistes à chlorite.

L'application de la méthode longs trous à des chantiers étroits (jusqu'à 1.75m), entraîne automatiquement une dilution volume de l'ordre de 35 à 45%, à cause de l'effet géométrique (voir la section 7.1.7). Par exemple, pour 1.75m de minerai + 2 x 0.30m de dilution des murs on devra extraire un total de 2.35m: la dilution minimale se chiffre alors à $2.35 / 1.75 = 1.34$ ou 34%. Rappelons la dilution importante et la baisse des teneurs à l'alimentation qui avaient suivi l'adoption de cette méthode à la Mine Arthur White de Dickinson Mines Ltd il y a quelques années, en remplacement des chantiers coupe et remblai.

8.4.3 MÉTHODE DES CHAMBRES-MAGASINS

A) Description

La méthode des chambres- magasins, de même que la méthode des chambres remblayées, reposent sur une technique de remblayage. Dans le cas actuel, l'abattage débute au toit d'une coupe horizontale de la veine ou zone tabulaire. Une partie du minerai abattu est gardée dans le chantier pour servir de plate-forme de travail et pour étayer les murs du chantier pendant l'exploitation vers le haut (Figure 8-4). Comme le minerai augmente en volume après avoir été abattu, il est nécessaire d'en extraire environ le tiers pour permettre la poursuite des travaux. Ce minerai ainsi "emmagasiné", d'où le nom de la méthode, est retiré lorsque l'abattage du minerai dans le chantier est complété.

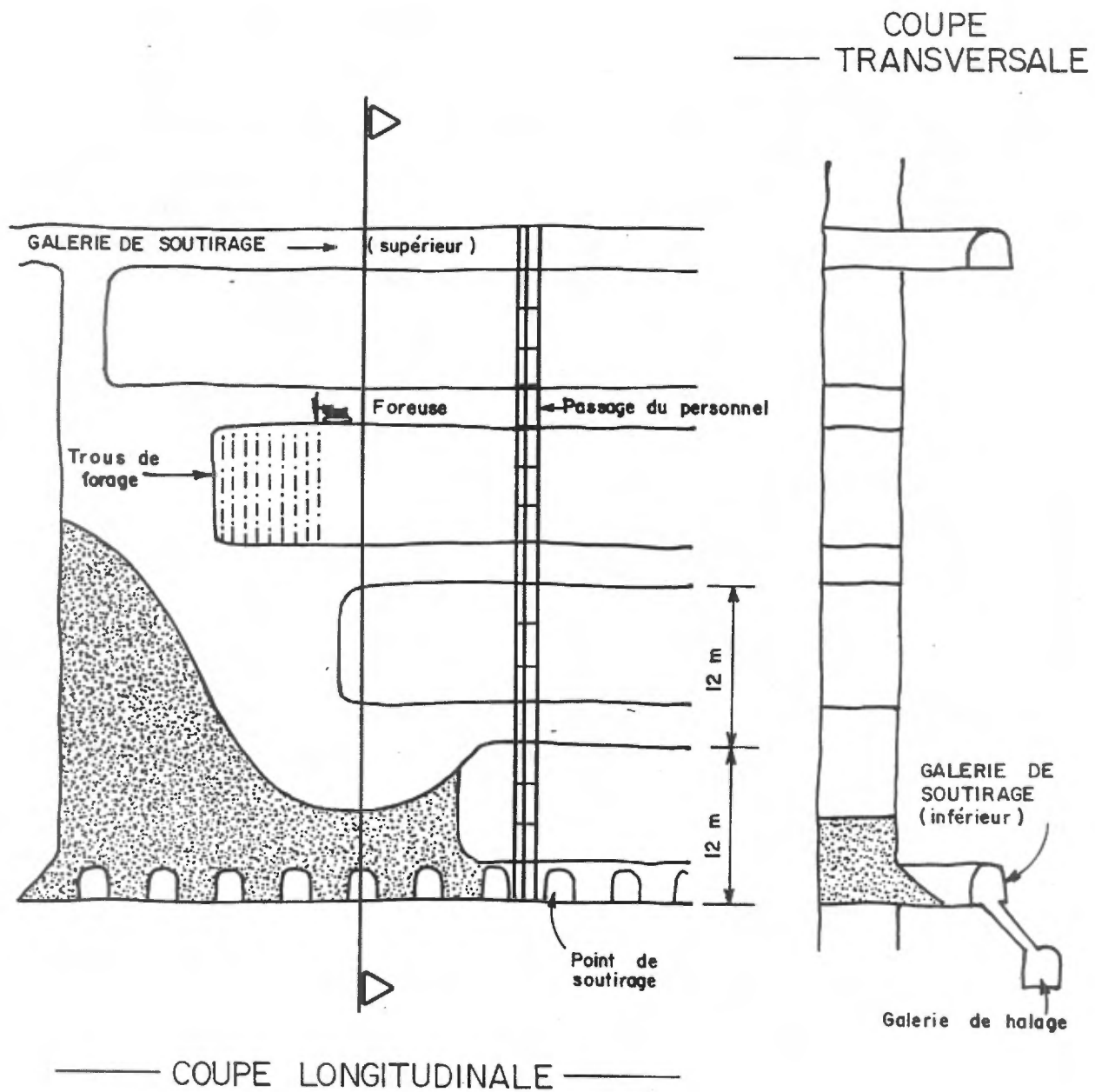
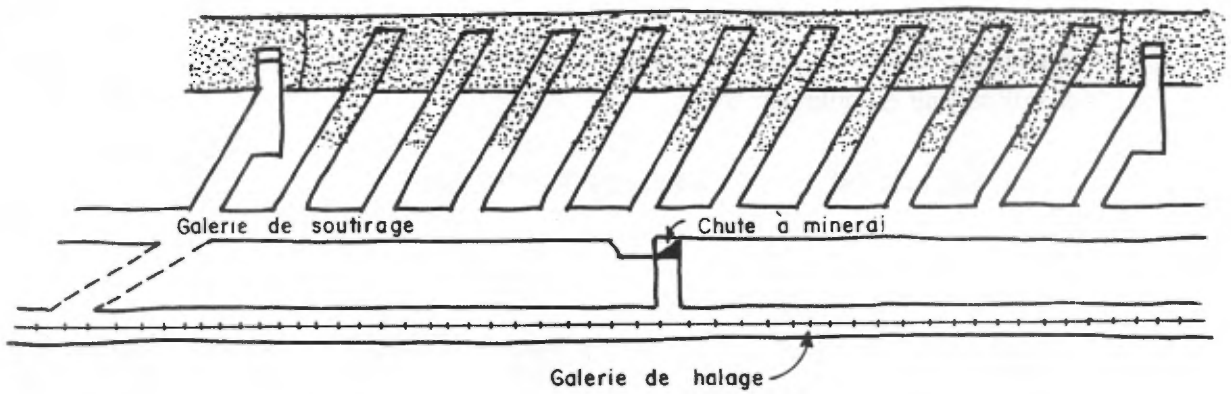
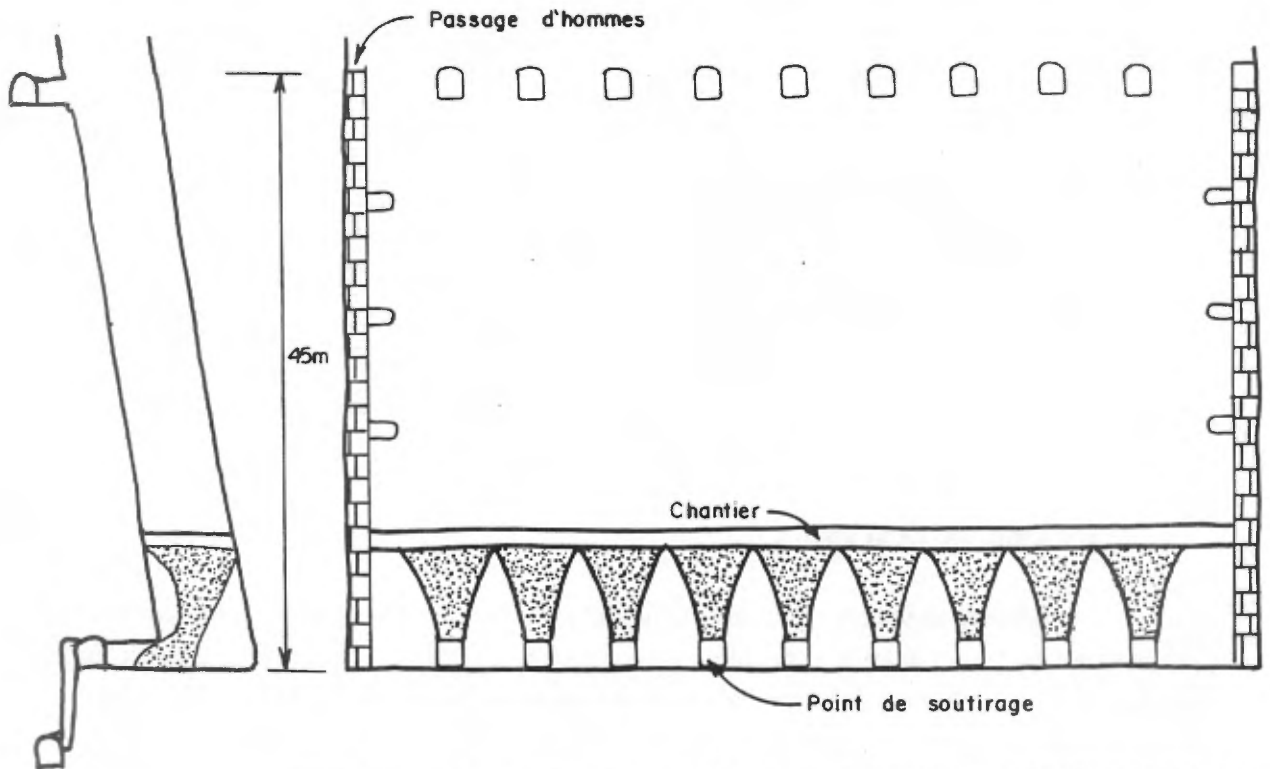


Fig. 8.3

**MÉTHODE DE MINAGE PAR LONGS
TROUS DE PETITS DIAMÈTRES**

COUPE
TRANSVERSALE

COUPE
LONGITUDINALE



PLAN

Fig. 8.4

La méthode chambres-magasins s'utilise pour l'exploitation de gisements présentant les caractéristiques suivantes:

- fort pendage ($> 50^\circ$), épaisseur modérée à faible;
- bonne compétence du minerai;
- stabilité des épontes supérieure et inférieure;
- emmagasinage sans altération du minerai;
- besoin de suivi géologique, murs irréguliers.

Elle constitue une technique d'abattage traditionnelle, laborieuse, qui requiert des frais de main-d'oeuvre importants et qui est d'une productivité limitée. On cherche à la remplacer par des méthodes moins dispendieuses et/ou de productivité plus immédiate comme la méthode à longs trous ou le soutirage par foudroyage. Ces méthodes sont moins adaptées à l'extraction de gisements à murs irréguliers qui requièrent un contrôle exigeant et amènent plus de dilution que la méthode des chambres-magasins.

B) Contrôle de la qualité

La méthode chambres-magasins permet un suivi continu des contours d'un chantier, par observations géologiques et échantillonnages à toutes les coupes horizontales, à partir du début du chantier. Elle est donc particulièrement adaptée à des zones minéralisées de bonne compétence, de largeurs faibles à moyennes dont les murs sont irréguliers et dont les teneurs justifient des frais d'extraction et de contrôle plus importants. Les monteries d'accès sont habituellement situées à l'extrémité des zones, sauf pour les zones très longues; leur valeur d'échantillonnage est donc variable.

8.4.4 MÉTHODE DES COUPES ET REMBLAIS

A) Description

La méthode d'exploitation par coupes et remblais (cut and fill), illustrée en figure 8-5, est très flexible et, par conséquent, facilement adaptable à presque tous les types de gisements.

En général, une tranche de minerai de 2.4 à 3 mètres est abattue du toit du chantier. Au besoin, le toit est ensuite assujéti au moyen de boulons d'ancrage. Puis le minerai abattu est sorti du chantier au moyen de chargeuses-navettes par la galerie de service, ou par une chute à minerai. L'espace vacant de 2.4 à 3.0 mètres est alors remblayé, habituellement au moyen de rejets de l'usine, de graviers ou de stériles de la mine, et le cycle recommence.

Le chantier s'élevant ainsi peu à peu, à tous les 9 mètres d'élévation environ, une nouvelle galerie de service doit être prévue pour l'évacuation du minerai. Les entrées de ces

galeries sont modifiées à chaque cycle d'extraction, telles qu'illustrées dans la Figure 8-6. La masse de minerai abattu étant peu volumineuse, il en découle une productivité réduite à cause des manoeuvres requises, du contrôle constant exigé et du caractère cyclique de l'exploitation. La méthode des coupes et remblais est susceptible de mécanisation pour les gisements d'une certaine largeur.

Cette méthode est efficace dans le cas de gisements verticaux ou sub-verticaux ($> 45^\circ$) qui s'enfoncent très profondément dans le sous-sol, pour répondre aux contraintes géomécaniques. Elle peut aussi être employée pour des gisements moins profonds dont les épontes ont une faible résistance ou des limites très variables et pour un minerai dont la valeur permet l'emploi de cette méthode relativement coûteuse.

B) Contrôle de la qualité

La méthode des coupes et remblais offre les mêmes caractéristiques que la méthode des chambres-magasins quant au contrôle de la qualité lors de l'exploitation. Elle permet un contrôle suivi des limites extérieures de la minéralisation, donc une bonne sélectivité lors de l'extraction. Cette méthode permet donc de réduire les pertes et la dilution.

8.4.5 MÉTHODE AVOCA

A) Description

La méthode AVOCA combine certaines caractéristiques des méthodes d'extraction en chambre ouverte et de coupes et remblais, pour maintenir les murs des chantiers ouverts après l'extraction du minerai. Cette méthode comporte le sautage de rangées de forages placés à partir d'un sous-niveau, le chargement du minerai avec des chargeuses contrôlées à distance et le remblayage du chantier avec de la roche stérile placée à partir du sous-niveau supérieur (Figure 8-7). Cette méthode présente les avantages suivants:

- cycles indépendants de forage, sautage, chargement du minerai, remblayage par du stérile, dans une exploitation en continu;
- la surface des murs/plafonds non supportés est gardée minimale et contrôlée par le remblayage de stérile; ceci élimine le besoin de piliers et contrôle la dilution par les murs;
- l'exploitation peut se poursuivre sur plusieurs sous-niveaux en parallèle si les murs le permettent.

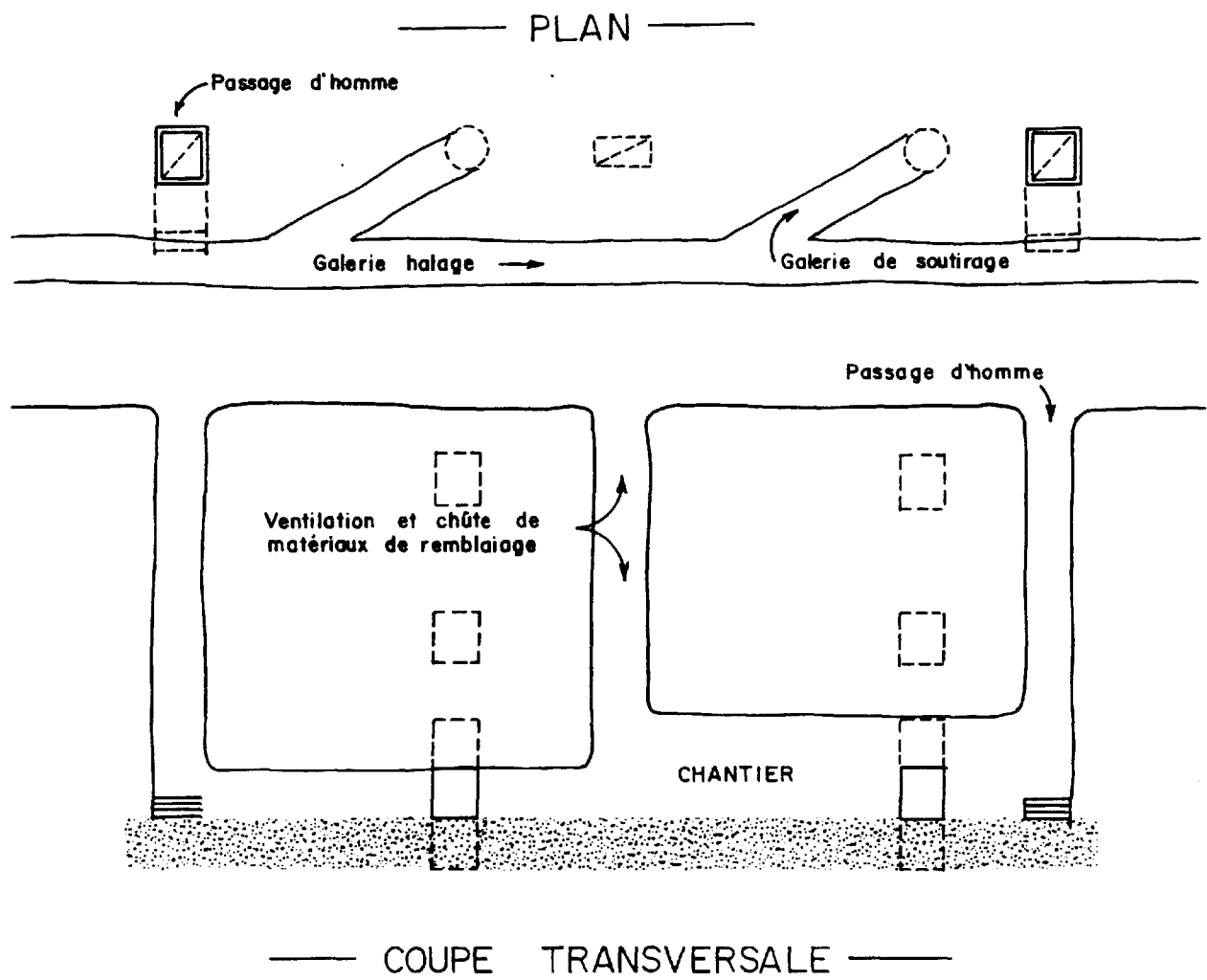
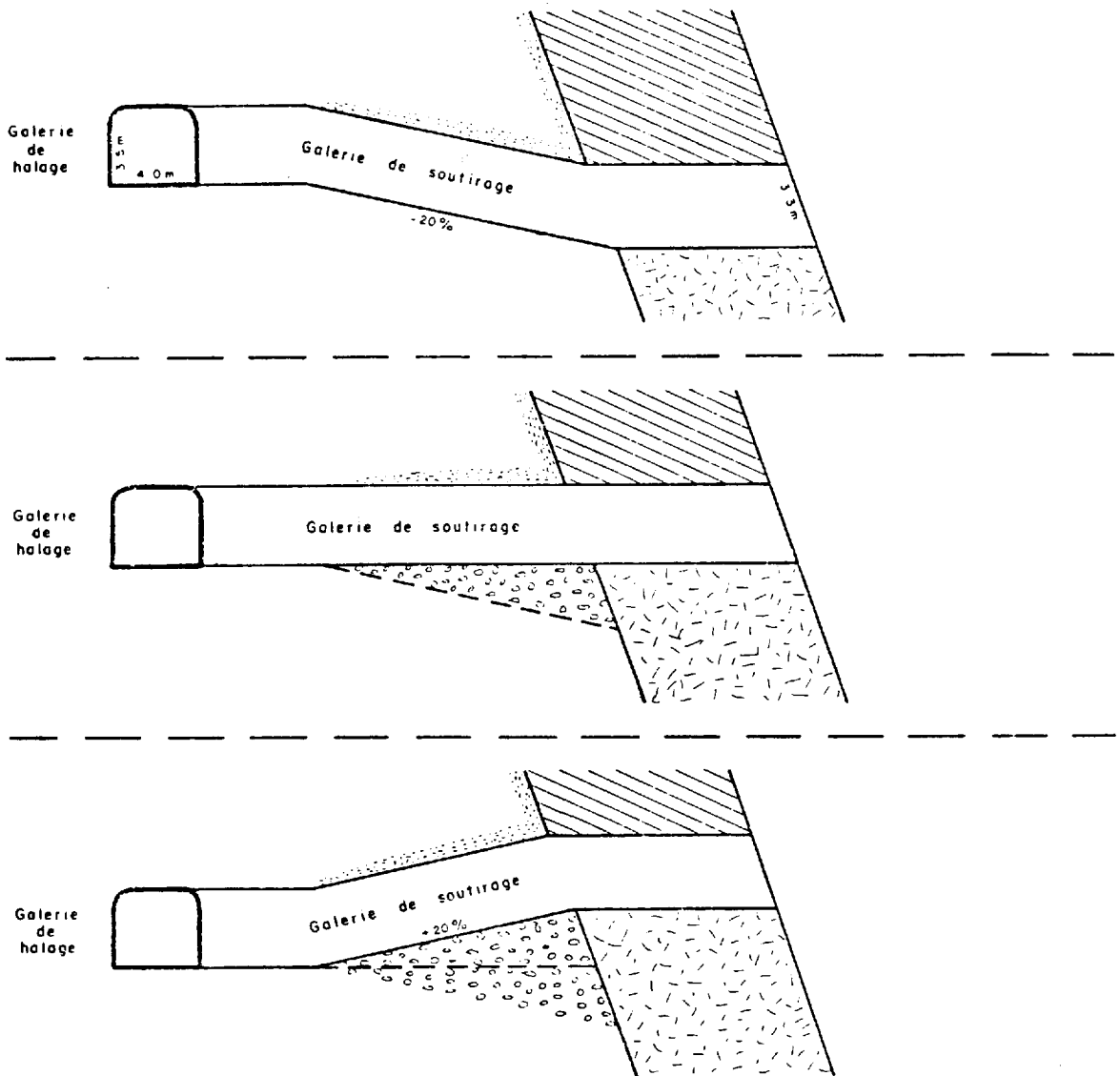


Fig. 8.5

COUPES & REMBLAIS

ECHELLE - 1:250



LÉGENDE





- | | | | |
|---|------------------|---|-------------------|
|  | Zone minéralisée |  | Pierre à remblais |
|  | Zone stérile |  | Sable à remblais |

Fig. 8.6

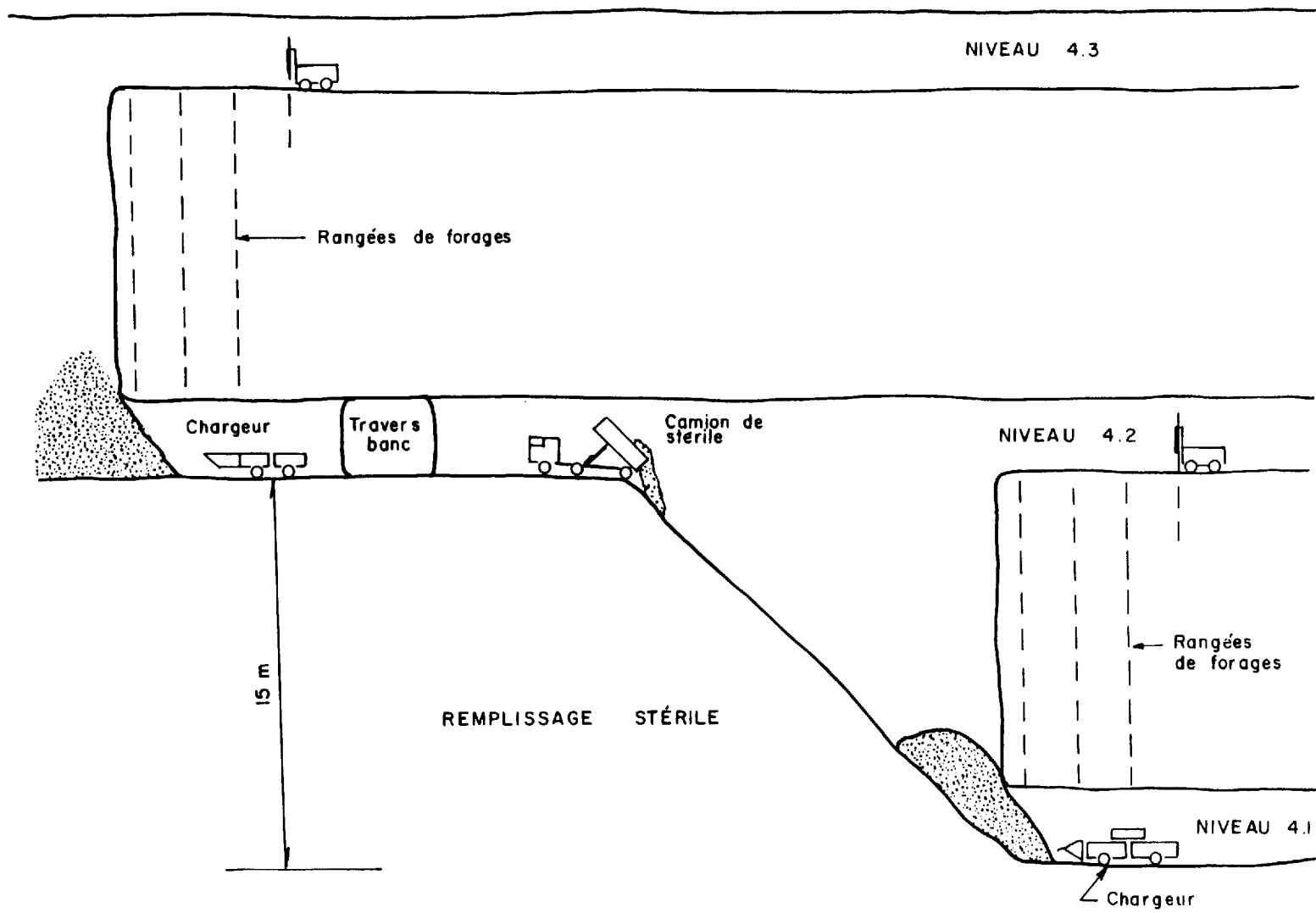


Fig. 8.7

B) Contrôle de la qualité

La méthode AVOCA est vulnérable à la dilution par le stérile utilisé pour le remblayage. L'irrégularité des contacts et le comportement mécanique des murs peuvent également causer de la dilution et des pertes. La méthode permet des sondages de détail par les galeries de halage, ainsi que la cartographie et l'échantillonnage des galeries de développement et des sous-niveaux. Les longs trous peuvent être échantillonnés pour préciser le contour des murs. La méthode AVOCA sera utilisée dans la zone 2 de la mine Doyon à partir du début de 1990: on y prévoit des dilutions (globale) de l'ordre de 15 %. Le maintien d'une telle efficacité demandera beaucoup de contrôle et de suivi.

8.4.6 MÉTHODE DE SOUTIRAGE PAR FOUROYAGE

A) Description

Dans la méthode de soutirage par foudroyage ou méthode des chambres foudroyées (sublevel caving), le gisement est divisé en sous-niveaux espacés de 8 à 15 mètres verticalement, selon le pendage du gisement. A chaque sous-niveau, il y a un réseau de galeries qui traversent tout le gisement. Le minerai situé au-dessus des galeries est perforé en longs trous qui ont la forme d'un éventail (Figure 8-8). Le minerai est soutiré et l'effondrement du mur supérieur referme l'ouverture après le soutirage.

Le soutirage par foudroyage est utilisé pour l'exploitation de gisements à fort pendage dont les murs ne présentent pas assez de compétence pour l'extraction par une méthode de chambre ouverte.

Le soutirage par foudroyage ne convient que dans les cas où les galeries ne nécessitent pas de soutènement. Toutes les étapes de cette méthode se prêtent à la mécanisation, ce qui permet des coûts d'extraction raisonnables.

B) Contrôle de la qualité

La méthode du soutirage par foudroyage ne permet pas d'accès direct au minerai avant l'extraction en général. On peut se servir des galeries d'extraction pour des forages de détail et on peut également échantillonner certaines rangées des forages pour sautages. La dilution et les pertes de minerai sont souvent importantes dans la méthode de soutirage par foudroyage. Par exemple, la Figure 8-8 illustre un cas où l'angle des trous avec l'éponte supérieure n'est pas optimal pour séparer efficacement minerai et stérile. On y observera également la position du stérile.

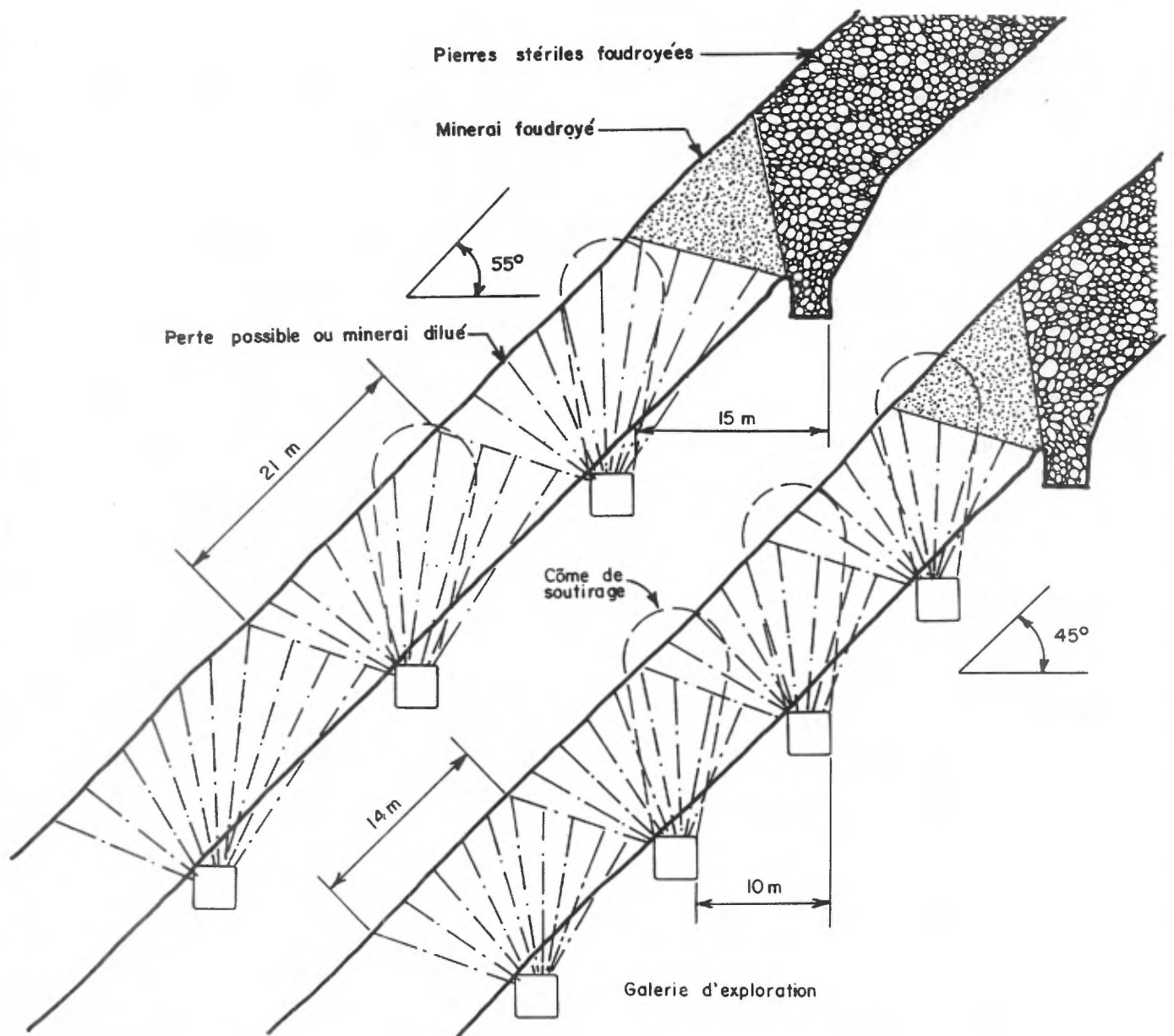


Fig 8.8

**MÉTHODE DE SOUTIRAGE
PAR FOUDROYAGE**

Diverses variantes de la méthode ont été développées pour optimiser le rendement et minimiser l'apport de stérile dans l'alimentation. Les procédures doivent surveiller les conditions du chantier et contrôler la sortie du minerai en évitant de vider le chantier trop vite, pour minimiser la dilution de l'éponte supérieure. Il faut donc prévoir de façon réaliste la récupération et les pertes possibles avec cette méthode.

8.4.7 MÉTHODE DES BLOCS FOUROYÉS

A) Description

La méthode des blocs foudroyés (block caving) est adaptée à de grands gisements de type massif, tels les porphyres cuprifères ou aurifères, lorsque la faible compétence mécanique de la roche rendrait les méthodes plus sélectives trop dispendieuses et trop dangereuses. C'est cette caractéristique de la roche qui permet au minerai, foudroyé à l'aide d'un réseau approprié de forages, de s'écouler dans les ouvertures aménagées au dessus des points de soutirage.

B) Contrôle de la qualité

Le gisement doit être échantillonné au moyen de forages au diamant ou à la percussion et par les galeries de développement et les sous-niveaux. Une fois l'exploitation en cours, la seule information additionnelle provient de l'échantillonnage des points de soutirage. L'effondrement du matériel est planifié et réalisé par le contrôle du soutirage, pour minimiser l'apport de matériel plus pauvre ou stérile des murs. Cependant, on a de fait peu de contrôle sur les résultats, sauf d'arrêter le soutirage quand la teneur devient trop basse. La dilution et les pertes sont en général très fortes par rapport au contour cible foudroyé.

8.5 CARACTÉRISTIQUES DES MÉTHODES D'EXPLOITATION _____

Les tableaux 8-1 et 8-2 présentent un résumé des caractéristiques physiques et de l'efficacité des méthodes d'exploitation décrites dans les sections précédentes, du point de vue du géologue/ingénieur géologue, de l'ingénieur des mines et de l'exploitant.

TABLEAU 8-1
CARACTÉRISTIQUES DES MÉTHODES MINIÈRES

MÉTHODE D'EXPLOITATION	PENDAGE	COMMENTAIRE	COÛT
CHAMBRES ET PILIERS			
Horizontal	0 à 15°	Minerai compétent Éponte compétente Haute mécanisation	Bas
Plan incliné	15 à 40°	Peu de mécanisation	Élevé
Par paliers	15 à 40°	Haute mécanisation	Moyen
LONGS TROUS			
Petits diamètres	> 50o	Épontes compétentes Trous 60-80mm Profondeur 15m	Bas/Moyen
Grands diamètres	> 50°	Trous 170mm Profondeur 50m	Bas/Faible
CHAMBRES-MAGASINS	> 50 °	Minerai compétent Épontes compétentes	Moyen
CHAMBRES ET REMBLAIS	> 45°	Minerai compétent Éponte de compétence moyenne	Elevé
MÉTHODE AVOCA	> 60 °	Minerai compétent Épontes de compétence moindre Haute mécanisation	Moyen
CHAMBRES FOUROYÉES			
	20 à 60°	Éponte compétente Haute mécanisation	Bas
BLOCS FOUROYÉS	> 60°	Minérai et épontes incompétents	Bas

TABLEAU 8-2
EFFICACITÉ DES MÉTHODES MINIÈRES

Méthode	Récupération %	Dilution %	Sélection	Contrôle
CIEL OUVERT	60 à 95%	10-30	Très bonne	Elevé
CHAMBRES ET PILIERS				
Horizontale	35 à 60	5-20	Bonne	Limité
Plan incliné	40 à 70	5-20	Bonne	Limité
Par paliers	50 à 75	5-20	Bonne	Limité
À LONGS TROUS:				
Petits diamètres	80 à 90	20-50	Médiocre	Limité
Grands diamètres	90 à 100	10-40	Médiocre	Faible
CHAMBRES-MAGASINS	80 à 100	5-20	Élevée	Élevé
CHAMBRES ET REMBLAIS	80 à 100	5 à 20	Élevée	Elevé
MÉTHODE AVOCA	70 à 95	10 à 40	Médiocre	Limité
CHAMBRES FOUROYÉES	60 à 80	20 à 50	Médiocre	Faible
BLOCS FOUROYÉS	40 à 80	20 à 50	Basse	Très faible

8.6 CAS TYPES

Les perspectives d'ingénierie minière sont différentes de celles du calcul des masses et des teneurs, même si elles s'appliquent aux mêmes gisements. Pour élargir les perspectives, le Guide reviendra sur quelques cas types déjà présentés; un nouveau cas type sera également discuté sommairement.

8.6.1 LA MINE SISCOE

Le Guide cite, comme exemple de la complexité des situations minières, le cas historique de la mine Siscoe, située près de Val d'Or. Cette exploitation a prolongé ses activités de 1940 à 1949 environ à la suite d'un choix judicieux de méthodes d'exploitation. En effet la direction de la mine a abandonné l'exploitation très sélective de veines aurifères très riches, mais très complexes, au profit d'une exploitation moins sélective, plus productive et moins dispendieuse, qui permettait également de récupérer les veines étroites mais riches qui se situaient dans les épontes des premières.

L'histoire de cette exploitation peut être retracée dans les fichiers des coupures de presse du Northern Miner et dans les fichiers de compagnie, au Ministère de l'Énergie et des Ressources de Québec. Beaucoup d'exploitants se sont réclamés de cet exemple pour s'orienter vers des méthodes d'extraction moins sélectives, mais tous n'ont pas obtenu des résultats équivalents: beaucoup des épontes des veines ou zones ainsi exploitées n'étant pas aussi riches que celles des veines de la mine Siscoe.

8.6.2 CAS TYPE: MINE DOYON

Pour illustrer l'importance des procédures d'acquisition d'information et de contrôle de la qualité à l'exploitation minière, le Guide revient à l'exemple de l'exploitation à ciel ouvert de Mine Doyon, donné au chapitre 8. Les réserves de la fosse y étaient qualifiées de "prouvées", par forages au diamant sur maille de 15 mètres. Cependant, la réalisation de ces prédictions lors de l'exploitation a exigé un échantillonnage plus serré. Sur chaque banc de 10m, on a procédé d'abord au forage de sondages à la percussion inclinés à 45° et de 12 à 15m de longueur, entre les sondages au diamant, pour obtenir une maille de 7.5 m. Les rognures sont récupérées au moyen du cyclone dont est équipée la foreuse pour le contrôle des poussières. Le contour du minerai planifié pour sautages est révisé d'après ces résultats.

L'optimisation de la récupération du minerai ne permet pas d'utiliser la foreuse de calibre 150mm utilisée pour le sautage du stérile, avec maille 4m x 4m. On doit plutôt utiliser pour les forages dans les zones minéralisées une foreuse de calibre 75mm, avec maille 2.3m x 2.3m.

Ces forages sont échantillonnés sur longueurs de 3m et on révisé, s'il y a lieu, les contours du sautage avant la mise à feu, pour optimiser la teneur. C'est au coût de ces mesures que la dilution de 10% attribuée à l'estimation des teneurs des réserves prouvées de cette mine a pu être maintenue à ce niveau dans l'exploitation.

8.6.3 EQUITY SILVER MINES

La section 6. résume un cas type de tests de contrôle de qualité sur les échantillonnages et les analyses des forages de production à Equity Silver Mines Ltd (Giroux, Sinclair et Miller, 1986). Les vérifications décrites ont permis, en corrigeant les biais des échantillonnages et des analyses, d'améliorer la sélection minière et d'augmenter les revenus par un montant estimé à environs 1M\$ par an. Cet exemple souligne l'importance d'un contrôle de qualité approprié des échantillonnages au stade de l'exploitation.

Miller et Giroux, 1986⁷⁷, rapportent le développement d'un modèle géostatistique d'estimation à partir des échantillonnages des forages du gisement Main Zone de Equity Silver Mines Ltd, qui est exploité à ciel ouvert. Une comparaison de ces résultats avec ceux de la méthode polygonale montrent une meilleure correspondance des premiers avec les données de la production. L'accroissement du revenu amené par l'estimation plus précise des limites du minerai avec la géostatistique se chiffre, selon cette étude, à près d'un million de dollars par an.

8.7 GUIDES D'APPLICATION: CONCEPTION

La conception et la planification d'une exploitation minière sont des étapes reliées à l'évaluation géologique des gisements, au calcul des masses et des teneurs et à la minéralurgie. Il va sans dire que l'ingénieur des mines est le principal intervenant mais que l'ensemble du processus requiert l'intervention de l'équipe multidisciplinaire: géologue/ingénieur géologue, géostatisticien, ingénieur spécialiste en géomécanique, ingénieur minéralurgiste, spécialiste de la finance et de l'économie minière.

Le Guide fera la revue des principaux éléments à considérer dans la planification minière, afin d'arriver à la méthode la plus économique pour le projet dans son ensemble, parce que la plus appropriée au cas sous étude. Par exemple, il est peu recommandable d'appliquer une méthode d'extraction demandant un contour fixé à l'avance à un gisement d'une géologie très variable telle des veines irrégulières formant des limites imprécises.

8.7.1 GISEMENT ET MÉTHODE

Au moment de la conception, il faut expliciter les relations suivantes entre le gisement et la méthode d'exploitation:

- la forme et les caractéristiques du gisement;

géométrie et distribution de la minéralisation;

attitude des zones minéralisées: en général des zones verticales peuvent être extraites avec moins de dilution que des zones à plus faible pendage, à compétence égale de la roche. Dans une mine à ciel ouvert, les zones inclinées ou sub-horizontales sont plus difficiles à extraire sans dilution que les zones verticales ou sub-verticales;

épaisseur du gisement: un gisement mince sera plus vulnérable à la dilution mécanique (voir sections 7.1.7);

- les relation chantier/gisement: la corrélation entre le contour "minier" résultant d'une méthode donnée et les contours naturels ou interprétés du gisement influence directement l'efficacité de l'extraction.
- l'échelle de l'exploitation: la dimension de l'unité "triable" sera beaucoup plus grande dans une exploitation à ciel ouvert à 25,000 t/j, que dans une exploitation similaire à 1000 t/j.

8.7.2 GÉOMÉCANIQUE

Les conditions géomécaniques du milieu minier ont des implications directes sur la stabilité des installations minières et par conséquent la sécurité des travailleurs. La géomécanique est donc un élément essentiel de la conception et des plans des exploitations minières, mais l'application de ces connaissances dépasse le cadre du présent travail. Le "Guide de conception des piliers de surface" publié par le Centre de recherches minérales offre les informations nécessaires.

Les piliers planifiés dans une mine ne peuvent faire partie des réserves minières que si des plans d'extraction ont été établis en fonction de toutes les exigences géomécaniques.

8.7.3 PRÉVISIONS

Une fois un plan d'extraction envisagé, il faut établir l'effet des **pertes** et de la **dilution** à l'exploitation lors de la réalisation de ce plan. L'estimé résultant est le facteur de dilution qui sera appliqué au calcul des teneurs et masses du chantier pour arriver à l'estimé des réserves minières. Il va sans dire que cette opération demandera plusieurs étapes itératives et qu'elle exigera la collaboration des géologues/ingénieurs géologues et des géostatisticien avec les ingénieurs des mines, sans oublier les minéralurgistes.

A) Calculs des masses et des teneurs

Les méthodes discutées au chapitre 8 s'appliquent ici. Les teneurs repères sont fournies par l'analyse de l'ingénierie et de l'économique et seront appliquées à l'intérieur des murs des chantiers planifiés. Dans le cheminement préconisé par le Guide, les méthodes géostatistiques utilisent les méthodes de krigeage pour l'estimation des teneurs; les méthodes traditionnelles dépendent de facteurs de correction d'expérience. Ces corrections ainsi appliquées aux estimés des teneurs ne font pas partie de la dilution minière au sens strict.

B) Facteur(s) de dilution

Il est essentiel de calculer la dilution minière avec la teneur appropriée, soit celles des blocs krigés (ou portions) qui sont impliqués, soit celle de la courbe des corrections des teneurs par krigeage. La pratique traditionnelle, qui consiste à calculer la dilution à teneur nulle ajoute une imprécision additionnelle aux résultats des estimations et n'est pas recommandable.

8.7.4 CONDITIONS DE RÉALISATION

Le Guide rappelle que le facteur de correction de "dilution d'exploitation" n'est qu'un **ESTIMÉ**. En effet, les pertes et la dilution lors de l'exploitation, quoiqu'anticipées, ne sont pas fixées ou garanties comme telles. Il faudra donc contrôler, sinon réduire autant les pertes que la dilution lors de l'extraction minière, par un contrôle de qualité efficace pour ne pas dépasser l'ESTIMÉ de "dilution d'exploitation" utilisé pour un chantier ou une méthode donnée. Pour ce faire, il faut analyser les conditions prévisibles à l'exploitation minière. Les possibilités d'erreurs de réalisation se situeraient par exemple:

- dans la délimitation des murs: les imprécisions et les erreurs dans la réalisation du plan de forage et de sautage introduisent des pertes et des dilutions non prévues;
- dans l'écroulement des murs des chantiers après l'abattage;
- dans les lacunes des échantillonnages et autres procédures de contrôle;
- dans l'acheminement du minerai et du stérile après sautage.

Les méthodes géostatistiques peuvent contribuer à l'efficacité de toutes les étapes des estimés et à l'efficacité de la réalisation (section 7-6 et David, 1988 et 1989).

8.7.5 CONTRÔLE DE LA QUALITÉ

C'est la responsabilité du géologue/ingénieur géologue dans l'exploitation minière de veiller à la qualité du matériel extrait, au suivi du plan d'extraction du minerai. Cette action doit, pour être efficace, être planifiée au moment de la conception et de la planification minière. La démarche même d'établissement du "facteur de dilution" exige de voir les possibilités de contrôle des teneurs: quelles mesures peuvent ou doivent être prises pour minimiser l'importance des pertes et de la dilution lors de l'exploitation dans chacune des méthodes envisagées? Citons par exemple les facteurs suivants:

- possibilité d'obtenir des informations additionnelles avant le sautage et d'ajuster les contours du minerai, du chantier:
 - par des sondages de détail avant la délimitation finale du chantier;
 - par échantillonnages des forages de sautage ou d'autres échantillonnages durant l'exploitation qui permettent des ajustements aux contours du minerai avant sautage²⁷;
 - par l'utilisation des techniques géostatistiques pour l'évaluation des résultats des échantillonnages;
- possibilité de contrôle par échantillonnages des points de soutirage:
 - l'échantillonnage des points de soutirage est une mesure de contrôle a posteriori qui permet tout au plus de juger si le matériel soutiré témoigne d'une dilution imprévue;
 - l'échantillonnage des godets ou des camions est sujet aux mêmes limitations.
- possibilité de réacheminements du matériel après l'abattage, particulièrement à ciel ouvert.

Le contrôle de la qualité demande la collaboration de toute l'équipe technique, particulièrement du personnel de production. La direction doit transmettre le message explicite que le **contrôle de la qualité est une fonction essentielle, non un ennui qu'il faut tolérer en le minimisant**. Il faut souligner que les systèmes traditionnels de bonus à la production placent une prime sur la quantité, non la qualité et rendent d'autant plus difficile la collaboration des mineurs aux mesures de contrôle de la qualité.

27

La méthode chambres magasins, la méthode coupes et remblais et l'extraction à ciel ouvert permettent de suivre et modifier les contours de la minéralisation, tandis que la méthode long-trous permet peu ou pas de sélectivité durant l'exploitation.

8.7.6 COÛTS ET IMPLICATIONS

L'étude des coûts des méthodes alternatives d'exploitation doit se faire de façon systématique, pour permettre des comparaisons objectives de ces alternatives. Le lecteur trouvera des exemples d'estimation de caractère préliminaire, tels qu'ils sont requis à la fin du stade 5, dans le Guide commandité par CANMET, intitulé "Underground Metal Mining". Les estimés requis au stade de la faisabilité DOIVENT être de caractère plus détaillé que les exemples de ce texte et s'appliquer spécifiquement au gisement, au chantier sous étude. Le Guide rappelle encore que l'on doit calculer toutes les alternatives, non seulement la préférée ou la plus plausible. Nombre de compagnies minières et de consultants ont développé des formules et des logiciels appropriés à ces études. Le tableau 8-3 donne un exemple type de formule d'évaluation de chantier dans une mine établie.

A cette dernière étape de planification, il faut poser clairement les questions suivantes:

- coûts comparatifs: comment se comparent les coûts d'exploitation des méthodes alternatives qui sont d'intérêt ? Quelles sont les interactions des choix de méthodes avec les teneurs de rentabilité et les teneurs de coupure ?
- implications: quelles seront les implications du choix retenu sur la cédule de développement, sur la cédule et le rythme d'exploitation, sur la teneur et les caractéristiques du minerai fourni à l'usine sur le coût du gramme ou du kilogramme de métal produit, sur la rentabilité globale de l'exploitation?
- productivité: quelle est la probabilité que les prédictions de productivité de la méthode planifiée soient réalisées? Quelles sont les embûches et les difficultés prévisibles, les difficultés de mise en marche que l'on peut anticiper, dans la mine, dans l'usine, en relation avec l'environnement, etc (Knoll 1989, Clow, 1990)

La méthode d'extraction qui montre le coût par tonne extraite le plus bas à la mine n'est pas nécessairement celle qui offre le plus bas coût par kilogramme de métal ou par once d'or. Un tel choix n'est pas automatiquement le plus rentable pour l'exploitation dans son ensemble, compte tenu des implications de l'extraction minière sur le rendement de l'usine minéralurgique ou la qualité du produit final, par exemple.

TABLEAU 8-3
ÉVALUATION DE CHANTIER

Mine: _____	Chantier: _____	Date: _____
Réserve: _____ tonnes @ _____ g/t Au _____ g/t Ag, _____ % Cu;		
Dilution minière: _____ % @ _____		
1) Valeurs Applicables: _____ g/t Au @ _____ =		
_____ g/t Ag @ _____ =		
_____ % Cu @ _____ =		
VALEUR / TONNE:		= _____ \$/t
<hr/>		
3) Développements	Galerie: _____ @ _____ = _____ \$	
	Gal. s. niv. _____ @ _____ = _____ \$	
	Monterie conv. _____ @ _____ = _____ \$	
	Monterie l.t. _____ @ _____ = _____ \$	
	Parement _____ @ _____ = _____ \$	
	Autres _____ = _____ \$	
COÛTS DES DÉVELOPPEMENTS:		Sous/total _____ \$
		_____ \$/t
<hr/>		
3) Extraction minière		
	\$ _____ x T _____ Chambre-magasin = _____ \$	
	\$ _____ x T _____ Sous-niveau = _____ \$	
	\$ _____ x T _____ Longs trous = _____ \$	
	\$ _____ x T _____ = _____ \$	
COÛTS D'EXTRACTION		Sous-Total _____ \$ _____ \$/t
<hr/>		
4) Frais généraux de la mine:		
	Services s/terre: _____ \$/t	
	Services mec./élect: _____ \$/t	
	Concentrateur _____ \$/t	
	Forage exploration _____ \$/t	Sous-total _____ \$/t
<hr/>		
5) PPOFIT (PERTE) A LA MINE \$/t = 1 - [2 + 3 + 4] ==		_____ \$/t
<hr/>		
6) FRAIS GÉNÉRAUX D'EXPLOITATION		
	Services sous-terre _____ \$/t	
	Services méc./élect. _____	
	Administration _____	Sous-total _____ \$/t
<hr/>		
7) PROFIT (PERTE) D'EXPLOITATION \$/t = 5 - 6		_____ \$/Tt
<hr/>		
Par: _____	Date: _____	Approuvé: _____ par _____

- précision: les estimés établis par ces études sont-ils d'une précision suffisante pour l'objectif d'investissement rentable dans un projet industriel ?
- opportunité: les études et la planification sont-elles appropriées et suffisantes pour assurer le développement de la mine et les objectifs initiaux de production, pour rencontrer les cédules de planification de production et de planification financière, et les paiement des intérêts, le remboursement des emprunts (Knoll, 1989, Clow 1990).

8.7.7 SÉCURITÉ ET ENVIRONNEMENT

Quel que soit le type d'exploitation envisagé, les aspects de sécurité et d'environnement doivent être parties intégrantes du processus de conception et de planification. Pour tous les types d'exploitation, il faut prévoir tous les effets sur l'environnement et les contaminations possibles par des effluents provenant des aires de stockage des stériles et des rejets. Il faut également prévoir la réhabilitation, le réaménagement des sites utilisés, avec les coûts afférents. Ces données sont nécessaires, d'abord aux études d'impact exigées par les lois et règlements, mais également à la gestion rationnelle de l'exploitation envisagée.

8.8 GUIDES D'APPLICATION: LE BILAN RÉSERVES

Trop peu d'entreprises minières procèdent à une comptabilisation rigoureuse des résultats des exploitations. Le Guide propose ici des procédures de bilan visant à mieux expliciter les interrelations entre les techniques d'évaluation des gisements d'or, les résultats de l'extraction minière et ceux de l'usine.

8.8.1 LE BILAN MÉTAL DANS L'EXPLOITATION

Le systématisme doit englober toutes les étapes de la comptabilisation des tonnes et du métal d'intérêt dans l'opération minière, autant dans les réserves que dans l'extraction minière et dans l'usinage. Le Guide propose que la présentation des réserves et des inventaires des gisements délimités comporte une procédure de Bilan systématique des masses et du métal contenu.

Cette méthode du bilan systématique est courante dans les pratiques comptables. Dans l'industrie minière, les minéralurgistes en font autant, dans une perspective de contrôle et d'amélioration de l'efficacité des procédés d'extraction. Par contre, à la géologie et dans la mine, les bilans sont plus difficiles et surtout plus rares, malgré diverses suggestions et recommandations, telle celle de Heath, 1981⁷⁸.

8.8.2 LE BILAN RÉSERVES / RESSOURCES

Le Guide propose d'appliquer à la présentation des réserves une procédure de Bilan qui s'appuie sur une explication, (une réconciliation en terme comptable), des causes des différences observées entre les estimés de l'année précédente, les résultats de la production, et les nouveaux estimés.

Il s'agit de présenter les estimés des réserves et des ressources délimitées sous forme d'une série de tableaux synoptiques et analytiques qui visent à résumer, comparer et présenter l'évolution des réserves et des ressources délimitées d'une mine. Cette évaluation s'appuiera, d'une part, sur les résultats de l'exploitation minière, d'autre part sur l'évolution des estimés des réserves suite, aux nouvelles informations géologiques acquises et à l'évolution des facteurs d'ingénierie et des facteurs économiques. La procédure recommandée a été développée et appliqué dans les exploitations minières du groupe SOQUEM entre 1974 et 1986. Les exemples aux tableaux 8-4 à 8-6 proviennent de l'exploitation de la Société Minière Louvem dans le canton Louvicourt en 1974-75.

Le lecteur qui désire consulter d'autres cas-types pourra référer à l'article très élaboré de Taylor 1966⁷⁹ qui rapporte les résultats d'une enquête poursuivie sur une période assez prolongée et appuyée sur une connaissance approfondie de l'opération sous étude.

Dans les projets de développement minéral, les mêmes principes s'appliqueront, mais avec beaucoup moins de détails et aucune donnée de production, évidemment. Le but du système élaboré que le Guide propose est d'assurer que toute l'information pertinente accumulée durant le développement d'un gisement et dans l'exploitation soit explicitée de façon à pouvoir mieux servir. L'application de ce système requiert des compilations et bilans qui couvrent les thèmes suivants.

- 1- état global des réserves au début de la période: (8-4);
- 2- bilan global des gisements et zones: après l'exploitation, des gains et pertes à l'exploitation, dans les travaux de géologie et d'ingénierie et selon les conditions économiques (8-5);
- 3- bilan des catégories: tableaux synoptiques des mouvements entre catégories, incluant l'exploitation, les découvertes et les pertes (8-6);
- 4- bilans détaillés des zones: des tableaux additionnels devraient être ajoutés pour montrer les transactions et la situation résultante dans chaque lentille ou chantier.

L'expérience, durant près de dix ans, à l'application d'un tel système de bilans montre qu'il peut contribuer beaucoup pour identifier les méthodes, les paramètres et améliorer les résultats du travail d'évaluation des gisements.

Trop souvent, dans l'aléatoire des conditions géologiques, on se préoccupe peu des raisons d'une large marge d'erreur dans l'évaluation, surtout quand des résultats favorables ailleurs compensent ces pertes. Trop souvent également, on néglige de chercher les causes des différences observées entre les résultats des estimations des réserves et les résultats de l'usinage, afin de prendre les mesures nécessaires pour résorber ces différences.

SOCIÉTÉ MINIÈRE LOUDEM — DIVISION LOUDEM
RÉSERVES DE MINÉRAI DISPONIBLES AU 1^{er} AVRIL 1976
RÉSERVES TOTALES

	TONNES	Cu	Zn	Ag	Au	G
I- a) Minéral prouvé (dilué à 15%)						
Zone 4-0 (500 et +)	98,900	0.19	9.65	1.26	0.083	3.60
Zone 4-1 (500 et +)	54,700	0.07	8.86	0.67	0.046	3.20
Zone 41-0 cassé disp.	73,700	0.30	11.11	0.94	0.131	3.65
Zone 42 (500 et +)	31,000	0.14	4.1	0.60	0.040	2.95
Zone 4 Surface à -500	258,300	0.19	9.23	0.96	0.084	3.45
Zone 40 (500 au 800)	22,400	0.43	8.67	2.11	0.252	3.27
Zone 41 (500 au 535) pilier temporaire	75,200	0.52	13.00	1.76	0.055	3.72
(535 au 800)	150,900	0.45	7.00	1.10	0.032	3.34
Zone 4 sous le 500	248,500	0.47	8.97	1.39	0.06	3.45
Zone 3 (500 au 1050)	293,000	0.26	5.36	0.81	0.01	3.75
Zone 3 et 4 sous 500	541,500	0.36	7.01	1.08	0.032	3.61
Sous total	799,800	0.30	7.73	1.04	0.049	3.56
II- b) Minéral probable (dilué à 15%)						
Aurécote 32 (850 - 1150)	103,500	0.19	7.31	0.85	0.043	3.70
Zone 36 (surface - 500)	354,700	0.08	5.18	0.97	0.017	3.70
Zone 37	150,000	0.18	5.36	0.66	0.017	3.60
Autres zones (60+50 à 65+00)	242,900	0.22	5.32	1.02	0.035	3.56
Zone 3	851,100	0.15	5.51	0.92	0.03	3.64
Zone 43 et 44 (surface à 500)	59,500	0.09	2.71	1.82	0.063	3.15
Zone 4-1 sous le 800	5,700	0.04	4.77	0.33	0.018	2.88
Zone 43 sous le 500	4,000	0.78	9.71	1.11	0.25	3.49
Zone 4 sous le 500	69,200	0.13	3.28	1.66	0.07	3.15
Zone 5	220,000	0.15	5.00	0.75	0.02	2.95
Sous total	1,140,300	0.15	5.28	0.93	0.027	3.48
Total de I et II	1,940,100	0.21	6.29	0.97	0.036	3.51
III- c) Minéral semi-probable						
Zone 5 et satellites	130,000	0.10	8.00	0.50	0.02	3.50
Zone 3	250,000	0.10	9.00	0.50	0.02	3.50
Sous total	380,000	0.10	8.66	0.50	0.02	3.50
GRAND TOTAL	2,320,100	0.19	6.68	0.90	0.033	3.35

SOCIÉTÉ MINIÈRE LOUDEM — DIVISION LOUDEM
TOTAL DU MINÉRAI ET DES MINÉRALISATIONS PAR ZONE

	M I N É R A I			MINÉRALISATIONS (4)
	TOTAL MINE AU 31/03/76	EN PLACE (3)		
		RESERVE MINIÈRE 01/04/76	PILERS ET BLOCS NON RECOUVRABLES	
Zones 1 et 2 +500	648,000	nul		
Zones 1 et 2 -500 +950	2.04, <u>123,000</u>	nul		
Zone 3	1.7 (7) <u>298,600</u>	<u>34,700 - 1.3 M lb Zn</u>		
Sous total cuivre	2.0, <u>1,069,000</u>	<u>1.89% Cu, _____</u>		
Zone 3	1.94, <u>1,394,000</u>	<u>1,394,000 - 169.6 M lb Zn</u>		
Zone 4	<u>189,635 x 51.2 M lb Zn</u>	<u>0.16, 6.10, 0.82, 0.02, 3.64</u>		
Zone 5	<u>13.5% Zn, 1.40, 0.05, _____</u>	<u>576,000 - 96.8 M lb Zn</u>		
Total zinc	<u>350,000 - 42.8 M lb Zn</u>	<u>0.13, 6.11, 0.66, 0.02, 3.15</u>		
	<u>189,635 - 51.2 M lb Zn</u>	<u>2,320,000 - 310.0 M lb Zn = \$24.45</u>		
	<u>13.5% Zn, _____</u>	<u>0.19, 6.68, 0.90, 0.033, 3.35</u>		

1) Tonnes - lb Zn - (Valeur (2))
 % Cu, % Zn, on/T Ag, on/T Au, Densité

2) Valeur estimée selon valeur décembre 1975:
 Zn = 3.00%
 Au = 140. x 78% = \$109.20/onçe
 Ag = 4.5 x 20% = \$ 0.90/onçe

3) Volume géologique incluant piliers transversaux longitudinaux,
 etc., piliers non recouvrables et autres.

4) Sous teneur coupeur de \$13/tonne (décembre 1975).

SOCIÉTÉ MINIÈRE LOUVEM — DIVISION MANITOU

BILAN PAR CATÉGORIE AU 01 / 04 / 76

MINÉRAI DE ZINC	RESERVES AU 01/12/75	MINE 01/02/75 à 31/03/76	RECONCILIATION Quantité - Teneur	RESERVES AU 01/01/76	REMARQUES
I - PROUVE 15% dilution	294,200 61.2 M lb Zn	57,078 12.3 M lb Zn		799,800 123.6 M lb Zn	Pertes au détail
SEMI-PROUVE 15% dilution	586,500 76.8 M lb Zn				
	880,700 141.2 M lb Zn	57,078 12.3 M lb Zn		799,800	Pertes au détail
II - PROBABLE (non dilué) Dilué à 15%	933,250 116.1 M lb Zn		+148,700 58,000 4.41 M lb Zn	{ 1,140,300 120.4 M lb Zn	Dilution à 15% sans teneur Additions tonnes et livres Zn
I + II	1,813,950 254.1 M lb Zn	57,078 12.3 M lb Zn	+148,700 + 34,200 +2.3 M lb Zn	1,940,100 244.1 M lb Zn	Dilution à 15% - Teneur 20% Gain de tonnage Gain de zinc provenant de semi-probable
Semi-probable Non dilué	380,000 65.8 M lb Zn	-	-	380,000 65.8 M lb Zn	Pas de changement
I + II + III	2,193,950 320.0 M lb Zn	57,078 12.3 M lb Zn	+171,000 2.3 M lb Zn	2,320,100 310 M lb Zn	Idem

Chapitre IX

LES ASPECTS MINÉRALURGIQUES

9. LES ASPECTS MINÉRALURGIQUES	219
9.1 RECHERCHE ET INGÉNIERIE	219
9.1.1 PERTES ET DILUTION	219
9.1.2 STADES DES ESSAIS	220
9.1.3 INGÉNIERIE ET CHOIX	222
9.2 LES MÉTHODES DE TRAITEMENT	222
9.2.1 CONCENTRATION GRAVIMÉTRIQUE	222
9.2.2 AMALGAMATION	223
9.2.3 FLOTTATION	223
9.2.4 CYANURATION	224
9.2.5 LIXIVIATION EN TAS	225
9.3 LES ÉTAPES MINÉRALURGIQUES	227
9.3.1 MINÉRALOGIE	227
9.3.2 ÉCHANTILLONNAGE	228
9.3.3 ESSAIS MINÉRALURGIQUES	230
9.3.4 ÉTAPES DES ESSAIS	232
9.3.5 INGÉNIERIE DE L'USINE	234
9.4 LES ÉCHANTILLONNAGES EN USINE	235
9.4.1 CONTRÔLE DE LA MASSE ET DES TENEURS	235
9.4.2 OPTIMISATION DES CONTROLES	236
9.4.3 RÉTROACTION SUR LES RÉSERVES	237
9.5 LA VARIABILITÉ MINÉRALURGIQUE	237
9.5.1 MINE ST. LAWRENCE COLUMBIUM	238
9.5.2 MINE NIOBEC	238
9.6 GUIDES D'APPLICATION	238
9.6.1 CONTRÔLE DE L'EFFICACITÉ	238
9.6.2 ESSAIS EN USINE INDUSTRIELLE	240
9.6.3 PRÉDICTIONS DU RENDEMENT MINÉRALURGIQUE	242

9 . LES ASPECTS MINÉRALURGIQUES

Le choix du procédé approprié pour l'extraction du ou des métaux d'intérêt contenu(s) dans une roche minéralisée est une phase essentielle de l'évaluation d'un gisement. La recherche requise prendra place, à des niveaux croissants de détail et d'intensité, de la confirmation du gisement jusqu'à l'étude de faisabilité. La portée des résultats dépendra de la nature, du volume et de la représentativité des échantillons étudiés, ainsi que du caractère des travaux effectués. L'objectif est d'optimiser l'extraction éventuelle du métal d'intérêt, en minimisant les pertes et la dilution, dans une perspective de rentabilité. Cette optimisation est essentielle à l'application de contrôles informatisés aux procédés. La figure 9-0 montre les principaux paramètres traitant de la minéralurgie.

Deux colloques du Centre de recherches minérales du Québec se sont attachés, en 1984 à Val d'Or et en 1987 à Rouyn-Noranda, aux divers aspects du "Traitement des minerais d'or". Le Guide citera, en divers endroits du présent chapitre, plusieurs des conférences qui ont été présentées à ces occasions. L'ensemble de ces comptes-rendus doit être lu par quiconque s'implique dans le traitement des minerais d'or.

9.1 RECHERCHE ET INGÉNIERIE

Le programme de recherches minéralurgiques effectué dans le cadre de l'évaluation d'un gisement d'or a pour but de déterminer les paramètres et les conditions optimales de chacune des étapes d'un schéma de traitement. Le but est d'optimiser la récupération des métaux d'intérêt et la rentabilité de l'exploitation. Cette étape permettra en outre d'établir les coûts d'installation et les coûts d'exploitation du schéma de traitement qui sera retenu.

9.1.1 PERTES ET DILUTION

Les pertes à la minéralurgie consistent en tout métal présent dans le minerai présenté à l'usine et non récupéré durant le procédé de traitement. Ces pertes peuvent être reliées à divers facteurs dont les principaux sont énumérés ici:

- les pertes dans les rejets (stériles, scories, etc):
 - . la granulométrie: matériel trop fin, ou trop grossier;
 - . le broyage insuffisant;
 - . l'association de l'or avec des éléments ou minéraux de traitement difficile;
 - . l'inefficacité du procédé ou les insuffisances des contrôles d'exploitation;

Méthode d'évaluation

- le métal non payé par le raffineur:
 - . les pertes au transport;
 - . les pertes de récupération;
 - . les clauses contractuelles;
- le vol / la piraterie.

La dilution se manifeste, à l'étape de la minéralurgie, par des lacunes de qualité du produit pour lesquelles l'opérateur est pénalisé et qui pourraient être reliées à des carences du contrôle de qualité dans la mine. Ce sera par exemple une teneur trop faible de l'élément principal reliée à des teneurs trop élevée en éléments secondaires (dont certains, des impuretés provenant de salissure lors du transport, etc.). La dilution est rarement un problème pour une exploitation qui produit de l'or en briques, mais celle qui produit un concentré qui doit être raffiné ailleurs, y est vulnérable.

9.1.2 ÉVOLUTION DES ESSAIS

Les essais minéralurgiques sur les minerais d'or se font typiquement en plusieurs étapes. La première étape consiste en études minéralogiques faites dans le cadre de l'évaluation géologique du gisement (voir section 4.3.3, Tome II): il s'agit d'établir la granulométrie et les associations minérales des minéraux d'intérêt. Dans un gisement aurifère, ce métal peut être libre ou associé à plusieurs minéraux en fines disséminations ou encore inclus dans leur maille cristalline: par exemple aux sulfures, aux tellurures, aux arséniures.

Les premiers essais sur des échantillons d'un gisement sont faits de façon ponctuelle pour fournir des éléments d'orientation pour les travaux de confirmation du gisement au stade 4. Au stade 5, dans la phase de définition du gisement, les besoins deviennent plus exigeants et comprendront des essais en laboratoire, parfois des essais en usine pilote à format réduit.

C'est au stade 6 que des essais en usine-pilote seront requis, à la fois pour confirmer les paramètres de traitement en usine, la récupération métal et pour confirmer les estimés de la teneur et de la quantité d'or contenu dans le matériel usiné. Parfois ces essais seront exécutés en usine commerciale.

Dans tous les cas, un soin particulier doit être apporté à la nature et à la représentativité des échantillons prélevés et traités, pour s'assurer que les résultats des essais sont applicables à l'ensemble du gisement. Les chiffres et paramètres ainsi obtenus seront utilisés dans l'étude de faisabilité afin d'établir la rentabilité du projet.

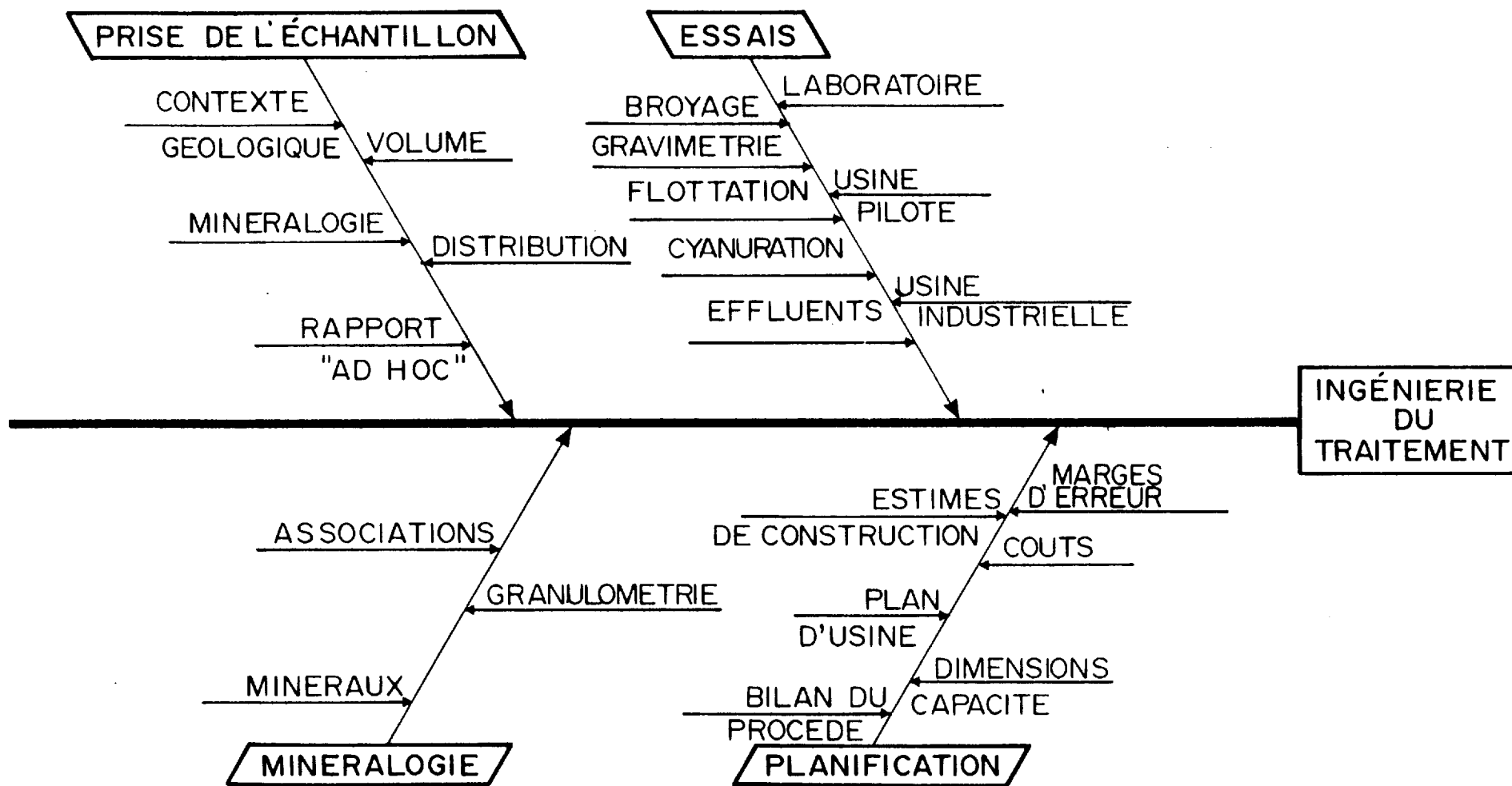


Fig. 9.0

9.1.3 INGÉNIERIE ET CHOIX

Le choix d'un procédé est le résultat d'une évaluation de l'ensemble des divers paramètres. Il y a tout d'abord la récupération escomptée pour un procédé donné et la qualité du produit, ce qui amène un rendement brut différent pour chaque option. En contre-poids, chaque option de circuit de traitement est accompagnée de coûts de capital et de coûts d'exploitation. Le choix d'un circuit de traitement pourrait se faire directement à partir de l'analyse économique des divers paramètres physiques et des coûts des diverses alternatives.

Cependant, comme une exploitation minière comporte des interrelations multiples entre les aspects de géologie, d'extraction minière et de minéralurgie, il est important de considérer l'ensemble de la situation et la rentabilité globale. Il faudra par exemple considérer la flexibilité qu'offre une option donnée vis-à-vis une augmentation possible des réserves ou un minerai différent par sa qualité, sa minéralogie ou sa lithologie.

9.2 LES MÉTHODES DE TRAITEMENT

L'ensemble des aspects minéralurgiques et métallurgiques des minerais d'or dépasse de beaucoup le cadre de l'étude actuelle, de même que les conditions de leur optimisation. Le Guide ne présentera ici qu'un aperçu sommaire des principales méthodes, avec leurs caractéristiques, toujours dans la perspective d'évaluation des gisements qui l'oriente. Les descriptions qui suivent décrivent sommairement les principales techniques d'extraction de l'or et s'inspirent des conférences présentées aux Colloques de 1984 et de 1987 du CRM en particulier celles de Desrochers⁸⁰, Veillette⁸¹, Kasongo⁸².

9.2.1 CONCENTRATION GRAVIMÉTRIQUE

La concentration gravimétrique est particulièrement adaptée aux minerais contenant de l'or grossier, facilement libéré. La concentration gravimétrique peut se faire en milieu aérien ou aqueux et est favorisée par le poids spécifique élevé de l'or (15 à 19). Les appareils de concentration gravimétrique en milieu aqueux peuvent être classés en trois groupes suivant le mode de concentration (Kasongo, 1987):

- en lame mince: couloirs d'alluvionnement, cônes de Reichert;
- en accélération différentielle: tamis vibrants (jigs), tables à secousses (type Wilfley);
- par force centrifuge: spirales, concentrateurs Knelson.

Outre ces méthodes commerciales, citons le superpanner et les liqueurs denses qui sont des méthodes de séparation limitées au laboratoire, ou à des étapes finales de purification.

AVANTAGES

- 1- Non polluant, aucun produit chimique;
- 2- Faible consommation d'énergie;
- 3- Production d'un concentré haute teneur;
- 4- Récupération au début du circuit de matériel grossier autrement difficile à flotter ou à lixivier.

DÉSAVANTAGES

- 1- Rendement faible;
- 2- Vulnérabilité au vol;
- 3- Difficultés d'échantillonnage et d'analyse du concentré;
- 4- Requier des quantités considérables d'eau (par voie humide).

Le rendement obtenu par la concentration gravimétrique est plus faible que celui des autres procédés (excepté la lixiviation en tas). Sauf dans le cas du traitement de minerai provenant de gisements alluvionnaires (placer), la gravimétrie est presque toujours utilisée en association avec un autre procédé. Ce procédé est de moins en moins à la mode lors de la conception des schémas de traitement des usines nord-américaines récentes. Il demeure très utile pour les cas où il apparaît approprié de récupérer l'or grossier au début du circuit. Le concentré gravimétrique demandera généralement des étapes additionnelles de nettoyage et de purification.

9.2.2 AMALGAMATION

L'amalgamation est un des plus vieux procédés de concentration de l'or. Ce procédé utilise le mercure pour amalgamer l'or du concentré obtenu, par diverses méthodes gravimétriques par exemple. L'amalgame doit ensuite être grillé pour récupérer l'or d'une part, le mercure de l'autre; l'utilisation du mercure est de moins en moins acceptée à cause des problèmes de santé et d'environnement qui y sont associés. Ce procédé a été remplacé par la cyanuration qui est plus efficace, moins dispendieuse et moins polluante.

9.2.3 FLOTTATION

Le procédé de flottation peut être utilisé pour concentrer un minerai dans lequel l'or est finement divisé et intimement associé à des sulfures ou des arséniures. Les caractéristiques de ce procédé amènent les avantages et désavantages suivants:

AVANTAGES

- 1- circuit simple et compact, moins dispendieux d'installation et d'opération;
- 2- récupération élevée, sauf dans certains cas pour l'or grossier;
- 3- rejets relativement peu polluants ⁽²⁸⁾;
- 4- la concentration de l'or permet de réduire les besoins en équipement et en investissements aux étapes subséquentes.

DÉSAVANTAGES

- 1- requiert généralement un broyage fin;
- 2- la teneur en or du concentré est en général peu élevée, ce qui entraîne des frais de grillage élevés, surtout lorsque le concentré ne contient pas de métaux usuels.

9.2.4 CYANURATION

Le procédé de cyanuration comporte la mise en solution ou la lixiviation de l'or contenu dans un minerai par le cyanure et sa précipitation ou sa capture par un procédé secondaire. La cyanuration demeure le procédé d'extraction de l'or le plus utilisé et le plus versatile, à cause de l'évolution technologique depuis les premières applications au début du siècle. La mise en solution de l'or par le cyanure est commune à toutes les versions actuelles de ce procédé:

- 1- version Merrill Crowe: le procédé original;
- 2- version charbon activé en pulpe (Carbon in pulp);
- 3- version lixiviation en tas (Heap Leaching);
- 4- version charbon activé dans la solution mère (carbon in leach).

L'efficacité du processus de cyanuration dépend des conditions suivantes:

- que l'or soit propre;
- que l'or soit exposé à la solution de cyanure (finesse de broyage et prétraitement appropriés);
- que la solution de cyanure soit active, avec un ph (teneur en Ca (OH)₂) et une pureté appropriés);
- que de l'oxygène dissout soit disponible en quantité requise;
- que la durée d'agitation soit suffisante pour dissoudre l'or.

Sans aller dans tous les détails de ces variantes (sauf pour la lixiviation en tas), il y a lieu de souligner les avantages et les désavantages principaux:

²⁸ En autant qu'ils soient contenus dans un parc à résidus qui ne permet pas l'oxydation des sulfures et l'écoulement d'eaux acides.

AVANTAGES

- 1- rendement élevé et stable;
- 2- simple (relativement) à opérer;
- 3- coulée d'un lingot d'or au site de la mine.

DÉSAVANTAGES

- 1- sérieux problèmes de pollution causés par la présence de cyanure et d'ions métalliques dans les rejets d'usinage;
- 2- coût d'opération et coût d'investissement plus élevés que pour les autres procédés énumérés, (sauf pour la lixiviation en tas).

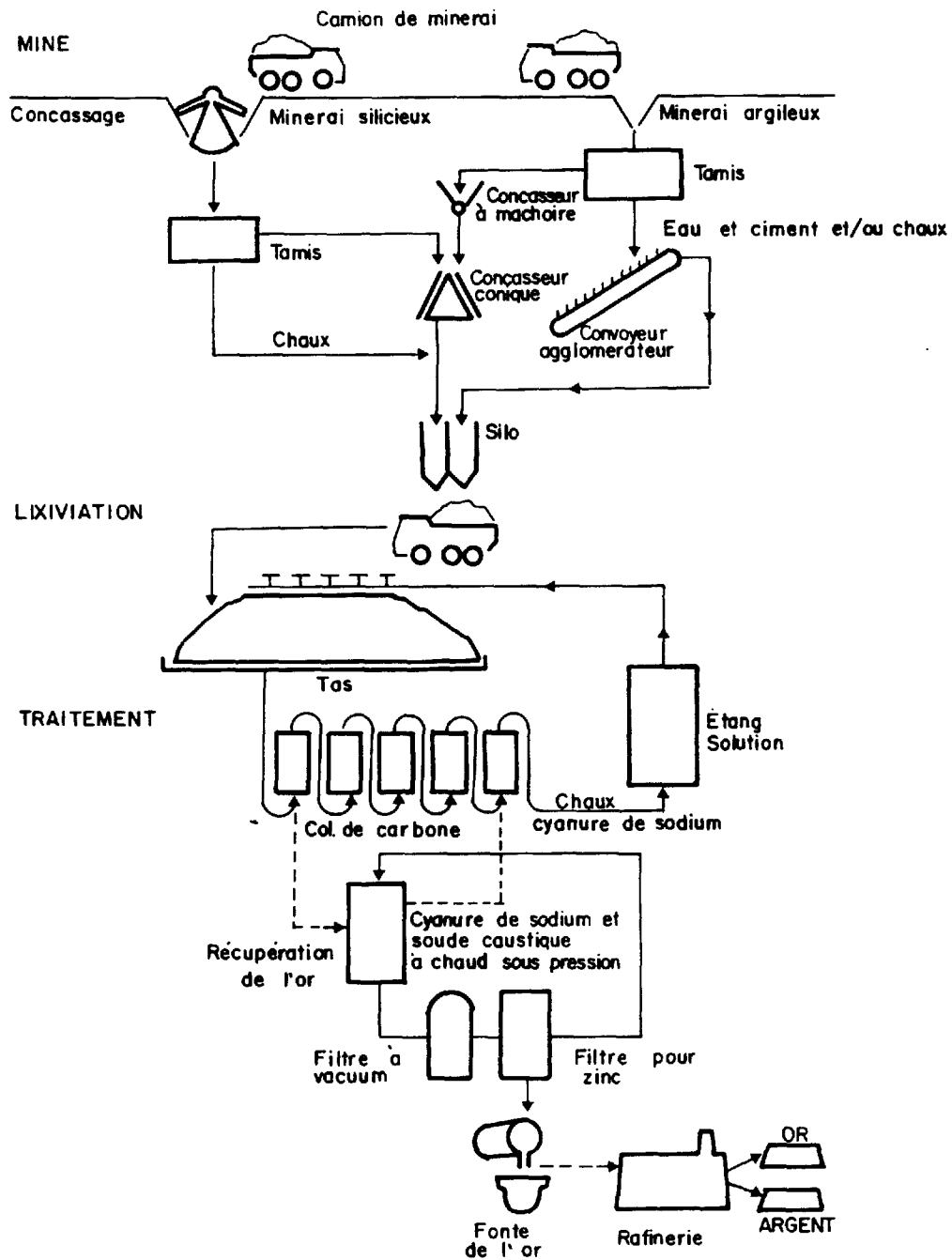
9.2.5 LIXIVIATION EN TAS

Les caractéristiques de la méthode de lixiviation en tas (Heap leaching) méritent une description. Cette méthode, déjà utilisée pour l'extraction du cuivre à partir de minerais lixiviés, a changé en une génération toute la perspective de l'extraction de l'or à partir de minerais à faible teneur; la figure 9-1 offre un schéma type. En raison de sa simplicité relative, la méthode de lixiviation en tas est très économique, autant quant aux frais d'implantation que pour les frais d'exploitation, mais n'offre pas un rendement aussi élevé que la cyanuration conventionnelle.

Le minerai, extrait de façon traditionnelle, est déposé sur des "tapis" de lixiviation. La lixiviation s'effectue par l'utilisation d'un système d'aspersion qui consiste à arroser le minerai avec une solution de cyanure pendant les semaines ou les mois nécessaires à l'obtention de la récupération optimale. Le "tapis" est préparé pour être étanche et recueillir les solutions de cyanure qui autrement pénétreraient dans le sol.

Le concassage de la roche est en général nécessaire, même s'il s'agit d'une roche altérée ou poreuse. Mais, si à la suite du concassage, la roche demeure trop compacte, s'il y a un excès de fines, ou encore si la teneur en argile est importante, des problèmes de traitement et de récupération peuvent se poser. Le minerai doit présenter une porosité suffisante pour permettre la circulation des solutions et la lixiviation du métal recherché, sinon la récupération sera insuffisante. A l'inverse, un excès de fines ou de minéraux argileux restreindra la circulation de la solution de cyanure qui peut rester stagnante ou s'écouler sans imprégner le minerai. Le Bureau des Mines des États Unis a mis au point une technique d'agglomération des fines ou de l'argile par le ciment Portland, ce qui permet au cyanure de mieux circuler à travers tout le tas.

La récupération est relativement basse, souvent de l'ordre de 60-70%. La méthode de lixiviation en tas doit être bien planifiée et bien contrôlée pour être efficace. Il est



TIRÉ DE : MINING MAGAZINE Sept. 1986, p. 157-160

Fig 9 1

SCHEMA DE LIXIVIATION EN TAS

important de bien établir les divers paramètres techniques, de ne pas surestimer la teneur d'or du minerai et de connaître la minéralogie et la présence d'éléments délétères tel le carbone.

Il va sans dire qu'à cause de ses caractéristiques et de la grande difficulté sinon de l'impossibilité d'obtenir un bilan métallurgique, **l'application de la méthode de lixiviation en tas pour des essais en vrac ayant pour but de déterminer la teneur d'une zone ou d'un gisement est très limitée**. Tout ce qu'un tel essai pourra accomplir ce serait de montrer des résultats à la hausse par rapport aux estimés de teneur; le rendement ne pourra être estimé sans avoir établi, avec une marge d'erreur appropriée, la teneur de l'alimentation et des rejets (section 9.1.4).

9.3 LES ÉTAPES MINÉRALURGIQUES

Les essais minéralurgiques ont pour but d'établir toutes les caractéristiques de la minéralisation sous étude. La prépondérance du procédé de cyanuration ne doit pas mener à écarter les essais ni faire oublier les autres méthodes susceptibles d'être utilisées, telles la gravimétrie et la flottation, en complément de la cyanuration.

9.3.1 LA MINÉRALOGIE

A) Les méthodes

Le premier objectif des études minéralogiques est de définir la nature et la dimension des particules d'intérêt dans la roche sous étude. La section 4.2.2 traite de l'application quantitative de la minéralogie dans le contrôle géologique. Pour les minerais d'or, il faut déterminer la distribution de l'or dans les divers minéraux et dans les diverses fractions granulométriques de ces minéraux:

- 1) or grossier libre et visible;
- 2) or fin, non visible;
- 3) or fin disséminé dans les silicates;
- 4) or fin disséminé ou incorporé dans les sulfures, les arséniures;
- 5) or fin disséminé ou incorporé dans les tellurures;
- 6) les associations minérales susceptibles de contribuer à des problèmes de récupération à la lixiviation: sulfures, arséniures, carbone.

La détermination de la distribution de l'or dans les diverses fractions granulométriques demande des mesures et calculs appropriés. Il faut tenir compte du poids spécifique élevé de l'or, de l'effet volume par rapport aux surfaces mesurées, si on veut établir la proportion de l'or qui se trouve dans chaque fraction. Cet objectif n'est souvent pas facile à atteindre, compte tenu

de la distribution pépitique et des faibles teneurs de l'or dans la roche. Très souvent, on ne réussira pas à voir un nombre suffisant de particules, malgré l'observation d'un nombre relativement élevé de sections polies (Wilhelmy, 1988, ²³). Il faut quand même faire l'effort d'essayer car les observations minéralogiques peuvent contribuer à une meilleure perception de la distribution de l'or, face aux problèmes amenés par les minerais dits réfractaires.

B) Les minerais réfractaires

On entend par minerais réfractaires ceux qui présentent des difficultés spéciales de récupération de l'or, particulièrement de lixiviation de l'or par la cyanuration. Il est important de bien identifier ces conditions par l'étude minéralogique. Les types principaux de minerais réfractaires sont les suivants:

- or associé avec les sulfures qui réagissent avec la solution de cyanure. Ce sont particulièrement la chalcosine, la chalcopyrite, la covelline, la pyrrhotine, le réalgar(AsS) l'orpiment(As₂S₃), la stibine(Sb₂S₃). Les cations métalliques et l'ion soufre réagissent avec le cyanure;
- or associé avec du carbone, soit du graphite, soit des hydrocarbures lourds, soit des acides organiques. Les problèmes peuvent être reliés soit à la libération restreinte de l'or associé au matériel contenant du carbone, soit à la réadsorption de l'or dissout au carbone résiduel;
- or très finement disséminé qui ne vient pas en contact avec les solutions de cyanure. Il s'agit d'or très finement disséminé avec les silicates ou le plus souvent avec les sulfures.

On trouvera un traitement plus élaboré de ces questions dans l'article de Demopoulos, 1987⁸³ et dans celui de Hausen, 1985⁸⁴.

9.3.2 L'ÉCHANTILLONNAGE

Toute la valeur et l'applicabilité des essais dépendent de la représentativité du matériel soumis pour étude. Il est donc nécessaire d'apporter beaucoup d'attention à cette question.

A) La représentativité

L'échantillonnage d'un gisement pour des essais minéralurgiques implique divers prérequis. Tout d'abord, la connaissance géologique et minéralogique du gisement et de la distribution des teneurs doit être suffisante pour établir le degré de représentativité des échantillons traités par rapport à l'ensemble du gisement. Cette question essentielle a déjà été

discutée de façon élaborée au chapitre 6 du Guide, en particulier à la section 6.3, mais il est nécessaire d'y revenir dans le présent chapitre.

En général, les échantillons sont fournis par les géologues /ingénieurs géologues aux minéralurgistes qui supposent qu'ils sont appropriés. On observe trop souvent, a posteriori, que les seuls documents concernant les échantillons soumis pour des essais sont les rapports minéralurgiques signés par le professionnel qualifié responsable des essais. La plupart du temps, ce rapport des essais ne contient qu'un *avertissement que le signataire n'a pas été impliqué dans les travaux antérieurs ni dans l'échantillonnage, donc ne peut garantir la représentativité géologique des essais* effectués sur les échantillons fournis

Il apparaît essentiel que les échantillons fournis aux laboratoires d'essais ou soumis pour des essais pilotes ou des essais en usine industrielle, soient toujours accompagnés d'un rapport professionnel. Ce rapport comprendra une description géologique, complétée de plans et cartes géologiques, où le géologue / ingénieur responsable de la prise des échantillons aura établi leur origine et leur représentativité.

Il faut souligner, même si les échantillons prélevés en vue d'essais aux premiers stades de l'évaluation d'un gisement ne sont pas nécessairement représentatifs, qu'il est dangereux qu'ils soient pris sur des portions non typiques et/ou très riches du gisement. Nonobstant la nécessité de faire bonne impression sur la direction et/ou sur le public pour assurer les financements subséquents, il arrive souvent que ces premiers échantillons biaisent pour longtemps les perceptions de ceux qui travaillent au dossier ou doivent prendre des décisions. Une telle situation peut avoir des conséquences sérieuses sur la rentabilité d'une d'exploitation éventuelle.

B) Les échantillons des sondages

Les premiers essais doivent d'abord caractériser les divers types géologiques / minéralogiques des minéralisation. Aux stades ultérieurs, il sera de plus en plus nécessaire que les échantillons soient représentatifs à la fois de l'ensemble du gisement et de ses diverses parties. C'est essentiel s'il y a des différences marquées des teneurs et des différences géologiques et/ou minéralogiques qui peuvent influencer l'évaluation minéralurgique de l'ensemble du gisement.

La nature et la qualité des échantillons des sondages sont d'importance. L'échantillon peut être l'objet de contamination par des produits chimiques, des huiles, ou s'être détérioré depuis la prise de l'échantillon: certains minéraux comme la pyrrhotine ou certains silicates instables sont vulnérables à l'oxydation. Des méprises de cette nature ont déjà eu des résultats catastrophiques au stade de l'exploitation dans certaines usines. Pour terminer, rappelons que

certaines méthodes analytiques détruisent à toute fin pratique la valeur d'un échantillon pour des essais subséquents, telle la méthode du tamisage des métalliques.

Typiquement, les premiers échantillons pour des essais sont constitués à partir de carottages. Les échantillons représentant des intervalles types sont pesés, regroupés, concassés à la dimension de 4 à 2 mm; on doit prélever à ce moment des échantillonnages de contrôle pour réduire les possibilités d'erreur, de contamination ou de falsification des échantillons. Il faut se rappeler cependant que **le meilleur estimé de la teneur du lot est la moyenne des échantillons individuels déjà analysés**. Par contre, *attribuer au lot la teneur d'un échantillon prélevé après le mélange et analysé une fois n'est pas une procédure valable du point de vue statistique: on ne doit jamais faire porter une décision sur une seule analyse*. Le poids spécifique sera également mesuré et cette information comparée avec les mesures faites par les géologues. Il est approprié de mesurer la teneur du lot en divers éléments, de vérifier les données minéralogiques déjà disponibles.

C) Échantillons en vrac

Dans la même perspective, au moment de prélever un échantillon en vrac qui doit servir à établir un procédé, il est nécessaire d'avoir déterminé, individuellement, les caractéristiques lithologiques et minéralogiques des différentes zones qui composent le gisement et d'avoir établi clairement le cadre dans lequel ces essais sont effectués. Ces questions sont discutées de façon plus élaborée dans les chapitres 5 et 6 du Guide.

9.3.3 LES ESSAIS MINÉRALURGIQUES

Les essais standard des laboratoires se font souvent sur des échantillons de 1 kg. Des essais plus élaborés se feront sur des lots de 20 kg ou plus.

A) Essais de broyage

Ces essais ont pour but d'établir la finesse de broyage requise, la dimension de libération des particules d'intérêt. D'autres essais permettront d'établir l'indice de broyabilité du matériel ou indice de Bond. Cet indice consiste en l'énergie requise (en kw-heure) pour réduire un minerai en vrac jusqu'à 80 % plus fin que 100 microns. Il contribuera au choix des équipements de broyage standard, tandis que le broyage semi-autogène requiert des essais en usine.

B) Concentration gravimétrique

Des essais de concentration gravimétrique s'imposent quand la minéralisation sous étude contient de l'or libre grossier. C'est "l'or visible" rapporté au journal des forages et dont

témoignent les valeurs d'or erratiques des analyses. L'objectif de tels essais est de voir s'il y a lieu d'utiliser la gravimétrie à la sortie des broyeurs ou en début du circuit de concentration pour récupérer l'or grossier; cet or grossier est plus vulnérable aux pertes dans le circuit et plus susceptible d'entraîner des frais élevés de cyanuration.

Si les résultats des essais préliminaires indiquent qu'une proportion significative du minerai montre un contenu "d'or grossier" qui dépasse 10%, des essais sur des lots plus importants s'imposeront. Si ces résultats sont confirmés, il faudra considérer l'éventualité d'utiliser ces équipements en usine, en plus de recourir aux mesures appropriées pour minimiser les "pertes" de divers types.

C) Flottation des sulfures

Des essais de flottation des sulfures (ou arséniures) s'imposeront lorsque ces minéraux sont associés avec une partie au moins de l'or présent dans le minerai. Même quand l'or semble être surtout libre, il est approprié de vérifier le contenu en or d'un concentré de ces minéraux. La finesse de broyage requise pour les sulfures peut en général être déterminée par la minérigraphie avant les essais. Ceux-ci devront plus particulièrement établir les paramètres suivants: le choix et le dosage des réactifs, le temps de conditionnement, le temps de flottation, le nombre de stades requis, le rapport de concentration.

D) Essais de lixiviation

Les essais de cyanuration en laboratoire ont pour but de déterminer les paramètres suivants:

- la dimension de broyage optimale;
- les paramètres opératoires:
 - .le temps de rétention;
 - .détermination et quantification des réactifs
(cyanure, oxygène, chaux, agents oxydants);
 - .ph;
 - .préaération;
- la présence en solution et le comportement d'éléments nuisibles tels As, Cu, Fe, Sb et les cyanures.

Outre ces données, il faudra également obtenir des informations sur les paramètres suivants:

- vitesse de décantation du concentré et des résidus;
- vitesse de sédimentation " " " " " ;
- indice de filtration " " " " " ;
- composition de la solution mère.

Les essais donneront une bonne indication du temps de rétention en usine (entre 24 et 72 heures en général). Si des éléments nuisibles sont libérés, des essais cycliques peuvent être requis pour indiquer la concentration qui peut s'établir en usine. Des essais de cyanuration en colonnes seront requis, si on envisage l'application de la lixiviation en tas.

E) Comparaisons des procédés de récupération

Le procédé conventionnel de précipitation de l'or, dit Merrill Crowe, utilise la poudre de zinc pour précipiter l'or en solution après l'étape de lixiviation par le cyanure; une méthode alternative est l'utilisation du charbon activé dite charbon en pulpe. Dans le cas où le minerai est très finement broyé, la méthode charbon en pulpe s'avère la meilleure solution.

En général, la précipitation conventionnelle ne fait pas l'objet d'essais en laboratoire. Les essais sur le procédé de charbon en pulpe mettent la solution en contact avec un charbon activé afin de déterminer les caractéristiques de la réaction: cinétique, nombre de stades, concentration du carbone, concentration des solutions, teneur d'or sur le charbon, désorption.

9.3.4 LES ÉTAPES DES ESSAIS

A) Les essais initiaux

Les essais initiaux ou d'orientation permettent d'établir les caractéristiques minéralurgiques du matériel soumis. A cette étape, les objectifs seront les suivants:

- 1) justifier la poursuite des travaux d'exploration/mise en valeur en établissant qu'il n'y a pas d'obstacle insurmontable au traitement et à la récupération minéralurgique;
- 2) analyser les problèmes techniques que présente l'extraction du (ou des) métal ou minéral d'intérêt;
- 3) établir l'orientation et la planification des essais subséquents.

Après cette étape d'orientation, on passe aux essais systématiques en laboratoire, dont les buts ont été décrits plus haut. Dans la pratique, il arrive souvent que ces deux premières étapes s'intègrent. Une fois les essais en laboratoire complétés, on procédera à une première conception d'un circuit de traitement en usine, conception qu'il s'agira de vérifier par des essais en usine pilote .

B) Les essais en usine-pilote

Les essais plus élaborés qui suivent les premiers sont de nature et de formats variés. En général, il s'agira d'essais en continu en usine pilote, en format réduit par rapport à l'échelle éventuelle d'exploitation, soit de 100 à 1000 kg/heure. De tels essais permettent, en plus de

l'optimisation du procédé, une étape additionnelle de vérification du contenu métal par rapport à l'étape des échantillonnages. Dans l'évaluation d'un gisement d'or, il arrive aussi que l'on procède à des essais sur des volumes importants, dans une usine commerciale.

Il est opportun de distinguer entre les échantillonnages grand format, utilisant un atelier approprié de concassage et d'échantillonnage systématique comme les décrit le chapitre 8 du Guide, et les véritables essais d'extraction en usine pilote ou en usine industrielle. Durant les dernières années, il est souvent arrivé que le public ait confondu essais d'échantillonnages et essais minéralurgiques. L'estimation du contenu d'or par l'usine pilote dépendra d'un bilan de l'extraction appuyé sur la masse et la teneur de l'alimentation, du produit et des rejets. Pour comparaison, l'usine d'échantillonnage s'appuyera sur des déterminations analytiques faites sur des portions restreintes de la masse totale, donc moins représentatives.

Les essais en usine pilote fourniront des données qui permettront également de préciser plusieurs paramètres essentiels de l'exploitation envisagée. Les objectifs minéralurgiques essentiels des essais en usine pilote sont les suivants:

- établir les paramètres du circuit projeté tels que:
 - .la consommation des réactifs;
 - .le contenu en divers éléments des solutions;
 - .les caractéristiques des résidus solides et liquides;
- permettre un bilan minéralurgique des essais et la récupération possible;
- faire la vérification du circuit proposé pour en permettre la conception détaillée et l'ingénierie, les coûts d'investissements et les coûts d'exploitation;
- établir les caractéristiques du produit obtenu et dans certains cas, produire des échantillons pour les acheteurs éventuels, quand il s'agit de concentrés qui seront expédiés à une autre usine, pour grillage ou autre méthode d'extraction,

L'évaluation des résultats obtenus doit toujours se faire en fonction des échantillons traités, de leur situation dans le gisement, des éléments de correspondance et de représentativité avec le gisement. Sinon, des distorsions importantes peuvent s'introduire, distorsions qui pourront affecter le rendement et la rentabilité de l'exploitation éventuelle.

C) Les essais en usine industrielle

Dans certains cas on ne peut pas procéder de facto au design d'une usine industrielle après les essais en usine-pilote à format réduit. Ceci se produit lorsque divers facteurs ne peuvent être projetés à échelle agrandie, tels les paramètres de broyage ou l'accumulation des impuretés dissoutes par la cyanuration. L'usine de format commercial permet en principe une vérification plus poussée de la teneur du minerai, mais à condition de rencontrer une série de conditions.

Les essais en usine industrielle demandent un niveau de contrôle et de supervision plus élevé que l'exploitation commerciale. C'est à ce prix que l'on atteindra l'objectif de maximiser le rendement de l'extraction de l'or et des métaux qui l'accompagnent et aussi de vérifier la teneur d'or du lot soumis. Souvent, l'opportunité du revenu éventuel à tirer du traitement d'un tonnage important contribue à minimiser l'importance des aspects minéralurgiques de l'essai dans l'esprit des divers intervenants. Ces aspects comprennent les étapes suivantes:

- la mesure de la masse et de la teneur de l'alimentation, des rejets, des concentrés;
- la durée des essais requise pour stabiliser le procédé;
- les mesures de contrôle et de supervision technique requises pour les objectifs des essais;
- l'établissement d'un bilan rigoureux des essais et d'une analyse critique de toutes les étapes et procédures suivies;

Avant de s'engager dans des essais en vrac dans une usine, le responsable de la valorisation d'un gisement, son minéralurgiste-conseil et son géologue/ingénieur géologue doivent faire une revue complète de la situation et des objectifs des essais en usine industrielle qui sont envisagés. La section 9.4 discute les problèmes d'échantillonnage en usine tandis que la section 9.6.2 suggère des règles d'application et des procédures pour préparer de tels essais.

9.3.5 L'INGÉNIERIE DE L'USINE

C'est à partir de ces diverses informations que l'on pourra faire l'ingénierie de l'usine. Essentiellement les quatre champs suivants d'information sont requis:

- les résultats techniques des essais, récupération escomptée, teneurs des concentrés. Ces résultats, s'ajoutant aux données des réserves de minerai et aux résultats des essais, permettront d'établir le circuit requis pour rencontrer les objectifs de production;
- les coûts de traitement, selon les équipements, les réactifs et la main d'oeuvre requise,
- les coûts des investissements requis pour la construction de l'usine, lorsque cette option est envisagée, ou les coûts du traitement à forfait dans une usine déjà établie.
- la marge d'erreur des divers paramètres requis et la nature des difficultés qui pourraient nuire aux objectifs de production.

Ces calculs se feront à diverses étapes, à divers niveaux de précision, car des études de préféabilité précèdent et planifient l'étude finale de faisabilité du projet minier. **L'optimisation de l'ingénierie et des diverses étapes de contrôle technique des procédés de concentration dépasse le cadre du Guide d'évaluation des gisements d'or.**

9.4 LES ÉCHANTILLONNAGES EN USINE

Le contexte de l'évaluation des gisements d'or oblige le Guide à porter un regard critique sur les pratiques d'échantillonnage de certaines usines. Dans le contexte d'essais de temps limité requis pour mieux connaître le contenu en or d'un gisement, ces considérations sont importantes pour la compagnie d'exploration minière qui envisage des essais en usine industrielle. La société minière ne peut ignorer ces problèmes qui affectent le rendement et la rentabilité.

9.4.1 CONTRÔLE DE LA MASSE ET DES TENEURS

A) Contrôle / efficacité

Le contrôle des teneurs de la masse usinée dans une usine de cyanuration n'est pas facilité par les caractéristiques pépétiques du l'or dans le minerai et son corrolaire, la présence de paillettes d'or dans le circuit de concentration/extraction. Ce problème est crucial, autant au stade des essais en usine pilote ou usine industrielle, qu'à celui de l'exploitation. L'établissement de la teneur autant que de la masse usinée est requis pour connaître la quantité de métal contenu dans les trois phases du procédé: l'alimentation, le concentré et le rejet. Ce contrôle est nécessaire pour prévenir et contrôler une quatrième éventualité: les pertes occultes et le vol. Optimiser le rendement technique et surtout la rentabilité de l'exploitation ne peut se faire sans tous ces contrôles!

Que l'échantillonnage de l'alimentation de l'usine ou des rejets ne soit pas suffisant parce que les échantillons sont trop peu volumineux ou trop peu nombreux, ou parce que les quantités d'alimentation mesurées ne sont pas exactes, le résultat sera le même: la connaissance du contenu métal du minerai, des rejets et parfois même des concentrés sera incertaine ou erronée. Alors, la redondance d'information nécessaire à un bilan vérifié du procédé manquera. Dans ces cas, l'adage traditionnel des opérateurs que "la vérité est dans la brique (d'or)" n'est qu'un leurre, puisqu'un bilan minéralurgique comptabilisé seulement sur la base de l'or contenu dans la brique de coulée et dans les rejets de l'usine ne peut tenir compte des pertes d'or (en paillettes ou sous d'autres formes) qui peuvent se produire en divers endroits du circuit d'usinage.

B) Les difficultés

Le Guide a discuté aux chapitres 5 et 6 des difficultés de l'échantillonnage et des analyses de l'or. Ces difficultés (chap 5 et 6 du Guide) affectent la connaissance de la teneur vraie de l'alimentation et du rendement réel du procédé. Le Guide veut cependant souligner qu'il est nécessaire, pour optimiser le rendement minéralurgique et la rentabilité économique, de reconnaître et éliminer certains laxismes et inconsistances dans les procédures et les façons

de penser. Diverses méthodes et attitudes, disons artisanales, ont été développées dans le contexte plus difficile des générations précédentes; ces méthodes et attitudes perdurent encore ici et là, ou renaissent parfois. Une volonté de rigueur accrue doit être présente pour optimiser tous les niveaux de la gestion d'une exploitation. Le Guide décrira quelques situations types où il y a place à amélioration.

9.4.2 L'OPTIMISATION DES CONTRÔLES

A) L'échantillonnage de l'alimentation

Trop d'usines d'extraction de l'or ne sont pas munies d'un système adéquat d'échantillonnage de l'alimentation. Il arrive, dans certaines usines, que le régime de broyage/-tamisage/recirculation rende difficile, sinon empêche de facto, un échantillonnage représentatif à l'entrée de l'usine. On tolère trop souvent ces restrictions occasionnelles, en oubliant que l'étape de la mesure et de l'échantillonnage de l'alimentation de l'usine est essentielle, surtout pour les usines qui traitent du minerai en lots ou à forfait. Certaines usines échantillonnent l'alimentation après l'étape du broyage, malgré les possibilités de pertes d'or grossier au broyage.

Le Guide considère que, lors d'essais minéralurgiques, de telles situations sont en contradiction avec la recherche de la teneur de l'alimentation et du rendement métallurgique qui sont les buts de ces essais. Ces situations sont incompatibles avec l'objectif de rentabilité et avec la gestion efficace des exploitations.

B) Les pertes d'or grossier

On oublie trop souvent, lorsqu'on dit que "la vérité est dans la brique", les possibilités de pertes d'or grossier:

- lors d'essais en usine, de l'or grossier peut rester captif dans le circuit à la fin du test. Inversement le(les) lot(s) précédent(s) ont pu contribuer à ces pièges de l'or en paillettes;
- le détournement d'or (high grading) à une étape ou à l'autre du procédé de concentration par cyanuration ou par gravimétrie demeure toujours une possibilité, étant donné la valeur de l'or;
- les pertes d'or grossier non dissous peuvent également se produire dans les rejets.

Sans échantillonnage représentatif et sans la mesure exacte des masses de l'alimentation et des rejets, on limite indûment les outils qui permettraient la vérification des données et le diagnostic de ces situations.

C) Les estimés de production

Dans le contexte où les informations ne sont pas suffisantes et les bilans pas très rigoureux, les prédictions ne sont pas très précises. Par exemple, les prédictions de l'or contenu dans le concentré de presse sont faites de façon conservatrice, ce qui n'a pas tellement de conséquences, mais ne témoigne certes pas d'un contrôle serré. Après l'usine, l'affinage de l'or amène peu de contestations sérieuses sur le contenu métal du produit de l'usine par le raffineur. Ceci se produit plus souvent entre le concentrateur et l'usine de grillage des métaux usuels quand au contenu en divers métaux des concentrés, dont l'or. Des meilleurs contrôles faciliteront de bons règlements.

9.4.3 RÉTROACTION SUR LES RÉSERVES

Dans le cas d'essais en usine, la rétroaction des résultats des essais sur les inventaires des réserves est en général directe. Dans les exploitations, la situation n'est pas toujours aussi claire. Dans certains cas limites (pas seulement dans l'or), on a vu des exploitations continuer pendant des années à estimer les réserves de la même façon, même si les résultats de la production étaient à la baisse par rapport aux premiers. L'estimation des réserves d'une exploitation doit tenir compte des résultats de l'usinage.

9.5 LA VARIABILITÉ MINÉRALURGIQUE

Selon l'enquête de Champigny et Armstrong citée au chapitre 8, les compagnies minières participantes ont mentionné que "la prédiction de la variabilité minéralurgique et des rendements minéralurgiques était un développement souhaité ou même requis dans l'estimation et l'exploitation des gisements". Tous les gisements n'ont pas la complexité qui requiert de telles mesures élaborées. Si c'est le cas cependant, Le Guide considère que cet objectif couvre plus que le contexte d'application de la géostatistique dans lequel il a été formulé. Dans le contexte de la minéralurgie de l'or, le présent chapitre a montré que le rendement de l'extraction de l'or peut être affecté par la nature et la granulométrie des minéraux présents et par la lithologie. Parfois ces conditions varient à travers le gisement sous étude et sont susceptibles d'influencer le rendement si on n'en tient pas compte systématiquement.

Faute d'exemples pertinents dans l'or et pour aider à la formulation de recommandations d'application générale, le Guide citera deux cas types reliés à l'extraction du pyrochlore de roche à carbonates: la mine d'Oka de St-Lawrence Columbian and Metals Corp. et de la Mine Niobec. Ces exemples montrent les mesures prises par ces exploitations, aux prises avec une minéralurgie complexe et une récupération influencée par la lithologie et la minéralogie. Des guides d'application seront ensuite formulés.

9.5.1 MINE ST LAWRENCE COLUMBIUM

A compter de 1963, l'estimation des réserves à la mine d'Oka de St-Lawrence Columbiium and Metals s'est faite en utilisant des abaques de récupération établis par le minéralurgiste de l'usine à partir des rendements observés. Ces abaques utilisaient la teneur Nb_2O_5 et la teneur en $CaCO_3$ pour établir la valeur du minerai en livres de Nb_2O_5 . Ces chiffres étaient ensuite utilisés, autant pour le calcul des réserves que pour le contrôle de la production ⁽²⁹⁾. Des essais en laboratoire sur des zones spécifiques étaient également utilisés, mais non sur une base systématique, puisque l'abaque répondait essentiellement aux besoins. Les prédictions géologiques de l'alimentation ajoutaient, à la teneur et aux livres d'oxyde de niobium, une prédiction de la lithologie du prochain lot de production et également un estimé de la teneur du concentré de pyrochlore.

9.5.2 MINE NIOBEC

Au début de la mise en valeur des gisements de niobium de St-Honoré, il est apparu que des essais minéralurgiques sur des échantillons des carottes regroupées sur l'ensemble des zones n'étaient pas satisfaisants. En effet, de tels échantillons regroupaient ainsi plusieurs lithologies de caractéristiques minéralogiques et minéralurgiques différentes, ce qui augmentait considérablement les difficultés.

Géologues ingénieurs et minéralurgistes ont donc établi, à partir de la caractérisation géologique et minéralogique des sondages, un programme systématique d'essais en laboratoire sur des intersections types des sondages des zones minéralisées. Cette procédure, toujours en vigueur, est devenue une composante essentielle de la caractérisation des zones et des lentilles pour l'exploitation. L'évaluation des zones se fait sur la base des livres d'oxyde de niobium recouvrables d'après les essais, autant pour l'estimation des réserves que pour les prédictions de production.

9.6 GUIDES D'APPLICATION

9.6.1 CONTRÔLE DE L'EFFICACITÉ

A toutes les étapes des exploitations, des mesures de contrôle sont requises pour optimiser le rendement du procédé et minimiser les pertes d'or grossier. A la mine, les mesures de surveillance sont surtout de nature policière, étant donné les conditions. En usine, il ne faut pas se contenter des mesures policières ostentatoires au moment de la coulée de la

²⁹

Les silicates en général réduisaient le rendement minéralurgique du procédé de concentration du pyrochlore, c'est pourquoi, en corollaire on utilisait la teneur calcite, facilement mesurable pour estimer le rendement d'une intersection ou zone.

brique d'or. Un contrôle plus strict de la masse et de la teneur de l'alimentation, des rejets (dans certains cas des concentrés), appuyé sur une surveillance stricte et objective de toutes les étapes du procédé, permettra un bilan plus rigoureux et des informations diagnostiques des situations.

A) Le contrôle de la masse

Ce point ne pose habituellement pas de problème majeur. La plupart des usines sont munies de systèmes automatisés. Dans le cas d'usinage à forfait, le client doit toujours tout vérifier et ne pas se fier à ce qu'on lui dit ou promet. Tous les appareils se dérèglent à l'occasion, toutes les consignes s'oublient à un moment ou l'autre.

B) Le contrôle de la teneur

L'échantillonnage approprié de l'alimentation de l'usine de concentration d'or peut permettre une meilleure connaissance de la teneur de l'alimentation. Ce matériel est en général concassé à une dimension de 15 à 40 millimètres environ, donc peut facilement être échantillonné de façon automatique. La précision atteinte de fait variera selon les facteurs suivants:

- 1) volume suffisant de l'échantillon: le volume de l'échantillon représentatif doit être calibré par rapport au volume de production qu'il représente et par rapport à la dimension des particules minéralisées. Ce paramètre, qui peut être calculé par la formule de Pierre Gy (sect. 5.1), dépend de la dimension de l'alimentation, des particules d'or et du volume traité chaque jour. En pratique, pour de l'or très pépétique, on pourrait arriver à des chiffres de plusieurs centaines de kilos pour une production de 1000 tonnes par jour. D'où la nécessité de faire ce calcul et de ne pas se satisfaire d'échantillons minimaux;
- 2) délai de prélèvement: il faut que les échantillons de l'alimentation, des concentrés, des rejets soient prélevés par des échantillonneurs automatiques. Si l'échantillonnage est fait manuellement, ce qui est moins sûr et moins fiable, il devrait l'être à un intervalle fréquent, de l'ordre de 15 à 30 minutes. *A l'intérieur d'essais minéralurgiques en usine industrielle, s'il n'y a pas d'échantillonneur mécanique et automatique de l'alimentation, un préposé doit être assigné de façon prioritaire à cette fonction et ce, 24 heures par jour, pour la durée des essais .*
- 3) nombre suffisant d'échantillons: il faut réduire la variance d'échantillonnage au stade des analyses et pour se faire la teneur journalière doit être calculée à partir d'une vingtaine d'échantillons par jour au minimum;

- 4) lieu de prélèvement: l'échantillonnage de l'alimentation sur le matériel broyé à la sortie du broyeur n'est pas approprié, puisque des pertes importantes d'or pépitique pourraient se produire au broyeur ou à sa sortie.

Il n'y a pas d'excuse de ne pas utiliser un échantillonneur automatique sur du matériel 15 à 40 mm. Il va sans dire que la procédure consistant à prélever une prise d'échantillon à tous les huit ou quatre heures est inacceptable, de même que celle de regrouper tous les échantillons du poste ou de la journée pour réduire le nombre des analyses! Les chapitre 5 et 6 du Guide ont déjà discuté de ces problèmes.

C) La surveillance objective

Peu ou pas d'usines d'extraction d'or sont dotées d'un véritable système de sécurité 24 heures par jour et 7 jours par semaine. En l'absence des responsables, les caméras vidéo en circuit fermé sont un leurre. De fait, une surveillance objective demanderait des caméras enregistrées avec systèmes d'horlogerie et scellées. Par comparaison aux étapes précédentes du procédé, l'étape finale de la coulée de l'or est très bien surveillée, mais on en tire parfois un sentiment de sécurité illusoire!

9.6.2 LES ESSAIS EN USINE INDUSTRIELLE

Le responsable de la valorisation d'un gisement, son minéralurgiste et son géologue/ingénieur géologue doivent se poser de nombreuses questions, avant de s'engager dans des essais en usine industrielle, s'ils veulent s'assurer que de tels essais contribuent vraiment à la connaissance de la minéralurgie du gisement. Les mêmes questions doivent également se poser avant de signer un contrat d'usinage à forfait dans une usine établie.

A) L'échantillon

Quelle est la représentativité de l'échantillon disponible pour traitement? Est-ce un échantillon provenant d'un seul site? Le gisement est-il homogène ou regroupe-t-il des zones hétérogènes qui regrouperaient des problèmes difficiles à résoudre à cette échelle? Y-a-t-il des possibilités de contamination, de dilution à l'extraction?

B) Le circuit et le taux de traitement

Le circuit disponible correspond-il avec les besoins établis pour ce minerai à partir des essais en laboratoire ou en usine-pilote?

Le régime commercial de traitement de l'usine est-il approprié au volume d'échantillon que le client aura à faire traiter?

Le Guide rappelle le contexte de mise au point, qui demande de prolonger les essais sur une période suffisante pour stabiliser le procédé, assurer des échantillonnages efficaces et établir le bilan quantitatif qui indiquera les conditions de rendement optimal. Un régime de l'usine plus élevé réduira les frais de l'essai mais réduira proportionnellement sa valeur d'expérience. Un essai en usine industrielle s'étendra sur 10 jours au strict minimum lorsque les conditions sont optimales; autrement, de tels essais devraient se prolonger sur une période de 20 à 30 jours.

C) Échantillonnages et contrôles

Il faut s'interroger sur les équipements disponibles, les procédures en vigueur pour le contrôle de l'alimentation et du circuit, sur l'expertise disponible.

- Quels sont les systèmes de contrôle de l'alimentation, de mesure de la masse usinée, du concentré, des rejets?
- D'autres minerais seront-ils usinés en parallèle sur d'autres circuits? Y aura-t-il (ce qui est inacceptable pour des essais) un autre minerai mélangé avec celui faisant l'objet de l'essai (ou du contrat d'usinage)? S'il y a alternance de minerai, la durée de traitement est-elle suffisante ?
- Les pratiques opérationnelles de l'usine d'intérêt sont-elles appropriées à l'objectif d'essai minéralurgique de la compagnie d'exploration minière pour la valorisation de son gisement? Sinon, peuvent-elles être adaptées? Quelle sera la stabilité et la fiabilité de ces ajustements?
- L'équipe en place offre-t-elle les compétences requises pour faire face aux problèmes de mise au point du traitement de l'échantillon soumis?

a) La comptabilisation minéralurgique

A partir des équipements, des personnes et des procédures en place, l'usine considérée pourra-t-elle faire l'évaluation minéralurgique rigoureuse requise pour la bonne gestion des essais envisagés? Dans une perspective de bonne gestion, la même question doit être posée dans le cas d'usinage à forfait, surtout s'il y a alternance du minerai soumis pour usinage à forfait avec un minerai d'autre provenance.

Le Guide rappelle que les exigences des essais sont plus rigoureuses que celles de la production en continu dans une usine commerciale, à cause du changement de l'alimentation, du temps limité disponible pour optimiser les procédures de traitement d'un nouveau minerai. Les problèmes de contrôle comprennent en particulier les possibilités de capture d'or grossier dans les pièges du circuit, les possibilités de nettoyage approprié du circuit avant et après les essais, les procédures de sécurité.

b) Le contrat

Si, après cet examen rigoureux, le bilan des réponses à ces questions est positif, il est essentiel que l'objectif du test, la masse à traiter, le taux de traitement, les modalités de contrôle et les pratiques opérationnelles soient établis de façon concrète et précise dans un contrat écrit entre les parties, en même temps que les prix, les dates, les délais et les autres clauses pertinentes.

9.6.3 PRÉDICTIONS DU RENDEMENT MINÉRALURGIQUE

Le systématisme que propose le Guide dans la démarche d'évaluation des gisements est de nature à favoriser l'application de prédictions statistiques du rendement minéralurgique. L'objectif proposé par les compagnies minières (Champigny, Armstrong 1989), la prédiction du rendement minéralurgique, demandera une collaboration accrue entre personnel des départements de géologie, d'ingénierie, de production et le personnel de l'usine.

En effet, l'atteinte de cet objectif demandera l'utilisation systématique des connaissances géologiques, minéralogiques et analytiques du gisement. Il faudra également que l'échantillonnage et la caractérisation du (des) gisement(s) soient faits d'une façon détaillée pour des essais minéralurgiques à petite échelle. Autant les résultats des laboratoire et des essais en usine pilote devront être reliés avec les portions des gisements et les types lithologiques avec lesquelles ils correspondent. Les étapes suivantes de travail seront requises pour atteindre un cet objectif.

A) Cartographie systématique

La cartographie des surfaces rocheuses et le journal détaillé des forages doivent enregistrer systématiquement toutes les informations géologiques et minéralogiques pertinentes. Ces observations doivent se faire dans un mode quantitatif qui facilitera l'établissement de prédictions statistiques dans les étapes à venir. Les section 4.2 et 4.4 traitent particulièrement de ces questions.

B) Codage systématique des informations

Les informations recueillies doivent être disponibles pour faciliter leur utilisation. Un système informatisé facilitera à la fois le codage et l'utilisation des informations recueillies, mais un système traditionnel de plans et de sections permettra également d'utiliser cette information, de façon moins souple cependant.

C) Caractérisation des échantillons

Pour compléter la base d'information permettant des prédictions de rendement minéralurgique, il faudra que le matériel servant à des essais minéralurgiques soit situé et caractérisé de façon rigoureuse dans le gisement, quant à sa lithologie, sa minéralogie, sa représentativité par rapport à une portion ou à l'ensemble du gisement. Ceci implique les étapes de contrôle géologique décrites aux sections 4.7 et 5.4.

D) Calcul des réserves/ Planification

Les informations acquises dans les étapes précédentes devront être utilisées et incorporées dans le calcul des réserves pour permettre des caractérisations et des prédictions appropriées. Ainsi, le calcul des réserves pourra comporter l'identification de types minéralurgiques appropriés comme champs additionnels d'information. La planification minière et les prédictions de production pourront incorporer ces facteurs.

E) Rétroaction des résultats de production

En dernière étape, il est important qu'il y ait une rétroaction des résultats de production et d'usinage vers la base de données du gisement. Cette information permettra d'affiner les prédictions de rendement minéralurgique. Une telle rétroaction dépendra des conditions minières. En effet, les limitations de la base d'information sont fréquentes dans une mine souterraine: parfois les chantiers qui alimentent l'usine sont multiples et la provenance exacte du minerai qui arrive à l'usine est difficile à établir. La présence de minerai de développement ajoute à ces difficultés, mais celles-ci n'excusent pas de négliger les différences entre les réserves/la planification et les résultats d'exploitation.

CHAPITRE X

LES ASPECTS ÉCONOMIQUES

10. LES ASPECTS ÉCONOMIQUES	247
10.1 PERSPECTIVES D'ÉVALUATION ÉCONOMIQUE	248
10.1.1 STADES D'ÉVALUATION ÉCONOMIQUE	248
10.1.2 DILUTION ET PERTES	248
10.1.3 DÉMARCHE D'ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DU PROJET	249
10.2 L'ANALYSE ÉCONOMIQUE	252
10.2.1 DÉFINITION DU MINÉRAI	252
10.2.2 ÉTATS FINANCIERS PRÉVISIONNELS	255
10.2.3 COÛTS D'INVESTISSEMENT	256
10.2.4 COMPTES D'EXPLOITATION	261
10.3 L'ÉVALUATION ÉCONOMIQUE ET FINANCIÈRE	266
10.3.1 RENTABILITÉ	266
10.3.2 STRUCTURE FINANCIÈRE	267
10.3.3 EFFICIENCE	267
10.4 L'ANALYSE DE SENSIBILITÉ	268

10. LES ASPECTS ÉCONOMIQUES

"...Les minéraux dans le sol n'ont pas de valeur explicite. Aucune valeur ne sera réalisable avant qu'ils aient été extraits, traités et livrés à un client. Par conséquent, l'économie de la définition du minerai ne peut être évaluée séparément de l'économie de tout le processus minier. De fait, c'est l'économie du processus minier qui établit la définition économique du minerai. ... La seule valeur immédiate (que les gisements) possèdent est le prix qu'une compagnie pourrait offrir pour l'opportunité de les exploiter. ... De façon plus réaliste, un gîte minéral devrait être considéré comme une opportunité de développement.

" K. F. Lane, The Economic Definition of Ore, p 6 ⁽³⁰⁾.

L'établissement des réserves minières d'un gisement se fait à partir d'une teneur de rentabilité et de teneurs de coupure dérivées des facteurs économiques s'appliquant aux données de la géologie et de l'ingénierie. Dans chaque cas, se sont les coûts de toutes les étapes du processus minier face aux prix des métaux, à la demande, aux investissements requis aux frais qu'ils impliquent, qui déterminent la rentabilité du projet. Les facteurs économiques ont donc une influence directe sur l'établissement des réserves minières d'un projet.

L'entrepreneur minier ne contrôle pas les prix des métaux / minéraux (ni les taux d'intérêt). Par contre, il peut et doit s'assurer, par des travaux de conception, de planification et d'évaluation économique appropriés, de contrôler le mieux possible la justesse des estimés des coûts de la réalisation du projet et de l'exploitation.

C'est à partir de ces chiffres que l'on fera l'estimation des réserves de minerai, du bilan prévisionnel de l'exploitation, de la valeur présente du projet, des différents rapports de rendement des investissements projetés. Ce seront ces chiffres qui justifieront (ou non) la décision de mise en production et permettront la réalisation du financement requis. Dans cette démarche, le Guide entend revoir les principes généraux, esquisser et proposer des procédures. L'application détaillée des méthodes financières déjà établies, telles l'établissement de la valeur présente, le calcul du taux de rendement ou les méthodes de simulation, n'entre pas dans le mandat du Guide.

30 "...Minerals in the ground have no explicit value. Not until they have been extracted, treated and delivered to a customer is any value realised. Therefore the economics of ore definition cannot be assessed separately from the economics of the total mining process. Indeed it is the economics of the mining process which determine the economic definition of ore."

10.1 PERSPECTIVES D'ÉVALUATION ÉCONOMIQUE

10.1.1 LES STADES D'ÉVALUATION ÉCONOMIQUE

L'évaluation économique se fait par des étapes qui correspondent aux stades d'évaluation des aspects d'ingénierie d'un projet de développement minéral. Au stade 4, l'évaluation économique est de caractère conceptuel et vise à situer l'intérêt de confirmer la présence d'un gisement minéral et ensuite d'en entreprendre la mise en valeur. Cette évaluation se fait à partir des perspectives conceptuelles d'ingénierie et d'économique, face aux informations et interprétations géologiques disponibles. Aux stades 5 et 6, l'évaluation économique devient graduellement quantitative, s'appuyant sur l'augmentation des connaissances dans les axes de la géologie et de l'ingénierie.

C'est au stade 7, celui des études économiques, et à l'étude de faisabilité du stade 8, que les aspects économiques d'un projet minier deviennent tout à fait quantitatifs. Ces aspects économiques dépendent, par définition, des coûts d'implantation et des coûts d'exploitation face aux revenus. Les revenus anticipés sont reliés directement à la teneur du minerai exploité et au rendement de l'exploitation, face à la demande des marchés et face aux prix des métaux. L'analyse économique relie et intègre tous les aspects d'un projet afin de lui attribuer une valeur.

10.1.2 DILUTION ET PERTES

La démarche du Guide s'axe sur l'identification des pertes et de la dilution à toutes les étapes de l'exploitation minière, dans le but d'augmenter l'efficacité de toutes les opérations successives. Jusqu'ici, la dilution et les pertes ont été étudiées en fonction de l'efficacité dans les différentes étapes de l'évaluation dans les axes de la géologie et de l'ingénierie. Cette efficacité est recherchée en vue de l'objectif d'extraction optimale de la ressource minérale. Finalement, cette efficacité s'évaluera par les paramètres économiques, mais en même temps il faut réaliser que les paramètres économiques sont une des principales causes d'incertitude et même d'erreur dans l'établissement des réserves minières.

Les difficultés d'évaluation des paramètres économiques, leurs variations dans le temps et le choix des paramètres appropriés pour appuyer les décisions, contribuent aux difficultés rencontrées dans l'évaluation des gisements. Mentionnons les variations à la baisse de la demande et des prix des métaux, les variations à la hausse des coûts et du loyer des argents investis. Ces variations modifient les situations et peuvent mener jusqu'à remettre en question les choix et orientations établis, les teneur repères, la réalisation des objectifs financiers et la possibilité de rencontrer les engagements contractuels. Dans cette perspective, le Guide souligne qu'il est particulièrement important de bien situer la démarche de l'évaluation économique des projets, si on veut optimiser les décisions.

10.1.3 LA DÉMARCHE D'ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DU PROJET

L'évaluation économique du gisement se fait à partir des réserves minières et les réserves minières sont établies à partir de repères économiques, puisque *le mot réserve, tel que défini, implique connaissance géologique appropriée, ingénierie établie, faisabilité et rentabilité*. Dans cette perspective, il faut voir qu'un bloc individuel de minéralisation ne doit être considéré comme du minerai que si l'extraction de ce bloc augmente la valeur du projet minier (ou de l'exploitation en cours). Cette relation étroite entre rentabilité et définition de la réserve implique un processus itératif d'évaluation par essais successifs dans le but d'optimiser les teneurs repères du gisement en fonction des paramètres économiques.

A) HYPOTHESES D'ÉVALUATION

Dans cette perspective, le Guide se propose d'explicitier les critères et les hypothèses de base sur lesquels s'appuieront les évaluations économiques et les décisions d'aménagement de projets miniers.

a) Politique d'évaluation globale

Une orientation suggérée aux paragraphes précédents serait d'utiliser l'*optimisation de la valeur présente* comme politique d'évaluation économique d'un gisement. Il y a lieu de regarder l'ensemble de cette question, les implications et les conséquences d'une telle orientation avant de l'endosser.

Le rendement optimum pourrait se voir dans l'extraction maximum d'un élément contenu dans un gisement, indépendamment des coûts. Cette situation s'observe rarement en dehors de situations d'urgence stratégique ou d'une gestion économique centralisée axée vers l'auto-suffisance. Dans une telle situation, il faudra quand même des critères de choix et de paliers minimum: comment établir la contribution positive qu'un bloc individuel devrait faire à l'objectif stratégique?

Le rendement optimum dans un contexte capitaliste se définit souvent en fonction de la recherche d'un *rendement maximum sur le capital investi* (ROI) ou d'une *valeur présente maximum*. Les perspectives de cette solution sont de caractère **court terme** (6 à 9 ans) dans le contexte des rendements élevés sur le loyer de l'argent qui sont recherchés, particulièrement depuis les derniers vingt ans. Dans un contexte de stricte rentabilité économique, c'est une solution attrayante, mais l'histoire récente ainsi que les analyses économiques ont montré que cette politique tend à l'épuisement des ressources naturelles, autant de celles qui sont renouvelables (comme les pêcheries ou la chasse aux baleines), que de celles qui sont considérées comme ressources non-renouvelables.

Le rendement optimum pourrait être défini dans une perspective long terme, celle du **développement durable**, en fonction d'**optimiser, de maximiser l'extraction du métal contenu dans le gisement, tout en maintenant la rentabilité** ⁽³¹⁾. C'est l'objectif de long terme que le gouvernement d'Afrique du Sud a recherché par les normes imposées aux compagnies pour les teneurs de coupure et de rentabilité, particulièrement durant les périodes de hausses des prix. Une telle politique, s'appuyant sur l'importance des mines aurifères dans ce pays, s'appliquerait mal dans notre contexte d'économie libre et d'exploitations de divers formats et types.

b) Caractéristiques des gisements miniers

Il faut situer des orientations de la politique financière d'exploitation dans les perspectives et caractéristiques du développement minéral:

- caractère limité du gisement (dans la plupart des cas),
- dimensions, limites ultimes et autres paramètres du gisement incomplètement connues, avec possibilités de découvertes et développements additionnels;
- imprécision des connaissances d'ingénierie du gisement et du projet minier et risques de pertes reliés à ce facteur;
- caractère limité (financièrement ou physiquement) d'une partie au moins des installations et des ressources nécessaires à l'extraction du gisement, ce qui demande efficacité malgré les incertitudes;
- variations des prix des métaux sur les marchés et variation des coûts de production selon le stade d'évolution de l'exploitation minière;
- ambiguïté des situations de hausses des prix et des choix de maximiser le rendement à court terme par l'extraction de teneurs plus riches ou le rendement à long terme et l'extraction maximale par un abaissement des teneurs.

Le Guide suggère, étant donné la complexité des perspectives, l'utilisation de la valeur présente maximale comme politique d'évaluation d'un gisement. Cependant, les décisions prises par les administrateurs et les dirigeants des sociétés devront s'appuyer sur des perspectives plus larges que la stricte maximisation à court terme de la valeur présente.

³¹ "... providing a fair and attractive return on capital..."

B) Les âges d'une exploitation minière

En s'inspirant des stades décrits par Taylor, 1972, le Guide définit cinq âges ou paliers distincts dans la vie d'une exploitation minière, le stade 10 de l'échelle utilisée par le Guide. Ces paliers, énumérés au Tableau 10-1, sont caractérisés par des contextes financiers différents et ils servent à illustrer l'évolution des conditions économiques qui régissent une exploitation minière.

Tableau 10-1

LES ÂGES D'UNE EXPLOITATION MINIÈRE

- STADE 10. A Les premières années d'exploitation:**
période de rodage;
remboursement de la dette;
début des profits et de la taxation.
- 10. B Les années adultes:**
profits et dividendes importants;
expansion à des teneurs plus basses;
ré-investissements.
- 10. C Les années de maturité:**
production stable, réserves (et teneurs) décroissantes.
- 10. D Les années de déclin:**
extinction des réserves, période de récupération à des teneurs encore plus basses permise par une réduction des frais généraux, en particulier ceux de développement.
- 10. E La fermeture:**
arrêt de l'exploitation, démembrement, liquidation des actifs.
-
-

Une telle gamme de conditions financières pendant l'exploitation implique que les teneurs repères qui guident l'établissement des réserves et le contrôle de la production varieront en fonction des conditions financières différentes de ces diverses étapes. Tenir compte de ces variations dans la planification et les états financiers prévisionnels demandera l'utilisation de méthodes itératives appuyées sur des logiciels appropriés sur ordinateurs.

10.2 L'ANALYSE ÉCONOMIQUE

L'analyse économique comporte deux phases reliées mais distinctes: l'évaluation des teneurs repères, teneurs coupures/teneurs marginales et l'analyse financière du projet minier en vue d'en établir la valeur actualisée à partir de divers critères d'investissement.

10.2.1 LA DÉFINITION DU MINERAI

Le Guide a déjà défini, dans la section 7.1.3, les teneurs coupures, les teneurs marginales et les teneurs de rentabilité. Rappelons les définitions fondamentales de Mortimer (1950):

La teneur moyenne exploitée doit fournir un certain profit par tonne usinée: la teneur qui correspond au seuil (ou minimum) de profit acceptable, c'est la teneur de rentabilité;...La teneur minimale exploitée doit faire ses frais: c'est la teneur marginale, ou teneur de coupure.

Pour l'évaluation des teneurs repères, le Guide s'appuie sur les travaux de Taylor (1972) et de Lane (1988) déjà cités. Le livre récent de Lane "The Economic Definition of Ore" fait étape pour la définition du minerai. Le Guide veut intégrer les aspects économiques aux aspects de géologie et d'ingénierie déjà traités. Les teneurs repères sont essentielles à la définition du minerai. Le Guide recommande de garder aux termes réserve et minerai une signification stricte de faisabilité géologique, d'ingénierie et d'économique, dans la continuité des réglementations des valeurs mobilières ((Tome II, chapitres 7 et 8 et Tome III, chapitre 3).

A) La teneur de rentabilité

La **teneur de rentabilité** d'une exploitation minière est établie en bonifiant la teneur marginale d'une valeur au moins égale au rendement des taux d'emprunts à long terme, plus un rendement supplémentaire appelé prime de risque. La prime de risque a pour but de compenser un investissement risqué par rapport à un investissement moins hasardeux: c'est le coût d'option (opportunity cost). Donc, la teneur de rentabilité d'un gisement ou d'un bloc minéralisé est la teneur seuil où la valeur réelle des substances minéralisées couvre le prix de revient de la production vendue, augmenté de la valeur du coût d'option. C'est la teneur minimum d'exploitation déterminée d'après le coût d'option, le rendement minimum désiré. Le tableau 10-2 présente le calcul de la teneur globale de rentabilité économique. A chaque teneur de rentabilité est associée une teneur marginale qui est nécessaire pour l'établissement de la teneur moyenne d'un gisement ou d'une zone minéralisée de plus petites dimensions.

TABLEAU 10-2

TENEUR GLOBALE DE RENTABILITÉ ÉCONOMIQUE**DONNÉES:**

PRODUCTION ANNUELLE (tonnes)	PR
COÛTS VARIABLES: (dollars / tonne)	CV
Forage	
Développement	
Extraction	
Traitement	
COÛTS FIXES ANNUELS:	CF
Services	
Administration	
COÛT D'OPTION (dollars)	CO
DILUTION MINIÈRE (décimale)	DM
RÉCUPÉRATION MINIÈRE (décimale)	RM
RÉCUPÉRATION AU TRAITEMENT (décimale)	RT
PRIX DU MÉTAL (dollars/unité)	PM

TENEUR DE RENTABILITÉ ÉCONOMIQUE =

(unités / tonne)

$$\frac{CV + ((CF + CO)/PR)}{PM \times RM \times RT / (1 + DM)}$$

B) Teneur de coupure / teneur marginale

Le Guide rappelle la définition de Taylor, 1972, qui fait de la teneur de coupure (ou teneur seuil) un concept général, un repère essentiel à toute évaluation de gisement: "*La teneur de coupure est toute teneur qui est utilisée, à partir de n'importe quel critère approprié, afin de distinguer entre deux alternatives de décision et d'action*".

C) L'évolution des teneurs

Aux premiers stades des évaluations, on utilisera des teneurs de coupures d'ordre conceptuel ou basées sur des considérations géostatistiques, ou sur des gisements de type ou d'allure similaire, en fonction de choisir ou exclure des échantillons, des intersections ou des blocs. Aux stades plus avancés de l'évaluation, lorsque les données d'ingénierie et d'économique le permettent, la teneur de coupure sera la TENEUR MARGINALE (breakeven). La teneur marginale est celle pour laquelle le *revenu recouvrable est équilibré avec les coûts attribués à partir du point de décision*.

Lors de l'exploitation, la teneur marginale globale variera dans le temps selon les charges financières qui caractérisent chaque âge de l'exploitation. Ainsi, au moment de l'étude de faisabilité, la teneur marginale d'un gisement ou d'une zone minéralisée est celle pour laquelle la valeur recouvrée des substances minéralisées vendues est égale aux coûts de développement, d'extraction, de traitement et d'administration. C'est alors une teneur de coupure globale qui sert à établir la limite concrète des zones ou des chantiers pour l'établissement des réserves et le calcul de la faisabilité d'ensemble. Pour qu'il y ait rentabilité, pour que la minéralisation devienne du minerai, la teneur de coupure doit être appropriée pour permettre que la teneur de la zone sous étude soit plus élevée que la teneur de rentabilité.

Dans le détail de l'exploitation, des teneurs de coupure "ad hoc", plus ponctuelles, sont requises à divers points, pour justifier des décisions à partir d'un choix entre diverses options, en *fonction des coûts et des revenus escomptés en aval*. C'est le cas des blocs ou tonnages minéralisés à faible teneur dont les frais amont sont déjà assumés. A la mine, il s'agit de décider d'extraire ou de laisser en place/envoyer aux rejets un bloc donné. A l'usine, il faut décider soit de traiter, soit de laisser aller aux piles de marginal. Ce sont ces points de décision et situations que, dans la tradition minière française, les termes "carreau mine" et "carreau laverie" décrivent. L'expérience minière montre cependant le danger de ces procédures d'exception: si elles deviennent trop nombreuses la teneur moyenne exploitée sera affectée à la baisse, ce qui fausse les prédictions. **Dans un nouveau projet minier, il serait trompeur et dangereux que la décision de la réalisation dépende de tels raffinements!**

D) Calcul des teneurs de coupure

Les teneurs de coupure globales, que l'on applique aux réserves minières et à l'exploitation, sont dérivées de la teneur de rentabilité dont la formule a été donnée à la section précédente. Pour établir la teneur de coupure appropriée à un gisement ou un chantier donné, la distribution statistique des teneurs, l'interprétation graphique de la géologie et des minéralisations et la distribution des blocs krigés seront mis à contribution.

Ces évaluations sont ponctuelles dans le temps, au moment de l'étude de faisabilité ou de la planification moyen terme d'une exploitation. Les variations des paramètres financiers durant la vie d'une exploitation obligent à plus de sophistication si on veut optimiser le rendement.

Lane, 1988, propose la formule suivante pour exprimer la stratégie d'optimiser la valeur présente d'une exploitation basée sur une ressource limitée (R). Il s'agira de maximiser la valeur de l'expression:

$$c - \tau(\delta V^* - dV^*/dT) = c - F\tau \dots$$

c est le flux monétaire résultant d'une unité de ressource,

δ est le coût du Capital (100 δ %),

τ est le temps requis pour traiter cette unité,

V^* est la valeur présente maximum à ce stade,

T le moment considéré,

F le coût d'opportunité,

L'application de telles procédures d'évaluation demandera des procédures itératives assez complexes et l'usage de programmes sur ordinateurs. Il s'agit en pratique d'appliquer une véritable politique d'optimisation de la rentabilité, par l'application de teneurs de coupure (marginales) planifiées et adaptées aux conditions financières aux divers âges d'une exploitation minière. Peu de compagnies minières ont atteint ce niveau de sophistication. Pour les projets au stade de la décision, peu ont l'information suffisante pour justifier de pousser très loin l'application de cette politique. Cependant, pour les compagnies comme pour l'être humain, les modèles de comportement acquis au début de la vie persistent souvent bien longtemps après qu'ils soient devenus périmés: ceci doit encourager à utiliser des modèles plus sophistiqués que le plus bas commun dénominateur des besoins.

10.2.2 LES ÉTATS FINANCIERS PRÉVISIONNELS

L'évaluation économique de l'ensemble du projet minier se fera à partir des états financiers prévisionnels. Ces états financiers, qui s'appuient sur les données des axes de la

géologie et de l'ingénierie, établissent les flux monétaires du projet pendant la période projetée d'exploitation et permettent d'en évaluer la rentabilité. La **valeur présente** du projet sera établie par l'application de taux d'escompte appropriés aux revenus anticipés pour le projet dans les années futures et en faisant le total des montants ainsi obtenus.

L'analyse financière de base est généralement établie en dollars constants au début du projet, un financement intégral par fonds propres étant supposé. Le taux de rentabilité indique la viabilité du projet dans les conditions présentes.

Pour être véridiques, les états financiers prévisionnels doivent être établis d'un point de vue autant opérationnel que financier. Autrement dit, les projections des dépenses annuelles d'exploitation doivent représenter les coûts réels d'extraction et de traitement du minerai d'un lieu défini du gisement, selon des méthodes d'extraction et de traitement adéquatement déterminées. Les plans d'exploitation détaillés doivent avoir été établis pour chaque secteur et chantier de la mine projetée; ces plans et études doivent être assez poussés pour déceler la *non-rentabilité* de certains blocs de minerai qui pourront être exclus des chantiers projetés. **a valeur de l'étude de faisabilité et l'à-propos de la décision de mise en production du projet minier, ainsi que le succès éventuel du projet, dépendent de la qualité de ce travail.**

10.2.3 LES COÛTS D'INVESTISSEMENT

L'établissement du bilan prévisionnel de l'exploitation exige l'établissement des coûts d'investissement. Le Guide recommande d'utiliser les différentes catégories définies par la "Loi concernant les droits sur les mines" et par les lois fédérale et provinciale sur l'imposition sur des revenus, afin de faciliter les calculs des droits miniers et des impôts.

Les coûts d'investissement sont définis comme les "frais d'immobilisation pour la mise en valeur d'un projet minier destiné à produire et à vendre ou encore à utiliser une quantité déterminée de substances minérales". La distribution des coûts dans le temps doit être réalisée à partir d'un échancier des principaux investissements.

Les taxes sur les matériaux de constructions doivent être incluses s'il y a lieu. Les taxes fédérales et provinciales sur l'équipement d'extraction et de traitement sont exclues.

Généralement, pour le service de génie et de gérance du projet d'aménagement minier, les coûts de l'investissement initial doivent être majorés d'environ 12%.

A) Exploration et mise en valeur

Il est évident que les **dépenses déjà encourues et accumulées** pour l'exploration et la mise en valeur du gisement avant l'étude de faisabilité, ne sont pas comptabilisées dans les coûts d'investissement, mais doivent être incluses dans le calcul des droits miniers et des impôts sur le revenu.

Il est important que les frais d'exploration et de mise en valeur qui sont **projetés dans les coûts d'investissement**, soient classés selon le lieu ou le mode d'exploitation choisi afin que soit facilité le calcul des droits miniers et des impôts sur le revenu. Les frais d'exploration et de mise en valeur du projet principal d'une exploitation minière souterraine sont sujets à des allocations additionnelles dans le calcul des droits miniers. De même, les frais d'exploration sur des terrains s'appliquant à d'autres projets que le projet principal sont sujets à des allocations additionnelles dans le calcul des droits miniers.

B) La propriété minière

Les coûts projetés par un entrepreneur minier pour un déboursé ou pour des dépenses d'exploration, de mise en valeur et de développement, afin d'acquérir une participation quelconque au projet, ne sont pas nécessairement déductibles dans le calcul des droits miniers ou de l'impôt provincial sur le revenu. Ce sujet très complexe exige que les stratégies et les décisions soient appuyées sur des avis experts.

C) Les immobilisations

On définit les immobilisations comme "les biens matériels d'une durée relativement longue, utilisés par une entreprise dans le cadre de ses opérations". Le coût d'une immobilisation comprend tous les frais nécessaires à son acquisition et à sa mise en état afin que les besoins de l'entreprise soient satisfaits.

L'infrastructure, les bâtiments et l'équipement doivent faire l'objet de comptes distincts car ils seront sujets à des taux d'amortissements différents.

La valeur de l'infrastructure, des bâtiments et des équipements d'une entreprise minière dépend de la durée de son exploitation, selon le taux de dépréciation établi. En raison de sa nature et souvent de son isolement géographique, l'entreprise minière qui voit ses opérations se terminer plus tôt que prévu, subira une perte appréciable sur ses immobilisations; une partie de cette perte peut être récupérable contre l'impôt payable ou déjà payé.

D) Le fonds de roulement

En plus de l'investissement pour l'exploration, pour la mise en valeur, pour les bâtiments et l'équipement, une somme additionnelle, appelée communément **fonds de roulement** est nécessaire pour que le fonctionnement du complexe minier sur une base productive soit assuré. Le fonds de roulement est la liquidité dont une entreprise a besoin pour ses opérations quotidiennes afin de rémunérer ses employés et de payer toute autre dépense courante pendant la période qui s'étend du départ de l'extraction du minerai jusqu'au moment de l'encaissement des revenus de la vente du métal. Le fonds de roulement peut être évalué comme suit:

- les revenus de cette période;
- moins le bénéfice de cette période;
- moins l'amortissement de cette période;

Alternativement, le fonds de roulement nécessaire pourrait être défini comme "tous les frais effectivement payés durant la période cible qui doit être au minimum de trois mois". Cette méthode d'évaluation est suffisante pour déterminer le fonds de roulement d'un projet. Par contre, ce fonds de roulement peut être modifié durant la période de production. Les ratios du fonds de roulement et de trésorerie pourront servir de guides pour l'analyse de la capacité de la société à régler ses dettes à court terme au fur à mesure de leur échéance:

$$\text{RATIO DU FONDS DE ROULEMENT} = \frac{\text{ACTIF A COURT TERME}}{\text{PASSIF A COURT TERME}}$$

Un ratio de 2 est généralement considéré comme très acceptable pour les mines d'or n'ayant pas de provision pour créances douteuses. La trésorerie doit être suffisante pour rencontrer les besoins de fonds de roulement de l'entreprise projetée. Le ratio de trésorerie est suggéré pour vérifier ces besoins:

$$\text{RATIO DE TRÉSORERIE} = \frac{\text{LIQUIDITÉ} + \text{COMPTES CLIENTS}}{\text{PASSIF A COURT TERME}}$$

Un ratio de 1 est généralement considéré très acceptable pour les mines d'or à cause de la solvabilité des clients.

Tableau 10-3
COÛTS D'INVESTISSEMENTS

1. EXPLORATION:	Autres projets Projet souterrain Projet en surface
2. MISE EN VALEUR	Autres projets Projet souterrain Projet en surface
4. PROPRIÉTÉ MINIÈRE:	Coûts de la propriété
5. INFRASTRUCTURE:	Route, aménagements résidentiels Ligne électrique et sous-station Services sanitaires Installations connexes Transport et communications
6. ADMINISTRATION:	Bâtiments Équipements
7. SERVICES:	Bâtiments Équipements
8. EXTRACTION:	Bâtiments et équipements stationnaires Équipements mobiles Développement de la mine Installations connexes
9. TRAITEMENT:	Bâtiments Équipements Installations connexes
10. FONDS DE ROULEMENT	
11. INVENTAIRE	
12. ADDITION ET RENOUVELLEMENT DES ACTIFS	
13. ENVIRONNEMENT	

NOTE:

Les frais de démarrage ne sont pas comptabilisés dans les investissements.

E) Les stocks

Dans une exploitation aurifère, les stocks sont constitués exclusivement des approvisionnements en main pour que les délais de livraison soient évités et que la marche continue de l'exploitation soit assurée. Le niveau des stocks requis peut varier grandement selon sa localisation géographique de l'exploitation et selon les délais de livraison. Le niveau d'efficacité d'une bonne gestion peut être déterminé par le taux de rotation des stocks par rapport aux taux d'autres compagnies comparables:

$$\text{TAUX DE ROTATION} = \frac{\text{COÛT ANNUEL DES APPROVISIONNEMENTS}}{\text{STOCK MOYEN}}$$

F) Le renouvellement

Les coûts de renouvellement touchent essentiellement le remplacement des équipements stationnaires ou mobiles dépréciés normalement suite à l'utilisation.

G) La protection de l'environnement

Les lois et règlements existants obligent la compagnie minière à prévoir dans ses frais d'implantation les mesures nécessaires pour la protection de l'environnement durant les opérations normales. Il faudra aussi prévoir établir un fonds de réserve pour les réaménagements requis à la fin de l'opération. Un tel fonds de réserve devra être suffisant pour permettre également de faire face aux accidents ou aux circonstances imprévues qui mettraient en danger la qualité de l'environnement naturel.

H) Le démarrage

La durée de la période de démarrage est fondée sur l'expérience de complexes similaires. Normalement, une période minimum de 6 mois est nécessaire avant d'atteindre la production maximale planifiée. Ce manque à gagner durant la première année de production est causé par les retards, la formation du personnel et par le rodage des nouvelles installations. Durant les périodes d'activité intense de l'industrie, cette période peut être rallongée par la rareté du personnel qualifié. Ces frais supplémentaires pourront être chargés aux dépenses de capitalisation s'il les pertes deviennent plus importantes à cause de délais plus longs. **Sous-estimer la durée de la période de rodage peut causer des problèmes financiers et logistiques importants et devenir un facteur de risque majeur.**

10.2.4 LES COMPTES D'EXPLOITATION

Les comptes d'exploitation prévisionnels, ou états des résultats, présentent les revenus d'une entreprise pour une période donnée (normalement 12 mois). Dans le cas de l'étude d'un projet les comptes d'exploitation sont la base du bilan prévisionnel qui servira à établir la rentabilité du projet.

Schématiquement, les comptes d'exploitation contiennent les données suivantes:

$$\text{REVENUS} - \text{DÉPENSES} = \text{PROFIT NET}$$

TABLEAU 10-4
LES COMPTES D'EXPLOITATION PRÉVISIONNELS

REVENUS:	Revenus bruts Frais de réalisation Revenus nets
COÛTS VARIABLES:	Forage de probation et d'exploration Développement Extraction Traitement Environnement
COÛTS FIXES:	Services Géologie et ingénierie Frais administratifs Frais siège social Taxes Redevances Amortissement Fonds pour l'environnement
BÉNÉFICE D'EXPLOITATION	
FRAIS FINANCIER	
IMPÔTS (fédéral et provincial)	
DROITS MINIERS	
BÉNÉFICE NET	

A) Les revenus

C'est la valeur brute de la production annuelle qui constitue les revenus d'une entreprise minière. Dans les termes des lois fiscales, il s'agit de *"la valeur réelle des substances minérales vendues ou utilisées par un exploitant pendant un exercice financier au prix du marché à l'époque de leur vente ou de leur usage ou la valeur réelle des substances minérales expédiées ou utilisées par un exploitant pendant un exercice financier au prix du marché à l'époque de leur expédition ou de leur usage, le tout selon la méthode régulièrement employée par l'exploitant."* (Loi concernant les droits sur les mines). Normalement, ces revenus sont comptabilisés sur la base du revenu net après raffinage (N.S.R.), déductions faites des frais de vente, transport, douanes. Les frais de raffinage peuvent être comptabilisés différemment: les résultats sont similaires.

Les nombreuses fluctuations du prix de l'or sont attribuables aux phénomènes macro-économiques et aux mouvements des marchés. C'est pourquoi plusieurs analyses de sensibilité doivent être menées en fonction du prix de l'or selon les situations économiques projetées. Certaines compagnies réussissent à profiter de façon importante des variations des marchés par des politiques de préventes, d'emprunts d'or et autres. Ces stratégies ponctuelles et opératoires d'optimisation ne peuvent évidemment être invoquées dans le cadre d'une étude de faisabilité. La possibilité de leur utilisation serait plutôt incorporée dans les facteurs positifs de risque sur lesquels s'appuiera la direction d'une compagnie pour prendre une décision.

B) Dépenses/bénéfices d'exploitation

Pour fins d'analyse, les dépenses d'exploitation sont divisées en coûts variables et en coûts fixes:

les **coûts variables** sont des coûts qui augmentent en fonction de la production (le tonnage). Ils comprennent la main-d'oeuvre, l'électricité, les explosifs, l'équipement et le matériel nécessaires aux opérations ainsi que le matériel et les pièces de rechange destinés à l'entretien.

les **coûts fixes** comprennent les services, l'ingénierie, les frais administratifs et l'amortissement.

En déduisant les coûts variables et les coûts fixes des revenus, on obtient le **bénéfice d'exploitation**. Il indique le véritable niveau de rentabilité des activités principales d'une entreprise, avant la déduction des frais financiers, des impôts et des droits miniers. Des analyses de sensibilité doivent être menées afin de mesurer les effets des variations des coûts d'exploitation.

C) Les taxes

Les coûts considérables que représentent la mise en exploitation d'un dépôt minier et les aléas du marché, causés par les variations du prix du métal, augmentent les risques des entrepreneurs miniers. Les modalités de taxation des compagnies minières, autant au niveau fédéral qu'au niveau provincial, peuvent compenser une partie des risques des nouveaux projets. Parfois, l'attrait de ces bénéfices fiscaux pourra déformer le processus de décision d'implantation.

Les compagnies minières canadiennes en exploitation sont sujettes à trois sources de taxations:

- a) impôt fédéral sur le revenu corporatif;
- b) impôt provincial sur le revenu corporatif;
- c) droits miniers ou redevances au niveau provincial;

Le tableau 10-5 présente un sommaire de l'imposition fédérale et provinciale au moment de la rédaction du Guide. Il faudra s'assurer des données en vigueur au moment de l'évaluation. Le tableau 10-6 donne un sommaire des droits miniers au Québec.

Tableau 10-5
SOMMAIRE DE L'IMPOSITION FÉDÉRALE ET PROVINCIALE
AU NIVEAU CORPORATIF (aout 1988)

TAUX DE L'IMPÔT FÉDÉRAL 28 %

TAUX DE L'IMPÔT PROVINCIAL 5.9%

DÉDUCTIONS:

Dépréciation (nouvelles installations) 100 %

Dépréciation (autres actifs) 25 %

Allocation de ressources
(du profit avant frais financiers) 25 %

Allocation d'exploration 100 %

Coût de la mine et du terrain minier 30 %
(de la valeur restante; non déductible au provincial)

Allocation de développement 100 %

NON DÉDUCTIBLES:

Redevances

Droits miniers

Tableau 10-6
SOMMAIRE DES DROITS MINIERS DU QUÉBEC ⁽³²⁾

	<u>LIMITE</u>	<u>ANNUEL</u>
TAUX DES DROITS	18 % du profit	18 %
CRÉDIT	90,000 \$ cumulatif sur 3 ans	
DÉDUCTIONS:		
Dépréciation	100 % des biens	30 %
Développement	100 % du développement	100 %
Investissement	33 % de l'investissement Maximum: 33 % du profit	33 %
Traitement	Minimum: 15 % du profit Maximum: 65 % du profit	8 % * 15 % **
NON DÉDUCTIBLES:		
Frais d'administration au niveau corporatif		
Frais de participation		
Amortissement de la mine		
Amortissement du terrain minier		
Redevances		
Frais de financement		
Taxes et impôts		
Dividendes		
Réserves et provisions		
Dépenses couvertes par subsides		
* première transformation	** deuxième transformation	

32 A jour au 25 janvier 1989.

10.3 L'ÉVALUATION ÉCONOMIQUE ET FINANCIÈRE

L'analyse des états financiers prévisionnels d'un projet permet, au moyen de ratios et de coefficients, d'évaluer les rendements dans différents domaines et de les comparer aux autres mines aurifères en exploitation dont les activités sont comparables et surtout de voir s'ils rencontrent les objectifs financiers du promoteur du projet.

L'interprétation et l'analyse du contenu des états financiers prévisionnels sont divisées en quatre catégories:

les liquidités servent à évaluer la capacité d'un projet à faire face à ses obligations à court terme durant son exploitation. L'interprétation et l'analyse des liquidités ont été définies dans la section des coûts d'investissement, le fonds de roulement et les stocks et ne seront donc pas discutées ici;

la rentabilité sert à évaluer la viabilité d'un projet en fonction de ses revenus, son bénéfice et ses investissements;

la structure financière sert à évaluer l'endettement et les fonds propres en fonction des capitaux du projet;

l'efficience sert à évaluer la productivité projetée durant l'exploitation.

10.3.1 LA RENTABILITÉ

La rentabilité est l'objectif le plus important dans l'analyse financière d'un projet. La rentabilité mesure l'efficacité globale en établissant des rapports entre le profit net d'une part et, d'autre part, le revenu, l'investissement et les fonds propres (avoir des actionnaires).

$$\text{MARGE NETTE} = \frac{\text{PROFIT NET} \times 100}{\text{REVENU}}$$

Ce rapport (ratio) indique le bénéfice net pour chaque dollar de revenu. En comparant ce ratio à d'autres exploitations aurifères, la rentabilité du projet peut être mieux jugée.

$$\text{RENTABILITÉ DE L'ACTIF} = \frac{\text{BÉNÉFICE NET}}{\text{ACTIF}}$$

Ce ratio indique le bénéfice net pour chaque dollar de l'actif. De même, la rentabilité du projet peut être mieux jugée en la comparant à d'autres exploitations aurifères.

$$\text{RENTABILITÉ DES FONDS PROPRES} = \frac{\text{BÉNÉFICE NET}}{\text{FONDS PROPRES}}$$

Ce ratio indique le bénéfice net pour chaque dollar de fonds propre investi (avoir des actionnaires).

10.3.2 LA STRUCTURE FINANCIÈRE

La structure financière est très importante pour évaluer la situation financière d'un projet. Elle indique la provenance des capitaux d'un projet, soit au moyen d'emprunts, soit par l'émission d'actions ordinaires ou privilégiées. Le ratio de structure financière est important parce qu'il indique la proportion des différents titres émis par l'entreprise:

OBLIGATIONS	A %
ACTIONS PRIVILÉGIÉES	B %
ACTIONS ORDINAIRES	C %
TOTAL	100 %

En général, les obligations ne doivent pas représenter plus de 30% de la structure du capital d'une entreprise et le pourcentage des actions ordinaires doit être égal au pourcentage des obligations et des actions privilégiées. Plus les bénéfices d'une entreprise sont stables, plus son ratio d'endettement peut être élevé.

L'établissement de la structure financière d'un projet est un élément très important de la faisabilité d'un projet. La conception et la réalisation d'une structure financière appropriée à la nature d'un projet, aux conditions économiques, financières et sociales qui prévalent dans un environnement donné peut être autant ou plus importante que la réalisation des aspects de géologie et d'ingénierie du projet. C'est aussi l'un des éléments importants du risque de la réalisation d'un projet.

10.3.3 L'EFFICIENCE

Le ratio d'efficacité sert à évaluer le degré de productivité de l'entreprise en fonction du capital investi (capitaux propres):

$$\text{RENDEMENT DU CAPITAL} = \frac{\text{BÉNÉFICE NET} + \text{INTÉRÊTS}}{\text{AVOIR DES ACTIONNAIRES}} \times 100$$

10.4 L'ANALYSE DE SENSIBILITÉ

La rentabilité d'une exploitation est influencée directement par les variations du prix du métal, des frais d'investissement et d'exploitation et est aussi affectée par les phénomènes macro-économiques. C'est pourquoi l'analyse économique et financière doit comporter diverses analyses de sensibilité, menées dans le but de vérifier l'effet de variations conjoncturelles ou stratégiques, telles:

- les coûts d'investissement;
- les frais d'exploitation;
- les prix de l'or et des autres métaux recouvrables;
- le taux d'inflation;
- le taux d'échange du dollar canadien;
- les taux d'intérêt;
- les subventions;
- les fonds propres;
- les emprunts;
- les facteurs d'offre et de demande;
- autres variations.

Le chapitre suivant du Guide, Faisabilité et Décision, reprend ce sujet.

CHAPITRE XI

L'ÉTUDE DE FAISABILITÉ

ET LA DÉCISION

Contenu

11. L'ÉTUDE DE FAISABILITÉ ET LA DÉCISION	271
11.1 LE BUT DE L'ÉTUDE DE FAISABILITÉ	271
11.2 LE CONTENU DE L'ÉTUDE DE FAISABILITÉ	273
11.2.1 ASPECTS GÉOLOGIQUES	273
11.2.2 INGÉNIERIE DU PROJET	274
11.2.3 ÉCONOMIQUE	275
11.2.4 ASPECTS SOCIO-POLITIQUES	275
11.2.5 ÉTUDE DE SENSIBILITÉ	275
11.2.6 RECOMMANDATIONS	277
11.3 LE RISQUE	277
11.4 LA DÉCISION	278

11. L'ÉTUDE DE FAISABILITÉ ET LA DÉCISION

L'étude de faisabilité finale du Stade 8 constituera le BILAN de l'ensemble des informations, des facteurs et des éléments requis pour l'implantation de la mine projetée. Elle comprendra donc nombre d'éléments qui, de par leur nature et leur complexité, dépassent le cadre du Guide d'évaluation des gisements d'or, mais qui doivent être présents dans le bilan final que constituera cette étude.

11.1 LE BUT DE L'ÉTUDE DE FAISABILITÉ

L'étude de faisabilité a pour fonction de vérifier (audit) toutes les études sur lesquelles s'appuie le projet d'implantation d'une exploitation minière et de faire le bilan du dossier. Le but de ce bilan est d'établir si le projet justifie un investissement bancaire dans un projet de caractère industriel (par opposition au caractère d'investissement de risque des stades de découverte et de mise en valeur du gisement).

L'étude de faisabilité devra donc intégrer toutes les études appropriées; les chapitres précédents tracé un panorama des aspects géologiques, techniques et économiques (directs). L'étude de faisabilité, pour rencontrer son objectif et justifier (s'il y a lieu) la décision positive d'implantation, doit donc tenir compte de tous les éléments de risque que comporte le projet. Il faudra également inclure dans l'étude de faisabilité les aspects environnementaux et leurs coûts (ce qui dépasse le cadre de ce Guide), ainsi que les aspects et coûts socio-politiques susceptibles d'influencer la faisabilité ou la rentabilité du projet.

Une telle appréciation requiert une évaluation basée sur des critères détaillés dans tous les axes de connaissance qui touchent le projet à réaliser. C'est la seule façon de minimiser les risques de frais imprévus et accrus et d'erreurs techniques qui nuiraient à l'aménagement du projet ou encore changeraient les conditions et la rentabilité de l'exploitation projetée. C'est la différence majeure entre l'étude de faisabilité du stade 8 et les études préliminaires de faisabilité qui sont exécutées à la fin de chacun des programmes de travail et/ou de chacun des stades ou qui ont précédé le stade 8.

Le texte déjà cité du Guide "Underground Metal Mining", commandité par CANMET, est un exemple type de procédures d'estimations adaptées aux stades préliminaires d'évaluation (stades 4 et 5) et c'était le but recherché par ses commanditaires. Par contre les méthodes d'estimation de ce type ne permettent pas d'atteindre, dans la plupart des cas, la précision requise pour une décision de mise en production, mais plusieurs s'en contentent.

C'est dans ce contexte que l'on pourrait situer des observations du Rapport du Comité Conjoint de l'Ordre des ingénieurs du Québec et de l'Association professionnelle des géologues et des géophysiciens du Québec⁸⁵, concernant des lacunes de certaines études de faisabilité qui ont pour but d'appuyer des décisions d'investissements:

"Dans une optique d'économie court terme, on se contente de travaux de conception de caractère préliminaire, qui laissent une large marge d'erreur possible dans les estimés des coûts du projet minier envisagé. Cette philosophie de travail pourrait s'exprimer en ces termes: ne pas dépenser des fonds pour faire le 'design' détaillé d'un projet dont la réalisation n'a pas encore été décidée"

.....Dans l'ère de complexité technique et financière, incluant l'inflation que nous vivons depuis 1973, l'expérience est que l'on sous-évalue les coûts éventuels de réalisation d'un projet beaucoup plus souvent qu'on les surévalue.

.. cette incertitude s'ajoutant aux aléas géologiques présents dans la définition et l'estimation des réserves des gisements, il n'est plus possible dans la grande majorité des cas d'évaluer les coûts de réalisation d'un projet à + / - 10 % à partir d'un ~design~ préliminaire, comme ce fût déjà le cas dans des dossiers moins complexes. La faisabilité et la rentabilité ainsi évaluées pour le projet sont entachées de la même marge d'incertitude que les calculs sur lesquels elles s'appuient.

On peut en arriver ainsi à fausser le processus de décision, puisque le dossier ainsi dressé pourrait indiquer de façon erronée la rentabilité d'un projet. Une organisation peut alors être amenée, à partir de cette information incomplète, à prendre une décision et un engagement corporatif et financier sur des données dont la fiabilité est incertaine et souvent trop faible.

Ces commentaires recourent ceux de Grace (1986), Knoll (1989) et de Clow (1990), cités en section 3.3. De nombreux exemples récents confirment le danger des attitudes décrites lorsqu'il s'agit de décider d'un investissement qui doit être rentable. Autant il serait stérile d'utiliser des critères trop exigeants pour les évaluations faites aux stades initiaux des projets, où l'essentiel est de vérifier le potentiel de découverte minérale et de mise en valeur d'un gisement, autant l'évaluation qui précède la prise de décision doit s'appuyer sur des données et des critères qui respectent le caractère de cette décision. Souvent, les intervenants en exploration n'ont pas l'expérience requise pour faire face aux conditions de ces nouvelles étapes et aux décisions qu'elles amènent.

Les méthodes d'estimations préliminaires décrites au guide "Underground Metal Mining" publié par CANMET, sont appropriées aux stades de développement d'un projet, avec

des marges d'erreur à la hausse pouvant aller à 40% ou plus. Des logiciels d'évaluation au stade de la pré faisabilité ont également été développés tel celui présenté par Nagle⁸⁶ (1988) qui vise une marge d'erreur de +/- 30%. De telles procédures sont acceptable pour une étude préliminaire de faisabilité, mais tout à fait insuffisant pour une décision de caractère commercial. C'est pourquoi les travaux de conceptions au stade de la faisabilité doivent être complétés par la planification détaillée requise pour assurer une marge d'erreur à la hausse maximum de 10%. On oublie souvent qu'il n'y a pas de risque financier sur une estimation trop haute, il y a seulement le danger, en surestimant les coûts et/ou le risque, de déprécier une occasion de gain. **L'optimisme aveugle des débuts d'un projet doit être remplacé à l'étude de faisabilité par un optimisme pondéré et lucide.**

C'est dans cette perspective que l'étude de faisabilité finale doit faire l'évaluation et la vérification de tous les éléments servant à calculer la faisabilité et la rentabilité du projet. Cette revue implique tous les travaux de probation et de valorisation, les informations factuelles, les résultats calculés, les inférences et hypothèses. A partir de cette revue, on pourra établir des marges d'erreur sur tous les éléments importants servant à calculer la faisabilité et la rentabilité du projet. Ces données serviront aux études de sensibilité et à l'établissement du risque global de l'investissement.

11.2 LE CONTENU DE L'ÉTUDE DE FAISABILITÉ

11.2.1 LES ASPECTS GÉOLOGIQUES

Il s'agit des résultats des études des chapitres 4 à 7 du Guide. Le gisement est le principal actif physique d'un projet minier. Son évaluation doit être envisagée comme un véritable inventaire qui vise à tirer l'avantage maximum des informations disponibles: aucun aspect de l'interprétation des informations ne doit être négligé. A partir des acquis ainsi établis, la direction de la compagnie évaluera les risques du projet et décidera de l'importance qu'elle doit donner au potentiel additionnel de la propriété, exprimé par les minéralisations inférées et par le contexte métallogénique.

La planification détaillée qui caractérise un projet minier doit également s'étendre aux aspects géologiques et miniers du dossier. Grimley 1986⁽¹¹⁾, souligne l'importance de la géologie dans le processus de planification de l'exploitation éventuelle, processus qui doit prendre place à l'étape de faisabilité. Pour le banquier, il est essentiel que la portion du gisement qui sera exploitée au début de l'opération et sur laquelle repose le remboursement du prêt, soit adéquatement connue.

Il faudra donc que soient planifiés (et budgetés!) dès l'étude de faisabilité, les travaux et échantillonnages additionnels à faire au stade de l'aménagement de la mine pour assurer les

premières années de production. Trop souvent, on met en veilleuse les travaux géologiques à ce stade, en donnant priorité aux autres investissements, mais souvent avec des résultats douloureux.

11.2.2 L'INGÉNIERIE DU PROJET

L'ingénierie d'un projet touche plus spécialement les aspects miniers et minéralurgiques étudiés dans les chapitres 8 et 9 du Guide et tout ce qui touche à l'environnement. A ces aspects se greffent nombre de considérations touchant le génie civil, la construction, le développement minier, etc.

A) Aspects miniers et minéralurgiques

Pour les aspects miniers, les mêmes remarques déjà faites pour la géologie s'appliquent: l'interprétation et la planification sur papier coûtent moins cher que dans la mine! Il faut donc prévoir non seulement le plan optimum, mais aussi les éventualités défavorables, les teneurs plus basses, les roches moins compétentes, les volumes moins importants, qui pourraient affecter soit les coûts des investissements, soit les coûts d'exploitation et par conséquent la rentabilité des fonds investis.

Côté minéralurgie, les essais en laboratoire, en usine pilote et, s'il y a lieu, en usine industrielle, devront avoir été assez élaborés pour établir le procédé de concentration avec suffisamment de détails pour assurer la récupération prédite. Il faut également s'assurer, avec une marge d'erreur limitée pour l'intervalle de confiance choisi, que le procédé choisi et pour lequel l'usine de concentration est construite convient vraiment. On connaît nombre de cas où, faute d'essais appropriés ou suffisants, l'usine n'a pas fourni, soit la récupération, soit la qualité du produit anticipée avec des conséquences désastreuses.

Les plans de la mine autant que ceux de l'usine doivent être établis avec un détail suffisant pour assurer une marge étroite (<10%) de variation à la hausse des coûts de réalisation.

B) L'environnement

La préservation de l'environnement est devenue une préoccupation urgente de notre société, préoccupation qui s'est exprimée dans des lois et règlements aux niveaux provincial et fédéral. **Les études techniques et l'estimation des coûts associés avec la protection de l'environnement font partie de l'ingénierie du projet** et les remarques des paragraphes précédents s'appliquent quant à marge d'erreur des données, des plans et des estimés. La situation est d'autant plus complexe que les règlements sont récents et souvent non vérifiés dans

l'application. Il faut également compter sur les aléas de l'opinion publique et des campagnes de pression. Vaut mieux être bien préparé que surpris et contrit!

11.2.3 L'ÉCONOMIQUE

A) Les prix, les marchés

L'étude de faisabilité doit comprendre des études situant les perspectives du contexte commercial passé, présent et futur du produit que l'on envisage produire. La situation est plus simple pour l'or à cause de son rôle économique officieux et l'aspect offre et demande est minimisé dans les études économiques par rapport aux autres aspects. Cependant l'augmentation de la production d'or à travers le monde justifierait une plus grande emphase sur les aspects de marché, sur les relations de demande et d'offre et on aurait tort de négliger d'entreprendre des études et des pronostics des prix futurs de ce métal.

11.2.4 LES ASPECTS SOCIO-POLITIQUES

Cette section de l'étude de faisabilité comprendra l'exposé et l'appréciation du contexte social et politique du milieu dans lequel le projet sera réalisé. Les incertitudes dans les coûts ainsi que les risques dus à la localisation géographique et au contexte politique devront être explicités.

11.2.5 L'ÉTUDE DE SENSIBILITÉ

Cette étape implique une analyse élaborée des prédictions financières pour établir d'une façon détaillée l'effet des variations inhérentes aux marges d'erreur et aux autres aspects du projet minier envisagé. Les éléments géologiques et miniers doivent être inclus, autant que les éléments économiques dans ceux dont on évalue l'impact sur la rentabilité du projet. Malheureusement, cette discipline essentielle à l'évaluation du risque, à laquelle s'astreignent beaucoup de sociétés minières, est souvent ignorée ou évitée par d'autres.

L'analyse de sensibilité devrait suivre une démarche parallèle à l'ensemble de l'évaluation et s'attacher à toutes les étapes de l'évaluation ou une marge d'erreur pourrait affecter les résultats de l'étape et la rentabilité de l'ensemble (Tableau 11-1). L'évaluation systématique de tous ces aspects présentera des difficultés de méthodologie. Aux premiers stades des évaluations, on pourra utiliser une échelle subjective établissant la fiabilité comme Élevée, Moyenne, Basse. A la fiabilité finale, on pourra attribuer des probabilités et des marges d'erreur à ces divers facteurs. Le Guide suggère, comme pour le calcul des réserves, d'utiliser le niveau de probabilité de 90%. Il s'agit ici d'un prototype à développer, non d'une recette toute faite.

TABLEAU 11-1
PLAN D'ANALYSE DE SENSIBILITÉ

SUJET

MARGE D'ERREUR ⁽³³⁾

Axe géologique

Géologie du gisement
Échantillonnages
Estimation des réserves minières

Axe de l'ingénierie

Aspects miniers
Rendement minier
Coûts d'investissements
Coûts d'exploitation
Contrôle de la qualité
Aspects minéralurgiques
Qualité du concentré
Rendement minéralurgique
Coûts d'investissement
Coûts d'exploitation
Aspects environnementaux
Coûts des aménagements
Dommages imprévus

Axe économique

Conditions de financement
Prix des métaux
Perspectives des marchés
Aspects sociaux économiques
Aspects politiques

MARGE D'ERREUR GLOBALE

³³ Marge d'erreur relative (%) à un niveau de confiance de 90%. Aucun chiffre n'est proposé ici, sauf pour les marges d'erreur suggérées pour les réserves et les gisements délimités. Il s'agit ici d'un prototype à développer par l'expérience.

11.2.6 LES RECOMMANDATIONS

Les recommandations de l'étude de faisabilité s'appuient sur l'ensemble des éléments du dossier pour juger de la faisabilité du projet proposé. Même à ce stade, la réponse n'est pas assurée. Elle pourrait être: "Oui on va de l'avant, le projet est rentable" ou alternativement: "Non, le projet n'est pas (encore) rentable et un développement doit être abandonné .. ou reporté.." Parfois, à ce stade, certains vont engager un consultant, non pour faire un bilan objectif du projet, mais pour formaliser une réponse *que l'on a décidé devoir être positive*. Le bilan dressé par Knoll (1989) sur la période des actions accréditives (sect. 3.4), montre les résultats déplorables que peuvent entraîner de telles attitudes.

11.3 LE RISQUE

RISQUE: 1) Danger éventuel plus ou moins prévisible...;
2) (Droit) Éventualité d'un événement ne dépendant pas exclusivement de la volonté des parties et pouvant causer la perte d'un objet ou tout autre dommage;
3) Le fait de s'exposer à un danger (dans l'espoir d'en retirer un avantage).
Dictionnaire Le Petit Robert.

L'évaluation du niveau du risque que comporte la réalisation d'un projet dépend de l'administrateur, du gestionnaire et du financier, mais s'appuie sur les dossiers de géologie, d'ingénierie et d'économique. L'évaluation du risque débute par la quantification des marges d'erreur des divers aspects du projet; cette évaluation s'appuiera également sur les résultats des analyses de sensibilité. L'élément le plus impondérable de cette évaluation dépend des perceptions de ceux qui prendront les décisions et des politiques d'action de la compagnie impliquée. Par exemple, une junior d'exploration, dans sa volonté de croissance, évalue et accepte des risques différemment de la société minière établie.

Le Guide distingue donc le concept de risque de celui de précision / de marge d'erreur au niveau de confiance choisi dans l'estimation des réserves, car la notion de risque déborde les stricts aspects d'évaluation géostatistique des réserves des gisements, d'ingénierie et de réalisation: **l'appréciation du risque implique des critères d'évaluation qui dépassent les éléments quantifiables par la statistique dans les trois axes de connaissance.**

Les professionnels de la géologie, de l'ingénierie, de l'économique doivent travailler à analyser et à délimiter les éléments qui contribuent au risque et à établir les méthodes appropriées pour le réduire. Il va sans dire que la marge d'erreur de l'estimation des réserves est la première composante du risque du projet qui devrait être évaluée, mais des marges d'erreur des divers éléments d'ingénierie et d'économique pourront et devront être calculés ou estimés par des analyses de sensibilité comme on l'a vu précédemment. Le Guide souligne de

nouveau qu'il n'y a pas de gloire et rarement de gain, à assumer des risques qu'un travail et des frais modérés auraient permis de réduire de façon appréciable.

Un élément de risque important est relié avec la dimension et la teneur du gisement dont la mise en production est envisagée, avec sa valeur moyenne par rapport aux coûts de capital et d'exploitation, selon les chiffres de Grenier (1964) qui sont cités en section 3.4. Certains de nos prédécesseurs étaient familiers avec les limites de fiabilité des estimés, à témoin l'adage que des entrepreneurs d'il y a plusieurs générations appliquaient à l'exploitation de petits gisements: "You must turn your money over three times." Autrement dit, sur un projet de haut risque, la valeur brute du projet devrait être trois fois l'investissement projeté pour laisser une marge de sécurité appropriée au niveau de risque.

11.4 LA DÉCISION

La décision ne fait pas, à proprement parler, partie de l'étude de faisabilité. Il vaut la peine de rappeler que la décision de mise en marche d'un projet minier est un processus parfois long. Ce n'est pas un instant, c'est très peu souvent une étape courte. Toutes les démarches d'établissement des contrats de vente, d'obtention du financement, des baux miniers et des permis et d'obtention des subventions, l'engagement du personnel clé, le choix d'un entrepreneur doivent se régler avant que le Stade 9, l'Aménagement de la mine, puisse débiter.

La décision d'implantation d'un projet est une prérogative de la direction d'une compagnie, dans laquelle l'appréciation des risques inhérents au projet a une très large place. De ce point de vue, la direction d'une compagnie a le privilège d'établir sa décision en fonction de critères qu'elle choisit et pondère selon ses connaissances, ses politiques d'action, son expérience et (pourquoi pas!), selon son intuition, lorsqu'on arrive au bout des connaissances concrètes. La présence de ces impondérables amène souvent à oublier que **les politiques d'action d'une entreprise de développement minéral doivent faire l'objet d'analyse, de recherche et de planification tout comme les aspects de géologie, d'ingénierie et d'économique** (Coyle, Montaldo-Cancela, 1984⁸⁷). Ce sujet, malgré son intérêt, dépasse le cadre du Guide d'évaluation des gisements d'or.

Dans le contexte minier, l'appréciation du contexte géologique, des conditions des marchés, des facteurs de progrès technologique peuvent faire contrepoids aux éléments de risque dans la prise de décisions que certains pourraient trouver hasardeuses. C'est l'évaluation du risque discutée plus haut! L'attrait du développement minier vient de cet élément d'impondérable qui s'appuie d'abord sur l'évaluation du potentiel géologique du gisement et également sur l'appréciation des facteurs technologiques, du développement des marchés et de l'évolution des prix.

L'histoire minière récente montre plusieurs échecs reliés à des évaluations techniques incomplètes, à des choix erronés et à des erreurs d'orientation dans la réalisation de projets miniers. Les lacunes des dossiers de géologie, d'ingénierie et d'économique influenceront les critères d'appréciation et les motivations de l'entrepreneur ou du gestionnaire pour l'entraîner à une mauvaise appréciation des facteurs de risque ou des marchés. Des décisions non appropriées au contexte technique et économique mèneront ensuite à des échecs financiers.

Par contre, certains ont réussi à bâtir des empires miniers sur des projets qui apparaissaient douteux au moment de la décision. De tels succès, qu'ils s'appuient sur la chance ou sur une très grande habileté, n'autorisent pas les professionnels, l'entrepreneur ou le dirigeant de se passer d'informations ou d'études qui pourraient être obtenues sans trop de frais et qui réduiraient l'ampleur des risques qu'il faudra assumer pour prendre la décisions d'aller de l'avant.

Plusieurs événements récents montrent que les compagnies minières, quoique beaucoup moins vulnérables à ces difficultés que les juniors d'exploration, n'en sont pas exemptes. Savoir parier et risquer veut dire savoir réduire sinon éliminer les risques évitables. Une comparaison avec un autre métier peut être utile: le "gambler" professionnel sait éviter les pertes inutiles et la ruine, pour rester dans la partie et profiter des opportunités véritables.

CHAPITRE XII

LES NORMES ET LEUR APPLICATION

12. LES NORMES ET LEUR APPLICATION	283
12.1 LES NORMES DE PRÉSENTATION	283
12.1.1 L'INFORMATION GÉOLOGIQUE	283
12.1.2 L'INFORMATION EN INGÉNIEURIE ET EN ÉCONOMIQUE	285
12.1.3 L'ÉVALUATION GLOBALE	285
12.2 LE ROLE DES PROFESSIONNELS	285
12.2.1 LA VÉRIFICATION DES RÉSERVES	285
12.2.2 LE RAPPORT PROFESSIONNEL	286
12.3 L'ÉVALUATION DES DOSSIERS TECHNIQUES	287
12.3.1 LE ROLE DU COMITÉ D'EXPERTS	287
12.3.2 MODALITÉS DE FONCTIONNEMENT	288

12. LES NORMES ET LEUR APPLICATION

Pour compléter l'objectif de consultation et concertation, le Guide propose ici des normes pour guider la présentation et l'évaluation des éléments de géologie, d'ingénierie et d'économique des rapports touchant l'évaluation des gisements. Ces considérations touchent plus particulièrement la préparation et l'évaluation des études soumises à titre de rapports de qualification et se situent dans la même perspective élargie établie dans la section 11.1 du Guide. Le Guide discutera ensuite des exigences et des problèmes et des conditions de la pratique des professionnels responsables des rapports et des vérifications; le Guide y discutera plus particulièrement l'expérience d'un Comité d'experts à la Commission des valeurs mobilières de Colombie Britannique.

12.1 LES NORMES DE PRÉSENTATION

Les éléments de procédures et les normes qui suivent sont proposées pour guider la préparation d'un rapport de faisabilité ou d'un rapport de qualification. Il y a déjà plusieurs instructions et règlements et notes explicatives qui couvrent ces questions; les personnes chargées de vérifier les rapports de qualification se plaignent toutes de la difficulté de faire appliquer les règlements actuels. Selon le Guide **le problème fondamental n'en n'est pas un de réglementation, mais de standards de travail et de normes de pratique professionnelle.** En général le Guide pousse la rigueur et les exigences de vérification et de standardisation plus loin que les réglementations actuelles dans une optique de plus grande cohérence et de plus grande rigueur. Il faudra revoir toute cette question après une période de réflexion sur le contenu du Guide. Quelques éléments qui sont discutés dans les chapitres qui précèdent sont rappelés dans les paragraphes qui suivent.

12.1.1 L'INFORMATION GÉOLOGIQUE

La première qualité d'un bon prospectus est qu'un professionnel du domaine ou un investisseur éclairé doit pouvoir se faire une idée juste du projet par le résumé technique qui y est présenté.

A) L'information géologique

La description des caractéristiques géologiques, gîtologiques, structurales et minéralogiques du gisement est essentielle; les éléments du cadre géologique du gisement qui sont pertinents à l'évaluation ont été discutés dans le chapitre 4 Tome II. Les procédures

d'échantillonnage, d'analyse et de valorisation du gisement, les procédures de vérifications ont fait l'objet plus particulièrement des chapitres 5 et 6.

Des plans et sections en nombre approprié, représentant la géologie, la minéralisation, les sondages et les informations analytiques appropriées sont nécessaires, il va sans dire dans les rapports techniques. Ils sont également nécessaires dans les prospectus, même si ces informations sont plus synthétiques et plus brèves. **Sinon, comment l'investisseur moyen, le spécialiste financier ou même le professionnel du secteur minéral pourraient-ils s'y retrouver?**

B) Le calcul des réserves / ressources connues

Le Guide a proposé au Tome III un système révisé de classification des réserves et des ressources qui s'intègre avec les méthodes d'estimations décrites au chapitre 7 et avec les aspects de planification minière discutés au chapitre 8 du présent Tome. Les divisions en catégories et classes sont applicables dans un système conventionnel d'estimation et dans un système d'estimation géostatistique. Pour ce dernier, des divisions axées sur la dimension de maille et sur la marge d'erreur à l'intervalle de confiance de 90% sont proposées. La marge d'erreur des estimés sera établie pour chaque métal contenu.

La description de la méthodologie géologique et des mailles d'information, de la méthodologie géostatistique, des pratiques informatiques ainsi que des hypothèses de travail utilisées pour l'estimation sont requises. Un inventaire des réserves s'applique à un gisement d'une géométrie spécifique qui doit être explicitée: 1M de tonnes en 10 lentilles n'est pas la même chose qu'un gisement massif de 1M de tonnes. Les piliers ne seront inclus dans les réserves de minerai qu'en autant que les études géomécaniques et la planification minière requise pour leur extraction auront été exécutés.

Il faudra éviter d'utiliser, dans la présentation des estimés des réserves, des chiffres qui dépassent la précision réelle des estimés. On sait que la marge d'erreur globale des réserves prouvées est rarement moindre que 10% sur la teneur (et en pratique sur les tonnes). Par contre, l'expression d'une précision sans rapport avec l'exactitude réelle des chiffres est fréquente sinon habituelle dans les estimés des réserves et surtout dans les catégories moins échantillonnées de ces réserves. Les estimés des minéralisations inférées, ou "réserves possibles" ne sont pas selon les définitions actuelles des estimés quantitatifs. Il n'est donc pas approprié d'utiliser dans de tels estimés des chiffres et des formulations qui donnent l'impression que la marge d'erreur du volume est presque nulle, que la teneur est connue au troisième ou au quatrième chiffre significatif, quand en réalité la précision du premier chiffre est déjà faible!

L'exemple en exergue du chapitre 3 du Guide est typique: les "réserves potentielles", de même que les réserves probables et les réserves prouvées, sont chiffrées à la dernière tonne; les réserves potentielles sont 1.5 fois plus importantes que le total des réserves prouvées et probables. On notera de plus que la teneur des "réserves potentielles" est 5% plus haute que celle des "réserves probables" et 10% que celle des "réserves prouvées".

Le Guide rappelle que la Commission des Valeurs mobilières de Colombie Britannique ne permet pas d'inclure dans des estimés de réserves des "réserves possibles" qui dépassent 20% du total des "réserves prouvées et probables". Les règlements de la Security and Exchange Commission des USA ne permettent pas de publier des "réserves possibles", sauf dans le cas où de tels chiffres ont déjà été publiés dans un autre pays. Des révisions de l'Enoncé de politique nationale 2A et des diverses réglementations provinciales sur ce sujet s'imposent donc après une période de discussion de ces sujets.

12.1.2 INGÉNIERIE ET ÉCONOMIQUE

Le rapport de qualification doit comporter la description des étapes de travail et du palier d'avancement dans l'axe de l'ingénierie au stade actuel atteint par le projet. Ceci comprendra de façon non exclusive le facteur accessibilité, la description des travaux de valorisation minière et minéralurgique exécutés, des plans et projets établis, des résultats anticipés (dilution, récupération minière minéralurgique et métallurgique, qualité des produits) et des marges d'erreur possible. L'information économique présentée au rapport doit comprendre la présentation des études économiques et des études des marchés avec tous les paramètres appropriés utilisés pour établir la rentabilité.

12.1.3 L'ÉVALUATION GLOBALE

L'étape finale comporte l'évaluation des résultats d'ensemble du projet: à partir de l'information géologique, de l'ingénierie et des études économiques. Il s'agit d'établir le bilan objectif du projet: les perspectives de rentabilité justifient-elles un investissement bancaire dans le projet minier envisagé. Certains rapports semblent oublier le contexte et les buts: évaluer les informations disponibles et faire le point sur le dossier en vue de justifier des travaux additionnels. Il est tout à fait aberrant de lire, dans un rapport récent de préfaisabilité préliminaire sur un gisement dont la mise en valeur débute, une recommandation de mise en production quant le dossier justifie au plus une recommandation de continuer les travaux!

12.2 LE RÔLE DES PROFESSIONNELS

12.2.1 LA VÉRIFICATION DES RÉSERVES

Les réserves de minerai et les ressources délimitées constituent le principal actif brut d'une compagnie minière. Le principe général qui devrait s'appliquer est que, tout autant que le bilan financier de la compagnie, les autres constats de l'état d'une exploitation devraient être soumis à un vérificateur spécialisé externe à la compagnie. C'est le cas du bilan des réserves et tout autre dossier touchant les aspects de sécurité, d'ingénierie ou d'environnement d'une exploitation.

C'est l'opinion que W.G. Brissenden, un ingénieur conseil et ancien vice-président mines du Groupe Noranda, soumettait à l'Association minière du Québec dans une étude commanditée suite à l'accident survenu à la mine Belmoral en 1980. Une telle recommandation n'a en soi rien de révolutionnaire, mais il demeure que trop peu de Conseils d'administration font appel à de telles vérifications pour des décisions d'importance, se reposant le plus souvent sur les avis de la direction de la compagnie et du personnel technique.

12.2.2 LE RAPPORT PROFESSIONNEL

La présentation des réserves/ressources doit être faite dans un rapport professionnel. La majorité des réglementations sur les valeurs mobilières spécifient et insistent sur les qualifications des professionnels qui rédigent les rapports de qualification. Les mêmes exigences doivent s'appliquer à la préparation des réserves à l'intérieur des compagnies et pour les rapports annuels des compagnies.

Un tel rapport d'expertise doit être confié à un professionnel doté d'une longue expérience pertinente. Soulignons que la Commission des Valeurs Mobilières du Québec, dans le règlement Q-23, demande un minimum de sept ans d'expérience pour tout géologue / ingénieur qui rédige un rapport de qualification servant à un financement d'exploration minière.

Dans la pratique, le rôle d'expert indépendant que remplit le professionnel est difficile. En effet, il est choisi par un client qui se garde souvent le rôle principal dans la définition du mandat et de ses limites (et même parfois, des conclusions). De plus, c'est le client qui acquitte (ou non) la note d'honoraires du professionnel et qui le choisira (ou non) pour un prochain mandat. Il est donc important que le professionnel puisse s'appuyer sur des normes suffisamment explicites et structurées, ce que le présent Guide s'efforce de faire. Il est également important que des repères et instances soient disponibles pour trancher, dans un contexte professionnel, les cas litigieux qui se présentent. L'objectif est d'améliorer la qualité des standards de pratique et des rapports professionnels.

En développement minéral, la dynamique du milieu entraîne souvent la prise de décisions dans un contexte qui comporte nombre d'incertitudes techniques, décisions qui de plus se situent la plupart du temps dans un climat promotionnel pour ne pas dire spéculatif (auquel réfère l'article de Knoll (1989) discuté à la section 3.4).

12.3 L'ÉVALUATION DES DOSSIERS TECHNIQUES

Le Comité s'est attardé aux modalités de l'appréciation des rapports techniques touchant les évaluations des gisements minéralisés et des gisements miniers. Il peut arriver que les conditions d'évaluation des rapports techniques par les organismes de réglementation ne sont pas optimales. Dans ces conditions, se produisent des divergences d'opinions entre les professionnels au service des organismes de réglementation et ceux au service ou à l'emploi des compagnies minières ou des courtiers. Dans ce contexte, la présence d'intervenants appartenant à d'autres disciplines que celles du génie et de la géologie a souvent tendance à embrouiller les divergences sur les aspects techniques plutôt qu'à aider à les résoudre.

12.3.1 LE RÔLE DU COMITÉ D'EXPERTS

Le Guide désire souligner l'à-propos, dans ces conditions, d'un mécanisme de révision utilisé depuis plusieurs années à la Commission des valeurs mobilières de Colombie-Britannique, le Comité d'experts. Nous décrivons ici la structure et le fonctionnement de ce Comité. Une description plus élaborée est présentée dans une série d'articles du magazine Mining Review de juillet/août 1988, particulièrement dans Stewart & Martin, 1988⁸⁸.

Le processus d'évaluation des dossiers à la Commission des valeurs mobilières de Colombie Britannique comporte plusieurs étapes de révision. Les organismes qui organisent un financement peuvent contester des décisions qu'ils jugeraient non appropriées. Ces étapes de révision s'appuient essentiellement sur la présence d'un Comité d'experts du domaine de l'exploration et de l'exploitation minière. Le Comité d'experts donne des avis et fournit des expertises additionnelles à celles du consultant/analyste en titre, en participant à la révision des dossiers controversés et aux diverses démarches de révision des décisions.

L'influence du Comité expert de la Commission des valeurs mobilières de Colombie-Britannique est reliée au calibre de l'expérience et de l'expertise de ceux qui le constituent, à leurs états de service et à leurs réalisations et découvertes dans le domaine de l'exploration et de l'exploitation minière en Colombie Britannique. Les rédacteurs du Guide considèrent qu'un tel Comité d'experts (Advisory Committee) est un élément essentiel du système de contrôle professionnel du contenu des rapports d'ingénierie et des rapports de qualification et que l'exemple de la Colombie Britannique vaut d'être imité en d'autres régions. De fait, un Comité semblable vient d'être formé à la Commission des valeurs mobilières de l'Ontario.

12.3.2 MODALITÉS DE FONCTIONNEMENT

Nous résumerons quelques points essentiels qui ressortent de la présentation du processus d'évaluation des dossiers et du fonctionnement du Comité d'experts:

- 1) les discussions techniques reliées au contenu du prospectus se font directement entre professionnels plutôt que par fonctionnaire ou avocat interposé, ce qui respecte mieux le champ de pratique professionnelle des ingénieurs et géologues et reconnaît le rôle spécifique de ces professionnels en exploration minière et en développement minier;
- 2) les contacts plus directs entre professionnels que préconise la CVCB accélèrent les échanges et permettent de réduire les frictions et les délais qui freinent le cheminement des dossiers. Ce mécanisme permet également, et c'est très important dans le cas de l'évaluation des gisements, une meilleure concertation et conciliation technique entre les points de vue divergents des divers professionnels impliqués.
- 3) le comité technique assure un appui technique et tactique au professionnel qui a la responsabilité de l'évaluation (et occasionnellement du refus) des dossiers techniques. Un tel appui peut s'exercer autant face aux intervenants des milieux de l'exploration, que face à ceux des secteurs de la finance ou de la politique;
- 4) le Comité d'experts témoigne face au public, face à l'industrie et face aux milieux financiers, du souci de la Commission des valeurs mobilières de Colombie-Britannique d'assurer une expertise étendue autant qu'approfondie derrière les évaluations.
- 5) le Comité d'experts amène également un élément important d'objectivité dans le processus d'évaluation. Il permet de réduire la possibilité de décisions biaisées par les expériences ou les préférences personnelles du professionnel qui évalue le dossier. En corollaire, la présence du Comité permet une évaluation plus objective des situations, dans le cas où des personnes chercheraient à utiliser de tels arguments pour contester le refus d'un dossier technique.

Chapitre XIII

PERSPECTIVES

13. PERSPECTIVES

La démarche du Guide s'adresse en priorité aux intervenants qui ont la responsabilité des évaluations de géologie, d'ingénierie, d'économique des gisements d'or, ainsi qu'aux dirigeants qui doivent mener ces programmes et prendre les décisions appropriées.

La démarche suivie par le Guide a consisté d'abord en une revue des caractéristiques du développement minéral, suivie d'une revue critique de l'ensemble des aspects de l'évaluation des gisements d'or. Les aspects géologiques, d'ingénierie, d'économique et de réalisation ont été reliés dans une **perspective systémique**. La problématique et la grille d'analyse qui ont été appliquées, ainsi que les recommandations apportées au niveau des procédures méthodes et normes, sont de nature à améliorer toutes les procédures reliées à l'évaluation des gisements. Le Guide considère qu'il devrait en résulter une amélioration de la précision des évaluations des gisements d'or aux divers stades et étapes. Même s'il n'a pu percevoir tous les problèmes ni formuler toutes les solutions, le Guide a voulu contribuer, modestement, à baliser le cheminement vers les méthodes, techniques et systèmes de l'avenir.

L'inventaire minéral des gisements délimités et des réserves minières et la classification en catégories, sont des éléments clés du processus d'évaluation des gisements. Les premiers chapitres du Tome III du Guide sont consacrés à une analyse critique des systèmes existants de classification des réserves. Ce travail a permis de formuler un système plus cohérent, plus complet, qui correspond mieux aux besoins aux stades et étapes successives de l'évaluation des gisements, plus particulièrement des gisements d'or. Les propositions du Guide serviront à lancer les discussions et concertations préalables à son adoption généralisée.

Le Guide peut contribuer à la compréhension de l'évaluation des gisements par les organismes gouvernementaux, les organismes de réglementation et les organismes financiers. L'analyse du processus de développement minéral et du processus d'évaluation des gisements d'or que fait le Guide peut aider ces intervenants à mieux comprendre les caractéristiques du domaine et les situations et à mieux orienter leurs démarches et leurs décisions.

Le Guide a revu le rôle du professionnel dans l'évaluation des gisements, du point de vue des organismes de réglementation et des organismes financiers. L'amélioration des standards professionnels et des processus de décision se traduira par une **plus grande efficacité de l'industrie et des milieux financiers** et espérons le, une **meilleure rentabilité des fonds investis par le public**, autant aux étapes de risque plus élevé de la mise en valeur qu'à l'étape de la décision de mise en marche d'un projet minier. Un tel résultat aurait certes une **rétroaction bénéfique sur l'intérêt du public investisseur et sur la disponibilité de capital de risque pour l'exploration, la mise en valeur et la mise en production des gisements.**

RÉFÉRENCES

1. SOQUEM, 1977, "Rapport annuel 1976-1977" et Kazmitcheff, 1972, "L'Exploration minérale moderne", 1972, p 12.
2. 1980, "Principle of a Resource/Reserve Classification for Minerals", United States Geological Survey Circular 831.
3. 1988, "Australasian Code for Reporting of Identified Mineral Resources and Ore Reserves", Report of the Joint Committee of the Australasian Institute of Mining and Metallurgy and the Australian Mining Industry Council.
4. Hugues, J.D., Klatzel-Mudry, L. Nikols, D.J., 1988, "A Standardized Coal Resource/Reserve Reporting System for Canada"; Coal Association of Canada and Geological Survey of Canada.
5. Zwartendyk, J. 1976, "Resource Classification and Terminology"; Presentation at the International Group Meeting on Evaluation of Uranium Resources, Rome Italy.
6. Harrisson, 1983, "A Schema for Classifying and Reporting Mineral Ressources: Rationalizing the Needs for Consistency and Accuracy with the Demands for Disclosure", conférence et résumé au congrès de l'AIME.
7. Vallée, M, 1989, "Développement, problèmes et besoins actuels des PME d'exploration minière", dans "L'entrepreneurship minier au Québec", Gaétan Morin éditeur, p.75-93.
8. Grimley, P.H, 1986, "Ore Reserves - A Banking Perspective", Comptes rendus du Symposium de l'ICM: "Ore Reserve Estimation: Methods, Models and Reality".
9. Lafleur, P. J., 1989, "Reducing Costs and Improving Quality of Grade Control in Mining", Conference at the 1989 CIM Annual Meeting in Québec, City. 11p.
10. Vallée, M, 1986, "Mineral Inventory, From Resource Reconnaissance and Evaluation to Ore Reserve", Proceeding, CIM Symposium on "Ore Reserve Estimation: Methods, Models and Reality, p. 10-31.
11. Hoover, H.C., 1909, "Principles of Mining", McGraw-Hill Book Co., New York, 199p.
12. Elbrond J., 1986, "Ore Losses, Rock Dilution and Recovery In Estimation, Design and Operation", Comptes rendus du Symposium de l'ICM: "Ore Reserve Estimation: Methods, Models and Reality".

13. Grace, K.A., 1986, "Ore Reserve Reporting - What do the Numbers Mean", Comptes rendus du Symposium de l'ICM: "Ore Reserve Estimation: Methods, Models and Reality", pp 47-52.
14. Vallée, M., Belisle, J.M., David, M., 1976, "Kriging as a Tool to Avoid Overestimation of Grade in Sulphid Orebodies", Proc. 14th APCOM Symposium, R.V. RAMANI ed., SME-AIME.
15. Gilfillan, J. F., 1986, "When Gold is Not Where You Found It", conference presented to the Securities Institute of Australia, Sidney, April 16, 15p.
16. Matheron, G., "Traité de géostatistique appliquée, T. 2, Le Krigeage", Ed B.R.G.M., Paris, 1971, 171p.
17. David, M., 1982, "Geostatistical Ore Reserve Estimation", Elsevier Publishing.
18. Knoll, K. 1989, "And Now the Bad News", The Northern Miner Magazine, June, pp 48-52.
19. Clow, G. G. 1990, "Lessons from the Front Lines - Recent Gold Mine Failures in Canada", text of the conference at the AGM in Ottawa, 14pp.
20. Mackenzie, B., Bilodeau, M., Dogget, M., 1988, "Mineral Exploration and Mine Development Potential in Ontario: Economic Guidelines for Government Policy". Technical Paper No. 9, Center for Resources Study, Queen's University, Kingston, Ont.
21. Grenier, P.E., 1964, "What happens when a geologist juggles with the statistics of the mineral industry: Exploration - Production - Reserves", Canadian Mining Journal, May, p. 45-49.
22. Deming, W. E., 1982, "Quality, Productivity and Competitive Position", MIT, Center for Advanced Engineering Studies.
23. Walton, M., 1986, "The Deming Management Method", Perigee Books, Putnam Publishing Co, 262 p.
24. 1989, "Mineralisation and Shear Zones", Geological Association of Canada, Short Course Notes, Vol. 6, Montréal Québec., May 12-14.
25. Colvine A. C. & al., 1988, "Archean Lode Gold Deposits of Ontario", Ontario Geological Survey, Miscellaneous Paper 139, Ministry of Northern Development and Mines, 136p.
26. Wells, J. 1969, "Placer Examination, Theory and Practice", Technical Bulletin # 4, Bureau of Land Management, U.S.Dept of the Interior.
27. Johnston, W.A. and Uglow, W.L., 1926, "Placer and Vein Gold Deposits of Barkerville, Cariboo District, B.C.", Geological Survey of Canada, Memoir 149.

28. Hodgson C. J., 1989, "The Structure of Shear-Related Vein Type Gold Deposits", Ore Geology Reviews", no. 4, p. 231-273.
29. CRM, 1986, "Guide d'ingénierie pour la conception des piliers de surface", préparé par ROCHE ltée, Groupe conseil, pour le Centre de recherches minérales du Québec, 146p.
30. Botbol, J.M. 1970, "A Model Way to Analyse the Mineralogy of Base Metal Mining Districts", Mining Engineering, March, pp 56-59.
31. Hausen, D.M, Park, W. C. Ed. 1981, "First Symposium on Applied Mineralogy - Process Mineralogy", AIME.
32. Hausen, D. M., Park, W. C., Hagni, R. D. Ed., 1985, "Applied Mineralogy Volume", ICAM '84.
33. Wilhelmy, J. F. 1988, "Exemple d'application de la minéralogie au traitement des minerais d'or", Rapport du Centre de recherches minérales du Québec, 20 p et annexes.
34. Dadson, A.S., "Ore Estimates and Specific Gravity", CIM Special Volume 9, Montréal 1968, pp. 3-4.
35. Northern Miner, 1989, "Belmoral rejects Ketz. Canamax sues", April 17, 1989, pp 1-2.
36. Boyer, A., 1989, "Estimation de la densité spécifique à partir des teneurs de métal", Rapport MRL 89-146, Laboratoire de recherche minière, CANMET, Energie Mines, Ressources Canada, pp1-33 et annexes.
37. Boyer, A., Billette, N. R., 1989, "Gisements et environnement minier, liens entre la géologie et la quantification", Rapport Divisionnel MRL 89-65, Laboratoires de recherche minière, CANMET.
38. Chamberlain, I.C. 1965, "The Theory of Multiple Working Hypotheses", Science vol. 148, May 7, p. 754-759, réimpression de l'article original, Science, 15, p. 92-97, 1890.
39. Platt, J.R. 1964, "Strong Inference", Science, Oct 16, p. 347-353.
40. CAME, 1990, "Computer Treatment of Exploration and Mining Data: Do's and Don'ts", Proceedings of the Workshop, N. Champigny chairperson, distributed by the Prospectors and Developpers Association of Canada, Toronto, 300 p.
41. Billette, N. 1978?, "Échantillonnage des minerais en vrac", Compte rendu de la Conférence présentée au "Séminaire sur les techniques de concentration de l'Or, Québec (Qué).
42. Gy, P. 1967, "L'échantillonnage des minerais en vrac", Tome I, Théorie générale, Revue de l'industrie minérale, numéro spécial, 15 janvier, 188p.

Méthode d'évaluation

43. Gy, P. 1971, "L'échantillonnage des minerais en vrac", Tome II, Théorie générale (fin)-Erreurs opératoires, Revue de l'industrie minière, numéro spécial, 15 sept 280p.
44. Gy, P. 1979, "Sampling of Particulate Materials, Theory and Practice", Elsevier Publishing Co, 431p.
45. Ingamells, C. O. 1974, "Control of Geochemical Error Through Sampling and Subsampling Diagrams", Geochemica and Cosmochemica Acta, pp 1225-1237.
46. Robinson, A. 1990, "Echo lowers estimate in U.S. mine", Globe and Mail, Saturday, Feb 17, p. E10.
47. Guy, P. 1967, "L'échantillonnage des minerais en vrac, Tome 1", Revue de l'industrie minière, 186p.
48. Yuill, W. G., 1985, "The Importance of Being Small", Presidential Address, Trans Inst. Mining Metall. Eng., p. B107-B114.
49. Sinclair, A. J., 1978, "Sampling a mineral deposit for feasibility Studies and Metallurgical Testing", dans "Mineral Processing Plant Design", Mular, A. L., Bhappu, R. B., ed. AIME.
50. Podolski, T. 1986, "The Corporate Point of View", Conférence présentée au Symposium de l'ICM: "Estimation des réserves: Méthodes, modèles et réalité."
51. Vallée, M. Gilbert, J., Dagbert M. 1986, "A Case Study of Gold Sampling, Developing the SOQUEM-New Pascalis Gold Deposit", Proceedings of the CIM Symposium on "Ore Reserve Estimation: Methods, Models and Reality".
52. Giroux, G.H. Sinclair A.J. 1986, "Production Quality Control Experiments", Comptes rendus du Symposium 1986 de l'ICM, "Estimation des réserves: Méthodes, modèles et réalité", p 238-260.
53. Sinclair, A. J. 1978, "Sampling a Mineral Deposit for Feasibility Studies and Metallurgical Testing.", Mineral Processing Plant Design, Ed by A. Mular and R. B. Bhappu, Society of Mining Engineers of AIME, pp 115-133.
54. Le Houillier, R. 1987, "Un résultat d'analyse, est-ce que ça vaut de l'or", Comptes rendus du Deuxième colloque sur l'or, p. 19-44.
55. Palmer I. A., Wright, T. A., ????, "The Fire Assay for Gold and Silver", dans "Standard Methods of Chemical Analysis, by Furnam, H, 5th Edition.
56. Coxon, C. H. Sichel, H. S. 1959, "Quality Control of Routine Mine Assaying and Its Influence on Underground Mine Valuation", Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, pp 489-517, May.
57. Bloom, L., 1989, "The Art of Sampling, The Northern Miner Magazine, pp 55-58.

58. Brindamour, R. Le Houillier R., 1988, "Méthodes de dosage de métaux précieux dans diverses substances minérales", Centre de recherches minérales du Québec, AC-12, 67p.
59. Vallée, M. Fillion, M. David, M. 1977, "Of Assays Tons and Dollars or: Can You Trust Gold Assay Values ?", Conférence présentée au Congrès annuel de l'ICM à Québec, 20p.
60. Taylor, H.K. 1972, "General background theory of cutoff grades", Transactions of the IMME, pp A160 to 179.
61. Lane, K.F. "Choosing the optimum cutoff grade". Colorado School of Mines Quarterly, 59, 811-829.
62. Lane, K.F., 1988, "The Economic Definition of Ore", Mining Journal Books, London, 149p.
63. Mortimer, G.J. 1950, "Grade Control", Transactions of Institution of Mining and Metallurgy, 59, Feb. 357-399.
64. David, M. 1988, "Advanced Geostatistical Ore Reserve Estimation", Elsevier Publishing Co.
65. Champigny, N., Grimley, P. H., 1990, "Computer-Based Ore Reserve Estimation: Practitioners' Views", Accepted for publication, CIM Bulletin.
66. Boyer, A. Dufresne, S. Boutin, M., 1989, "Logiciel CDT pour choisir la dimension optimale de la maille", Rapport Divisionnel MRL 89-27 (TR), Laboratoire de Recherche Minière, CANMET, 14p, et annexes.
67. Fytas, K., Chaouai, N. E., Lavigne, M., 1989, "Indicator Kriging Performance in Gold Deposit Estimation", Conférence au Congrès annuel de l'ICM, Québec, 20p.
68. Kwa, B.L. Mousset-Jones, P.F. 1986, "Indicator Kriging Applied to a Gold Deposit in Nevada, USA", Comptes rendus du Symposium 1986 de l'ICM, "Estimation des réserves: Méthodes, modèles et réalité", pp185-194.
69. Wellmer, F. W. 1983, "Classification of Ore Reserves by Geostatistical Methods", Erzmetall, 36 Nr 7/8.
70. David, M. 1988, "Dilution and geostatistics", CIM Bulletin, June, pp 29-35.
71. David, M., Toth, E. 1989, "Grade control problems, dilution and geostatistics: choosing the required quality and number of samples required for grade control", CIM Bulletin, Nov. pp 53-60.
72. Kwa, B. L. et Mousset-Jones P.F. 1986, "Mineral Reserve Estimation of Gold Deposits - A Survey of Practices", Proceedings of CIM Symposium on "Ore Reserve Estimation: Methods Models and Reality", pp 172-184.

73. Champigny, N., Armstrong, M., 1989, "Geostatistics for the Estimation of Gold Deposits: A Review and Survey of Current Practice", Conférence présentée au Colloque sur l'Or, Toulouse, France, mai 1989, texte soumis pour publication à Mineralium Deposita.
74. A.I.M.E. 1982, "Underground Mining Method Handbook" Hustrulid, W. A. Ed., Society of Mining Engineers of AIME, 1754 p.
75. J. S. Redpath Ltd. 1986, "Estimating Preproduction and Operation Costs of Small Underground Deposits" Report for Canmet with Annexes.
76. Graham, E.P., 1968, "Low Cost, High Dilution Mining", CIM Bulletin, pp 847, 853.
77. Miller J.H.L. Giroux, G.H. , 1966, "Practical Geostatistics - Equity Silver Mines", Comptes rendus du Symposium 1986 de l'ICM, "Estimation des réserves: Méthodes, modèles et réalité", pp 261-279.
78. Heath, K.C.G., 1981, "Relationship between ore reserve, mill feed and real tonnages and grades", Trans. of Inst. Min. Metall., London, p. A128-130
79. Taylor, H. K. 1966, "Ore valuation and underground metal accounting at Bancroft and other Zambian copper mines", Trans. Instn. Min. Metall. 75, 1966, 1109-36.
80. Desrochers, C. 1984, "Problèmes métallurgiques reliés à la mise en exploitation d'un nouveau gisement d'or". Conférence au "Séminaire sur le traitement des minerais d'or", Val d'Or, p 49-66.
81. Veillette, G. 1987, "Le développement d'un circuit de traitement pour les minerais aurifères", Comptes Rendus du Colloque du CRM: "De l'Or et des Profits", Val d'Or, pp 137-166.
82. Kasongo, T. 1987, "La récupération de l'or par gravimétrie", Comptes rendus du Colloque "De l'or et des profits", Centre de Recherches minérales du Québec, pp 191, 212.
83. Demopoulos, G. P. 1987, "Gold Extraction from Refractory Ores", Comptes rendus du Colloque: "De l'or et des profits", Centre de Recherches Minérales du Québec, pp, 273-328.
84. Hausen, D. M. 1985, "Process mineralogy of select refractory Carlin-type gold ores", CIM Bulletin, Sept. p 83-94.
85. "La pratique professionnelle du génie géologique, de la géologie et de la géophysique dans le secteur minier et dans le secteur des aménagements", Rapport du Comité conjoint OIQ et APGGQ, Avril 1987, révisé février 1988.
86. Nagle, A., J., 1988, "Aide à l'estimation des paramètres économiques d'un projet minier dans les études de pré faisabilité", Thèse de doctorat présentée à l'École nationale supérieure des mines de Paris, 193 p.

87. Coyle, R. G., Montaldo-Cancela, D. H., 1984, "Policy Analysis Model for Underground Mining Enterprises", Trans, Min, Metall, **94**, April, p. A90-A95.
88. Stewart, A.F. Martin, D. 1988, "Mining Consultants Checks and Balances", Mining Review, July August, pp 27-39.

--- 0 0 0 ---

ANNEXE I

REMERCIEMENTS

A 1. REMERCIEMENTS	303
A 1.1 ORGANISMES COMMANDITAIRES	303
A 1.2 CONSULTATIONS SUR LE RAPPORT PRÉLIMINAIRE	304
A 1.3 MISE EN GARDE	306

A 1. REMERCIEMENTS

Géoconseil Marcel Vallée inc. et Roche ltée, Groupe Conseil tiennent à transmettre leurs remerciements à tous ceux qui ont contribué à la rédaction et/ou à l'amélioration du **Guide d'évaluation des gisements d'or** et plus particulièrement aux personnes dont les noms n'apparaîtraient pas dans les listes qui suivent.

A 1.1 ORGANISMES COMMANDITAIRES

Plusieurs organismes se sont joints au Centre de recherches minérales du Québec pour le financement et la réalisation du Guide: en voici la liste. Le Comité aviseur formé des représentants de ces organismes a surveillé la préparation du Guide:

- Association Minière du Québec inc. (AMQ)
Raynald Jean, géologue
Chef géologue, Minnova Inc. Division Opémiska
- Association professionnelle des géologues et des géophysiciens du Québec (APGGQ)
Denis Marcotte géologue/géostatisticien
Pierre Bérubé ingénieur géologue, géophysicien
- Association des Prospecteurs du Québec (APQ)
Gratien Gélinas, directeur général
- Bourse de Montréal
Michel Champagne, géologue, MSc.
- Cambior inc
François Viens, ingénieur géologue
- Centre de recherches minérales du Québec (CRM)
Denis Lessard, ing. MSc. A., responsable du projet
- Commission des Valeurs Mobilières du Québec (CVMQ)
Marie José Girard, géologue, MSc.
- Géophysique GPR International inc.
France Goupil, ingénieur

Méthode d'évaluation

- Ordre des Ingénieurs du Québec (OIQ)
Jean Lavallée, ingénieur géologue

- Unité de recherche et service en technologie minière de l'Abitibi-Témiscamingue (URSTM)
Denis Bois, ingénieur géologue, directeur de l'URSTM

A 1.2 AUTRES CONSULTATIONS

GMV Inc. et ROCHE Ltée ont procédé, à partir de la version préliminaire du Guide, à une consultation auprès d'environ 40 personnes impliquées à divers niveaux dans les problèmes d'évaluation des gisements, pour s'assurer d'atteindre les objectifs visés dans l'appel d'offre pour la préparation du Guide. La liste qui suit donne les noms de toutes les personnes qui ont transmis des opinions et avis aux rédacteurs du Guide. Certains d'entre eux ont fait une revue critique élaboré de ce texte. GMV et Roche ainsi que le Centre de Recherche remercient toutes ces personnes pour leur contribution bénévole, mais très importante, à l'amélioration et la mise au point du Guide.

LISTE DES ORGANISMES / PERSONNES CONSULTÉS

ORGANISMES DE RÉGLEMENTATION ET GOUVERNEMENTAUX

John Drury, P. Eng.

Commission des valeurs mobilières de l'Ontario
Toronto, Ontario.

R. G. Stevenson, P. Eng.

Commission des valeurs mobilières de la Colombie Britannique
Vancouver, B.C.

G. M. Moreau, M.Sc., H. K. Taylor, P.Eng., A. J. Sinclair, Ph.D.,
Comité ad hoc sur la classification des réserves, Vancouver B. C.

André Boyer, PhD, Noël R. Billette, Ph.D.

CANMET, Ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources, Ottawa Canada

Yvon Laliberté, ingénieur

Secteur de la politique minérale
Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec

UNIVERSITÉS

Michel Bilobeau, ingénieur, Ph.D.
Professeur d'économie minérale
Université McGill, Montréal, Qué.

Claude Bourgoin, ingénieur des mines
Professeur d'exploitation minière
Département de mines et métallurgie
Université Laval, Québec, Qué.

René Dufour, ingénieur des mines
Professeur d'exploitation minière
Département de Génie minéral
École Polytechnique, Montréal, Qué.

Michel Gauthier, Ph.D.
Directeur du département de géologie
Université du Québec à Montréal, Montréal, Qué.

Wally McLean, Ph.D.
Professeur, Département de géologie
Université McGill, Montréal, Qué.

Alastair J. Sinclair, Ph.D.
Department of Geological Sciences
University of British Columbia, Vancouver, B.C.

COMPAGNIES MINIERES ET CONSULTANTS

Pierre Bérubé, ingénieur, M.Sc.
Sagax Géophysique inc.
Montréal, Qué.

André Bonenfant
Minéraux Noranda, Division Matagami
Matagami, Qué.

Michel Bouchard, ingénieur géologue, Ph.D.
Ressources Audrey inc, Rouyn-Noranda, Qué.

Méthode d'évaluation

Normand Champigny, ing. géologue, PhD.
Currie Coopers Lybrand, Toronto, Ont.

Mark Fields, géologue
Equity Preservation Corp, Vancouver, B.C.

Kamil Khobzi, géologue, MSc,
Kamil Khobzi & Associés, Longueuil, Qué.

Raymond Raby, ingénieur des mines
Vice-président mines
Explorations Mazarin Inc, Québec, Qué.

Richard Reid, ingénieur.
Vice-président
Géophysique GPR International, Longueuil, Qué.

John Sullivan, géologue
Exploration Noranda
Rouyn-Noranda, Qué.

A 1.3 MISE EN GARDE

Les contributions de toutes ces personnes à la critique et à l'enrichissement de la version préliminaire du Guide ont été reçues avec grande reconnaissance. Cependant, **GMV inc. et ROCHE Itée tiennent à souligner qu'ils assument l'entière responsabilité du contenu du Guide et des recommandations, ainsi que des erreurs de fait ou d'omission que la version finale pourrait contenir. La responsabilité d'aucune des personnes ou des organismes nommés n'y est donc engagée.**

Mai 1990

0 0 0

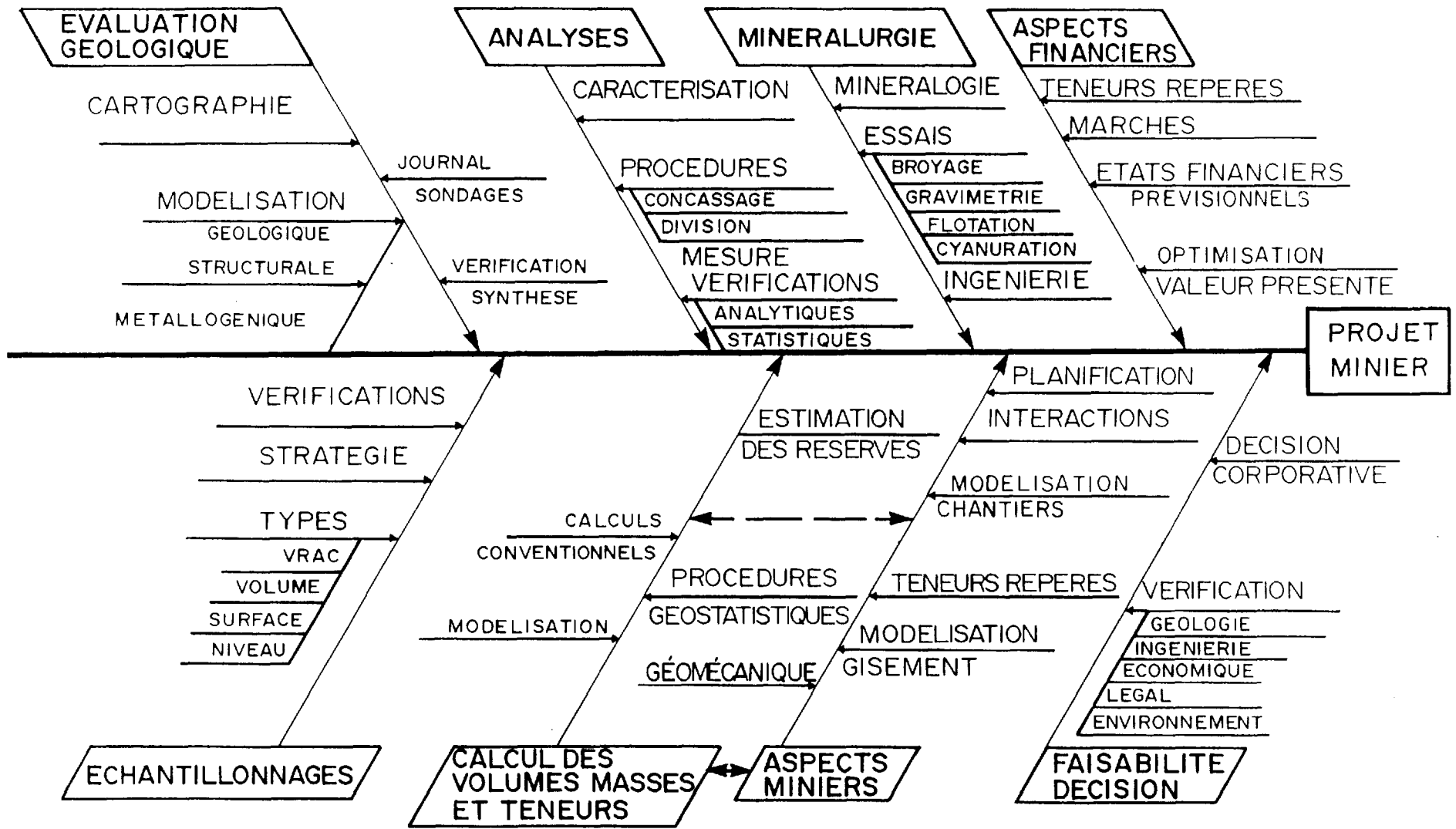


Fig.2.3

