

P0005/  
/05 B

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

Ecole Nationale Polytechnique

*Département de Génie Minier*



## *Projet de Fin d'Etudes*

*Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat  
En Génie Minier*

Thème :

**Réalisation d'une application pour le calcul de la teneur  
de coupure et le profit d'un projet minier.**

*Proposé et dirigé par :*

**k. OMRACI  
A. AIT YAHATENE**

*Présenté et étudié par :*

**HICHEM SABEG**

***Promotion 2005***

E.N.P- 10, Avenue Hassen Badi, 16200 El Harrach, Alger

## Résumé :

L'objectif essentiel de notre mémoire est la détermination de la teneur de coupure d'un gisement pour connaître et évaluer le profit générer par l'exploitation de celui-ci .L'étude s'est orienté vers l'approche de Lane pour le calcul du profit maximal qui peut être obtenu en considérant les facteurs limitatifs "Mine", "concentrateur", "Marché", pour obtenir à la Réalisation d'un algorithme de calcul de la teneur de coupure et le profit ; en utilisant Microsoft ACCESS et VISUAL BASIC.

**Mots clés :** Algorithme, Teneur, Coupure, Gisement, Lane, Ressources, facteurs limitatifs, krigeage.

## Summary:

The essential objective of our memory is the determination of the content of cut of a layer to know and to evaluate the profit to generate by the exploitation of this one L' study was directed towards the approach of Lane for the calculation of the maximum profit which can be obtained by considering the restrictive factors "Mines", "concentrating", "Gone", to obtain with the Realization of a calculation algorithm of the content of cut and the profit; by using Microsoft ACCESS and VISUAL BASIC.

**Key words:** Algorithm, Content, Cut, Layer, Lane, Resources, factors restrictive, krigeage.

## المخلص:

الهدف الأساسي من مذكرتنا هو تحديد نسبة القطع لطبقة معدن, وتقدير الفائدة الناتجة عن استغلال هذه الطبقة. اعتمادا على تقريب «Lane» لحساب الربح الأقصى باعتبار العوامل المحددة التالية ("المنجم", "المركز", "السوق") وذلك بتحقيق خوارزمية لحساب نسبة القطع و الربح بواسطة استعمال نظام استغلال ACCESS .

الكلمات المفتاحية : خوارزمية, نسبة, القطع, طبقة المعدن, المصادر, Lane, العوامل المحددة.

## DEDICACE



*Je dédie ce modeste travail*

*A mes parents*

*A mes frères et mes soeurs*

*A tout la famille SABEG*

*A mes amis*

## Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord mon Dieu « الحمد لله رب العالمين ».

Et pour leurs précieux conseils et suggestions, je voudrais exprimer ma gratitude à mes promoteurs M<sup>r</sup> **A.AIT YAHATENE** et **K. OMRACI** Enseignant à l'ENP pour son aide permanent et son encouragement qu'il m'a prodigué.

Mes remerciements vont également à tous les Enseignants du Département de Génie Minier.

Je tiens à remercier vivement messieurs les membres de jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'examiner ce modeste travail.

Que tous mes amis surtout M<sup>r</sup> **SABEG BILAL**, l'expression de ma profonde gratitude pour leur soutien moral dont ils ont fait preuve à mon égard.

Enfin, que tous ceux, qui de près ou de loin, ont participé à l'élaboration de ce travail trouvent ici l'expression de mes meilleurs remerciements.

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

# Sommaire

## Sommaire

### Introduction générale

#### Chapitre I : Les ressources et les réserves exploitables

I-1 Introduction.....	1
I-2 Définitions.....	2
I-3 Ressources et réserves .....	3
I-3-1 Ressources minérales .....	4
I-3-1-1 Ressources minérales présumées.....	4
I-3-1-2 Ressources minérales indiquées.....	5
I-3-1-3 Ressources minérales mesurées.....	5
I-3-2 Réserves minérales .....	6
I-3-2-1 Réserves minérales probables.....	7
I-3-2-2 Réserves minérales prouvées.....	7
I-4 Estimation des ressources géologiques.....	7
I-5 Méthodes conventionnelles de calcul des ressources .....	8
I-5-1 Méthode des polygones.....	8
I-5-2 Méthode des sections.....	9
I-6 Ressources récupérables .....	11
I-7 Influence de la densité sur le calcul des ressources.....	13
I-8 Durée de vie d'une mine .....	13
Conclusion.....	14

#### Chapitre II : Teneur et teneur de coupure d'un gisement

II-1 Introduction .....	15
II-2 Echantillonnage pour la mesure des teneurs.....	18
II-3 Utilisation de la simulation dans les problèmes de contrôle des teneurs..	18
II-4 Teneur de coupure .....	19
II-5 Facteurs qui affectent le choix des teneurs de coupure d'opération .....	21
II-6 Application de la teneur de coupure .....	25
II-7 Facteur qui conditionne l'exploitabilité d'un gisement .....	26
II-8 Méthodes conventionnelles de calcul de la teneur .....	27
II-8-1 Méthode des triangles.....	27
II-8-2 Méthode des pourcentages.....	27
II-8-3 Méthode de l'inverse de la distance.....	28
II-9 Importance de la qualité de l'estimation des teneurs .....	30
II-10 L'effet du biais conditionnel et de l'information sur les ressources estimées et récupérées: un exemple détaillé.....	33
II-11 Estimateurs en fonction des vraies valeurs .....	34

<b>II-12 Problèmes, auxquels la géostatistique peut apporter une contribution dans le domaine minier.....</b>	<b>36</b>
<b>II-13 Concepts de dilution .....</b>	<b>37</b>
<b>II-14 Relations de Lasky .....</b>	<b>37</b>
<b>II-15 Courbes tonnage –teneur de coupure .....</b>	<b>39</b>
<b>II-16 Détermination de la teneur de coupure graphiquement .....</b>	<b>41</b>
<b>II -17 Application de la loi normale et lognormale : .....</b>	<b>42</b>
<b>II-18 Minerai, formule, et teneur de coupure typiques (selon Peters, 1987) ..</b>	<b>46</b>
<b>Conclusion .....</b>	<b>47</b>
<b>Chapitre III : Teneur de coupure et profit d'un projet minier.</b>	
<b>III-1 Introduction .....</b>	<b>49</b>
<b>III-2 Aspects de l'activité minière .....</b>	<b>49</b>
<b>III-3 Analyse et gestion du risque d'un projet minier .....</b>	<b>53</b>
<b>III-4 Évaluation du risque lié au ressources / réserves avec des contraintes de temps, comment décider sur un investissement dans deux semaines...</b>	<b>55</b>
<b>III-5 Profit minier.....</b>	<b>56</b>
<b>III-5-1 intérêt de la géostatistique dans la détermination du profit...</b>	<b>56</b>
<b>III-5-2 Profit conventionnel.....</b>	<b>59</b>
<b>III-6 Approches d'estimation du profit minière.....</b>	<b>64</b>
<b>III-6-1 : Présentation d'un calcul de coût minier.....</b>	<b>64</b>
<b>III-6-2 Approche de Taylor.....</b>	<b>65</b>
<b>III-6-3 Approche de Lane.....</b>	<b>65</b>
<b>III-7 Teneur de coupure d'équilibre .....</b>	<b>72</b>
<b>III-8 Teneur de coupure optimale .....</b>	<b>73</b>
<b>III-9 Influence de la distribution sur la teneur optimale et le profit.....</b>	<b>74</b>
<b>III-10 Influence de la variance .....</b>	<b>75</b>
<b>III-11 La taxation .....</b>	<b>77</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>78</b>
<b>Chapitre IV : conception de la base de données.</b>	
<b>IV-1 Introduction.....</b>	<b>79</b>
<b>IV-2 Mode d'application.....</b>	<b>80</b>
<b>IV-3 Etude des entités.....</b>	<b>80</b>
<b>IV-4 Réalisation de l'organigramme.....</b>	<b>83</b>
<b>IV-5 Explication de l'organigramme.....</b>	<b>84</b>
<b>IV-6 programme de calcul de la teneur de coupure et le profit.....</b>	<b>85</b>
<b>IV-7 Mode d'emploi de l'application sous Access.....</b>	<b>86</b>
<b>IV-8 Présentation de l'application sous Access.....</b>	<b>87</b>

المدسة الوطنفة المنعدة التقنفةات  
BIBLIOTHEQUE — المكنفةفة  
Ecole Nationale Polytechnique

# Introduction Générale

## Introduction générale :

Les projets de mise en valeur n'ont pas de résultats d'exploitation historiques sur lesquels les estimations relatives aux décaissements d'exploitation futurs pourraient être fondées. Plus particulièrement à ce qui a trait aux projets de mise en valeur, les estimations concernant les réserves prouvées et probables et les décaissements d'exploitation sont fondées, dans une large mesure, sur l'interprétation des données géologiques obtenues grâce aux trous de mine et à d'autres techniques d'échantillonnage, et des études de faisabilité qui calculent les décaissements d'exploitation en fonction du tonnage prévu et des concentrations de minerais devant être exploités et traités, la configuration du corps minéralisé, les taux prévus de récupération de métal provenant du minerai, les frais d'exploitation estimatifs, les conditions climatiques prévues et d'autres facteurs. Par conséquent, il est possible que les décaissements d'exploitation réels et les rendements économiques diffèrent considérablement de ceux qui sont actuellement prévus pour un projet avant la production.

La rentabilité est liée à la teneur de coupure et au prix du métal, Le prix du métal est influencé par de nombreux facteurs qui échappent à notre contrôle, y compris les ventes de métal par les banques centrales, les opérations de couverture des producteurs, le taux de change du dollar américain par rapport à celui des autres devises importantes, la demande mondiale et régionale, la situation politique et la conjoncture économique. Le niveau mondial de la production métallifère a également une incidence sur le prix du métal. En outre, ce dernier connaît parfois des fluctuations rapides à court terme en raison de la spéculation.

Les coûts et les résultats des programmes d'exploration et de mise en valeur influent sur la rentabilité et sur la valeur. Comme les mines ont une durée de vie limitée qui dépend des réserves prouvées, on cherche activement à remplacer et à élargir les réserves, principalement par des acquisitions, par l'exploration et la mise en valeur des installations actuelles et par des activités d'exploration de reconnaissance. L'exploration minérale s'expose à de nombreux risques et peut ne pas mener à des opérations minières économiquement viables ni donner lieu à de nouvelles réserves pour remplacer et élargir les réserves existantes. La détermination des réserves est un processus estimatif.

L'exercice des activités d'exploration, de mise en valeur et d'exploitation de propriétés de ressources naturelles, qui, de par leur nature, comportent un degré élevé de risque. Les données relatives aux réserves prouvées et probables ne sont que des estimations; rien ne garantit que les quantités indiquées à l'égard de la production de métal seront atteintes. Les

écarts entre réserves réelles et réserves prévues et entre le taux de récupération réel et le taux de récupération prévu peut avoir une incidence importante sur les résultats financiers.

Pour obtenir un schéma simple de calcul du profit en fonction de la teneur de coupure nous avons organisé notre rapport de la façon suivante :

**Chapitre I : Les ressources et les réserves exploitables d'un gisement minier : Les différentes catégories des ressources et des réserves et les Méthodes conventionnelles de calcul des ressources...**

**Chapitre II : Teneur et teneur de coupure d'un gisement permet ; d'étudier les différents types de teneurs de coupure et les méthodes conventionnelles de calcul de la teneur.**

**Chapitre III : Teneur de coupure et profit d'un projet minier. Dans cette partie on détermine le profit en fonction de la teneur de coupure par l'approche de Lane et l'intérêt de la géostatistique dans la détermination du profit....**

**Chapitre IV : Algorithme de calcul de la teneur de coupure et le profit.**

Cette partie est consacrée à la conception de la base de données et le traitement des données. Nous présenterons un organigramme des facteurs limites et teneur de coupure ainsi que le profit.

# *Chapitre I*

## Ressources et réserves exploitables

## I-1 Introduction :

Les géologues et les ingénieurs miniers impliqués dans le domaine du calcul de réserves ont toujours été confrontés à la notion de la teneur en général et à la teneur de coupure en particulier.

La géostatistique est connue depuis près de 40 ans. Tout a commencé dans les mines d'or, où une correction statistique est portée à la manière traditionnelle afin d'estimer la teneur d'un bloc de minerai à partir d'un nombre limité d'échantillons pris autour du bloc à exploiter. La théorie était formulée 10 ans plus tard par « Georges Matheron » qui introduisit un outil pour analyser la continuité spatiale des teneurs appelé " le variogramme " et une méthode d'estimation basée sur le variogramme appelée " le krigeage ".

Durant les 20 années suivantes, ces outils ont été employés sur une vaste variété de gisements du simple minerai de fer sédimentaire à de l'uranium hautement variable ou des cas de métaux précieux. Ils ont été aussi raffinés. Les dix dernières années ont vu l'apparition de plusieurs façons efficaces d'analyser la continuité spatiale de minéralisations avec un variogramme clair. Des variantes de la méthode de krigeage ont été proposées. L'emphase a été mise sur l'estimation des blocs récupérés (tonnage et teneurs au-dessus des teneurs de coupure) plutôt qu'une moyenne d'un simple bloc de teneurs. La simulation conditionnelle a été proposée comme une alternative à "kriger" pour la production de multiples "images stochastiques" d'un gisement. Finalement, dans les gisements où l'exploitation est hautement sélective et le contact minerai/stérile peu visible, la géostatistique a démontré sa puissance de traitement des données de contrôle des teneurs.

L'avenir de la géostatistique semble brillant. Avec toutes les expériences et les développements des trente dernières années, la géostatistique est devenue une alternative possible aux méthodes géométriques traditionnelles de l'estimation des gisements. D'autres disciplines qui utilisent des données distribuées spatialement (pétrole, environnement, hydrologie, océanographie, foresterie) ont commencé à l'adopter.

Lorsqu'on désire prédire les ressources récupérables ou exploitables pour des portions du gisement pouvant correspondre à l'exploitation d'une semaine, d'un mois, d'une année, l'on ne dispose habituellement pas de suffisamment de données pour pouvoir construire un "histogramme local". On doit donc essayer de déduire la distribution locale à partir des données observées et d'un modèle. Parfois ce modèle inclut le changement de support, parfois non, et il faut alors utiliser une des lois statistiques. On est ici en plein domaine de la

géostatistique non linéaire. Le problème de l'estimation des ressources récupérables ou exploitables a été un secteur de recherche très actif au cours des années 1980.

Après plusieurs tâtonnements, une définition internationale unique des catégories de ressources (et de réserves) s'est imposée. Ces définitions doivent être respectées dans la préparation des rapports publics des compagnies minières.

Normalement, l'ingénieur de mine et le géologue, que ce soit par méthodes traditionnelles ou par géostatistique, ne peuvent fournir des estimations que sur des ressources.

Dans le premier chapitre on définit les ressources et réserves ainsi que les méthodes d'estimation de celle-ci ; La classification en réserves demande des études de faisabilité minière et économique.

La prévision des productions futures annuelles nécessite de connaître les réserves et la possibilité de leur exploitation. Les économistes ont une confiance illimitée dans la nouvelle technologie. Ils considèrent que les réserves augmentent avec les prix, faisant la confusion avec l'exploitation minière où les réserves dépendent de la teneur de coupure économique, qui dépend des prix.

## I-2 Définitions:

### I-2-1 Les gisements :

Sont les zones où se trouvent des accumulations exceptionnelles de minerais (on les distingue selon leur forme en filons, lentilles ou amas). La notion d'exploitabilité d'un type de minerai ou d'un gisement est liée aux circonstances économiques et aux données de la technique ; tel gisement n'est pas exploitable à une époque donnée, parce que les cours sont trop bas, (ou, ce qui revient à peu près au même parce que d'autres gisements plus favorisés suffisent à assurer les besoins) puis redevient exploitable ; tel minerai n'était pas exploitable avant la découverte du procédé de concentration par flottation ; tel gisement devient exploitable grâce aux progrès de la technique minière, par exemple la réfrigération de l'air pour les parties très profondes des mines. Mais ces roches ou ces zones n'en étaient pas moins des minerais et des gisements, ils n'étaient pas exploitables et le sont devenus.

### I-2-2 gisements métallifères et minerai métallique:

Ces deux définitions qui suivent sont encore économiques et sont riches de sens et de nuance et méritent quelques commentaires.

### - Un gisement métallifère :

C'est une masse de minerai métallique, contenant un ou plusieurs métaux, susceptibles d'être exploités.

### - Un minerai métallique :

C'est tout minéral, ou toute association minérale susceptible d'être exploité(e) pour l'obtention d'un ou plusieurs métaux (définition du mineur).

A propos du minerai... La définition que nous venons d'en donner est celle du mineur. Celui-ci ajoute souvent minerai brut ou « tout venant » pour désigner l'association minéral telle qu'on l'extrait de la mine ou de la carrière, et minerai proprement dit pour désigner le ou les espèces minérales utiles, qui seront isolées par concentration. Ce tri s'opérant souvent par « lavage », on dit souvent « minerai lavé » ou « concentré ». Les minéraux sans utilité constituent la gangue.

Pour les minéralogistes et les pétrographes le minerai est une roche, mais une roche très particulière, constituée en partie de minéraux qu'on ne rencontre pas souvent, ou fort rarement. Cependant le minéralogiste désigne assez fréquemment par « minerai » toute espèce minérale parce que la majorité des minéraux des minerais (au sens du mineur) sont opaques.

### I-3 Ressources et réserves :

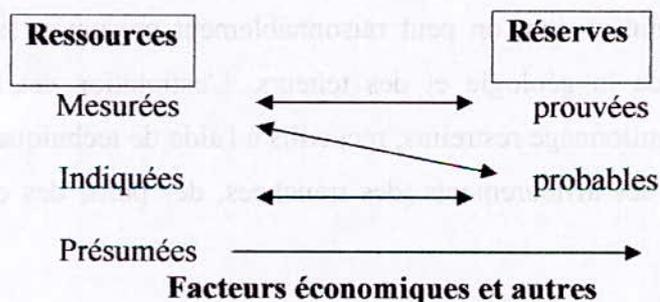
Des efforts importants ont été menés par différents pays (Etats unis, Australie, Afrique du sud, Canada) en vue de se doter de normes pour la catégorisation et l'évaluation des ressources et réserves. On note une forte convergence des différents projets et l'on peut ainsi se référer à la norme Canadienne qu'est très représentative des propositions présentées dans le monde.

Définitions et règles à suivre :

Distinction ressources- réserves : preuve de rentabilité (étude de faisabilité)

Trois catégories de ressources : mesurées, indiquées, présumées.

Deux catégories de réserves : prouvées et probables.



### I-3-1 Ressources minérales :

Elles sont subdivisées en trois catégories : les ressources minérales présumées, indiquées et mesurées, suivant l'ordre croissant de confiance. Les ressources minérales présumées comportent un degré de confiance inférieur à celui des ressources minérales indiquées qui, elles, comportent un degré de confiance supérieur à celui des ressources minérales présumées mais inférieur à celui des ressources minérales mesurées.

Les ressources minérales sont des concentrations ou indices minéralisés d'une substance naturelle solide présente au sein de la croûte terrestre ou sur celle-ci, qu'il s'agisse d'une substance inorganique ou d'une substance organique fossilisée, dont la forme, la quantité et la teneur ou qualité sont telles qu'elles présentent des perspectives raisonnables d'extraction rentable. La localisation, la quantité, la teneur, les caractéristiques géologiques et la continuité des ressources minérales sont connues, estimées ou interprétées à partir de preuves et de connaissances géologiques spécifiques.

Le terme comprend la minéralisation et les substances naturelles présentant un intérêt économique intrinsèque, délimitées et estimées par l'exploration et l'échantillonnage et à partir desquelles on pourra éventuellement définir les réserves minérales en tenant compte des facteurs techniques, économiques, juridiques, environnementaux, socio-économiques et gouvernementaux. L'expression " perspectives raisonnables d'extraction rentable " est une indication du jugement de la personne qualifiée relativement aux facteurs techniques et économiques pouvant vraisemblablement avoir une incidence sur la perspective d'une extraction rentable. Les ressources minérales constituent un inventaire de la minéralisation dont l'extraction pourrait s'avérer rentable dans l'hypothèse de conditions techniques et économiques réalistes et justifiables. Ces hypothèses doivent être présentées de manière explicite à la fois dans les rapports publics et techniques.

#### I-3-1-1 Ressources minérales présumées :

Les " ressources minérales présumées " constituent la partie des ressources minérales dont on peut estimer la quantité et la teneur ou qualité sur la base de preuves géologiques et d'un échantillonnage restreint et dont on peut raisonnablement présumer, sans toutefois la vérifier, de la continuité de la géologie et des teneurs. L'estimation est fondée sur des renseignements et un échantillonnage restreints, recueillis à l'aide de techniques appropriées à partir d'emplacements tels des affleurements, des tranchées, des puits, des chantiers et des sondages.

En raison de l'incertitude liée à cette catégorie, on ne peut émettre l'hypothèse que des ressources minérales présumées passeront, en tout ou en partie, à une catégorie supérieure, les ressources minérales indiquées ou mesurées, par suite de travaux d'exploration. Le degré de confiance de l'estimation est insuffisant pour permettre la mise en application significative de paramètres techniques et économiques ou pour permettre une évaluation de la viabilité économique qu'il serait justifié de rendre publique. Les ressources minérales présumées doivent être exclues des estimations formant la base des études de faisabilité ou autres études économiques.

### **I-3-1-2 Ressources minérales indiquées :**

Les " ressources minérales indiquées " constituent la partie des ressources minérales dont on peut estimer la quantité et la teneur ou qualité, la densité, la forme et les caractéristiques physiques avec un niveau de confiance suffisant pour permettre la mise en place appropriée de paramètres techniques et économiques en vue de justifier la planification minière et l'évaluation de la viabilité économique du dépôt. L'estimation est fondée sur des renseignements détaillés et fiables relativement à l'exploration et aux essais, recueillis à l'aide de techniques appropriées à partir d'emplacements tels des affleurements, des tranchées, des puits, des chantiers et des sondages dont l'espacement est assez serré pour émettre une hypothèse raisonnable sur la continuité de la géologie et des teneurs.

Une minéralisation peut être classée dans la catégorie des ressources minérales indiquées par la personne qualifiée lorsque la nature, la qualité, la quantité et la distribution des données sont telles qu'elles permettent d'interpréter avec confiance le contexte géologique et d'émettre une hypothèse raisonnable sur la continuité de la minéralisation. La personne qualifiée doit reconnaître l'importance de la catégorie des ressources minérales indiquées pour l'avancement de la faisabilité du projet. La qualité d'une estimation de ressources minérales indiquées est suffisante pour justifier une étude préliminaire de faisabilité pouvant servir de base à la prise de décisions majeures d'aménagement.

### **I-3-1-3 Ressources minérales mesurées :**

Les " ressources minérales mesurées " sont la partie des ressources minérales dont la quantité et la teneur ou qualité, la densité, la forme et les caractéristiques physiques sont si bien établies que l'on peut les estimer avec suffisamment de confiance pour permettre une considération adéquate de paramètres techniques et économiques en vue de justifier la planification de la production et l'évaluation de la viabilité économique du dépôt. L'estimation est fondée sur des renseignements détaillés et fiables relativement à l'exploration et aux essais,

recueillis à l'aide de techniques appropriées à partir d'emplacements tels des affleurements, des tranchées, des puits, des chantiers et des sondages dont l'espacement est assez serré pour confirmer à la fois la continuité de la géologie et des teneurs.

Une minéralisation ou une autre substance naturelle présentant un intérêt économique peut être classée dans la catégorie des ressources minérales mesurées par la personne qualifiée lorsque la nature, la qualité, la quantité et la distribution des données sont telles que l'on puisse estimer le tonnage et la teneur de la minéralisation à l'intérieur de limites concises et lorsqu'une variation de l'estimation n'aurait pas d'incidence notable sur le potentiel de viabilité économique. Cette catégorie nécessite un niveau élevé de confiance et de compréhension de la géologie et des contrôles du gîte minéral.

### I-3-2 Réserves minérales :

Elles sont subdivisées en réserves minérales probables et réserves minérales prouvées suivant l'ordre croissant de confiance géologique. Les réserves minérales probables comportent un degré de confiance inférieur à celui des réserves minérales prouvées.

Les réserves minérales désignent la partie économiquement exploitable des ressources minérales mesurées ou indiquées, démontrée par au moins une étude préliminaire de faisabilité. L'étude doit inclure les renseignements adéquats sur l'exploitation minière, le traitement, la métallurgie, les aspects économiques et autres facteurs pertinents démontrant qu'il est possible, au moment de la rédaction du rapport, de justifier l'extraction rentable. Les réserves minérales comprennent les matériaux de dilution et des provisions pour pertes subies lors de l'exploitation.

Les réserves minérales constituent la partie des ressources minérales qui, après considération de tous les facteurs miniers, donne une estimation de tonnage et de teneur qui, de l'avis de la ou des personnes qualifiées réalisant les estimations, forme la base d'un projet économiquement viable après considération des facteurs de traitement et de commercialisation, ainsi que des facteurs métallurgiques, économiques, juridiques, environnementaux, socio-économiques et gouvernementaux pertinents. Les réserves minérales comprennent tous les matériaux de dilution qui seront exploités conjointement avec les réserves minérales et transportées à l'usine de traitement ou aux installations équivalentes. Le terme " réserves minérales " ne suppose pas nécessairement la mise en place ou en fonction d'installations d'extraction ni la réception de toutes les approbations gouvernementales. Il signifie qu'il est raisonnable d'espérer de telles approbations.

### **I-3-2-1 Réserves minérales probables :**

Les " réserves minérales probables " constituent la partie économiquement exploitable des ressources minérales indiquées et, dans certains cas, des ressources minérales mesurées, démontrée par au moins une étude préliminaire de faisabilité. L'étude doit inclure les renseignements adéquats sur l'exploitation minière, le traitement, la métallurgie, les aspects économiques et autres facteurs pertinents démontrant qu'il est possible, au moment de la rédaction du rapport, de justifier l'extraction rentable.

### **I-3-2-2 Réserves minérales prouvées :**

Les " réserves minérales prouvées " constituent la partie économiquement exploitable des ressources minérales mesurées, démontrée par au moins une étude préliminaire de faisabilité. L'étude doit inclure les renseignements adéquats sur l'exploitation minière, le traitement, la métallurgie, les aspects économiques et autres facteurs pertinents justifiant l'extraction rentable au moment de la rédaction du rapport.

Le classement dans cette catégorie suppose que la personne qualifiée a le degré de confiance le plus élevé, ce qui, par conséquent, crée des attentes chez les lecteurs du rapport. Le terme devrait être restreint à la partie du dépôt où prend place la planification minière et pour laquelle des variations de l'estimation n'auraient aucune incidence notable sur le potentiel de viabilité économique.

## **I-4 Estimation des ressources géologiques**

### **Estimation :**

Estimer un dépôt métallifère consiste essentiellement à déterminer la valeur - métal qu'il contient. Cette valeur- métal est fonction du tonnage et de la teneur moyenne à condition que celle-ci soit au-dessous d'une teneur- limite et à certaines autre condition(minerai traitable, etc.). Donc l'estimation des gisements comporte des mesures de teneur à affecter à certains tonnages.

### **Bloc d'estimation :**

C'est le volume élémentaire du gisement dont on estime les caractéristiques : tonnage, teneur.

### **Apport de la géostatistique à l'estimation des ressources :**

Technique dérivée du calcul des probabilités appliquée à des problèmes d'estimation géologique.

**Krigeage :**

Technique géostatistique d'estimation des caractéristiques d'un volume prenant en compte des informations intérieures et extérieures à ce volume.

**I-5 Méthodes conventionnelles de calcul des ressources :**

On entend par méthodes conventionnelles, toutes les méthodes autres que la géostatistique. L'objectif est de fournir une estimation de la teneur pour tout élément de volume ou de surface à partir d'un échantillonnage limité. On applique ensuite les teneurs de coupure désirées à ces estimations. Toutes les méthodes conventionnelles (et même les méthodes géostatistiques) sont basées sur un calcul de moyenne pondérée qui attribue des poids aux observations en fonction de la position spatiale par rapport à l'élément de volume ou de surface que l'on veut estimer. Dans les méthodes géostatistiques et pour la méthode inverse de la distance, l'élément de volume (ou de surface) est défini a priori et est habituellement défini en fonction de la position spatiale des observations. La taille et la forme de celui-ci peuvent varier d'un endroit à l'autre, bref, ces méthodes assignent une (zone d'influence) à chaque observation. La façon dont ces zones d'influence sont construites donne le volume ou la surface estimée.

**I-5-1 Méthode des polygones :**

Dans un plan, on trace autour de chaque point échantillon un polygone renfermant tous les points du plan pour lesquels l'échantillon considéré est l'échantillon le plus près.

La méthode la plus utilisée consiste à tracer des triangles les plus équilatéraux possibles (triangulation de Delaunay). Une fois les triangles tracés, on abaisse des perpendiculaires aux points milieux des segments des triangles. Les intersections entre trois perpendiculaires définissent un sommet du polygone.

Le volume associé à un polygone : surface du polygone x épaisseur de la veine mesurée au point échantillon situé dans chaque polygone.

La géostatistique permet de démontrer que cette méthode est inadéquate pour estimer les ressources car elle néglige un facteur extrêmement important : l'effet support. En effet, la distribution des valeurs estimées sera identique à celle des valeurs (ponctuelles) observées. Cette méthode peut donner tout de même de bons résultats pour des échantillonnages denses ou la minéralisation est continue et varie graduellement pourvu que l'on tienne compte du support de sélection dans les calculs des ressources.

**I-5-2 Méthode des sections :****Principe :**

La méthode des sections consiste à tracer une suite de sections à travers un gisement, à déterminer les zones de minerais dans chaque section et à compiler le volume total en utilisant les distances entre chaque section. Cette méthode est particulièrement indiquée dans le cas de gisements en forme de veines ou de lentilles. Elle demande que les forages soient positionnés selon des sections parallèles, lesquelles sont habituellement orthogonales au corps minéralisé. Pour ce type de gisement, les logiciels modernes de calcul des ressources procèdent habituellement en 3 étapes :

- 1) Un modèle de blocs du gisement est construit à l'aide d'une méthode d'interpolation de type inverse de la distance ou krigeage (géostatistique).
- 2) Un solide est construit à partir des teneurs mesurées sur les carottes prélevées et d'une teneur de coupure spécifiée.
- 3) Le modèle de blocs est intersecté avec le solide et la teneur pour l'ensemble du solide est la moyenne des blocs contenu dans l'enveloppe de celui-ci.

**Remarque :**

Anciennement, les teneurs des forages servaient à estimer directement les teneurs des surfaces, lesquelles servaient à estimer directement les teneurs des volumes. Aujourd'hui on préfère découper le volume en blocs et les estimer par la géostatistique ou inverse de la distance.

La construction des solides s'effectue selon les étapes suivantes :

- 1) Déterminer les zones minéralisées sur chaque forage pour une teneur de coupure donnée.
- 2) À partir des intersections minéralisées des forages définir sur chaque section la surface minéralisée.
- 3) Joindre les surfaces minéralisées entre les sections pour construire des volumes.

**1) Zones minéralisées sur chaque forage pour une teneur de coupure donnée.**

- Pour une section donnée, on représente la trace des forages dans la section. On spécifie habituellement une distance de tolérance, de part et d'autre de la section, pour considérer

qu'un forage ou une partie de forage appartient à la section et doit y être représenté.

- Chaque analyse est représentée le long du forage et on détermine ainsi les portions de forage qui sont au-dessus de la teneur de coupure.

### **2) Construction des surfaces minéralisées :**

- On superpose la géologie connue (lorsque disponible).
- Considérant la géologie et l'ensemble des portions de forage au-dessus de la teneur de coupure, on délimite une ou plusieurs surfaces minéralisées sur chaque section. On évite de créer de trop petites surfaces qui ne pourront de toute façon être exploitées.
- Dans certains cas, on pourra aussi chercher à intégrer des contraintes d'exploitation pour fournir un estimé des ressources récupérables.
- Dans la construction des surfaces, on évite d'extrapoler à de trop grandes distances par rapport aux forages, surtout lors de la fermeture de la surface là où il n'y a pas de forages stériles pour nous guider.

### **3) Construction des volumes :**

- Des logiciels construisent des solides en 3D à partir des polygones fournis sur une série de sections parallèles. Ces polygones sont les limites des surfaces minéralisées obtenues à l'étape précédente. On procède ainsi :
- Le polygone correspondant à une surface donnée sur une section est discrétisé par une série de points.
- Deux polygones sur des sections voisines sont joints par des triangles de façon à fermer le vide entre les sections. Le solide est donc délimité par un ensemble de facettes triangulaires.
- Les sections de bout constituent un cas spécial. L'utilisateur doit fournir un point ou une surface de fermeture (ou plusieurs le cas échéant) pour chaque section de bout.

### **4) Intersection avec un modèle de blocs :**

- On détermine si chaque bloc est à l'intérieur ou à l'extérieur du solide formé. On calcule la moyenne des blocs intérieurs au solide. Chaque bloc peut avoir une simple estimation de la teneur si la densité est constante ou, si la densité varie, une estimation de la teneur et de la densité.

### I-6 Ressources récupérables :

Lorsqu'une mine est exploitée de façon sélective, i.e. que la décision d'expédier un bloc au concentrateur ou aux terrils est prise bloc par bloc, alors la simple connaissance de la teneur et du tonnage du gisement ne suffit évidemment pas à déterminer la rentabilité de la mine. En effet, deux mines d'or ayant une teneur moyenne de 3g/t, pourront montrer une rentabilité très différente selon la variabilité des teneurs de blocs (unités de sélection), et selon leur mode d'exploitation.

La prise en compte des contraintes d'exploitation dans la prédiction des ressources n'est pas à proprement parler du ressort de la géostatistique. La géostatistique agit plutôt comme étape préliminaire pour fournir les meilleurs estimateurs possibles des teneurs inconnues. Les contraintes d'exploitation peuvent alors être prises en compte par des programmes d'optimisation des fosses (ciel ouvert) ou des chantiers (souterrain). Dans ce dernier cas toutefois, seules des méthodes heuristiques (i.e. ne fournissant pas nécessairement une solution optimale) existent. L'attrait principal de la géostatistique consiste à fournir des estimations sans biais conditionnel. Ceci veut dire que la valeur calculée d'une fosse, après optimisation, devrait correspondre à ce qui serait réellement récupéré si on l'exploitait tel quel. Il faut noter toutefois que la fosse dessinée d'après les valeurs krigées sera différente de la fosse optimale que l'on aurait dessinée si l'on avait connu les vraies teneurs de bloc (effet information).

Dans ce qui suit on s'intéressera donc aux ressources récupérables en supposant une sélection libre des blocs. Il faudra garder à l'esprit que les contraintes minières ne pourront que faire décroître la valeur des ressources par rapport à la sélection libre. De plus, les outils utilisés pourront varier selon que l'on est intéressé aux ressources récupérables actuelles ou futures et selon que l'on s'intéresse à une échelle locale ou globale. Finalement on examinera la contribution que peut apporter la géostatistique à la classification des ressources en ressources mesurées, indiquées et inférées (ou présumées).

**Exemple :** Estimation des ressources La mine de bachelor (Canada).

Les compagnies minières de la mine d'Or de bachelor sont localisées dans le canton Le Sueur, près de la petite localité du Québec (Canada). Le site de la mine est doté de bureaux, d'un atelier mécanique, d'une sécherie, d'une salle de compresseur, d'un chevalement, d'un traitement ayant une capacité de 500 tonnes par jour, De plus, une estimation des ressources est montrée dans le Tableau ci dessous.

Tableau I-1 : estimation des ressources de la mine d'or de Bachlor (Canada 20-12-2004)

catégorie	Tonne	Teneur (g/t)	Or Total (Kg)
Mesurées	185477	8,81	1634
Indiquées	196572	10,80	2123
Inférées	232497	10,42	2423

- Les ressources minérales ne sont pas des réserves minérales car elles n'ont pas démontrées leur viabilité économique.
- Les ressources ont été colligées en utilisant une teneur de coupure de 3,43 g/t Au. Une teneur de coupure de 3,43g/t représente environ une valeur de 550\$/t au prix actuel de l'or et selon le taux de change en vigueur. Cette teneur de coupure doit être réévaluée en fonction des conditions du marché: prix de l'or, taux de change et coûts de minage.

Une densité unique par tonne courte fut employée pour les calculs. Les intersections obtenues par forage ont été calculées à une largeur horizontale minimum de 1.5m en utilisant la teneur du matériel adjacent lorsque analysé ou une valeur de zéro lorsque non analysé. En s'appuyant sur les pratiques en usage par le personnel de la mine d'or de bachlor lors des années de production, les hautes teneurs étaient coupées à 3,43 g/t Au pour la zone "Principale", et à 2,23 g/t Au pour une autre zone. Ce seuil de coupure n'est supporté par aucune étude statistique mais, comme il correspond aux règles en usage dans l'industrie minière.

La compagnie n'est pas au courant s'il existe un quelconque problème environnemental, de permis légal, de titre minier, de taxation, sociopolitiques, de marketing ou autre, qui pourrait matériellement affecter l'estimation des ressources minérales.

La plupart des méthodes utilisées pour l'estimation des ressources récupérables globales suivent le schéma suivant:

- 1) On construit l'histogramme des teneurs des observations (habituellement quasi-ponctuelles).

- 2) On calcule le variogramme des valeurs ponctuelles que l'on modélise.  
On calcule la variance des blocs de la taille des unités de sélection.
- 3) On "corrige" (sous certaines hypothèses) l'histogramme des valeurs ponctuelles de façon à ce que la nouvelle distribution présente la variance calculée en (2).
- 4) on applique les teneurs de coupure à l'histogramme corrigé. La proportion excédant la teneur de coupure donne le tonnage, la moyenne des valeurs excédant la teneur de coupure donne la teneur des ressources récupérables.

### I-7 Influence de la densité sur le calcul des ressources :

Dans le calcul conventionnel des ressources, les résultats d'analyse reçoivent d'abord une pondération linéaire (ex. trous de forage), de surface, et enfin de volumes. Des volumes sont traduits en tonne de minerai en utilisant un estimé de la densité. Cependant, la densité peut varier d'un bloc de minerai à l'autre et d'un type de gangue à l'autre. Par exemple, 1% de cuivre représente une masse de cuivre plus importante dans  $1\text{m}^3$  de sulfures massifs (densité de 4 à 5) que dans  $1\text{m}^3$  de gangue siliceuse (densité 2,7-3).

#### Exemple :

Soit un bloc de minerai de  $1\text{m}^3$  renferme 100 Kg de cuivre.

Si la densité du bloc est 3,5, la teneur est :  $100\text{Kg}/3,5\text{t}=2,9\%$ .

Si la densité du bloc est 3,2 la teneur est :  $100\text{Kg}/3,2\text{t}=3,1\%$ .

### I-8 Durée de vie d'une mine :

Il existe plusieurs formules empiriques, plus ou moins complexes et considérant un nombre plus ou moins important de paramètres, pour déterminer la durée de vie approximative d'une mine. Une des formules les plus simples est celle de Taylor:

$$\text{Durée de vie (en années)} = 6.5 * T^{0.25}$$

Où T est le tonnage de la mine exprimé en millions de tonnes.

Ex. une mine de 50 Mt aura une durée de vie approximative de  $6.5*50^{0.25}=17$  ans.

### Conclusion :

Les activités d'exploration, de mise en valeur et d'exploitation de propriétés de ressources naturelle qui, de par la nature, comportent un degré élevé de risque. Les données relatives aux réserves prouvées et probables sont des estimations ; rien ne garantit que les quantités indiquées à l'égard de la production seront atteintes, les écarts entre réserves réelles et réserves prévues et entre taux de récupération réels et taux de récupération prévus peuvent avoir une incidence importante sur les résultats financiers.

Les sociétés minières présentent l'information relative à leurs réserves et ressources à l'aide des sous catégories de réserves minérales "prouvées", réserves minérales "probables", ressources minérales "mesurées", ressources minérales "indiquées" et ressources minérales "présumées".

Une réserve minérale correspond à la partie économiquement exploitable des ressources mesurées ou indiquées, démontrée par une étude de faisabilité préliminaire ou une étude de faisabilité.

Une ressource minérale correspond à des concentrations ou indices minéralisés d'une substance naturelle solide présente au sein de la croûte terrestre ou sur celle-ci, qu'il s'agisse d'une substance inorganique ou d'une substance organique fossilisée, dont la forme, la quantité et la teneur ou qualité sont telles qu'elles présentent des perspectives raisonnables d'extraction économique.

L'estimation est fondée sur des informations détaillées et fiables relatives à l'exploration et aux essais, recueillies à l'aide de techniques appropriées à partir d'emplacements tels des affleurements, des tranchées, des puits, des chantiers et des sondages dont l'espacement est assez serré pour émettre une hypothèse raisonnable sur la continuité de la géologie et des teneurs.

Les investisseurs ne doivent pas tenir pour acquis qu'une partie de l'ensemble des ressources présumées existe ou qu'elles sont économiquement ou juridiquement exploitables. Pour les sondages qui sont éloignés l'un de l'autre au stade d'exploration On calcule la proportion de minerai et métal pour des unités de sélection (petits blocs) dans des unités plus larges.

Or, dans le cas d'une étude de réaménagement du territoire, on calcule dans une zone large, la proportion d'unités d'une surface qui est contaminée. Les techniques utilisées de la géostatistique sont le krigeage disjonctif.

## *Chapitre III*

Teneur et teneur de coupure d'un gisement

## II-1 Introduction :

Les compagnies d'exploitation minières font affaire avec les compagnies de géostatistique qu'ils ont, soit quelques doutes, ou pire, un problème avec l'estimation des ressources ou des réserves et teneur de coupure de leurs gisements. Avec l'explosion de logiciels miniers, virtuellement chacun peut calculer des ressources ou réserves à partir de données de trous de forage en quelques jours ou même quelques heures et la teneur de coupure à partir des données de marché ou concentrateur...

L'estimation des gisements comporte des mesures de teneurs à affecter à certains tonnages. la manière d'affecter les teneur aux tonnages, de même que la façon de répartir des sondages dans lesquels seront mesurées les teneurs, peut dans certains cas être aidée par une discussion mathématique fondée sur le calcul de probabilité. L'estimation ne peut donc être une simple suite d'opérations mathématiques. Cependant elle nécessite le recours à un appareil mathématique qui peut être simple ou assez compliqué selon le type de gisement et la précision attendue pour les résultats.

Pour les renseignements chiffrés sur les teneurs et les puissances ou volumes minéralisés, Il est essentiel de les faire figurer sur les mêmes plans ou sur des plans superposables. Le coût élevé des travaux de reconnaissance impose la meilleure utilisation possible de leurs résultats. Leur étude est particulièrement importante pour les gisements à faibles teneurs. Une faute d'estimation pouvant, dans de nombreux cas, rendre déficitaire un dépôt jugé rentable ou inversement, faire rejeter un dépôt qui aurait pu se révéler rentable.

C'est pourquoi de telles études ont été développées en particulier sur les gisements de métaux à faible teneur, par exemple dans les mines d'or d'Afrique du Sud. Mais il est évident qu'elles ont également un intérêt dans d'autres cas ; en fournissant davantage de renseignements, elles peuvent permettre de réduire les frais de recherches.

Le problème c'est qu'à lui seul le logiciel, ne peut pas tout faire. Dans la majorité des cas, la compétence et l'expérience du géologue, du statisticien et de l'ingénieur minier entrent en jeu pour qu'une prédiction fiable de ce qui peut être miné soit faite. En répondant à certaine question :

- A quelle teneur on peut exploiter un gisement ?
- Où devrais-je couper les teneurs hautes ?ou ai-je vraiment besoin de teneur de coupure de gisement?

- Basé sur des vérifications d'analyses, ai-je besoin de "corriger" les analyses avant de les utiliser dans l'estimation des ressources et de teneur de coupure?

- A quelle erreur d'échantillonnage puis-je m'attendre avec ce protocole de préparation d'échantillons et y a-t-il de la place pour de l'amélioration?

-Puis-je faire de l'interpolation de blocs avec les données de l'intervalle original d'analyse de 1 m ou dois-je créer des composites?

-Combien de dilution est incluse dans la teneur de bloc estimée et est-ce assez pour avoir une prédiction réaliste en tonnes minées?

- J'ai calculé plusieurs variogrammes dans toutes les directions et en employant presque toutes les transformations de données possibles. Lequel devrais-je utiliser dans le krigeage?

- quelle est la teneur de coupure pour exploiter un gisement?

C'est ce que nous allons essayer de mettre en lumière ces différents points pour obtenir des réponses satisfaisant notre curiosité sur la relation teneur de coupure- production et profit d'un projet minier.

#### **Teneur (en une substance donnée) :**

Rapport pondéral de la quantité de substance utile considéré au poids sur sec du volume de minerai, contenant cette même quantité de substance.

#### **Teneur géologique :**

Teneur de minerai en place estimée à partir des seules données géologiques ( $t_0$ ).cette teneur, peu significative pour l'exploitation, est remplacée en général par la teneur ( $t$ ), en place.

#### **Teneur en place :**

Teneur estimée du minerai compte tenu des contraintes générales d'exploitation.

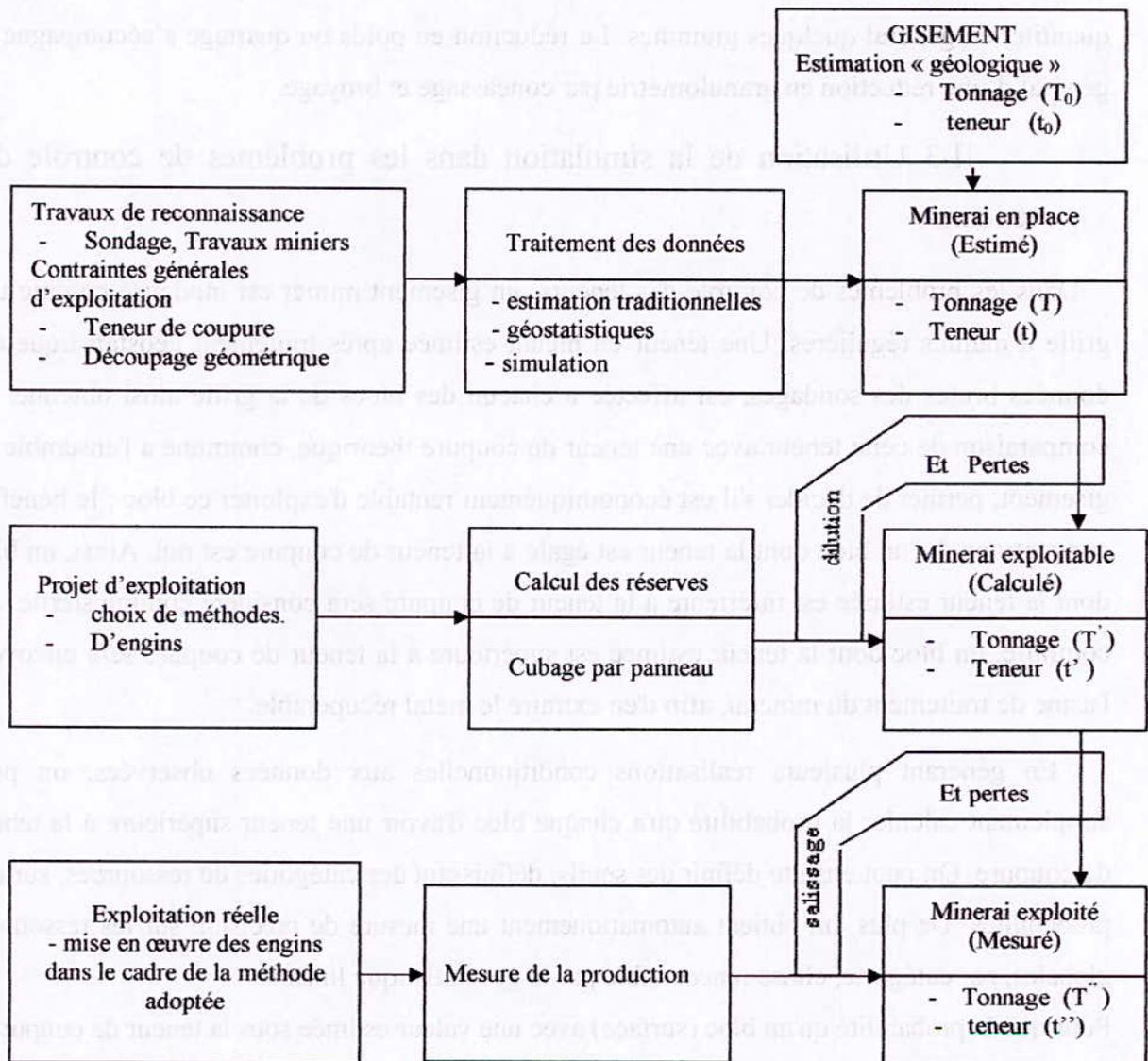
L'organigramme ci après donne l'explication de teneur géologique – teneur en place.

Avant l'exploitation d'un gisement on estime sa teneur  $t_0$  et le tonnage  $T_0$ , et à partir des travaux de reconnaissance (sondage, travaux miniers...) et les contraintes générales d'exploitation on détermine la teneur de coupure et le découpage géométrique. En faisant un traitement des données par des estimations traditionnelles, géostatistiques ou par simulation on estime la teneur  $t$  et le tonnage  $T$  du minerai en place.

Pour la préparation du projet d'exploitation on choisi la meilleure méthode d'exploitation et les engins les plus efficaces pour récupérer la plus grande quantité du minerai et l'estimation des réserves est basée sur le calcul de la teneur  $t'$  et tonnage  $T'$  du minerai exploitable après la dilution et les pertes.

Par la mise en œuvre des engins dans le cadre de la méthode adoptée pour commencer l'exploitation on mesure la production finale à partir de mesure de la teneur  $t''$  et le tonnage  $T''$  du minerai exploité après salissage et pertes.

On note que si la teneur du minerai exploité (mesuré)  $t''$  est supérieure à la teneur de coupure on exploite le gisement et on fait le traitement de ce minerai ; si non ou le laisse en place.



Organigramme II -1: Teneur géologique – Teneur en place

## II-2 Echantillonnage pour la mesure des teneurs :

Pour déterminer la teneur d'un lot de minerai, que celui-ci soit encore en place dans la mine, ou abattu, ou déposé sur le carreau de la mine il faut en tirer un échantillonnage le plus représentatif possible. Sur cet échantillon on dosera divers éléments chimiques.

Cet échantillon ne peut avoir exactement la composition moyenne du lot. La méthode courante consiste à multiplier le nombre des échantillons et à faire la moyenne des teneurs obtenus ; cela est coûteux et assez arbitraire. Certaines méthodes permettent d'avoir une idée de l'erreur commise dans cette opération.

L'échantillonnage comporte deux opérations successives : le prélèvement de l'échantillon, puis sa réduction en poids, car l'analyse chimique s'opère sur de très petite quantité, en général quelques grammes. La réduction en poids ou quartage s'accompagne en général d'une réduction en granulométrie par concassage et broyage.

## II-3 Utilisation de la simulation dans les problèmes de contrôle des teneurs :

Dans les problèmes de contrôle des teneurs, un gisement minier est modélisé comme une grille à mailles régulières. Une teneur en métal, estimée après traitement géostatistique des données brutes des sondages, est affectée à chacun des blocs de la grille ainsi obtenue. La comparaison de cette teneur avec une teneur de coupure théorique, commune à l'ensemble du gisement, permet de décider s'il est économiquement rentable d'exploiter ce bloc : le bénéfice conventionnel d'un bloc dont la teneur est égale à la teneur de coupure est nul. Ainsi, un bloc dont la teneur estimée est inférieure à la teneur de coupure sera considéré comme stérile. Au contraire, un bloc dont la teneur estimée est supérieure à la teneur de coupure sera envoyé à l'usine de traitement du minerai, afin d'en extraire le métal récupérable.

En générant plusieurs réalisations conditionnelles aux données observées, on peut simplement calculer la probabilité qu'a chaque bloc d'avoir une teneur supérieure à la teneur de coupure. On peut ensuite définir des seuils, définissant des catégories de ressources, sur ces probabilités. De plus, on obtient automatiquement une mesure de précision sur les ressources globales, par catégorie, chose inaccessible par la géostatistique linéaire.

Pour que la probabilité qu'un bloc (surface) avec une valeur estimée sous la teneur de coupure a une valeur en réalité au dessus de la teneur de coupure. On utilise des simulations pour créer

une série de "réalités" possibles. Multiples simulations du gisement sont faites sur une maille très dense.

Toutes ces simulations respectent l'aspect structural entre les données. Chaque simulation représente une "réalité" possible. Pour chaque simulation, la valeur pour chacun des blocs est calculée en moyennant les valeurs simulées sur la maille très fine qui se situe dans le bloc.

Pour une certaine teneur de coupure, la proportion des blocs avec une valeur au dessus de la teneur de coupure indique la probabilité que la valeur réelle (mais inconnue pour nous) se trouve au dessus de la teneur de coupure.

#### II-4 Teneur de coupure :

##### 1) Définition :

Valeur particulière de la teneur, choisie pour sélectionner le minerai. Cette valeur se réfère au volume unitaire de sélection (sondage, godet de pelle, volée, panneau...). La teneur de coupure possède une signification économique : elle consiste à un instant donné et à un stade de l'exploitation la limite de rentabilité de l'exploitation du minerai, afin de démarquer deux lignes de conduites : soit exploiter un gisement ou le laisser en place, soit traiter le minerai ou le rejeter.

##### 2) Types de teneur de coupure

###### A - Teneur de coupure optimale :

Teneur de coupure qui par son choix permet de maximiser le bénéfice. Ce maximum peut être évalué par un des critères d'évaluation économique par exemple les coûts d'extraction, prix du marché etc.

###### B - Teneur de coupure limite :

Teneur à laquelle le revenu récupérable du minerai est égal aux coûts d'exploitation.

###### C - Teneur de coupure de planification :

Au cours de l'exploration et aux différentes étapes de la planification, de l'exploration d'un gisement, une teneur de coupure est nécessaire pour définir géographiquement et quantitativement les limites du minerai potentiel.

Puisque aucune information précise sur l'exploration minière éventuelle n'est encore connue au début de l'exploration d'un gîte, la teneur de coupure de planification à cette étape est semi quantitative : elle vise à prédire de façon satisfaisante la valeur du minerai qui pourra éventuellement être exploité ou traité.

En général, les ressources sont calculées pour un certain nombre de teneurs de coupure.

Exemple : dépôt de cuivre à basse teneur à différentes teneurs de coupure. (Tableau ci après).

Tableau II-1 : ressources calculées pour les teneurs de coupure envisagés.

Ressources (MT)	teneur moyenne (g/t)	T.C (g/t)	tonnes de cuivre obtenu
957	0,70	0,10	669.900.000
749	0,84	0,30	629.160.000
453	1,14	0,60	516.420.000

#### D - Teneurs de coupure d'opération :

La teneur de coupure d'opération est nécessaire au début d'exploitation pour déterminer à court terme quelle portion du minerai peut être gardée en réserve et quelle portion peut être acheminée vers l'usine de traitement.

##### a- Teneur de coupure à la mine :

La teneur du minerai au-dessus de la teneur de coupure est exploité, celui en dessous reste en place.

##### b- Teneur de coupure au concentrateur :

La teneur du minerai (extrait) au-dessus de la teneur de coupure est acheminée vers l'usine de traitement pour être concentré. Le minerai sous la coupure est rejeté ou entreposé pour une concentration ultérieure.

##### c- Teneur de coupure à la fonderie :

La teneur du concentré au-dessus de la teneur de coupure est raffiné et vendu. La teneur de coupure peut aussi être appliquée à des impuretés présentes dans le concentré.

Les décisions sur les teneurs de coupure sont prises au moment de la production, même si ces teneurs de coupure ont d'abord reçu une première évaluation à l'étape de la planification. La teneur de coupure peut aussi s'appliquer de façon inverse (ex. teneur maximale de production de phosphate acceptable dans un concentré de fer).

Tableau II-2 : Influence de la teneur de coupure d'opération (mine, concentrateur, fonderie).

Milieu opératoire	Effet de la teneur de coupure
Mine	dimension des chantiers Distance des chantiers
Concentrateur	si du minerai doit être sorti de la mine, Il se peut qu'il ne soit pas économique de le traiter
Fonderie	Une teneur trop basse peut être refusée ou pénalisée Trop d'impuretés peut conduire à un retour au Concentrateur.

## II-5 Facteurs qui affectent le choix des teneurs de coupure d'opération :

### II-5-1 les prix :

Par exemple une hausse du prix de l'or permet d'exploiter avec profit du minerai présentement non rentable. On pourrait donc abaisser la teneur de coupure d'opération à la mine. D'un autre côté, si l'on prévoit que cette hausse du prix peut n'être que de courte durée, on pourrait au contraire décider d'augmenter temporairement la teneur de coupure à la mine de façon à produire le plus d'or possible durant cet intervalle de temps et profiter ainsi des prix à la hausse. Cette dernière dépend grandement du type d'exploitation utilisée et de la possibilité ou non de retourner chercher du minerai délaissé.

### II-5-2 la méthode d'exploitation :

Pour une exploitation souterraine, la teneur de coupure est calculée pour chacune des méthodes de minage, puisque les coûts de production varient d'une méthode à l'autre. Pour une exploitation de surface, les coûts de production sont déterminés pour chaque bloc inclus dans le modèle de blocs de l'exploitation spécifique.

La méthode d'abattage peut rendre difficile l'application de la T.C au niveau de la mine. Exemple : dans la méthode des blocs foudroyés, on récupère le minerai qui se présente sans appliquer de teneur de coupure. Eventuellement, des blocs sont abandonnés.

Taylor, 1972, reconnaît trois grand types d'exploitation. Il indique les étapes de l'exploitation pour chaque type où il est important d'établir les teneurs de coupures :

- Mine souterraine, gisement mince et variable : type A
- Mine souterraine, gisement massif ou tabulaire épais : type B
- Mine en fosse, (à ciel ouvert) gisement massif ou disséminé : type C

**Gisement de type A :**

Souterrain, en veines mince, erratique. Orientation variable. Grande extension dans les directions.

Ex : veines de quartz aurifère ; La définition de la minéralisation exige un échantillonnage très serré. La mise en valeur exige un développement long, ardu et très sophistiqué. Ce développement peut ensuite servir à la préparation du chantier d'abatage. La réserve accessible représente plusieurs années d'exploitation .Ce sont les seules réserves connues. L'exploitation est laborieuse mais flexible.

**Teneur de coupure :**

Considérant la connaissance détaillée du gisement, la principale teneur de coupure définira quoi abattre. Une coupure secondaire peut sélectionner l'acheminement vers le concentrateur.

**Gisement de type B :**

Souterrain : métaux de base, gisements tabulaires, épaisseur supérieure à 20 m. Minéralisation massive, régulière.

Ex : gisement de fer Ansil, Noranda (Brésil). Si disséminé, le minerai se prolonge dans les épontes. L'évaluation peut être faite sans développement. Le développement secondaire a peut d'avance sur l'exploitation. Les réserves sont grandes, mais le minerai immédiatement accessible est limité. Peu de flexibilité.

**Teneur de coupure :**

Le développement a pour principal objectif la préparation à l'abatage.

Généralement, ce qui est développé sera abattu. La première coupure décidera donc quoi développer, quelquefois même avant le développement primaire.

Considérant que les teneurs varient peu, la teneur de coupure définira souvent les limites du gisement. Ces gisements ont généralement deux teneurs de coupure en série :

- De pré développement.
- A l'extraction du minerai.

**Gisement de type C :**

Carrière : minéralisations de type Cu - Mo porphyrique.

Ex : Mine Gaspé, Murdochville (Etats-Unis). Gisement massif, minéralisation irrégulière. Souvent zoné, cœur riche, bordures plus pauvres extension vertical et horizontal de plusieurs centaines de mètres. Limites du gisement mal défini, des teneurs basses (< 1%). Seul l'exploitation en carrière est rentable, mais elle exige un forage intensif pour l'évaluation à partir de la surface. L'exploitation exige un gros capital.

**Teneur de coupure :**

La teneur de coupure de planification aide à prédire les limites probables de la carrière.

La principale coupure : quelle partie des roches broyées ira au traitement. Coupure secondaire pour évaluer la partie qui sera conservée temporairement sur pile avant d'être acheminée au traitement.

**II-5-3 développements technologiques :**

Diminution du coût d'exploitation ou de concentration, extraction d'autres minéraux devenus en demande.

**II-5-4 l'évolution de l'exploitation :**

A cause de l'actualisation, dans les critères d'évaluation, Il est souvent désirable de débiter l'exploitation à une teneur de coupure plus élevée en exploitant une zone plus riche (produire plus de métal plus rapidement) et de rajuster la teneur de coupure à un niveau plus bas par la suite.

**II-5-5 politiques internes et stockpiling :**

La possibilité d'emmagasiner du minerai permet de sélectionner à la mine du minerai de basse teneur qui sera éventuellement exploité suivant une hausse du prix du métal.

**II-5-6 dimension des installations en opération :**

Elle a une influence directe sur les coûts. Des capacités de production plus grandes permettent un coût de production à la tonne plus faible et permettent donc d'abaisser la teneur de coupure. De plus, les unités de sélection (i.e. les volumes que l'on peut vraiment sélectionner comme économiquement rentables) deviennent plus grands.

### II-5-7 besoins du concentrateur :

Afin de maximiser la récupération au concentrateur, il est important de fournir un minerai le plus homogène possible. Ce ci peut nécessiter la dilution du minerai à fortes teneurs ou au contraire l'ajout de minerai à forte teneur à du minerai de faible teneur.

Le tableau suivant indique la teneur de coupure et les récupérations métallurgiques moyennes dans les exploitations minières, utilisées pour le calcul des réserves minérales prouvées et probables dans quelques mines du Canada.

Tableau II-3 : teneur de coupure et récupération métallurgique moyenne de l'or de quelques mine au Canada.

Mine	récupération métallurgique moyenne <sup>(1)</sup> (or %)	Teneur de coupure
Rosebel	92 a 94	0.5 à 0.7
Doyon	96.2	3.0 à 4.6 <sup>(2)</sup>
Mouska	94.7	9.9 <sup>(2)</sup>
geant dormant	97.2	9.3 à 9.7 <sup>(2)</sup>
Omai	93	0.4 à 0.7 <sup>(2)</sup>

#### Cas d'exemple de la mine à ciel ouvert d'or au Canada

L'exploitation à ciel ouvert a produit un record de 19,6 millions de tonnes de roche desquelles ont été extraites 4,2 millions de tonnes de minerai. Le ratio stérile- minerai diminuera en raison de la diminution de la teneur de coupure, qui est passée de 0,7 à 0,65 gramme d'or par tonne. La hauteur des gradins a été augmentée de cinq à dix mètres afin d'améliorer l'efficacité des opérations de forage et de chargement. D'autre part, la largeur accrue des gradins, conjuguée à des techniques de dynamitage plus efficaces, a permis de restreindre les déplacements de minerai et de stériles pendant les opérations de dynamitage et de diminuer la dilution. D'autres améliorations ont aussi été apportées aux méthodes de contrôle de la teneur du minerai. En dépit d'un coefficient de recouvrement plus élevé, les améliorations apportées ont eu pour effet de diminuer les coûts de production de 7 % par rapport aux coûts de production en moyenne par tonne de minerai.

<sup>(1)</sup> Les taux de récupération variant selon les propriétés métallurgiques de chaque dépôt et les procédés utilisés.

<sup>(2)</sup> Varie selon les méthodes de minage utilisées.

L'agrandissement des installations n'a entraîné aucune modification du plan d'exploitation, car l'augmentation de la production sera contrebalancée par une baisse de la teneur de coupure qui s'établira à 0,5 grammes d'or par tonne. Étant donné les problèmes d'échantillonnage que pose la difficulté de distinguer le minerai des stériles en raison de l'effet de pépite, une baisse de la teneur de coupure augmentera, la probabilité d'envoyer le minerai au circuit de broyage tout en réduisant la dilution. Les techniques d'échantillonnage font également l'objet de mesures d'amélioration afin de mieux séparer le minerai des stériles avant le dynamitage. Le traitement de 4 000 tonnes additionnelles de minerai à faible teneur par jour ajoutera à la production annuelle, moyennant une faible augmentation des coûts de production.

La plus grande partie des réserves minérales n'étaient pas économiquement exploitables d'après le plan d'exploitation en vigueur à ce moment-là. Les modifications qui ont été apportées depuis lors devraient toutefois permettre de rentabiliser l'exploitation. Le facteur clé de ce retournement est l'expansion des capacités de broyage, qui devrait désormais permettre de traiter le minerai à plus faible teneur qui était auparavant mis en dépôt.

Les modifications sur le modèle géologique pour estimer les réserves se sont traduites par un accroissement du tonnage estimé des réserves, en raison surtout de la baisse des teneurs de coupure. Les réserves d'or estimées ont en outre légèrement diminué, principalement par suite de la réduction des dimensions de l'exploitation à ciel ouvert. Par ailleurs, un programme de forage au diamant sera réalisé pour délimiter plus précisément les réserves et de déterminer la durée utile de l'exploitation et préciser la teneur de coupure. De plus, les résultats obtenus par suite de l'expansion des capacités de broyage seront pris en compte dans les prochains calculs des réserves.

## II-6 Application de la teneur de coupure :

Avant d'aborder le calcul de ressources, il est important de décider quelle sera la teneur de coupure des sections évaluées. Lorsqu'on applique la teneur de coupure, il faut aussi tenir compte des contraintes d'exploitation comme la largeur minimum exploitable.

Le tableau II-4 montre la classification des intersections minéralisées en minerai et gangue selon la teneur de coupure de 1% Cu et la valeur de 3 mètres % (i.e. 1% sur 3 mètres). Pour être du minerai, l'échantillon doit donc remplir les deux conditions suivantes :

Avoir une teneur de 1% sur une largeur minimale de 3m(3m%), ainsi, une teneur de 2,20% sur une épaisseur de 1,34m ne remplit pas les conditions de l'exploitation sur 3m.

Puisque la valeur de  $m\%$  est de 2,95, cette portion ne pourrait donc pas être considérée comme du minerai exploitable.

Tableau II-4 : classification des intersections (valeur de coupure minimum de 1,0%et3% $m$ ) pour Cu.

épaisseur réelle (m)	Teneur %	%-mètre	minerai	Non minerai
2,31	1,51	3,49	X	
4,53	3,20	14,50	X	
1,20	2,73	3,28	X	
8,27	0,81	6,70		X
5,20	1,73	9,00	X	
1,34	2,20	2,95		X

## II-7 Facteurs qui conditionnent l'exploitabilité d'un gisement :

### Teneur et tonnage :

Les travaux d'extraction, d'enrichissement (ou concentration) du minerai brut, supposent une mobilisation de capitaux (ou d'énergie social). Il faut que ces capitaux « rapportent ». pour qu'on puisse espérer un profit, il faut d'abord que l'on soit assuré que le gîte contient une certaine valeur métal, c'est-à-dire, étant donné les cours actuels, un certain tonnage de métal ou des métaux que l'on se propose d'exploiter.

Or, le tonnage en métal est, en premier lieu, fonction de deux facteurs principaux, donnés par la nature : la teneur  $t$  du minerai en métal, le tonnage  $T$  de ce minerai.

Dans la pratique de l'exploitation ces deux facteurs ne sont pas indépendants. Pour un dépôt donné, on peut définir une teneur inférieure, ou teneur- limite, en- dessous de laquelle l'exploitation cessera d'être rémunératrice. Cette teneur- limite dépend du prix du métal c'est-à-dire des conditions économiques mondiales ou nationales du coût de l'extraction, de la localisation géographique du gisement, de sa nature minéralogique et enfin de sa dimension de son tonnage ; réserve de minerai.

Dans le calcul des réserves minérales, les teneurs de coupure sont établies en utilisant les hypothèses de la compagnie du prix à long terme du métal, les taux de change pour les devises étrangères, les récupérations métallurgiques moyennes et les coûts estimatifs de production sur la durée de vie d'une exploitation spécifique.

## II-8 Méthodes conventionnelles de calcul de la teneur :

### II-8-1 Méthode des triangles :

C'est une méthode qui est basée sur la construction de triangles à partir de points de mesures de teneurs.

En général, il est préférable de tracer des triangles équilatéraux, dans certain cas, on peut tracer les triangles parallèlement à la continuité de la minéralisation. La triangulation de Delaunay est unique et fournit les triangles les plus équilatéraux possibles. Une triangulation de Delaunay est obtenue lorsque le cercle passant par les sommets d'un triangle n'inclut aucun point échantillon à l'intérieure et ce pour chaque triangle. Des algorithmes très efficaces existent pour réaliser cette triangulation, pour plusieurs milliers de points. Cette triangulation s'effectue en quelques secondes à peine sur ordinateur.

#### *Façon de calculer la teneur et le volume des prismes triangulaires :*

Il existe 2 méthodes selon les hypothèses que l'on est prêt à adopter :

$$\text{Moyenne pondérée} = \frac{\sum t_i S_i}{\sum S_i}$$

Avec :  $t_i$  : teneur       $S_i$  : épaisseur au sommet du triangle.

Dans cette méthode, on suppose que le produit  $tS$  et  $S$  varient tous deux linéairement entre chaque sommet des triangles.  $S_i$ (épaisseur) varie linéairement, alors le volume associé au triangle est l'intégrale de l'épaisseur sur le triangle lequel est aussi égal à l'aire du triangle multiplié par l'épaisseur moyenne,  $A$  étant l'aire du triangle, soit  $(\sum S_i/3)*A$ . De même, si  $tS$  varie linéairement, le total sur le triangle sera  $(\sum t_i S_i/3)*A$ .

La teneur moyenne est donc bien  $\{(\sum t_i S_i/3)*A\} / \{(\sum S_i/3)*A\} = \sum t_i S_i / \sum S_i$ .

### II-8-2 Méthode des pourcentages :

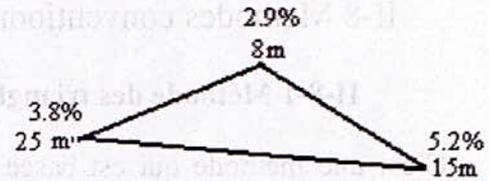
Dans cette méthode, on suppose que  $t$  et  $S$  varient tous deux linéairement entre chaque sommet des triangles. Comme précédemment, le volume vaut  $\sum S_i/3*A$  l'intégral sur le triangle du produit  $tS$  est :  $\{(\sum t_i)*(\sum S_i) + (\sum t_i S_i)\}/12*A$ .

La teneur moyenne est donc :  $\{[(\sum t_i)*(\sum S_i) + (\sum t_i S_i)]/12*A\} / \{(\sum S_i/3)*A\} = (\sum t_i + \sum t_i S_i / \sum S_i) / 4$

**Exemple :**

Teneur moyenne  $(2.9+5.2+3.8)/3=3.97\%$

Epaisseur moyenne  $(8+15+25)/3=16m$



Moyenne pondérée :  $\frac{3.8\% * 25m + 2.9\% * 8m + 5.2\% * 15m}{25m + 8m + 15m} = 4.09\%$

Teneur moyenne par la Méthode du pourcentage :  $\frac{3.8\% + 2.9\% + 5.2 + 4.09}{4} = 4.0\%$

**II-8-3 Méthode de l'inverse de la distance :**

Dans cette méthode, l'estimation de la teneur moyenne en un point M entouré par n points de teneur  $t_i$  ; distants  $d_i$  par rapport à M (Voir l'exemple ci-dessous) est donnée par la relation ci-dessous :

$$t = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{t_i}{d_i^b}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^b}}$$

Telle que :

b : l'exposant d'anisotropie.

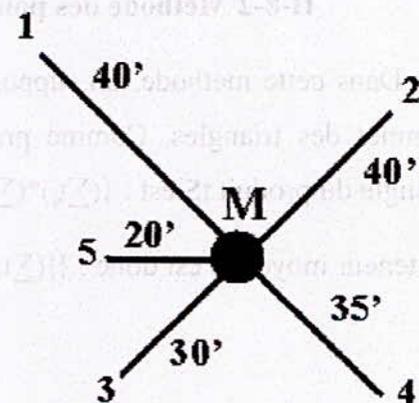
i : nombre des teneurs ou des distances.

**Exemple :** estimation de la teneur moyenne en un point entouré de 5 points de mesures de ce point ; la teneur moyenne sera donné par :

$$t = \frac{\sum_{i=1}^5 \frac{t_i}{d_i^b}}{\sum_{i=1}^5 \frac{1}{d_i^b}}$$

#	distance	Teneur
1	40	1
2	40	1
3	30	1.5
4	35	1.5
5	20	3

Tableau II-5 mesure de la teneur moyenne par la méthode de l'inverse de la distance



Avec  $b=2$  on trouve :

Par la méthode de l'inverse de la distance :

$$t = \frac{(1/40^2 + 1/40^2 + 1.5/30^2 + 1.5/35^2 + 3/20^2)}{(1/40^2 + 1/40^2 + 1/30^2 + 1/35^2 + 1/20^2)} = 2.05\%$$

On peut peaufiner l'estimation par:

- (1) Choix d'une distance maximale: puisque l'influence de certains points est négligeable à une certaine distance, on peut les exclure du calcul.
- (2) Inclusion d'anisotropie géométrique, i.e. on calcule la distance par la formule:

$$d = \sqrt{x^2 + ay^2}$$

Où « a » est un facteur d'anisotropie. Les coordonnées x et y ne sont pas nécessairement les coordonnées originales, on peut, au préalable, effectuer une rotation du système de coordonnées de façon à rendre le nouveau système parallèle à des directions préférentielles de la minéralisation.

- (3) Adapter le choix de l'exposant.

#### **Précision dans la méthode de calcul :**

1- Pour une configuration donnée de points, si l'on estime un bloc en calculant la distance entre les échantillons et le centre de celui-ci, tous les blocs recevront le même poids estimé indépendamment de leur taille. On évitera donc d'estimer de trop gros blocs, préférant estimer de petits blocs que l'on pourra toujours regrouper par la suite.

2- La détermination de l'exposant, d'anisotropie éventuelle et de la distance maximale est faite en se basant sur la connaissance géologique du gisement. On peut aussi utiliser une technique de validation croisée pour nous aider dans nos choix.

Validation croisée: Le principe de la validation croisée consiste à retirer tour à tour une donnée connue et à estimer ce point à l'aide des autres données. À la fin du processus, en chaque point d'observation, on dispose de la vraie valeur observée ( $Z_i$ ) et de l'estimé ( $Z_i^*$ ) obtenu en utilisant les données voisines et la méthode testée. On peut donc construire des « erreurs »:  $e_i = Z_i - Z_i^*$ , et calculer des statistiques sur ces erreurs comme la moyenne, la variance, etc... On peut répéter le processus en changeant de méthode d'estimation (par

exemple en changeant l'exposant « b ») et en comparant les statistiques des erreurs obtenues. La méthode choisie est la méthode donnant les meilleures statistiques d'erreur (moyenne près de 0, variance la plus faible possible, etc.).

Ce principe de validation croisée peut être utilisé pour toutes les méthodes d'estimation, en particulier pour les méthodes géostatistiques.

### II-9 Importance de la qualité de l'estimation des teneurs :

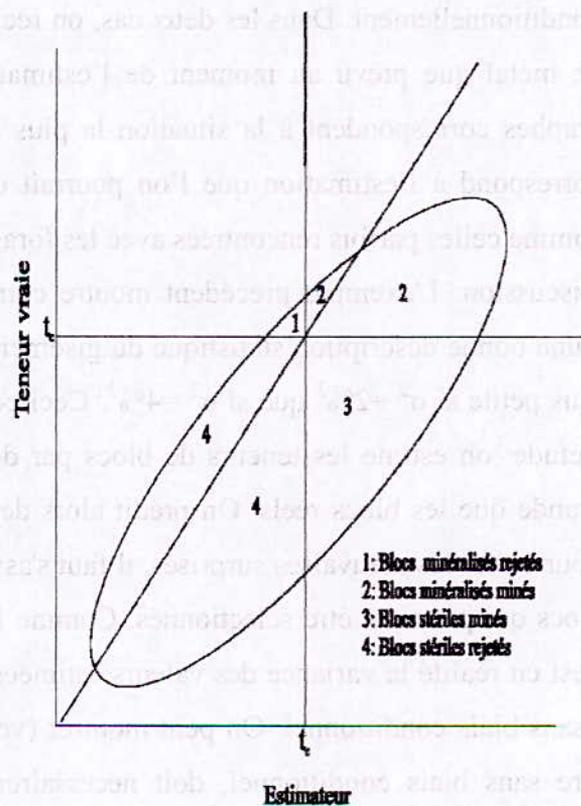
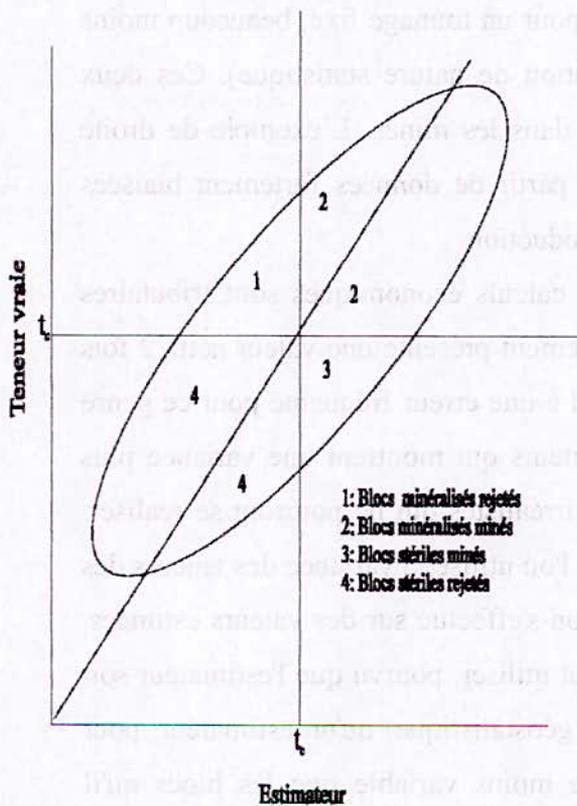
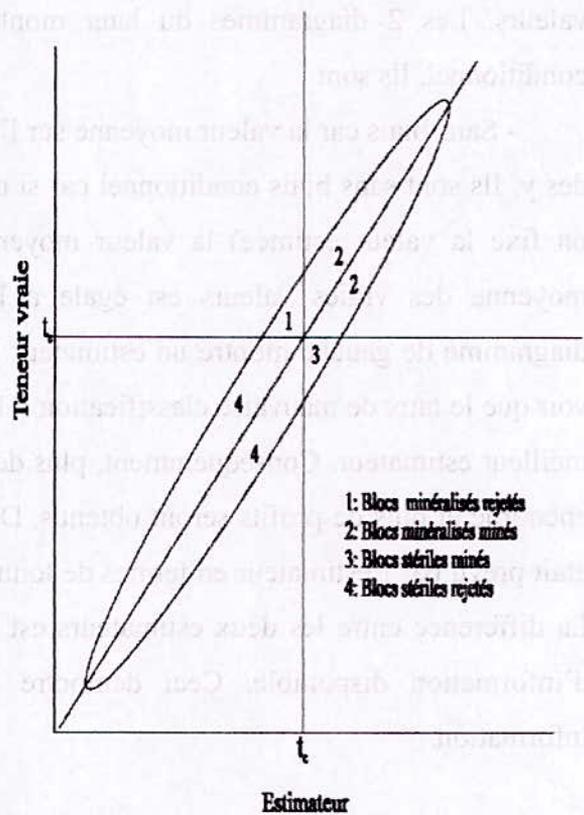
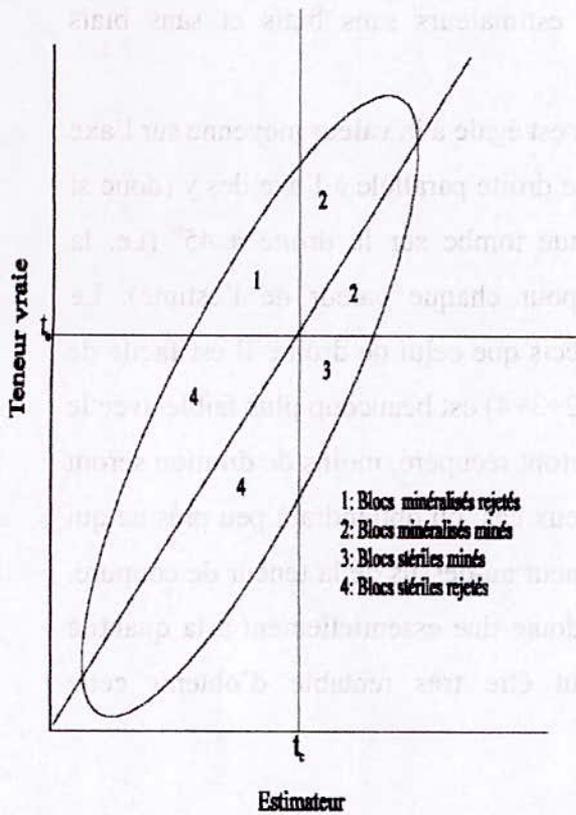
La qualité de l'estimation des teneurs est extrêmement importante au plan économique. Il faut réaliser que la sélection s'effectue toujours à partir de valeurs estimées mais que le métal contenu dans les blocs sélectionnés dépend de la teneur vraie et non de la teneur estimée. Deux paramètres influencent la qualité de l'estimation:

- la quantité (et la qualité) d'information disponible.
- la qualité de la méthode d'estimation utilisée.

En général, les estimateurs peuvent être plus ou moins précis et ils peuvent être avec ou sans biais. Le meilleur estimateur est le plus précis possible et sans biais. Le biais peut être global ou conditionnel. S'il est global, alors la moyenne de tous les estimés ne coïncide pas avec la moyenne du gisement. S'il est conditionnel, alors la moyenne des blocs dont l'estimateur prend une valeur donnée ne coïncide pas avec cette valeur. Cette dernière propriété est plus difficile à rencontrer que le biais global, i.e. un estimateur peut à la fois être globalement sans biais et montrer un fort biais conditionnel. Le biais global est habituellement rattaché à la qualité des données prélevées et on ne peut y changer grande chose. On le rencontre surtout lorsqu'on échantillonne les forages de production ou les galeries. Il se peut que l'échantillonnage ne représente pas équitablement toutes les granulométries présentes (phénomène de ségrégation), ce qui introduit normalement un biais. Au contraire, l'échantillonnage de carottes est habituellement sans biais, du moins lorsque la récupération de la carotte est complète.

Le biais conditionnel, lui, est davantage lié au type d'estimateur choisi. Un des estimateurs qui montre le moins de biais conditionnel est le krigeage. Toutes les méthodes basées sur des extensions géométriques montrent habituellement un biais conditionnel qui peut être assez important.

On doit bien comprendre que toute opération sélective s'effectue à partir de valeurs estimées, jamais à partir des vraies valeurs des blocs qui sont inconnues. Le diagramme suivant aide à comprendre les conséquences importantes de cet état de fait:



Les ellipses représentent l'ensemble des valeurs possibles pour l'estimateur et les vraies valeurs. Les 2 diagrammes du haut montrent des estimateurs sans biais et sans biais conditionnel. Ils sont :

- Sans biais car la valeur moyenne sur l'axe des x est égale à la valeur moyenne sur l'axe des y. Ils sont sans biais conditionnel car si on tire une droite parallèle à l'axe des y (donc si on fixe la valeur estimée) la valeur moyenne obtenue tombe sur la droite à 45° (i.e. la moyenne des vraies valeurs est égale à l'estimé pour chaque valeur de l'estimé). Le diagramme de gauche montre un estimateur moins précis que celui de droite. Il est facile de voir que le taux de mauvaise classification  $((1+3)/(1+2+3+4))$  est beaucoup plus faible avec le meilleur estimateur. Conséquemment, plus de métal seront récupérés, moins de dilution seront encourues et plus de profits seront obtenus. Dans les deux cas, on obtiendra à peu près ce qui était prévu par l'estimateur en termes de tonnage et teneur au-dessus de la teneur de coupure. La différence entre les deux estimateurs est ici sans doute due essentiellement à la quantité d'information disponible. Ceci démontre qu'il peut être très rentable d'obtenir cette information.

Le cas des deux estimateurs du bas est plus grave. Celui de gauche est sans biais global mais montre un biais conditionnel prononcé. Celui de droite est biaisé globalement et conditionnellement. Dans les deux cas, on récupérera, pour un tonnage fixé, beaucoup moins de métal que prévu au moment de l'estimation (dilution de nature statistique). Ces deux graphes correspondent à la situation la plus courante dans les mines. L'exemple de droite correspond à l'estimation que l'on pourrait obtenir à partir de données fortement biaisées comme celles parfois rencontrées avec les forages de production.

Discussion: L'exemple précédent montre combien les calculs économiques sont tributaires d'une bonne description statistique du gisement. Le gisement présente une valeur nette 2 fois plus petite si  $\sigma^2 = 2\%^2$  que si  $\sigma^2 = 4\%^2$ . Ceci correspond à une erreur fréquente pour ce genre d'étude: on estime les teneurs de blocs par des estimateurs qui montrent une variance plus grande que les blocs réels. On prédit alors des profits irréalistes qui ne pourront se réaliser. Pour éviter les mauvaises surprises, il faut s'assurer que l'on utilise la variance des teneurs des blocs qui pourront être sélectionnés. Comme la sélection s'effectue sur des valeurs estimées, c'est en réalité la variance des valeurs estimées qu'il faut utiliser, pourvu que l'estimateur soit - sans biais conditionnel. On peut montrer (voir partie géostatistique) qu'un estimateur, pour être sans biais conditionnel, doit nécessairement être moins variable que les blocs qu'il

cherche à estimer. Les teneurs réelles des blocs sont elles-mêmes moins variables que les teneurs des carottes prélevées dans le gisement (effet support).

## II-10 L'effet du biais conditionnel et de l'information sur les ressources estimées et récupérées: un exemple détaillé.

### 1) Simulation:

Les simulations permettent une estimation plus fine. En générant plusieurs réalisations conditionnelles aux données observées, on peut simplement calculer la probabilité qu'a chaque bloc d'avoir une teneur supérieure à la teneur de coupure. On peut ensuite définir des seuils, définissant des catégories de ressources, sur ces probabilités. De plus, on obtient automatiquement une mesure de précision sur les ressources globales, par catégorie, chose inaccessible par la géostatistique linéaire.

Un gisement a été simulé sur une grille ponctuelle de 128 (en x) 128 (en y) et 5 (en z) avec un variogramme sphérique ayant portées 20 (x) ,20 (y) et 10(z) et palier 25. La distribution statistique des valeurs ponctuelles est normale. Les valeurs ponctuelles ont été regroupées en 256 blocs de 8 (x) par 8 (y) par 5 (z). Ces valeurs constituent les vraies valeurs des blocs. On implante des "forages" dans ce gisement simulé. La teneur moyenne le long du forage est calculée (moyenne de 5 points verticalement). Ces teneurs moyennes servent de données pour une estimation 2D du gisement.

### 2) Estimation: 3 estimateurs sont utilisés:

Polygonal: Méthode polygonale. Chaque bloc est estimé par l'intersection centrale.

Krigeage 1: Krigeage ordinaire. Chaque bloc est estimé par les 16 voisins les plus proches, en utilisant les mêmes observations que pour la méthode polygonale (triangles sur la figure II-1).

Krigeage 2: Krigeage ordinaire: Chaque bloc est estimé par les 32 voisins les plus proches.

Cette fois on utilise la grille d'observations identifiée par les "+" sur la figure II-1. On a donc ici 4 fois plus d'observations pour effectuer le krigeage.

### 3) Ressources :

- i. On peut calculer les ressources "optimales" que l'on obtiendrait en sélectionnant selon les vraies valeurs des blocs. Évidemment, en réalité on ne connaît jamais les vraies teneurs des blocs.
- ii. On peut calculer les ressources prédites par chaque estimateur

- iii. Pour chaque estimateur, on peut calculer les ressources réellement obtenues lorsque la sélection est faite sur la valeur estimée.
- iv. On peut calculer les ressources en se basant sur la distribution normale, et en spécifiant la moyenne et la variance de cette distribution.

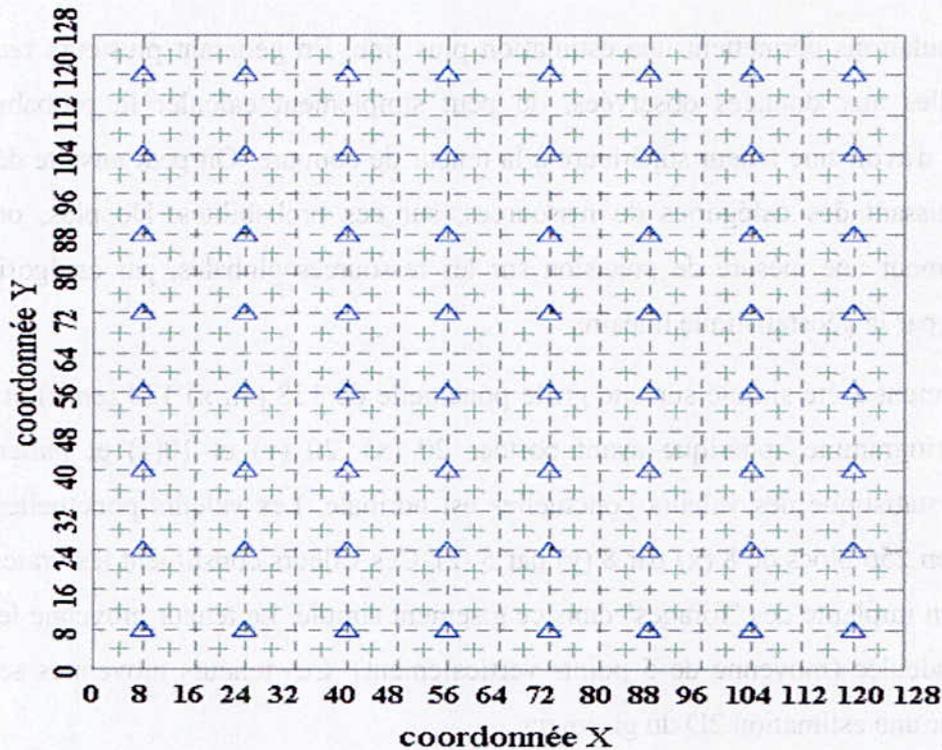


Fig II-1 : plan d'échantillonnage.

### II-11 Estimateurs en fonction des vraies valeurs :

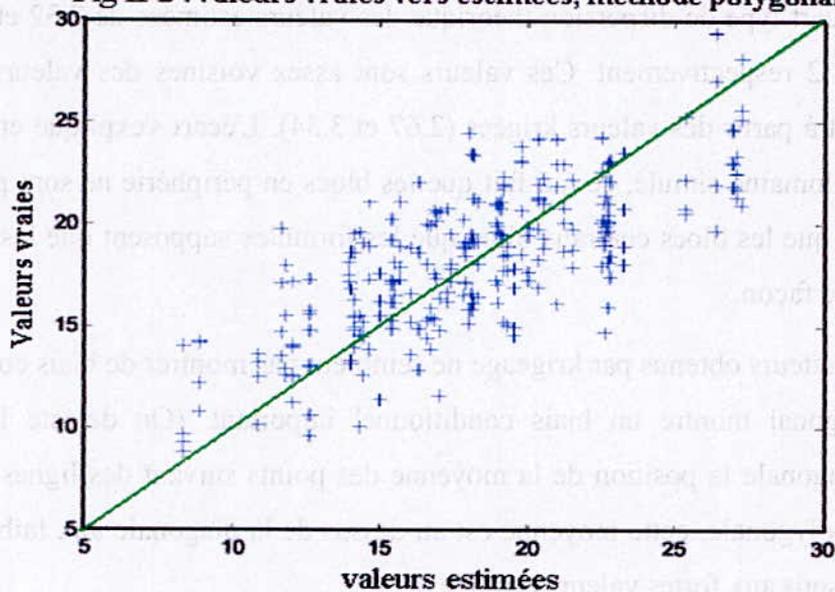
Les figures suivantes montrent les diagrammes binaires de valeurs vraies des blocs en fonction des valeurs estimées des blocs pour les 3 estimateurs. On constate que:

- 1) Les 3 estimateurs sont sans biais globalement.

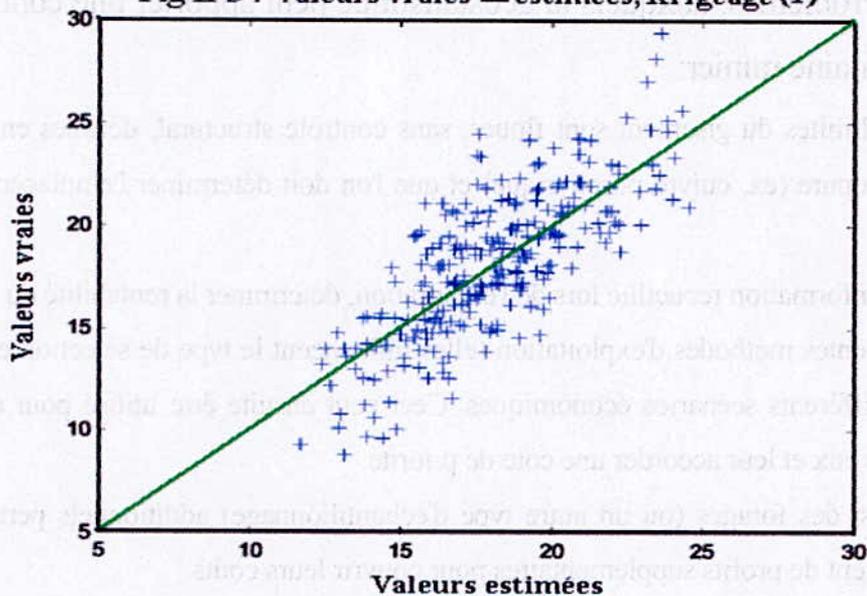
L'estimation la plus précise est fournie par l'estimateur utilisant le plus d'information (krigeage 2), la moins précise par celui utilisant le moins d'information, soit la méthode polygonale (effet information).

- 2) Comme attendu, la variance des estimations fournies par l'estimateur polygonal est voisine de la variance des valeurs ponctuelles. La variance des estimations obtenues par krigeage augmente avec la quantité d'informations (l'effet de lissage diminue), mais demeure inférieure à la variance des vraies teneurs des blocs, et à la variance ponctuelle.

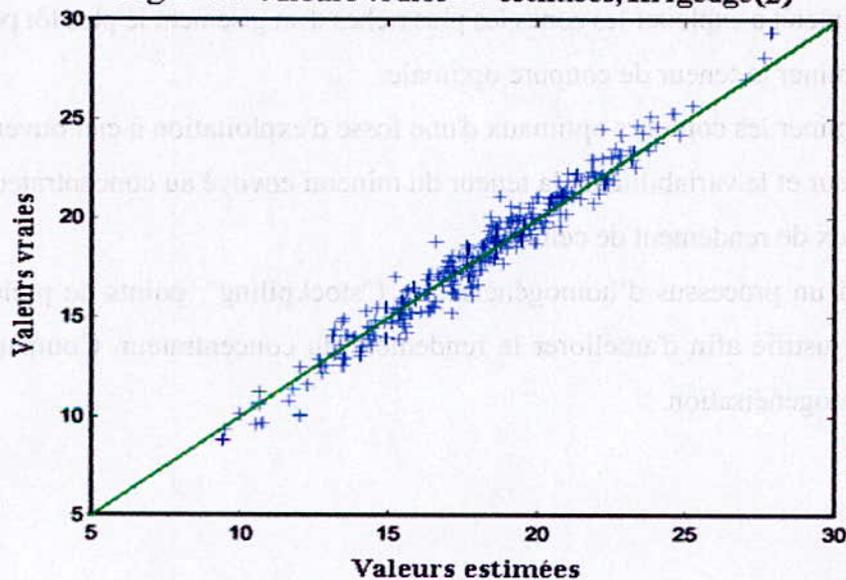
**Fig II-2 : Valeurs vraies vers estimées, méthode polygonale**



**Fig II-3 : Valeurs vraies — estimées, Krigeage (1)**



**Fig II-4 : Valeurs vraies — estimées, Krigeage (2)**



3) On trouve un écart-type de dispersion théorique des valeurs estimées de 2.32 et 3.19 pour les krigeages 1 et 2 respectivement. Ces valeurs sont assez voisines des valeurs calculées expérimentalement à partir des valeurs krigées (2.67 et 3.34). L'écart s'explique en partie par la faible taille du domaine simulé, ce qui fait que les blocs en périphérie ne sont pas estimés de la même façon que les blocs centraux alors que les formules supposent que les blocs sont estimés de la même façon.

4) Les deux estimateurs obtenus par krigeage ne semblent pas montrer de biais conditionnel. L'estimateur polygonal montre un biais conditionnel important. (On détecte le biais en comparant à la diagonale la position de la moyenne des points suivant des lignes verticales. Pour la méthode polygonale, cette moyenne est au-dessus de la diagonale aux faibles valeurs estimées et au-dessous aux fortes valeurs estimées).

## II-12 Problèmes, auxquels la géostatistique peut apporter une contribution dans le domaine minier:

- Lorsque les limites du gisement sont floues, sans contrôle structural, définies en fonction d'une teneur de coupure (ex. cuivre porphyrique) et que l'on doit déterminer l'emplacement d'un chantier d'abattage.

- A partir de l'information recueillie lors de l'exploration, déterminer la rentabilité du gisement en regard de différentes méthodes d'exploitation (elles influencent le type de sélection et la taille des blocs) et de différents scénarios économiques. Ceci peut ensuite être utilisé pour comparer divers projets entre eux et leur accorder une cote de priorité.

- Déterminer si des forages (ou un autre type d'échantillonnage) additionnels permettra de dégager suffisamment de profits supplémentaires pour couvrir leurs coûts.

- Aider à déterminer la séquence d'exploitation optimale permettant de maximiser les profits (on a généralement intérêt à exploiter les zones les plus riches d'un gisement le plus tôt possible).

- Aider à déterminer la teneur de coupure optimale.

- Aider à déterminer les contours optimaux d'une fosse d'exploitation à ciel ouvert.

- Prédire la teneur et la variabilité de la teneur du minerai envoyé au concentrateur et ainsi aider à prédire le taux de rendement de celui-ci.

- Déterminer si un processus d'homogénéisation ("stockpiling", points de prélèvements multiples, etc.) est justifié afin d'améliorer le rendement du concentrateur. Comparer divers scénarios pour l'homogénéisation.

- Prédire le plus exactement possible la teneur du minerai qui sera exploité à court terme. Déterminer si le minerai ainsi extrait sera suffisant pour alimenter seul une fonderie ou s'il faudra prévoir importer du concentré d'autres mines et/ou d'autres pays.

### II-13 Concepts de dilution :

Il y a deux types de dilution:

-La « dilution » de nature statistique liée à une mauvaise sélection des blocs. On peut diminuer cette dilution en augmentant la quantité (et la qualité) de données disponibles et en utilisant un bon estimateur (krigeage). À proprement parler, il ne s'agit pas de dilution (plutôt un biais conditionnel) mais les effets concrets sont les mêmes que pour la dilution opérationnelle.

- La « dilution » de nature opérationnelle liée à l'exploitation des blocs devant être sélectionnés. Même si l'on connaissait parfaitement les teneurs de chaque bloc du gisement, il serait toujours impossible d'aller les chercher exactement, une partie de stérile serait récupérée inévitablement et du minerai serait laissé en place. Ce type de dilution peut être diminué en améliorant les méthodes de minage.

Il faut aussi noter que la position relative des blocs minéralisés dans la mine influence l'application de la teneur de coupure. Dans certains cas, pour récupérer des blocs minéralisés on devra inclure des blocs non économiques. Dans d'autres cas, on abandonnera des blocs économiques demandant un développement trop onéreux. Ceci est particulièrement vrai dans le cas de mines souterraines.

### II-14 Relations de Lasky :

Lasky (1950) a noté empiriquement pour des gisements porphyriques de cuivre deux observations que l'on s'est rendu compte par la suite être valable très fréquemment :

La moyenne au-dessus d'une teneur de coupure ( $M(c)$ ) et le logarithme de la proportion du tonnage au-dessus d'une teneur de coupure ( $T(c)$ ) sont reliés approximativement linéairement :

$$M(c) = a - b \ln T(c)$$

Où « c » est la teneur de coupure et « a » et « b » sont des constantes (positives) spécifiques à chaque gisement. On peut démontrer, dans le cas lognormal, que cette relation est bonne tant que la variance du logarithme (naturel) des teneurs est inférieure à 4 (c'est habituellement le cas). En pratique, on n'utilisera cette loi que pour obtenir une approximation grossière. Pour

des calculs précis, on recourra aux formules de récupération spécifiques à chaque loi de distribution.

La moyenne au-dessus de la teneur de coupure est approximativement égale à la teneur de coupure plus une constante:

$$M(c) = b + c \qquad c = \frac{d[M(c)T(c)]}{dT(c)}$$

**Note:**

La deuxième relation découle directement de la première en notant que :

Ces deux relations, obtenues empiriquement par Lasky, sont rigoureusement valides (e et f des constantes à déterminer) comme l'indique la figure suivante pour la loi lognormale, de moyenne 1 et de variance 1, 2 et 4 :

On note une relation pratiquement linéaire à partir d'une certaine coupure. Toutefois alors que la pente est près de 1 pour  $\sigma^2 = 1$ , elle est environ de 1.5 pour  $\sigma^2 = 4$ , ce qui est contraire à l

**Loi de Lasky.**

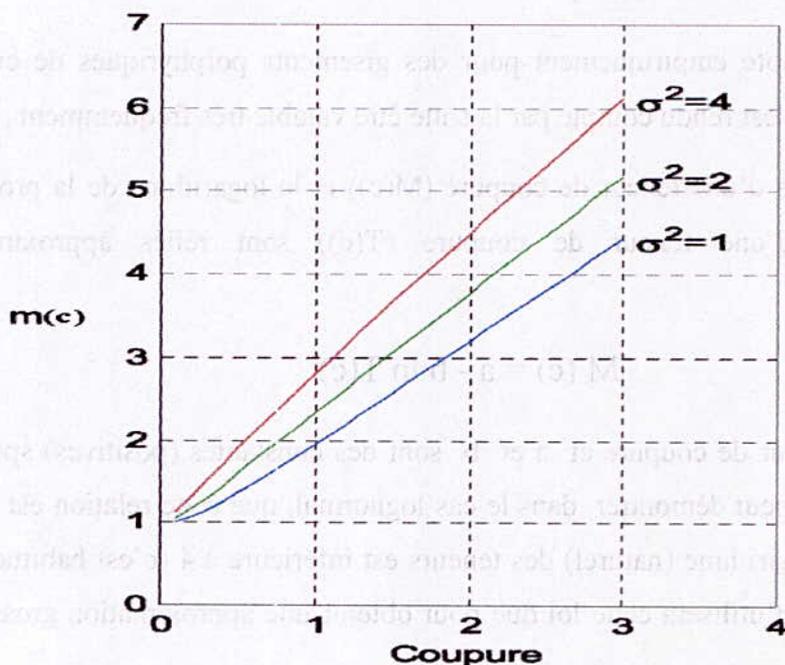
Uniquement dans le cas de la loi exponentielle (et dans ce cas particulier, on a :  $a = b = m$ ).

Pour la distribution lognormale (plus courante) une meilleure relation est donnée par

$$M(c) = e + f \cdot c$$

Ces relations ne constituent qu'un guide grossier. Pour vraiment déterminer la teneur au-dessus de la teneur de coupure, il faut modéliser le gisement par géostatistique et bien tenir compte du support sur lequel la sélection sera opérée.

**Figure II-5 : relation de Lasky ; loi lognormal (m=1)**



## II-15 Courbes tonnage –teneur de coupure :

La façon la plus courante d'exprimer le résultat du calcul des réserves est de tracer les courbes du tonnage ( $T(c)$ ) et de la teneur du minerai ( $M(c)$ ) en fonction de la teneur de coupure. Dans certains cas, on exprime directement  $T(c)$  en fonction de  $M(c)$  mais cela devrait être évité autant que possible. Bien sûr, en fonction de la teneur de coupure,  $T(c)$  est strictement décroissante et  $M(c)$  est strictement croissante.

La détermination des courbes tonnage- teneur est complexe. On peut, grâce à la géostatistique, tenir compte de la taille des unités de sélection et de l'information disponible. Toutefois, les contraintes propres à la position spatiale des différents blocs, en fonction de la méthode de minage, ne peuvent être prises en charge qu'au moyen de techniques de recherche opérationnelle (théorie des graphes, programmation dynamique, programmation en nombre entiers). Notons néanmoins que ces contraintes complexes n'ont pas à être considérées au moment de l'étude de pré faisabilité où les données disponibles ne permettent pas une modélisation aussi fine. Notons aussi que la qualité des résultats de la recherche opérationnelle est très fortement tributaire de la qualité des estimations fournies pour les différents blocs (ce point est, à, trop peu considéré en recherche opérationnelle).

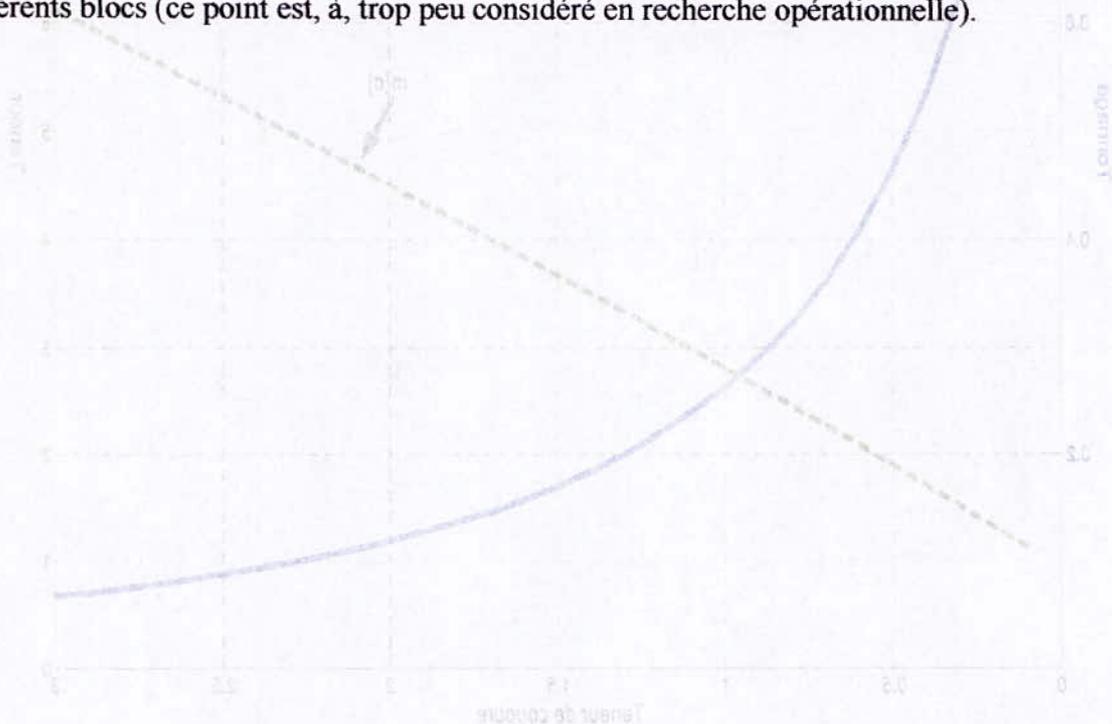


Figure II-15 Courbes tonnage – teneur – teneur de coupure

La figure suivante montre un exemple de courbe tonnage teneur pour une loi lognormale :

Telle que :

(c) : la teneur de coupure.

m(c) : teneur de minerai sélectionnée à la teneur de coupure (c).

T(c) : Tonnage des réserves exploitables à la teneur de coupure (c).

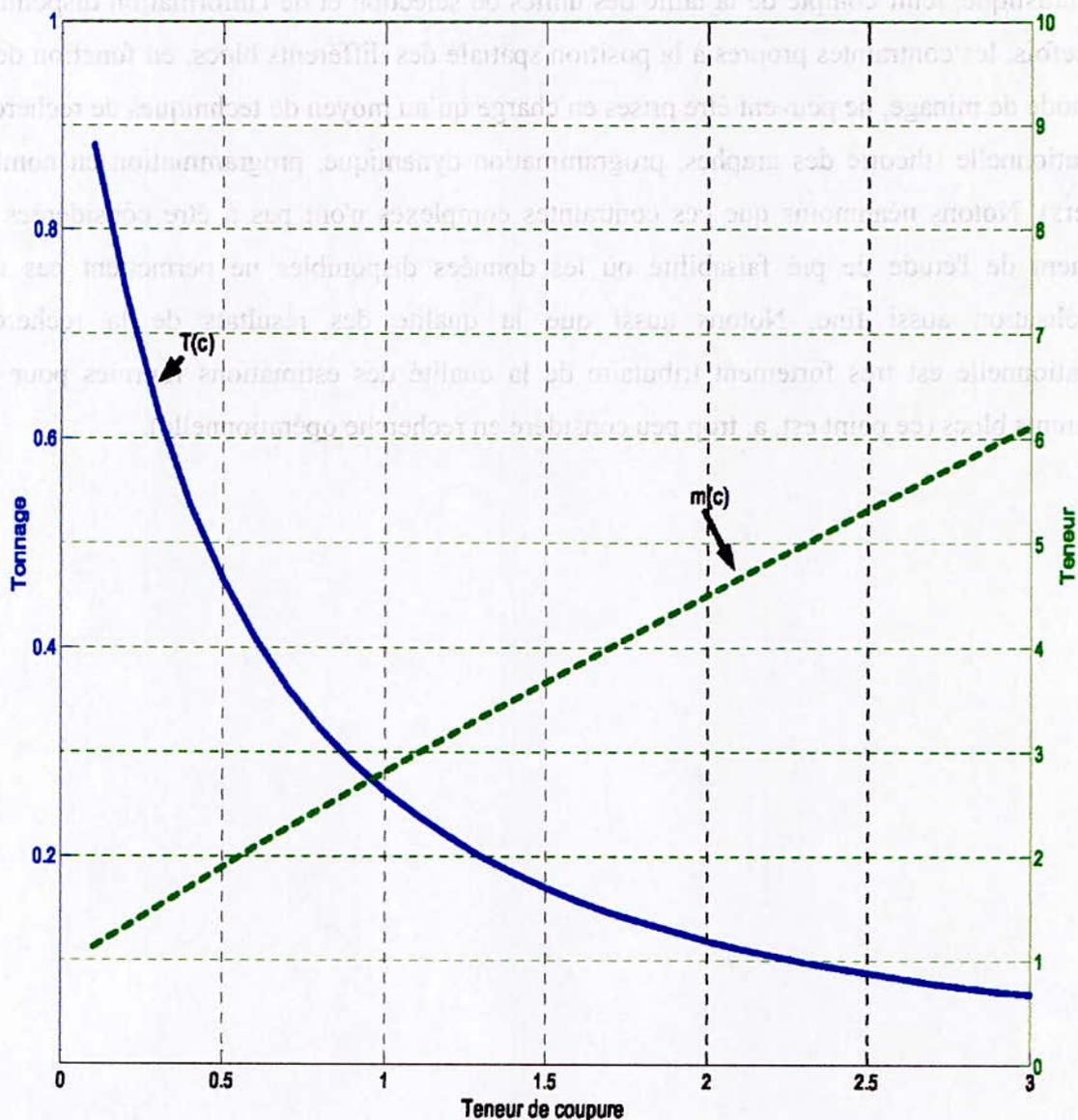


Figure II-6 : courbe tonnage – teneur. Loi lognormale  $m=1, \sigma^2=4$

## II-16 Détermination de la teneur de coupure graphiquement :

On détermine la teneur de coupure par la projection de la proportion du tonnage de minerai à l'équilibre (concentrateur/mine) sur la figure II-7 (a gauche) et on prolonge verticalement le point d'intersection sur l'axe des teneurs de coupure, et pour cette valeur si possible on exprime la teneur du minerai sélectionné par la courbe de teneur de minerai sélectionné en fonction de la teneur de coupure définit comme précédemment (voir l'exemple ci-dessous).

**Exemple :**

La figure ci dessous montre les courbes tonnage - teneur en fonction de la teneur de coupure. La capacité de la mine est de 2.5Mt/an, celle du concentrateur de 1Mt/an. La mine opère à l'équilibre avec le concentrateur.

À l'équilibre, on sélectionnera  $1\text{Mt}/2.5\text{Mt}=0.4$  du matériau minéralisé, ce qui correspond approximativement à la teneur de coupure 0.8%(Graphique de gauche). À cette teneur de coupure, la teneur du minerai est d'environ 2%. (Graphique de droite)

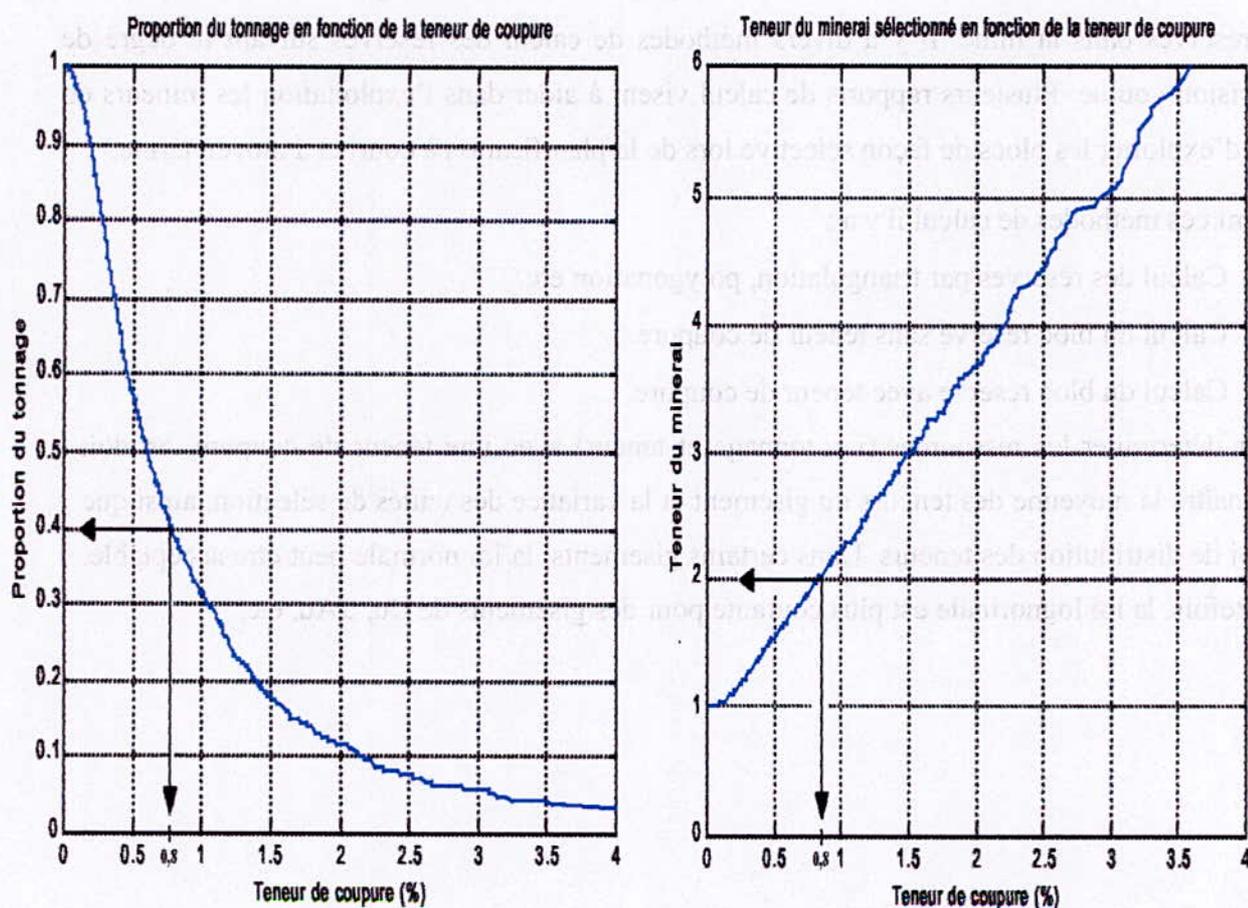


Figure II-7 : courbe tonnage – teneur de coupure et teneur de minerai- teneur de coupure.

II -17 Application de la loi normale et lognormale : réserves en fonction de la teneur de coupure :

#### Estimation de la teneur :

L'estimation de la teneur est un processus d'interpolation des valeurs d'une base de données dans les blocs modèles. La technique d'estimation fournit une meilleure solution que la méthode classique de calcul des réserves du minerai. En effet, les méthodes d'estimation expliquent les rapports spatiaux entre les échantillons. Deux façons de présenter les résultats d'un calcul d'échantillonnage sont possibles. La première consiste à visualiser l'information à l'intérieur du bloc la deuxième affiche le résultat à l'intérieur de la triangulation.

#### Calcul des réserves :

L'analyse détaillée des réserves est une tâche importante dans le développement de la mine car ce sont les réserves qui nous informent sur l'aspect et la forme de la minéralisation et de son emplacement dans l'espace. En plus le choix de la méthode d'exploitation et la planification des travaux, d'infrastructure et de préparation résultent également de la répartition de réserves dans la mine. Il y a divers méthodes de calcul des réserves suivant le degré de précision voulue. Plusieurs rapports de calcul visent à aider dans l'exploitation les mineurs en vue d'exploiter les blocs de façon sélective lors de la planification à court et à moyen terme.

Parmi ces méthodes de calcul il y a :

- Calcul des réserves par triangulation, polygonation etc.
- Calcul du bloc réserve sans teneur de coupure.
- Calcul du bloc réserve avec teneur de coupure.

Pour déterminer les ressources (i.e. tonnage et teneur) avec une teneur de coupure, on doit connaître la moyenne des teneurs du gisement et la variance des unités de sélection, ainsi que la loi de distribution des teneurs. Dans certains gisements la loi normale peut être acceptable. Toutefois, la loi lognormale est plus courante pour des gisements de Cu, d'Au, etc.

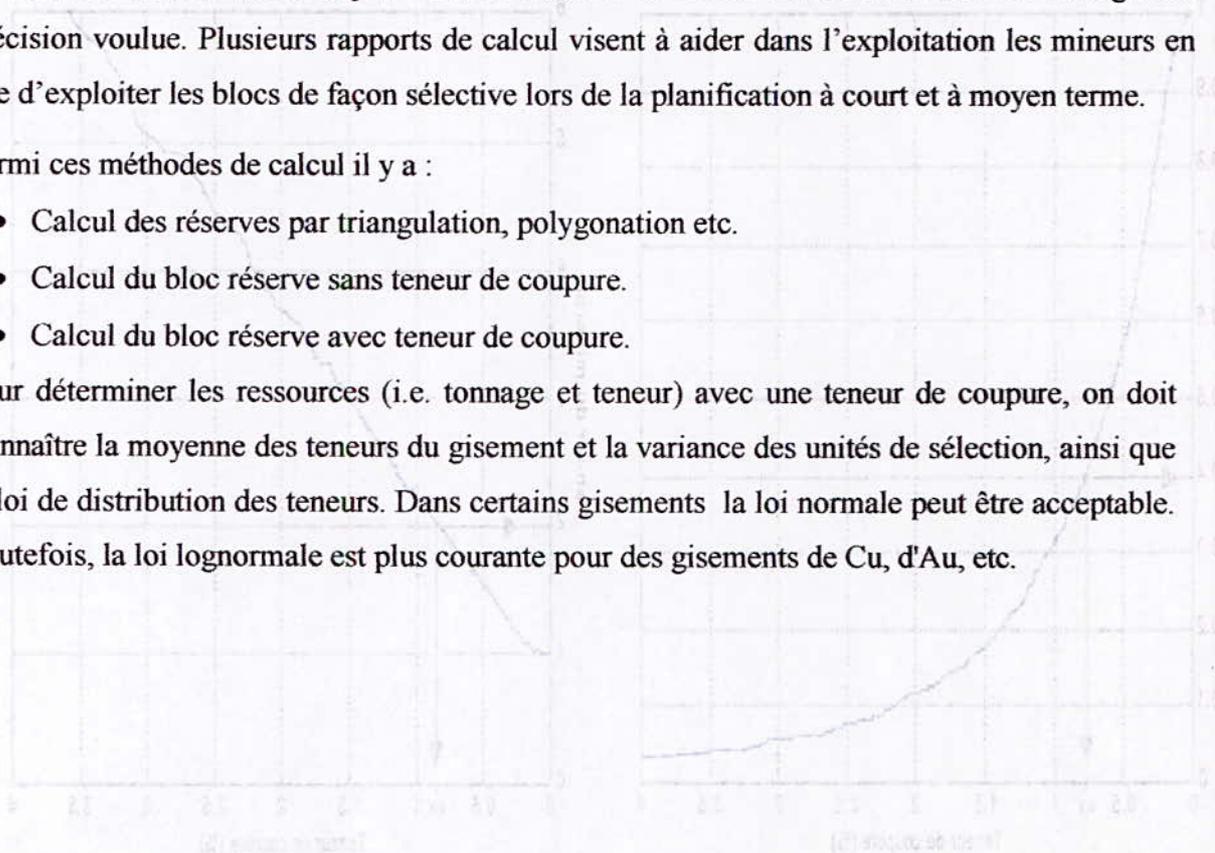


Figure 1-7. Courbes de teneur - teneur, le teneur de coupure et teneur de minerai - teneur de coupure.

**Fonctions de récupération :**

Dans ce qui suit nous présentons les calculs statistiques donnant les fonctions de récupération tonnage  $T(c)$  et la quantité  $Q(c)$  de métal contenue dans le minerai à la teneur de coupure en fonction des paramètres statistiques calculés selon la loi normal et lognormal.

Soit :

$T(c)$  : tonnage de minerai avec la teneur de coupure «  $c$  ».

$Q(c)$  : quantité de métal contenue dans le minerai à la teneur de coupure «  $c$  ».

$M(c)$  : la teneur du minerai relative à la teneur de coupure «  $c$  ».

$T_0$  : Tonnage total de gisement.

$f$  : fonction de densité d'une loi  $N(0,1)$ .

$F$  : fonction de répartition d'une loi  $N(0,1)$ .

$c$  : teneur de coupure.

$m$  : moyenne de la population.

$\sigma$  : écart -type de la population.

$\beta$  : écart type du logarithmique des teneurs (population).

Loi normale	Loi lognormale
$T(c) = T_0 \left\{ 1 - F \left( \frac{c - m}{\sigma} \right) \right\}$	$T(c) = T_0 F \left\{ \frac{1}{\beta} \ln \left( \frac{m}{c} \right) - \frac{\beta}{2} \right\}$
$Q(c) = mT(c) + T_0 \sigma f \left\{ \frac{c - m}{\sigma} \right\}$	$Q(c) = mT_0 F \left\{ \frac{1}{\beta} \ln \left( \frac{m}{c} \right) + \frac{\beta}{2} \right\}$
$M(c) = \frac{Q(c)}{T(c)}$	$M(c) = \frac{Q(c)}{T(c)}$

Tableau II-6 : fonction de récupération tonnage  $T(c)$  à la mine et de concentrateur  $Q(c)$  en fonction de la teneur de coupure.

$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(x) d(x) \quad f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}x^2}$$

$$m = e^{\mu + \frac{\beta^2}{2}} \quad \sigma^2 = m^2(e^{\beta^2} - 1)$$

Où  $\mu$  : moyenne du logarithme des teneurs (population)

$\beta$  : Écart-type du logarithmique des teneurs

Inversant ces relations, on a :

$$\beta^2 = \ln\left(\frac{\sigma^2}{m^2} + 1\right) \quad \text{Et} \quad \mu = \ln(m) - \frac{\beta^2}{2}$$

La plupart du temps, les distributions de teneurs dans les mines ressemblent beaucoup plus à des distributions lognormales que normales.

Exemple de calcul :

Chaque bloc rentable est sélectionné indépendamment de sa position par rapport à d'autres blocs et des contraintes minières.

Des blocs de minerai de fer suivent une loi normale de moyenne 50% et d'écart-type 15%.

Quelles sont les ressources à  $c=40\%$  ?

- Loi normale

$$T(c) = T_0 \left\{ 1 - F\left(\frac{C - m}{\sigma}\right) \right\}$$

$$T(c) = T_0 \left\{ 1 - F\left(\frac{40 - 50}{15}\right) \right\} = T_0 (1 - 0,25) = 0,750 T_0$$

$$Q(c) = mT(c) + T_0 \sigma f\left\{\frac{c - m}{\sigma}\right\}$$

$$Q(c) = 50\% * 0,750 T_0 + 15 T_0 f\left\{\frac{40 - 50}{15}\right\} \Rightarrow$$

$$Q(c) = (0,50 * 0,75 + 0,15 * 0,32) T_0 = 0,423 T_0$$

$$M(c) = \frac{Q(c)}{T(c)} = \frac{0,423 T_0}{0,750 T_0} = 56,4\%$$

- Loi lognormale

$$\beta = \sqrt{\ln\left(\frac{\sigma^2}{m^2} + 1\right)} \Rightarrow \beta = \sqrt{\ln\left(\frac{15^2}{50^2} + 1\right)} \Rightarrow \beta = 0,294$$

$$T(c) = T_0 F\left\{\frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{m}{c}\right) - \frac{\beta}{2}\right\}$$

$$T(c) = T_0 F\left\{\frac{1}{0,294} \ln\left(\frac{50}{40}\right) - \frac{0,294}{2}\right\} = T_0 F(0,612) = 0,730 T_0$$

$$Q(c) = m T_0 F\left\{\frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{m}{c}\right) + \frac{\beta}{2}\right\}$$

$$Q(c) = 50\% T_0 F\left\{\frac{1}{0,294} \ln\left(\frac{50}{40}\right) + \frac{0,294}{2}\right\} = 0,5 T_0 F(0,906) = 0,409 T_0$$

$$M(c) = \frac{0,409}{0,730} = 56\%$$

On constate pour cet exemple que T(c), Q(c), M(c) sont très proches l'un de l'autre lorsqu'on considère les deux lois de distribution.

0,2-2	Cassitérite (Sn) (70% Sn)	Etain
1,5-10 10-50 7-12	Divers minerais - sédimentaire (marbre) - sédimentaire (volcanique) - pluri (veines)	Magnésium
0,3-2	Pentandrite (Fe) S <sub>2</sub>	Nickel
10 <sup>-1</sup> (10g)	Au (70% Au)	Or
2-22	Galen (Pb) (80% Pb)	Plomb
0,2-2	Wolframite (FeMn) WO <sub>4</sub> (42-80% W)	Tungstène
2-22	Sphalérite (Zn) (61-67%)	Zinc

Tableau II-8 : Principales substances minérales et teneurs exploitées au Canada

II-18 Minerai, formule, et teneur de coupure typiques (selon Peters, 1987) :

Le tableau II-8 ci-dessous non donne une indication sur certaines teneurs de coupure de minerais métalliques pouvant être exploités pour en extraire le métal.

Substance	Minerai (formule)	Teneurs Exploitablees (%)
Chrome	Chromite ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) (33% Cr)	3-17
cuivre	Chalcopyrite ( $\text{CuFeS}_2$ ) (35%Cu)	0,3-2
	Bornite ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ )(69% Cu)	0,6-4
	Chalcosite( $\text{Cu}_2\text{S}$ )(80% Cu)	0,6-4
Fer	Magnetite $\text{SnO}_2$ (79% Sn)	25-50
	goethite( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) (63% Fe)	30-60
Etain	Cassitérite $\text{SnO}_2$ (79% Sn)	0,2-5
Magnésium	Divers minerai	
	- sédimentaire (marine)	15-40
	- sédimentaire (volcanique)	10-50
	- pluton (veines)	7-15
Nickel	Pentandite ( $\text{FeNi}_9\text{S}_8$ )	0,3-5
Or	Au (75%Au)	$10^{-5}$ (10g/t)
Plomb	Galène ( $\text{PbS}$ ) (80%Pb)	5-25
Tungstène	Wolframite ( $\text{FeMn}$ ) $\text{WO}_4$ (48-60%W)	0,2-5
Zinc	Sphalérite ( $\text{ZnS}$ ) (60-67%)	5-25

Tableau II-8 : Principales substances, minerais, et teneurs exploitables au Canada

### Conclusion :

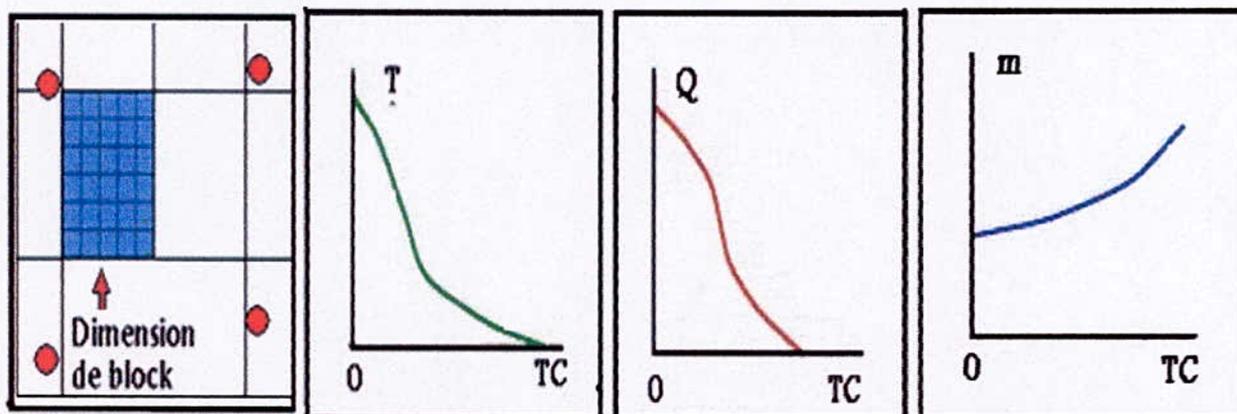
Dans ce chapitre, nous avons exposé certaines méthodes d'échantillonnage des gisements. Cette question est actuellement en pleine évolution. L'existence, la multiplicité et l'actualité même de ces tentatives montrent qu'il n'y a pas encore, en cette matière, de « doctrine » définitive. Et c'est là l'une des causes de la non application de ces techniques statistiques et mathématiques dans un grand nombre de cas. Les autres causes sont l'inexpérience de ces calculs, ou bien des gisements sûrement exploitables.

Mais il apparaît certain que, de plus en plus les ingénieurs des mines et ceux qui ont à prendre des décisions concernant l'exploitabilité ou la non exploitabilité des gisements ont grand besoin de maîtriser ces calculs statistiques pour une estimation plus juste des ressources récupérables grâce aux techniques géostatistiques.

Lorsque le projet est au stade de faisabilité. On décide quelle sera la taille de l'unité de sélection (bloc) qu'on va exploiter au stade de l'exploitation. A ce moment les sondages et données sont trop dispersés pour calculer lesquelles de ces blocs ont une teneur au dessus la teneur de coupure ou quelles unités de surface sont polluées.

Néanmoins il sera possible de calculer pour un grand volume ou surface la proportion d'unités de sélection et leur contenu en moyenne de métal. Les courbes tonnages de minerai (T) et tonnages de métal peuvent être construites. Ils donnent les tonnages de minerai et métal au dessus d'une teneur de coupure. La teneur du minerai augmente avec une augmentation de la teneur de coupure (C).

Une vraie alternative au lieu de kriger des petits blocs avec des données éparées.

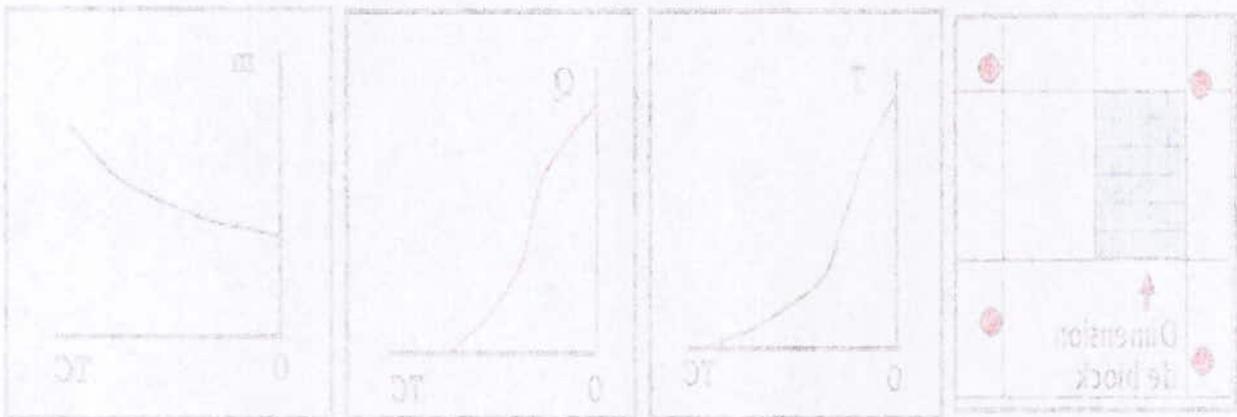


**Echantillon + panneaux Tonnage de minerai Tonnage de métal Teneur moyenne**

Lorsque le projet est au stade de l'exploitation, multiples simulations du gisement sont faites sur une maille très dense.

Toutes ces simulations respectent l'aspect structural entre les données. Chaque simulation représente une "réalité" possible. Pour chaque simulation, la valeur pour chacun des blocs est calculée en moyennant les valeurs simulées sur la maille très fine qui se situe dans le bloc.

Pour une certaine teneur de coupure, la proportion des blocs avec une valeur au dessus de la teneur de coupure indique la probabilité que la valeur réelle se trouve au dessus de la teneur de coupure.



## *Chapitre III*

Teneur de coupure et le profit d'un projet  
minier.

### III-1 Introduction :

Les sociétés d'extraction minière doivent distinguer entre les dépôts de minerai économiquement rentable ou non pour mettre en place une infrastructure à développer pour la production. L'outil primaire pour cette tâche est une étude de faisabilité qui compare des conceptions comparatives de mines pour identifier la méthode la moins coûteuse et estimer des gains financiers donnant les scénarios probables pour de futurs prix de minerai. Les études de faisabilité exigent des données considérables que ce soit géologiques ou technologiques afin d'estimer exactement les coûts d'extraction et de traitement. Ces données ne sont pas assez disponibles jusqu'à ce qu'un dépôt ne soit été étudié à fond par le forage, échantillonnage et la transformation métallurgique. Il y a un besoin, cependant, d'un outil simple pour distinguer entre les dépôts économiques et non rentables qui n'a pas été entièrement exploré. Connu en tant que le coût des modèles économiques, ces outils peuvent être utilisés dans l'exploration pour déterminer lesquels des secteurs ou des dépôts offrant de plus grandes possibilités économiques intéressantes. Dans l'évaluation des ressources, les filtres peuvent aider à déterminer lesquels des dépôts prévus sont économiques ou non rentables. Bien que les filtres exigent beaucoup moins de données, ils sont sensiblement moins précis dans leurs prévisions que les études de faisabilité.

### III-2 Aspects de l'activité minière :

#### 1) Mise en marché de la production :

La majeure partie des revenus et bénéfices de la compagnie minière provient de la vente du métal au moyen de différents instruments. Le cours de ce métal fluctue continuellement car il est, affecté par de nombreux facteurs indépendants de la volonté des sociétés minières. Ainsi, en vue de supporter les investissements pour lesquels elle s'est engagée, la compagnie minière adopte un programme de couverture sur le marché des métaux dont l'objectif est l'amélioration des revenus et la protection des fonds générés à moyen terme. Toutefois, advenant une baisse soutenue du cours du métal, ce programme pourrait s'avérer insuffisant pour satisfaire son objectif. Ce programme comprend l'utilisation de contrats de vente à terme fixe et flexible, de contrats de vente / achat d'options.

Pour les contrats de vente à terme différés en espèces a une date de livraison qui peut être reportée, et leur valeur augmente en fonction du temps et des taux d'intérêts.

Les options peuvent être converties en contrats de vente à terme différés en espèces. L'option peut expirer avant la date de livraison prévue. La compagnie attribue les options à la période à laquelle la livraison est prévue.

## 2) Industrie minière :

De par l'activité minière la compagnie est assujettie aux risques habituellement reliés à une entreprise minière. Le sautage, le forage et l'extraction du minerai comportent des risques tels que des formations géologiques inhabituelles ou imprévues, des travaux dangereux entraînant des éclatements de roches, des effondrements, des inondations et d'autres situations. Le traitement du minerai peut être affecté par des retards causés par des bris ou pannes d'équipements. Dans le cours de ses activités, la compagnie peut aussi voir sa responsabilité engagée en vertu des lois environnementales, par exemple, lors d'une défaillance des digues de retenue autour des aires de stockage des résidus. La compagnie risque aussi d'exposer sa responsabilité en cas de pollution, d'effondrements ou d'autres dangers contre lesquels une couverture d'assurance n'est pas disponible ou trop onéreuse. Le paiement des dommages intérêts relativement à ces sinistres pourrait réduire considérablement les liquidités et la valeur marchande de la société minière.

L'exploration et la mise en exploitation des gisements miniers comportent des risques financiers considérables qui ne peuvent pas tous être neutralisés par l'expérience, les connaissances et les évaluations conservatrices qu'effectue la compagnie.

En effet, les revenus générés par une exploitation doivent au minimum compenser les coûts d'exploitation ainsi que les coûts de mise en production à savoir : l'établissement des réserves minières au moyen de forages, la mise au point des procédés métallurgiques, la construction des installations, l'extraction et le traitement du minerai. De plus, à l'égard des sites miniers en exploitation, il est impossible de déterminer si des programmes d'exploration et de mise en valeur permettront de remplacer les réserves actuelles par de nouvelles réserves minières.

## 3) Vente de la production :

Pour un grand nombre de minerais et de concentrés (plomb, zinc, cuivre, étain, etc.) il est basé sur le cours des métaux, coté en bourse. Les cours des minerais sont calculés par la

formule de type suivant :  $V = \frac{Pt}{100} - F$ .

V : étant la valeur d'une tonne de minerai ou de concentré.

P : Le prix d'une tonne de métal contenu.

t : étant la teneur en pourcentage.

F : étant l'estimation des frais nécessaires pour passer d'une tonne de minerai ou de concentré à une tonne de métal (frais de transformation).

F comprend les frais de transport et de traitement, il comprend les pertes au traitement et la marge bénéficiaire. C'est donc ce terme qui fait l'objet de discussions.

Quelquefois, les formules sont de la forme :  $V = x \frac{Pt}{100} - F$  ; ou x représente le rendement de la transformation métallurgique, terme qui est donc sortie de F, d'autres formules plus compliquées existent.

Il existe également certaines bonifications pour des minéraux utiles présents en faible proportion (par exemple argent dans la galène). Pour les impuretés nuisibles au traitement métallurgique, on applique des pénalités au-delà d'une certaine teneur limite tolérée (par exemple l'arsenic est toléré à 0,1% dans un minerai de plomb, pénalisé de 0,1 à 5%, le minerai est rejeté pour plus de 5% d'arsenic).

En général, le commerce des minerais et des concentrés se fait pour des lots compris dans les limites de teneurs suivantes (d'après Polette 1954) :

Minerais ou concentrés	Teneur (%)
Blende	45-55
Calamine	40-48
Galène	45-70
Minerais de cuivre	20-30
Minerais d'étain	55-70
Minerais de chrome	45-50
Minerais d'antimoine	45-60

Tableau III-1 : teneur limite pour le commerce des minerais (Polette, 1954)

Etablir la rentabilité d'une mine c'est calculer le prix de revient de la tonne extraite, prévoir sa teneur, prévoir éventuellement le prix de revient des opérations de concentration, la teneur des concentrés, prévoir les frais de transport, et en fonction des cours, examiner si l'opération peut être bénéficiaire. Ces calculs et ces prévisions doivent être établis sur les projets complets des installations industrielles prévues et sur les résultats des essais de laboratoire.

Une partie substantielle des revenus et du bénéfice des sociétés minières provient de l'extraction et de la vente du métal, Les baisses du prix du métal pourraient toucher

défavorablement les revenus et bénéfices de ces sociétés si les prix des métaux demeurent bas pendant des périodes prolongées, elles pourraient être forcées d'interrompre la production et les ventes.

Le prix d'un métal a beaucoup fluctué au cours des dernières années et il subit les effets de nombreux facteurs indépendants du contrôle de la compagnie. Ces facteurs comprennent la demande relative à l'offre globale, les ventes et achats des banques centrales, la valeur de la devise américaine, l'inflation, l'intérêt des investisseurs et des spéculateurs ainsi que la conjoncture politique et économique internationale.

Malgré la gestion active du programme de couverture par la compagnie, l'efficacité de ce programme est tributaire de la capacité des contreparties à respecter les modalités des contrats et du maintien d'un marché liquide. La société minière réduit ses risques en diversifiant ses transactions avec un certain nombre d'institutions financières majeures.

Tout comme pour l'or, le prix du zinc et du cuivre subit les fluctuations significatives des marchés et les facteurs qui influencent l'offre et la demande demeurent hors du contrôle de la société. Une baisse significative du cours des métaux, si elle était soutenue pendant une période de temps considérable, pourrait même obliger la compagnie à interrompre la production et les ventes des métaux. De plus, il y a une concentration du risque associé au crédit en ce qui concerne les ventes des métaux de base puisqu'une partie importante de celles-ci est présentement conclue avec une seule société majeure.

Si la compagnie perçoit le produit de ses ventes de ces métaux en devises américaines alors qu'une partie importante de ses activités de production est située au pays étranger, alors en conséquence, toute hausse significative de la monnaie locale par rapport au dollar américain affecte négativement les résultats de la société, surtout si cette hausse se produit alors que les prix des métaux sont stables ou à la baisse.

#### **4) Assurances et activités minières**

Toute compagnie détient une assurance contre les dommages matériels ainsi qu'une assurance responsabilité pour la majeure partie de ses activités. De plus, elle est assurée contre le vol et la perte de marchandises en transit. Les polices d'assurance contre les dommages couvrent les interruptions des opérations résultant d'une perte assurée.

Les risques pour lesquels la société ne détient aucune couverture sont : les glissements souterrains, les inondations dans les mines et les autres sinistres comparables. De plus et sauf pour les événements de pollution soudains et accidentels, il existe des risques attribuables à la plupart des types de pollution environnementale pour lesquels la compagnie ne peut ou ne

désire obtenir une couverture d'assurance. La société estime prendre des mesures adéquates afin de minimiser les risques de pollution environnementale. Cependant, certaines mines posent un degré minimal de risque de pollution supérieur à d'autres, notamment quant au risque d'échappement accidentel significatif de solution cyanurée ou autres substances provenant des réservoirs de lixiviation et des parcs à résidus.

### III-3 Analyse et gestion du risque d'un projet minier :

La première phase de la simulation des opérations minières sur un modèle, a pour objet de tester le comportement du gisement face à plusieurs méthodes d'abatage plus ou moins sélectionnés : chambres remblayées sous niveaux abattus, sous niveaux foudroyés ...etc. l'hypothèse de base est que le niveau de connaissance du gisement au moment de l'exploitation sera du même ordre que celui donné par le modèle. Les critères de choix entre ces différentes méthodes étant la récupération du métal et la rentabilité économique de chaque méthode.

Pour chaque bloc (i) de minerai extrait, la meilleure méthode d'abatage est celle qui assurera que la teneur moyenne du minerai serait supérieure à la teneur de coupure ( $t_i > t_c$ ). Le problème est donc de déterminer pour chaque méthode, les blocs sélectionnables, compte-tenu d'un critère de coupure et des contraintes géométriques.

Le critère marginal de coupure utilisé revient à sélectionner toutes les unités dont la teneur moyenne du minerai qui aura récupéré les frais d'extraction, de traitement ...Donc elle est supérieure à la teneur de coupure.

Dans les projets concernant les ressources naturelles, tels que les mines, il y a au moins deux sources importantes d'incertitudes : l'incertitude du marché représentée principalement par le prix du métal, et l'incertitude technique ou privée représentée par les réserves. Les méthodes traditionnelles d'évaluation de projets, la valeur actualisée nette par exemple, sont basées sur des valeurs fixes pour tous les paramètres et un scénario de développement défini. Elles supposent que le management est passif aux changements de conditions. Les simulations de Monte Carlo peuvent être utilisées pour modéliser les incertitudes liées aux paramètres financiers et techniques, mais elles ont de grandes difficultés à intégrer des scénarios flexibles. De nos jours, il est largement reconnu, en finance et en management (Brealey et Myers, 1991), que les bons managers peuvent et doivent réagir aux changements de circonstances, et que ceci peut valoriser considérablement les projets en cours. Les décideurs ont la possibilité d'agir, car de nombreuses options réelles intègrent un projet d'investissement et ils peuvent choisir de les exercer dans l'intérêt de la compagnie.

La méthode des options réelles a été développée à partir des techniques d'évaluation des options financières. Elle a été conçue pour intégrer la flexibilité managériale et les incertitudes sur les prix, mais peu de travaux ont été effectués pour prendre en compte les incertitudes des paramètres techniques. Les questions liées aux incertitudes techniques ne sont apparues que récemment dans la littérature traitant des options réelles, et elles concernent en particulier le pétrole.

L'hypothèse risque-neutre est douteuse lorsque les options réelles sont évaluées car un projet minier (ou pétrolier) présente des risques spécifiques qui ne sont pas cotés sur le marché et un portefeuille répliquant le projet est impossible à trouver. Nous avons aussi à considérer l'approche décisionnelle en fixant un taux de discount représentant le risque du projet. Les résultats sont naturellement très différents des résultats obtenus avec le taux risque-neutre : la stratégie de développement est différente. Il est donc très important de définir correctement le taux de discount. Une prime de risque qui couvre le risque privé devrait venir s'ajouter au taux sans risque. Les approches décrites par Smith et Nau (1995) et Slade (2000), bien que différentes, utilisent les taux de risque ajustés.

Le modèle adopté doit prendre en compte l'incertitude sur les réserves et sur le prix du métal. D'autres sources d'incertitudes auraient aussi pu être incluses dans le modèle, comme par exemple le taux de production et la teneur de coupure. De plus, il pourrait être intéressant d'introduire dans le modèle la corrélation entre la production et le prix du métal, ou de façon analogue, entre la teneur de coupure et le prix du métal, ou entre la teneur de coupure et les coûts. Des prix élevés entraînent des teneurs de coupure plus faibles. A des prix élevés, la société minière pourrait vendre plus et diminuer la durée de vie de la mine (Lane, 1991).

L'approche considérée pourrait prendre en compte les opportunités du marché pour couvrir les risques du projet. Il pourrait être intéressant d'évaluer le cas étudié en considérant que, par exemple, 50 % de la production annuelle soit couverte. Les compagnies minières couvrent souvent une certaine proportion de leur production prévue, de telle sorte que les institutions financières soient sûres que les dettes seront payées. C'est à dire que les compagnies minières utilisent le marché des dérivés pour couvrir leur production. La principale raison de cette politique est la réduction et le contrôle du risque. En pratique, seulement quelques compagnies vendent plus qu'une faible fraction de leurs réserves prévues. Le management sait qu'une stratégie de vente à terme qui apparaît comme une gestion prudente du risque lorsque le prix du métal chute, serait inadaptée en période de forte hausse du

prix du métal. Le producteur ayant une couverture totale ne tire aucun bénéfice de l'amélioration du prix. Les produits dérivés augmentent la flexibilité de la direction des compagnies minières

Plus d'information concernant la compagnie qui exploite le gisement pourraient aider à mieux définir la règle de décision pour le projet optimal. Le décideur a un comportement neutre vis-à-vis du risque et choisit donc le projet avec le profit estimé le plus élevé, même si ce projet est plus incertain. Une petite compagnie qui ne veut pas prendre de risque ou qui est conservatrice préférera un projet plus sûr à un projet à plus forte valeur mais avec une plus grande incertitude. Au contraire, une grande compagnie qui est impliquée dans un grand nombre de projets n'hésitera pas à choisir le projet avec le meilleur retour sur investissement même s'il est plus risqué. La théorie de l'utilité devrait être utilisée pour l'analyse de la décision dans le cas d'une attitude conservatrice vis-à-vis du risque. La règle de décision est alors de choisir l'alternative qui a la plus grande utilité attendue.

#### **III-4 Évaluation du risque lié au ressources / réserves avec des contraintes de temps, comment décider sur un investissement dans deux semaines :**

Cela se fait par modélisation de la relation entre teneur de coupure, tonnage de minerai et métal et la création des courbes  $c=f(t)$  pour évaluer le risque lié au projet dans le temps.

Souvent on rencontre dans les rapports aux actionnaires des passages comme ceux-ci: "... le gisement a été évalué à 8mt avec une teneur moyenne de 1.7gr/t d'or." sur ces données seulement l'investisseur doit baser sa décision : un seul tonnage de minerai et métal, sans référence à l'unité de sélection, ou teneur de coupure !!!!

Une approche différente ; comme suit est à retenir :

1. avec l'interprétation géologique, une distribution tonnage de minerai est construite.
2. avec la distribution des teneurs.
3. ensuite, pour chaque combinaison aléatoire initiale (tonnage de métal, tonnage de minerai) au teneur de coupure zéro, on calcule la trajectoire tonnage minerai - métal pour une teneur de coupure qui augmente par la courbe  $c=f(t)$ .
4. les cash-flows annuels sont calculés avec une courbe  $c=f(t)$  sélectionnée aléatoirement des courbes simulées.
5. des analyses de risques et sensibilité peuvent être faites à chaque teneur de coupure ou à son équivalent: le prix du métal.

### III-5 Profit minier :

#### III-5-1 Intérêt de la géostatistique dans la détermination du profit :

On reconnaît un premier problème d'estimation des ressources: l'information dont on dispose est définie sur de petites unités échantillonnées (carottes, échantillons en vrac). Comment, à partir de cette information, prédire ce que sera la distribution d'unités de sélection d'un volume très supérieur?

Supposons que l'on connaisse la loi de distribution des teneurs des blocs. On peut calculer, les réserves récupérables en fonction des différentes teneurs de coupure. Ces réserves calculées correspondent à ce que nous obtiendrions si l'on connaissait effectivement la vraie teneur de tous les blocs du gisement. En pratique, ces vraies valeurs ne sont jamais connues et doivent être estimées à partir de l'information disponible. Quel estimateur choisir? Quelle quantité d'échantillonnage effectuer? Peut-on prédire maintenant ce qui sera effectivement récupéré plus tard à partir d'une quantité d'information supérieure?

Ces deux problèmes sont fondamentaux en géostatistique, on leur a donné un nom: l'effet support et l'effet information. L'effet support indique que la distribution des teneurs dépend de la taille des blocs que l'on considère. Ainsi pour un même tonnage extrait et supposant que l'on connaisse les vraies valeurs des blocs, on retire toujours plus de métal si la sélection s'effectue sur de petits blocs plutôt que sur des gros blocs (l'opération sur de petits blocs est plus sélective). L'effet information indique que l'on ne dispose pas des vraies teneurs des blocs qui nous intéressent mais seulement d'une estimation de celles-ci. Pour un même tonnage extrait, la sélection s'effectuant sur des blocs d'une taille donnée, on récupérera toujours moins de métal avec un estimateur qu'avec les vraies valeurs. Normalement plus on améliore l'estimateur, soit en recourant à de meilleures méthodes d'estimation, soit en augmentant le nombre de données, plus on retire de métal pour un même tonnage.

Un problème très important relié à l'effet information et à l'effet support est le problème de biais conditionnel. Très souvent, pour un tonnage extrait donné, on aura retiré beaucoup moins de métal que ne le prévoyait l'estimation, ce qui risque d'être ruineux pour la compagnie minière. Pour minimiser ce biais conditionnel, il faut utiliser des estimateurs qui tiennent compte à la fois de l'effet support et de l'effet information. C'est ce que fait le krigeage.

On définit Le profit : 
$$v = \sum_{i=1, t_i \geq t_c}^n (t_i - t_c)$$

Telle que ;  $t_i$  : la teneur vrai ou estimée.

$t_c$  : la teneur de coupure.

**Exemple numérique** (tiré de Armstrong, 1998).

Supposons une portion de gisement formée de 16 blocs eux-mêmes divisés en 4 parcelles. On connaît la vraie teneur de la parcelle du coin supérieur gauche. La teneur de coupure est 300 (représente les coûts pour extraire et traiter le bloc).

On définit le profit comme : 
$$\sum_{i=1, t_i > 300}^{16} (t_i - 300)$$

735			
	45	125	167
450	337	95	245
124	430	230	460
75	20	32	20

Les vraies teneurs des blocs sont également connues par une méthode plus précise que les précédentes:

505	143	88	207
270	328	171	411
102	220	154	263
101	54	44	155

Profit maximum que l'on puisse atteindre?

Profit:  $(505-300) + (328-300) + (411-300) = 205 + 28 + 111 = 344$

- les profits prévu et réalisé si l'on estime la teneur de chaque bloc par la parcelle connue :

1) Profit prévu ou estimé:  $(735-300) + (450-300) + (337-300) + (430-300) + (460-300) = 435 + 150 + 37 + 130 + 160 = 912$

On choisie les teneurs qui correspondent aux mêmes blocs qui détermine le profit prévu (estimé).

$$2) \text{ Profit réalisé: } (505-300) + (270-300) + (328-300) + (220-300) + (263-300) = 205-30+28-80-37=86$$

Si l'on estime la teneur de chaque bloc par la moyenne des parcelles du bloc et des blocs voisins par les côtés

Les valeurs estimées seraient alors:

410	310.5	108	179
411.5	271.4	206.4	241.8
269.8	228.2	249.4	238.8
73	139.3	75.5	170.7

Les profits prévus (ou estimés) et réalisés comme :

$$\text{Profit prévu: } (410-300) + (310.5-300) + (411.5-300) = 110+10.5+111.5=232$$

$$\text{Profit réalisé: } (505-300) + (143-300) + (270-300) = 205-157-30=18$$

Une estimation obtenue par krigeage a fourni les valeurs suivantes:

442	190	142	204
354	276	212	279
189	226	216	271
99	81	88	125

$$\text{Profit prévu: } (442-300) + (354-300) = 142+54 = 196$$

$$\text{Profit réalisé: } (505-300) + (270-300) = 205-30 = 175$$

Conclusion :

Dans cet exemple, on note que:

Dans tous les cas, le profit réalisé est inférieur au profit optimum (ou maximum), (effet information)

Seul le krigeage a fourni un profit prévu s'approchant du profit réalisé (absence de biais conditionnel).

On dit que la géostatistique a un rôle plus important dans l'estimation des profits prévus dans le domaine minier. (Effet support et effet information).

Le profit d'un exploitant, pour un exercice financier, est l'excédent de l'ensemble des montants suivants:

- a) la valeur brute de la production annuelle de l'exploitant pour cet exercice financier;
- b) un montant, autre qu'une aide gouvernementale, reçu ou à recevoir par l'exploitant, au cours de l'exercice financier, d'une personne ou d'une société, en raison d'une dépense engagée par l'exploitant pour un exercice financier donné et qui est une dépense déduite dans le calcul du profit annuel pour l'exercice financier donné ou une dépense qui est prise en compte pour l'exercice financier donné ; le moindre du compte cumulatif des cotisations de l'exploitant à la fin de l'exercice financier et de l'ensemble des montants dont chacun est un montant qui se rapporte à la restauration d'un terrain qui constitue une exploitation minière ; dans le calcul du revenu de l'exploitant pour l'exercice financier, pour l'application de cette loi, relativement à une fiducie pour l'environnement dont l'exploitant est bénéficiaire .
- c) l'ensemble des dépenses dont chacune est une dépense engagée par l'exploitant à l'égard d'une exploitation minière, pour l'exercice financier, dans la mesure où cette dépense a été engagée pour réaliser la valeur brute de la production annuelle provenant de cette exploitation minière et pour autant que cette dépense s'y rapporte directement;
- d) l'ensemble des dépenses dont chacune est une dépense engagée par l'exploitant, pour l'exercice financier, pour des travaux de recherche scientifique et de développement expérimental effectués, dans la mesure où elle peut être considérée comme se rapportant à l'exploitation minière.

### III-5-2 Profit conventionnel :

On appelle profit conventionnel la quantité:

$$P(c) = T(c) * [m(c) - c]$$

P(c) représente le profit obtenu après avoir payé les coûts d'exploitation T(c) et de traitement m(c) supposés être représentés par la teneur de coupure "c".

Le tableau suivant donne les ressources et le profit correspondant, prévus et réellement obtenus pour les différents estimateurs.

On note que :

T(c) : tonnage de minerai avec la teneur de coupure « c ».

m(c) : la teneur du minerai à la teneur de coupure « c ».

T<sub>0</sub> : Tonnage total de gisement.

Tableau III-2 : les ressources et le profit par différentes méthodes d'estimation.

Teneurs de Coupure	Méthode d'estimation	T(c)/T <sub>0</sub>	m(c)	P(c)/T <sub>0</sub>
14	Blocs, vraies teneurs	0.88	18.97	4.35
14	Polygonale, prédit	0.83	19.30	4.37
14	Krigeage 1, prédit	0.93	18.37	4.05
14	Krigeage 2, prédit	0.88	18.82	4.26
14	Polygonale, réalisé	0.83	18.97	4.11
14	Krigeage 1, réalisé	0.93	18.56	4.22
14	Krigeage 2, réalisé	0.88	18.90	4.33
14	Krigeage 1, loi normale	0.94	18.44	4.17
14	Krigeage 2, loi normale	0.88	18.86	4.30
17	Blocs, vraies teneurs	0.65	20.19	2.07
17	Polygonale, prédit	0.58	20.91	2.26
17	Krigeage 1, prédit	0.63	19.57	1.62
17	Krigeage 2, prédit	0.66	19.95	1.94
17	Polygonale, réalisé	0.58	19.26	1.69
17	Krigeage 1, réalisé	0.63	19.79	1.76
17	Krigeage 2, réalisé	0.66	20.09	2.03
17	Krigeage 1, loi normale	0.66	19.57	1.70
17	Krigeage 2, loi normale	0.63	20.19	1.99
21	Blocs, vraies teneurs	0.21	22.85	0.40
21	Polygonale, prédit	0.23	23.83	0.66
21	Krigeage 1, prédit	0.13	22.58	0.21
21	Krigeage 2, prédit	0.18	22.87	0.33
21	Polygonale, réalisé	0.23	21.22	0.05
21	Krigeage 1, réalisé	0.13	22.51	0.20
21	Krigeage 2, réalisé	0.18	23.19	0.39
21	Krigeage 1, loi normale	0.14	22.35	0.19
21	Krigeage 2, loi normale	0.20	22.92	0.38

1- À quantité d'information égale (i.e. mêmes nombre de forages utilisés), le Krigeage permet d'obtenir plus de profits que la méthode polygonale, et ce, pour toute teneur de coupure.

Coupure	Méthode	% optimum
14	Polygonale	94.5
14	Krigeage 1	97.0
17	Polygonale	81.6
17	Krigeage 1	85.0
21	Polygonale	12.5
21	Krigeage 1	(0.20/0.40)= 50.0

Tableau III-3 : pourcentage de profit par la méthode polygonal et krigeage1

Le % optimum est le rapport du profit réalisé avec des teneurs estimés par la méthode polygonale ou krigeage sur le profit obtenu avec les vraies teneurs.

On note que l'avantage du krigeage fait croître le % optimum avec la diminution de la teneur de coupure. Plus l'exploitation est sélective, plus le gain du krigeage est important.

2- Augmenter la quantité d'informations permet d'obtenir plus de profits, et ce pour toutes les teneurs de coupure. Ceci est une illustration de l'effet information. On amélioré le profit par une méthode plus précise (krigeage 2).

Coupure	Méthode	% optimum
14	Polygonale	94.5
14	Krigeage 1	97.0
14	Krigeage 2	99.5
17	Polygonale	81.6
17	Krigeage 1	85.0
17	Krigeage 2	98.1
21	Polygonale	12.5
21	Krigeage 1	50.0
21	Krigeage 2	97.5

Tableau III-4 : Précision du profit par une autre méthode de krigeage.

**Note:**

On remarque qu'à haute teneur de coupure, il est illusoire de vouloir effectuer une sélection efficace si l'on n'a pas beaucoup d'informations. Le bénéfice procuré par l'information supplémentaire est moindre à forte teneur de coupure. (Voir pour krigeage 2 et  $c=14, 17, 21$  tableaux III-2).

3- Le krigeage récupère pratiquement ce qu'il prédit alors que la méthode polygonale est beaucoup trop optimiste. Ceci est une illustration des conséquences du biais conditionnel et de l'effet support, (tableau III-5)

Tableau III-5 : valeur du rapport du profit relatif réalisé / prédit en fonction de la méthode d'estimation.

Teneurs de Coupure	Méthode	(réalisé-prédit)/réalisé*100
14	Polygonale	-6.3
14	Krigeage 1	4
14	Krigeage 2	1.7
17	Polygonale	-33.8
17	Krigeage 1	8
17	Krigeage 2	4.5
21	Polygonale	-1220
21	Krigeage 1	$(0.20-0.21)/0.20 = -5$
21	Krigeage 2	15.4

On constate que la méthode polygonale peut mener à des catastrophes si la mine doit être très sélective pour opérer avec profit. Cette méthode surestime beaucoup les profits. Le krigeage ne surestime pas les profits.

4- Il est possible, même sans même avoir effectivement réalisé les forages de prédire avec une précision raisonnable ce que le krigeage permettra de récupérer effectivement une fois les forages réalisés et les estimations par krigeage produites.

On peut prédire ce que la krigeage permettra de récupérer effectivement avant que les données soient disponibles (tableau III-6).

Tableau III-6 : amélioration du profit prédit – réalisé avec la précision du krigeage

Teneurs de Coupure	Méthode	(réalisé-prédit (normal))/réalisé*100 (%)
14	Krigeage 1	1.2
14	Krigeage 2	0.7
17	Krigeage 1	3.5
17	Krigeage 2	2
21	Krigeage 1	$(0.20-0.19)/.20 = 5$
21	Krigeage 2	2,6

5- Il est possible de prédire, avec une bonne précision, le gain effectif que devraient procurer des forages additionnels. (Tableau III-7).

Tableau III-7 : gain effectif et la teneur de coupure

Coupure	gain prévu/gain réalisé*100
14.0	118.21
17.0	107.4
21.0	100

Même pour la très haute teneur de coupure, on prédit bien le gain économique qu'apportent les forages additionnels. (Note: le gain prévu est obtenu en comparant la différence de profit prévu par la loi normale pour les 2 krigeages.

**Note :** le gain réalisé est la différence entre les gains obtenus par les 2 ensembles de valeurs krigées. Ainsi à la teneur de coupure 21, on calcule  $(0.38-0.19)/(0.39-0.20)*100=100$  (aux arrondis près)).

**Exemple d'application :**

Un gisement de Cu, la teneur moyenne  $m=1.3\%$  Cu, teneur de coupure  $c=1\%$ , distribution lognormale,  $T_0 = 50Mt$ ; Prix de Cu = 2\$/ kg Cu.

L'estimation des ressources de ce gisement est montrée dans le tableau III-8 ci-dessous on se propose d'ajouter des forages de façon à améliorer l'estimation.

Tableau III-8 : ressources d'un gisement de Cu

Etat	T(c)/ T <sub>0</sub>	Q(c)/T <sub>0</sub>	m(c)	P(c)/ T <sub>0</sub>
Actuel	0.253	1.089%	4.307%	0.836%
Futur	0.249	1.092%	4.392%	0.844%

Gain = profit futur - profit actuel

Gain	0.008%
------	--------

On a le prix de cuivre 2\$/kg, donc le prix total est :  $50*10^6*10^3*2=10^{11}\$$

Gain =  $0.008*10^{11}$

**8 M \$**

### III-6 Approches d'estimation du profit minier:

#### III-6-1 : Présentation d'un calcul de coût minier (mine d'or ; Brésil)

Le tableau ci-dessous donne des renseignements sommaires sur la production et l'exploitation de la mine d'or à Sao Bento (Brésil) pour chacun des exercices indiqués. Les « coûts effectifs d'exploitation » et les « coûts totaux de production » indiqués ci-après ont été calculés conformément à une norme établie par « The Gold Institute », qui était une association mondiale de fournisseurs d'or et de produits d'or et qui rassemblait les principaux producteurs d'or d'Amérique du Nord. The Gold Institute a cessé ses activités en 2002, mais la norme constitue une norme largement reconnue pour la présentation des coûts effectifs de production en Amérique du Nord. L'adoption de la norme est volontaire et les mesures de coûts présentées ci-après peuvent ne pas être comparables à d'autres mesures titrées semblables à d'autres sociétés. Les coûts effectifs d'exploitation par once découlent de sommes figurant dans nos états des résultats et comprennent les coûts d'exploitation du site minier tels que les coûts d'extraction, de traitement et d'administration, les redevances et les taxes à la production, mais ne comprennent pas l'amortissement, les coûts de restauration, les frais de financement, les dépenses en immobilisations et les coûts d'exploration. Les coûts totaux de production sont les coûts effectifs d'exploitation, auxquels il faut rajouter la provision pour épuisement, dépréciation et amortissement et les coûts de restauration. Cette donnée vise à donner des renseignements supplémentaires.

Tableau III-9 : Renseignement sur la production et l'exploitation de la mine de Sao Bento (Brésil)

Exercice	Tonnes de minerai	Teneur (g/t)	Rendement (%)	Production (g)	Coûts effectifs de l'exploitation (M\$)	Coûts effectifs de production (M\$)
2003	374130	9,13	92	3142543	234	356
2002	381295	9,47	93	3453847	184	282
2001	417609	9,13	91	3469621	216	306
2000	525893	7,95	93	3888190	195	270
1999	540014	8,18	92	4063930	184	251
1998	467215	7,6	93	3302276	250	324

### III-6-2 Approche de Taylor :

Selon Taylor les coûts pertinents sont uniquement les coûts d'exploitation.

- Si le concentrateur fonctionne à pleine capacité, on considère les coûts fixes et les coûts variables.
- Si le concentrateur ne fonctionne pas à pleine capacité, on considère que les coûts variables.

En effet, à pleine capacité du concentrateur, un minerai dont la teneur ne permet pas de couvrir l'ensemble des coûts fixes et variables entraîne une perte. Par contre, si le concentrateur est en attente de minerai, il vaut mieux fournir un minerai plus pauvre que pas de minerai du tout.

Si le minerai couvre les frais de traitement, alors la perte encourue sera moindre que si l'on ne fournit rien au concentrateur.

Si les revenus générés par l'exploitation sont actualisés, la teneur de coupure décroît dans le temps, sinon, elle demeure constante.

### III-6-3 Approche de Lane :

Les entreprises utilisent également l'analyse coût- avantage. Outre l'évaluation des risques liés à un investissement normal, qui prennent en compte la viabilité d'un projet au cas où les prévisions le concernant seraient erronées, cette dernière peut inclure des facteurs moins facilement mesurables, tels que la réaction des ouvriers face à leur transfert vers une nouvelle usine. L'analyse coût- avantage peut également prendre en compte les « **coût d'opportunité** » entraînés par une décision non prise, par exemple en comparant le revenu qui serait perdu si un nouveau projet n'était pas entrepris aux intérêts perdus en ne laissant pas d'argent à la banque.

A la fin de l'exercice comptable la société minière réalise des recettes et au sens de la comptabilité elle détermine leur profit.

Dans le cas de sociétés minières une fois le coût d'opportunité déduit est toujours positif, peut cela signifier que l'activité de la société est profitable au sens économique du terme, si au contraire le profit comptable était inférieur au coût d'opportunité, l'activité de cette société serait considérée comme non rentable d'un point de vue économique.

En résumé on a les deux définitions suivantes :

Profit (comptable) = Recette – coût de production direct (visible).

Coût d'opportunité = Profit (comptable) – Profit (économique)

En économie on a l'habitude de raisonner en terme de coût d'opportunité, en terme familier un coût d'opportunité désigne la somme d'argent à laquelle un individu doit renoncer pour pouvoir réaliser une certaine action, dans le cas de l'entrepreneur il doit renoncer aux intérêts qui lui aurait procuré son capital une fois placé.

Cette différence entre deux notions permet d'expliquer pourquoi certains économistes parlent de "profit nul" au long terme, il s'agit pas du profit comptable.

Si le profit comptable était nul il n'y aurait aucune forme d'incitation pour une société à poursuivre son activité, l'expression "profit nul" s'entend déduire tous les coût d'opportunité cas une fois trier les facteurs de production (ici le capital financier) on été rémunérés.

Pour l'approche de Lane : Les coûts pertinents incluent un coût d'opportunité en plus des coûts d'exploitation.

Le coût d'opportunité est défini par Lane comme l'intérêt sur le capital que représente la partie encore non exploitée de la mine. C'est en quelque sorte une pénalité pour tarder à exploiter la ressource disponible. L'importance de ce coût est fortement tributaire de la valeur estimée de la ressource et du taux d'intérêt choisi. La conséquence directe de l'inclusion de ce coût est de hausser la teneur de coupure, surtout en début d'exploitation. Au fur et à mesure que le gisement est exploité, la valeur résiduelle de celui-ci diminue, la teneur de coupure obtenue par Lane rejoint celle obtenue par Taylor.

Les mêmes considérations concernant l'utilisation à pleine capacité ou non du concentrateur s'appliquent ici. Si le concentrateur ne fonctionne pas à pleine capacité, on négligera les coûts fixes et les coûts d'opportunité dans le calcul de la teneur de coupure.

Dans les deux cas, mais surtout dans l'approche de Lane, deux autres facteurs importants viennent influencer la détermination de la teneur de coupure qui sont :

- Les attentes concernant l'évolution du prix des métaux.
- La capacité technologique de récupérer ultérieurement le minerai délaissé.

Pour le premier facteur, considérons ce qui se produit lorsque le prix du minerai diminue. Théoriquement, il faut exploiter à une teneur de coupure plus élevée pour rencontrer les coûts d'exploitation. Ce comportement est correct si l'on prévoit que le prix du métal n'augmentera pas dans un avenir proche. Si au contraire on prévoit une hausse à court ou moyen terme,

alors il serait plus rentable d'écouler maintenant du minerai plus pauvre et de conserver le minerai plus riche pour plus tard (les gains futurs compensant pour les pertes actuelles). Evidemment, il est extrêmement difficile de prévoir les prix des métaux même sur un horizon de deux ans et l'exercice demeure périlleux.

Concernant la capacité technologique de récupérer du minerai délaissé, ce facteur dépend en grande partie du mode d'exploitation de la mine. Si l'on peut récupérer le minerai délaissé, alors on peut se permettre d'appliquer plus facilement une haute teneur de coupure. S'il est impossible de récupérer du minerai délaissé, alors la teneur de coupure sera nécessairement revue à la baisse (et sera impossible d'appliquer directement l'approche de Lane).

La figure III-1 suivante montre schématiquement l'évolution possible de la teneur de coupure au cours de l'exploitation de la mine.

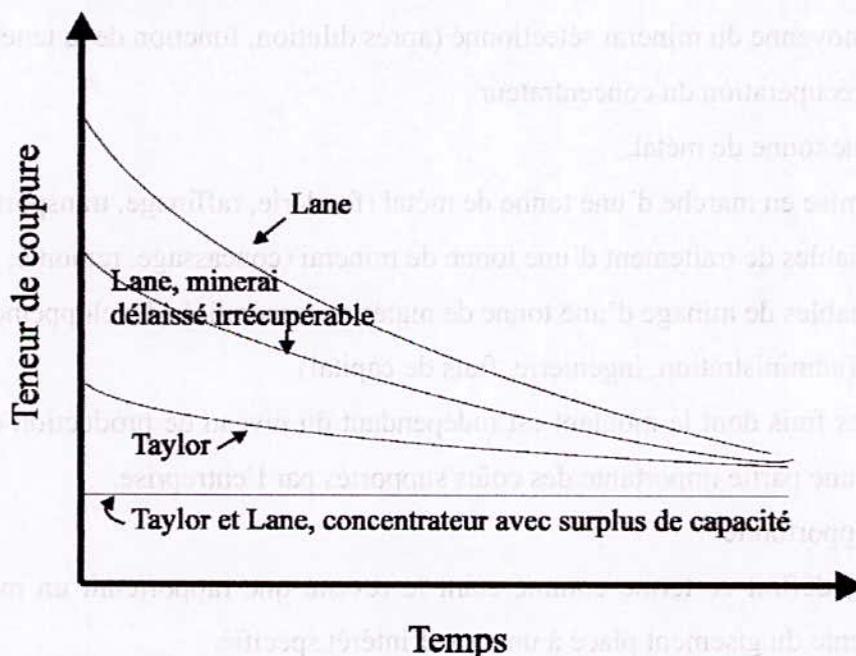


Figure III-1 : évaluation de la teneur de coupure avec le temps selon Lane et Taylor.

**Note :**

Les approches de Lane et Taylor supposent que l'on connaît la distribution des teneurs sur les quelles on effectue la sélection. Ici toutes les notions de géostatistique portant sur l'effet du support et de l'information disponible doivent être pleinement considérées.

Le concept de teneur de coupure optimale nécessite au préalable la définition de trois teneurs de coupure limite et de trois teneurs de coupure d'équilibre.

Taylor (1972) démontre que la teneur de coupure optimale est nécessairement une de ces six teneurs de coupure.

Lane et Taylor reconnaissent trois facteurs limitatifs important. Pour chacun correspond une teneur de coupure limite.

- Limite de la mine (développement et minage).
- Limite du traitement du minerai (concentrateur).
- Limite du marché (fonderie, contrats de vente).

Soit les variables suivantes :

$C$  : teneur de coupure.

$x_c$  : proportion du matériau minéralisé sélectionné (fonction de la teneur de coupure).

$g_c$  : teneur moyenne du minerai sélectionné (après dilution, fonction de la teneur de coupure).

$y$  : taux de récupération du concentrateur.

$p$  : prix d'une tonne de métal.

$k$  : coût de mise en marché d'une tonne de métal (fonderie, raffinage, transport, assurance...).

$h$  : frais variables de traitement d'une tonne de minerai (concassage, remonté, concentration).

$m$  : frais variables de minage d'une tonne de matériau minéralisé (développement forage, tir).

$f$  : frais fixe (administration, ingénierie, frais de capital).

Ce sont des frais dont le montant est indépendant du niveau de production ou d'activité. Ils constituent une partie importante des coûts supportés par l'entreprise.

$F$  : coût d'opportunité.

Lane (1988) définit ce terme comme étant le revenu que rapporterait un montant égal à la valeur présente du gisement placé à un taux d'intérêt spécifié.

$M$  : capacité de minage (matériau minéralisé).

$H$  : capacité de traitement (minerai sélectionné).

$K$  : capacité de marché (métal).

$v$  : profit net généré par une unité de matériau minéralisé.

Utilisant ces définitions, on voit que une tonne de matériau minéralisé donne  $x_c$  tonnes de minerai, et  $x_c g_c y$  tonnes de métal.

Dans ce qui suit, on considère à tour de rôle que la mine est le facteur limitatif, puis le concentrateur, puis le marché (fonderie). Dans chaque cas, il faut convertir la capacité de l'installation en équivalent « tonne de matériau minéralisé » et répartir les frais fixe en \$/tonne

matériau minéralisé. Ainsi, la mine a une capacité de M tonne de matériau minéralisé, le concentrateur traite H tonne de minerai soit  $H/x_c$  tonnes de matériau minéralisé et le marché a une capacité de K tonne de métal soit  $K/(g_c y)$  tonne de minerai et  $K/(g_c y x_c)$  tonne de matériau minéralisé.

**III-6-2-1-La mine est le facteur limitatif :**

M tonnes de matériau minéralisé sont minées et doivent supporter les frais fixes, la fonction de profit net à maximiser vaut donc :

$$vl = (p - k)x_c g_c y - hx_c - m \left( \frac{f + F}{M} \right) \quad (1)$$

Les termes :  $(x_c g_c y)$  : représente le métal produit.

$(p - k) x_c g_c y$  représente le revenu brut obtenu de la vente de ce métal.

$(f + F)$  représente les frais fixes et le coût d'opportunité.

$(f + F)/M$  représente le coût par tonne minée dû aux frais fixes.

$m$  : frais variables de minage d'une tonne de matériau minéralisé

Dans (1), les termes  $m$  et  $(f + F)/M$  ne dépendent pas de la teneur de coupure adoptée.

On peut aussi bien maximiser :

$$vl_{\max} = (p - k)q_c y - hx_c \quad (2)$$

Avec  $q_c = x_c g_c$

La courbe de profit net par tonne de matériau minéralisé en fonction de la teneur de coupure possède un seul maximum atteint en  $c_1$ . comme il existe une relation monotone entre  $c$  et  $x_c$ , on peut aussi bien dériver par rapport à  $x_c$  que par rapport à  $c$ .

Posant la dérivée de (2) par rapport à  $x_c$  égale à zéro et notant que  $c = \frac{dq_c}{dx_c}$ , on trouve

$$c_1 = \frac{h}{(p - k)y}$$

Cette teneur de coupure exprime le fait que le concentrateur et le marché est en attente, tout le matériau qui permettra de satisfaire les coûts variables d'exploitation générera un profit supplémentaire.

Note : cette teneur de coupure correspond à la teneur de coupure dite « Breakeven ».

**III-6-2-2-Le concentrateur est le facteur limitatif :**

Les frais fixes sont couverts par le minerai traité au concentrateur. La fonction de profit net à maximiser est :

$$v_2 = (p-k)x_c g_c y - hx_c - m - \left( \frac{(f+F)x_c}{H} \right) \quad (3)$$

Avec:

$x_c g_c y$  : Représente le métal produit.

$(p-k)x_c g_c y$  : Représente le revenu brut obtenu de la vente de ce métal.

$(f+F)$  : représente les frais fixes et le coût d'opportunité.

$\frac{(f+F)x_c}{H}$  : Représente le coût par tonne minée dû aux frais fixes (pour traiter

H tonnes, on a dû miner  $(H/x_c)$  tonnes).

Par une analyse semblable à la section précédente, on peut éliminer le terme « m » de la fonction à maximiser et exprimer la fonction à maximiser sous la forme :

$$v_{2_{\max}} = (p-k)q_c y - hx_c - \left( \frac{(f+F)x_c}{H} \right) \quad (4)$$

On dérive  $q_c$  par rapport à  $x_c$  on trouve que la teneur de coupure maximisant cette fonction est :

$$c_2 = \frac{h + (f+F)/H}{y(p-k)}$$

On notera que cette fois le facteur temps intervient dans la détermination de la teneur de coupure par la présence du terme F (coût d'opportunité).

**III-6-2-3 Le marché est le facteur limitatif :**

Les frais fixes doivent être supportés par la quantité de métal produit dont le profit net à maximiser s'écrit alors :

$$v_3 = (p-k)x_c g_c y - hx_c - m - \left( \frac{(f+F)x_c g_c y}{K} \right) \quad (5)$$

Avec :

$(f+F)x_c g_c y/K$  : représente les coûts fixes par tonne miné. En effet, pour vendre K tonnes de métal, on aura dû miner  $K/(x_c g_c y)$  tonnes de matériau minéralisé.

Comme précédemment, le terme « m » peut être éliminé, on obtient alors :

$$v3_{\max} = (p - k)q_c y - hx_c - \left( \frac{(f + F)q_c y}{K} \right) \quad (6)$$

Tout comme précédemment, dérivant par rapport à  $x_c$ , on trouve :

$$c_3 = \frac{h}{[(p - k) - ((f + F) / K)]y}$$

Si on hausse la teneur de coupure, un surplus de métal sera produit, qui ne pourra être vendu ou qui ne pourra être raffiné et on aura encouru des frais d'exploitation supplémentaires pour exploiter à cette teneur (les coûts de développement pour le minage seront supérieurs). Si on baisse la teneur de coupure, alors on aura un manque de métal encourageant une perte.

Notons que des formules précédentes, on a nécessairement :  $c_1 < (c_2, c_3)$ .

#### Exemple numérique :

Soit les données suivantes tirées de Lane (1988) représentant le cas d'un gisement d'uranium :

$y = 0.87$  taux de récupération du concentrateur.

$(p - k) = 60$ \$/kg prix net d'un kilogramme de métal.

$h = 3.41$ \$/t frais variables de traitement d'une tonne de minerai (concassage, remonté concentration)

$m = 1032$ \$/t frais variable de minage d'une tonne de matériau minéralisé (développement, forage, sautage, incluant stérile).

$f = 11.9$ M\$/an frais fixes (administration, ingénierie, frais de capital).

$F = 15.2$ M\$ coût d'opportunité.

$M = 12$ Mt capacité de minage (matériau minéralisé).

$H = 3.9$ Mt capacité de traitement (minerai sélectionné).

$K = 0.9$ kt capacité du marché (métal).

Avec ces chiffres, on calcul :

$$c_1 = \frac{h}{(p-k)y} = \frac{3.41\$/t}{0.87 * 60\$/kg} = 0.065\text{ kg/t}.$$

$$c_2 = \frac{h + (f + F)/H}{y(p-k)} = \frac{3.41\$/t + (11.9M\$ + 15.2M\$)/3.9Mt}{0.87 * 60\$/kg} = 0.198\text{ kg/t}$$

$$c_3 = \frac{h}{[(p-k) - (f + F)/K]y}$$

$$= \frac{3.41\$/t}{[60\$/kg - (11.9M\$ + 15.2M\$)/0.9Kt] * 0.87\text{kg/t}} = 0.131\text{ kg/t}.$$

### III-7 Teneur de coupure d'équilibre :

Les teneurs de coupure précédentes ont été déterminées en fonction des caractéristiques économiques et des limites de capacité de chaque composante séparément. On peut aussi définir trois autres teneurs de coupure basées uniquement sur la distribution des teneurs des blocs de sélection. Ces teneurs, dites d'équilibre sont telles qu'elles assurent que les éléments pris 2 à 2 sont en équilibre en terme de quantité traitée ("mine - concentrateur", "concentrateur- marché" "mine - marché").

#### 1) paire mine – concentrateur :

La teneur de coupure est choisie telle que :

$$x_c M = H$$

i.e. : la teneur de coupure permet de sélectionner suffisamment de minerai pour faire fonctionner le concentrateur à pleine capacité.

#### 2) paire concentrateur– marché :

La teneur de coupure est telle que :

$$g_c y H = K$$

i.e. : la quantité de métal produit au concentrateur ( $g_c y H$ ) est égale à la capacité du marché.

#### 3) paire mine – marché :

La teneur de coupure est telle que :

$$x_c g_c y M = K$$

i.e. : la quantité de métal produit par la mine ( $x_c g_c y M$ ) est égale à la capacité du marché.

Note : si  $x_c g_c = q_c > 1$ , prendre  $c=0$ .

### III-8 Teneur de coupure optimale :

Lane (1988) démontre que la teneur de coupure optimale est nécessairement soit une teneur de coupure limite, soit une teneur de coupure d'équilibre. Il s'agira de la teneur de coupure parmi ces 6 teneurs qui génère le profit par tonne de matériau minéralisé (« v ») le plus élevé tout en fournissant une solution réalisable. Pour déterminer la teneur de coupure optimale, on applique la méthode suivante:

Si la teneur d'équilibre est comprise entre les 2 teneurs limites correspondantes, on conserve la teneur d'équilibre; si elle est supérieure à la plus grande, on conserve la teneur limite supérieure; si elle est inférieure, on conserve la teneur limite la plus faible.

La teneur optimale est la teneur intermédiaire parmi les 3 teneurs déterminées précédemment.

Pour plus de détails, Disons simplement que ce résultat peut se visualiser graphiquement ; (Figure III-2) Chaque courbe de profit net correspondant aux 3 facteurs limites a un maximum correspondant à la teneur limite. Pour une teneur de coupure « c » donnée, si l'on trace une verticale, on obtient 3 points d'intersection. La valeur par tonne minéralisée que l'on peut atteindre est le point le plus bas de ces 3 points d'intersection (puisque les 2 autres excèdent la capacité d'une des installations. En se déplaçant sur la courbe la plus basse (solution réalisable), on trouve un point maximum qui ne peut être qu'un point d'intersection de 2 courbes (teneur de coupure d'équilibre) ou un point maximum d'une des courbes (teneur de coupure limite).

#### **Remarque :**

- Un certain nombre d'hypothèses ont été implicitement formulées par Lane pour arriver à ce résultat. En particulier, il considère que seuls la teneur moyenne et le tonnage au dessus d'une teneur de coupure sont fonctions de celle-ci. Ceci n'est pas tout à fait vrai. En effet, la dilution normalement augmente avec la teneur de coupure, le taux de récupération au concentrateur peut fluctuer en fonction de la teneur du minerai traité et le facteur 'F' peut aussi varier en fonction de la teneur de coupure. Dans ce cas, une approche itérative devra être utilisée.

- Taylor (1972) rapporte qu'habituellement la teneur de coupure d'opération des mines est égale ou inférieure à la médiane des valeurs des unités de sélection.

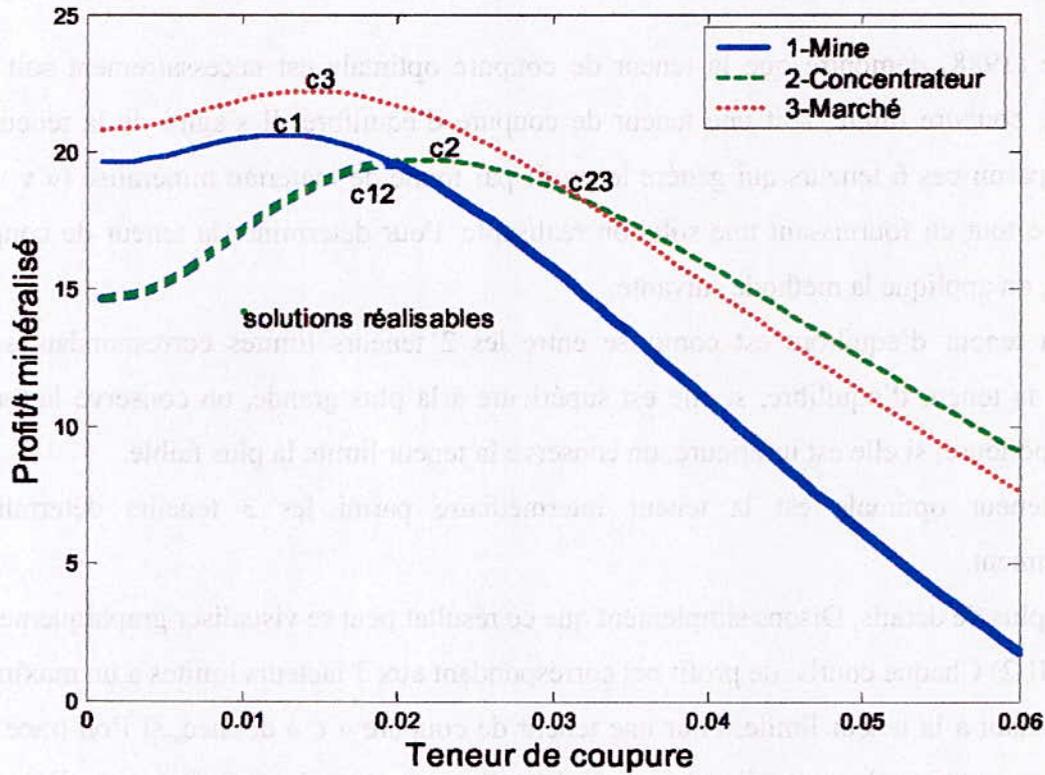


Figure III-2 : profit vs teneur de coupure

### III-9 Influence de la distribution sur la teneur optimale et le profit :

La figure suivante (III-3) illustre l'effet d'utiliser la mauvaise distribution pour déterminer la teneur de coupure optimale pour un même gisement. Supposons que les calculs ont été faits pour un ensemble de paramètres identiques sauf que l'on a considéré deux lois lognormales de variances différentes. (Paramètres utilisés:  $m=1.32\$/t$  minéral;  $y=.87$ ;  $p=600\$/t$  métal ;  $k=0$ ;  $h=3.41\$/t$  minerai;  $f=11.9M\$$ ;  $F=0M\$$ ;  $M=12Mt$ ;  $H=3.9Mt$ ;  $K=.085Mt$ ). Sur la figure gauche, l'optimum est atteint à l'équilibre mine concentrateur ( $c=0.79\%$ ) et rapporte un profit de  $0.72\$/t$  minéral. Sur celle de droite, l'optimum est atteint à la teneur de coupure  $0.93\%$  et un profit de  $0.36\$/t$  minéral en résulte.

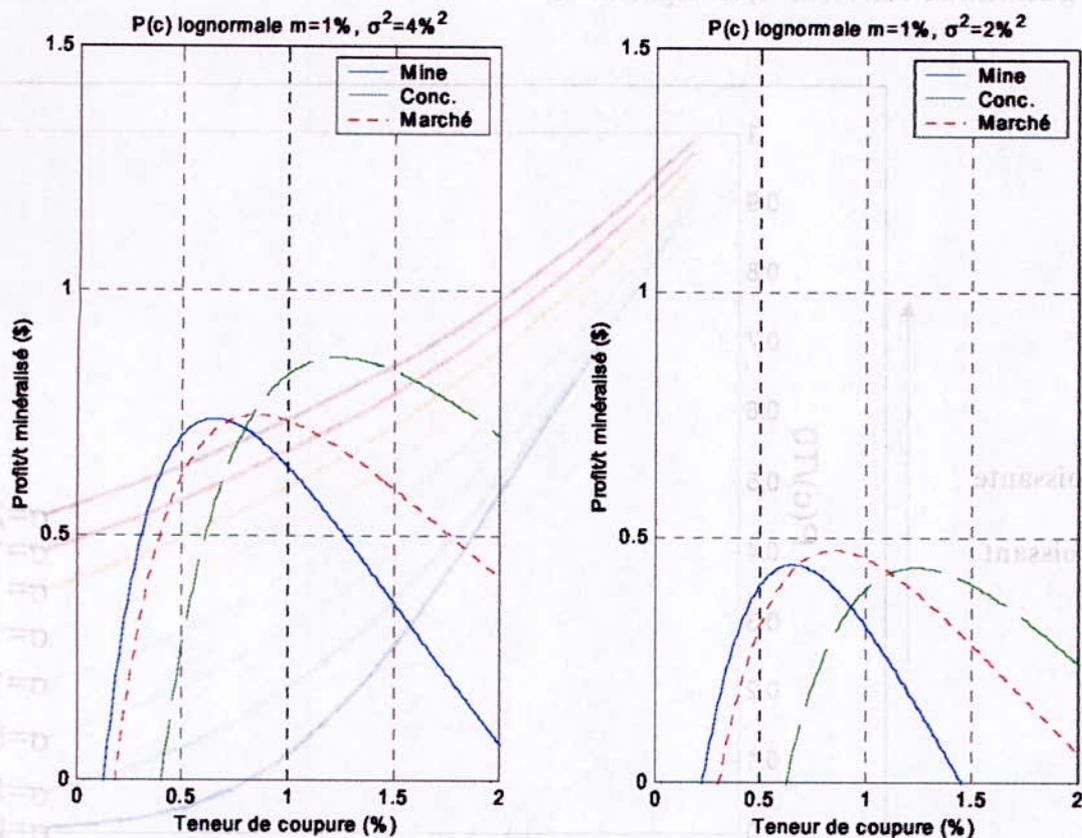


Figure III-3 : le profit minéralisé en fonction de la teneur de coupure.

### III-10 Influence de la variance :

On considère la courbe de profit conventionnel (figure III-4) :

Cette fonction est remarquable car elle augmente toujours pour une teneur de coupure fixé, lorsque la sélectivité de l'opération augmente.

La sélectivité augmente lorsque la sélection est faite :

- sur plus de blocs.
- à partir d'estimation des teneurs de blocs plus précises et sans biais conditionnel.

**Note :** dans les deux cas la variance des valeurs estimées augmente.

**Exemple :** gisement de cuivre,  $m=1$ , loi lognormale

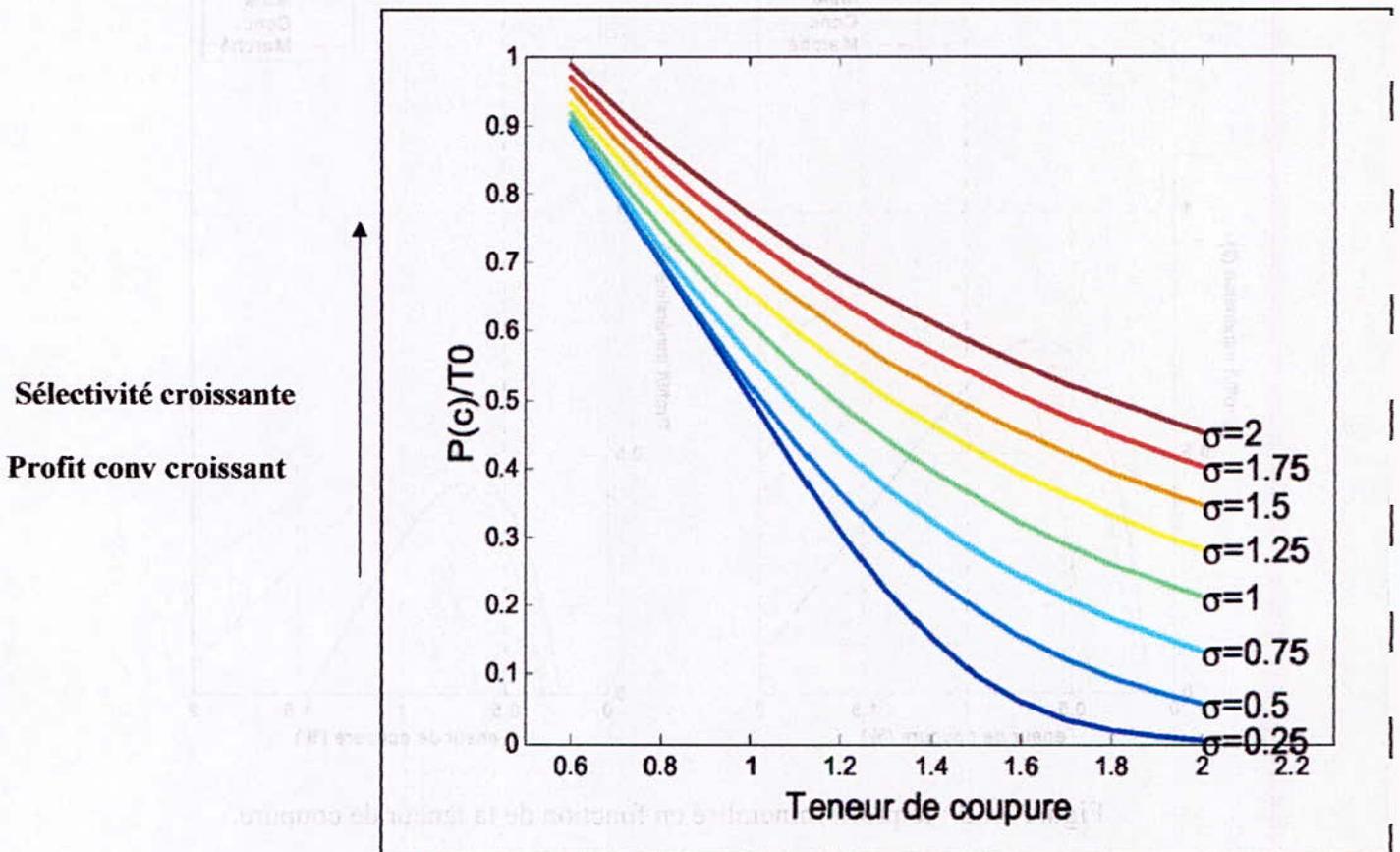


Figure III-4 : le profit conventionnel en fonction de l'écart type.

**Remarque :**

1- Peu importe la transformation choisie, il est important de réaliser que c'est la distribution des valeurs estimées (présentes ou futures) ou des valeurs vraies des blocs qui nous intéresse. Or l'on ne dispose au départ que des observations ponctuelles pour établir le type de distribution. Il faudra donc nécessairement disposer d'un modèle permettant de prédire comment se modifie la distribution ponctuelle lors du changement de support. On peut soit supposer que la loi de distribution ne change pas (dans le cas normal on en est assuré et dans le cas lognormal, l'expérience démontre que c'est généralement le cas), soit conserver la forme de la distribution ponctuelle en contractant la distribution pour avoir la variance désirée (correction affine), soit fournir un modèle qui permette l'évolution de la distribution (et la réduction de la variance) au fur et à mesure que le support augmente (modèle gaussien discret). Dans tous les cas, on doit spécifier une variance de l'estimateur, laquelle dépend de la configuration. On devrait donc

calculer les ressources pour chaque bloc séparément (avec sa variance propre) et effectuer le cumul des ressources sur tous les blocs.

2- Calculer les ressources globales en se basant sur la distribution des estimateurs n'a de sens que si les estimateurs sont sans biais conditionnel, autrement les valeurs calculées ne seront jamais réalisées. Or même le krigeage peut présenter un biais conditionnel (même si, en général, celui-ci est faible).

### III-11 La taxation :

Peters (1986) indique 3 types différents de taxation en usage dans le monde:

Taxe sur la valeur de la mine (ex. taxe foncière). Cette taxe est un frais fixe et a donc comme effet d'augmenter la teneur de coupure.

Royauté, i.e. taxe sur chaque tonne de minerai minée et déplacée. Elle agit comme un coût variable et augmente donc la teneur de coupure.

Impôt sur le revenu. Puisqu'elle s'applique aux profits nets, elle n'a que peu d'impact sur la teneur de coupure.

Au Canada, et plus particulièrement au Québec, on retrouve essentiellement comme forme de taxation:

Une taxe foncière (payable à la municipalité). Frais fixe, a un impact sur la teneur de coupure.

Un impôt sur le revenu payable aux gouvernements provincial et fédéral. Aucun impact sur la teneur de coupure.

Un droit minier payable au gouvernement provincial. Ce droit minier est très faible et son rendement a même été négatif au cours de plusieurs années en raison des crédits qui s'y rattachent (crédit pour pertes). Ce droit est en réalité un impôt sur les profits de la mine. Aucun impact sur la teneur de coupure.

**Conclusion :**

L'activité minière a dû faire face, au cours de la décennie passée, à une forte érosion des cours des matières premières et à une compétition avec des secteurs plus rentables, au regard des besoins en capitaux, à la suite de la mondialisation de l'économie; elle a de même dû adapter son outil de production à des contraintes environnementales de plus en plus astreignantes. Ce double défi, qui reste d'actualité, a pu être relevé pour l'essentiel par une augmentation des teneurs de coupure, par un accroissement des capacités de production (mines géantes) et d'investissements (regroupements, rachats, etc.) et par la fermeture accélérée des unités les moins rentables.

# *Chapitre IV*

## Conception de la base de données

**IV-1 Introduction :**

Alors qu’au début de leur histoire les ordinateurs servaient essentiellement à calculer, leur utilisation principale de jours est la gestion d’informations. On les retrouve dans tous les secteurs d’activité. Une grande quantité d’informations stockées dans un ordinateur s’appelle une base de données. Un logiciel permettant d’utiliser ces données est un *système de gestion de base de données* (SGBD).

Nous allons utiliser ici le logiciel Access comme outil de réalisation de notre application. Ce logiciel permet une conception aisée de bases de données ne dépassant pas une dizaine, avec un nombre d’utilisateurs. Il est à noter que plusieurs autres SGBD plus performants (mais également plus complexes) existent par ailleurs.

Le système Access est basé sur le modèle relationnel. Les informations sont stockées dans des tables qui sont reliées entre elles par des relations. L’interrogation de la base de données se fait à l’aide des requêtes, ces requêtes étant écrites à l’aide d’un langage commun à la plupart des SGBD (SQL).

Identifiant	Type de données	Taille	Nom du champ
01	Entier long	4 octets	Catégorie
02	Texte	255	Nom
03	Texte	255	Prénom
04	Texte	255	Adresse
05	Texte	255	Mail
06	Réel simple	8	Montant
07	Réel simple	8	Commission
08	Réel simple	8	Commission
09	Réel simple	8	Commission

### IV-2 Mode d'application :

On utilise le Microsoft Access pour résoudre le problème de calcul de la teneur de coupure et le profit par l'approche de Lane. dans cette application, Il sera question d'organiser les données de manière général qui aboutit à la création du modèle conceptuel des données dans le quel apparaît les variables de calcul de la teneur et le profit ; elle sont représentées sous forme d'entités liées entre elles par des relations.

**Exemple :** entités : Gisement, Mine, Concentrateur....

La création de ces entités est faite pour stocker toutes les informations sur les paramètres de la calcul la teneur de coupure et le profit par l'approche de Lane et ainsi les informations de gisement (profondeur, densité, ...) sont stockées sous forme de lignes dans la table gisement. La modification et l'affichage du contenu est fait d'une façon bien plus agréable que le mode « feuille de données » qui permet qu'un affichage en lignes et en colonnes par la création des formulaires des entités.

La création des requêtes permet d'extraire des enregistrements qui répondent à un certain critère Ces requêtes peuvent également extraire des données à partir de plusieurs sources simultanément à condition qu'il existe des relations entre les variables de calcul, la teneur de coupure, le profit ainsi que les information sur le gisement.

Cette application est illustrée dans un organigramme du calcul de la teneur de coupure et le profit (figure IV-2).

### IV-3 Etude des entités :

#### 1- Gisement :

**Description :** elle représente les caractéristiques du gisement.

**Propriétés :**

Nom du champ	Type de données	Taille	Identifiant
Codgis	Entier long	Automatique	Oui
Nom	Texte	50	Non
Miner	Texte	50	Non
Morph	Texte	50	Non
Profon	Réel simple		Non
Dens	Réel simple		Non
Tene	Réel simple		Non
Resgeo	Réel simple		Non

## 2- Les facteurs limitatifs :

**Description :** elle inscrit la teneur de coupure et le profit pour chaque facteur limitatif.

### a) La mine est le facteur limitatif :

Nom du champ	Type de données	Taille	Identifiant
codmin	Entier long	Automatique	Oui
Codgis	Entier long	Automatique	Oui
Codvar	Entier long	Automatique	Oui
c	Réel simple		Non
v	Réel simple		Non
v max	Réel simple		Non

### b) Le concentrateur est le facteur limitatif :

Nom du champ	Type de données	Taille	Identifiant
codcon	Entier long	Automatique	Oui
Codgis	Entier long	Automatique	Oui
Codvar	Entier long	Automatique	Oui
c	Réel simple		Non
v	Réel simple		Non
v max	Réel simple		Non

### c) Le marché est le facteur limitatif :

Nom du champ	Type de données	Taille	Identifiant
Codmar	Entier long	Automatique	Oui
Codgis	Entier long	Automatique	Oui
Codvar	Entier long	Automatique	Oui
c	Réel simple		Non
v	Réel simple		Non
v max	Réel simple		Non

**d) Variable :**

**Description :** elle représente les variables de la teneur de coupure et le profit avec les facteurs limitatif.

Nom du champ	Type de données	Taille	Identifiant
Codgis	Entier long	Numéro auto	Oui
codvar	Entier long	Numérique	Oui
typeFL	Texte	50	Non
$x_c$	Réel simple		Non
$g_c$	Réel simple		Non
y	Réel simple		Non
p	Réel simple		Non
k	Réel simple		Non
h	Réel simple		Non
m	Réel simple		Non
f	Réel simple		Non
F	Réel simple		Non
M	Réel simple		Non
H	Réel simple		Non
K	Réel simple		Non
C	Réel simple		Non
v	Réel simple		Non
v max	Réel simple		Non

**IV-4 Réalisation de l'organigramme :**

La conception du schéma relationnel nous a conduit à élaborer un organigramme global de l'application. Dans cette étape nous allons programmer l'organigramme ci-dessous de manière à faire figurer tout les facteurs limitatifs avec leur teneur de coupure et le profit correspondant.

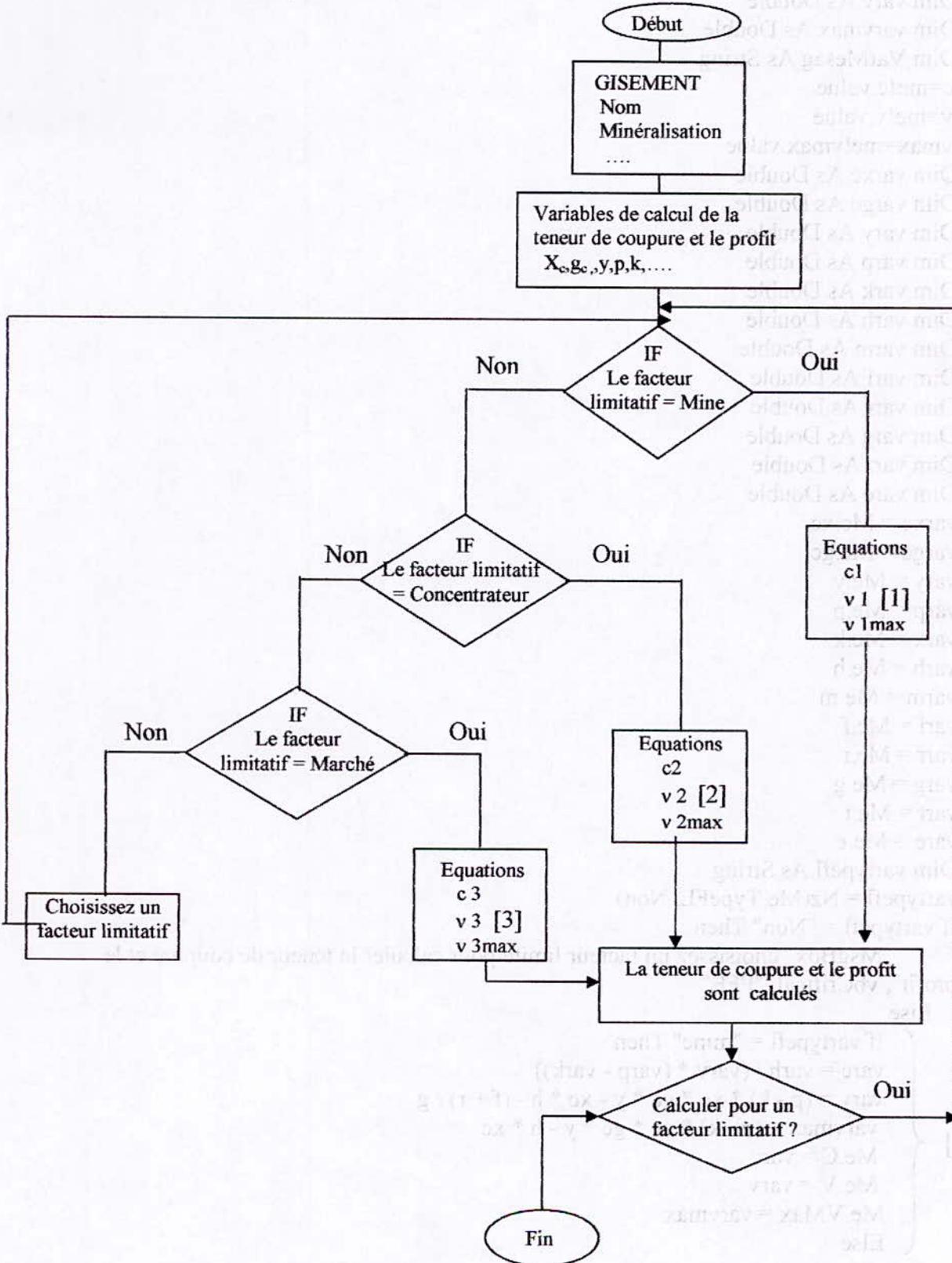


Figure IV-1 : Organigramme globale d'application.

**IV-5 programme de calcul de la teneur de coupeure et le profit :**

```

Private Sub calculer_Click()
On Error GoTo errvartypefl
Dim varc As Double
Dim varv As Double
Dim varvmax As Double
Dim VarMesag As String
'c=me!c.value
'v=me!v.value
'vmax=me!vmax.value
Dim varxc As Double
Dim vargc As Double
Dim vary As Double
Dim varp As Double
Dim vark As Double
Dim varh As Double
Dim varm As Double
Dim varf As Double
Dim varr As Double
Dim varg As Double
Dim vart As Double
Dim vare As Double
varxc = Me.xc
vargc = Me.gc
vary = Me.y
varp = Me.p
vark = Me.k
varh = Me.h
varm = Me.m
varf = Me.f
varr = Me.r
varg = Me.g
vart = Me.t
vare = Me.e
Dim vartypefl As String
vartypefl = Nz(Me.TypeFL, Non)
If vartypefl = "Non" Then
    MsgBox "choisissez un facteur limite pour calculer la teneur de coupeure et le profit", vbCritical, "PFE"
Else
    If vartypefl = "mine" Then
        varc = varh / (vary * (varp - vark))
        varv = (p - k) * xc * gc * y - xc * h - (f + r) / g
        varvmax = (p - k) * xc * gc * y - h * xc
        Me.C = varc
        Me.V = varv
        Me.VMax = varvmax
    Else

```

[1]

```

[2] {
    If vartypefl = "concentrateur" Then
        varc = (varh + (varf + varr) / vart) / (vary * (varp - vark))
        varv = (p - k) * xc * gc * y - xc * h - m - (f + r) * xc / t
        varvmax = (p - k) * xc * gc * y - h * xc - xc * (f + r) / t
        Me.C = varc
        Me.V = varv
        Me.VMax = varvmax
    Else
[3] {
        'If vartypefl = "marché" Then
            varc = varh / (((varp - vark) - ((varf + varr) / vare)) * vary)
            varv = (p - k) * xc * gc * y - xc * h - m - (f + r) * xc * gc * y / e
            varvmax = (p - k) * gc * xc * y - xc * h - (f + r) * xc * gc * y / e
            Me.C = varc
            Me.V = varv
            Me.VMax = varvmax
        'Else
        'End If
    End If
End If
End If
VarMesag = MsgBox("Voulez-vous calculer pour d'autres données du même
Gisement?", vbExclamation + vbYesNo, "ENP")
If VarMesag = vbYes Then
DoCmd.GoToRecord , , acNewRec
Else
End If
Exit Sub
errvartypefl:
MsgBox "Erreur", , "ENP"
End Sub

```

#### IV-6 Explication de l'organigramme :

Pour tout gisement Taylor et Lane reconnaissent trois facteurs limitatifs importants ; À chaque facteur correspondent une teneur de coupure limite et le profit. La figure IV-1 explique le calcul de cette teneur pour chaque facteur.

Si le facteur limitatif est "la mine" le programme renvoi vers les relations de Lane c1 et v1 (page 69) qui représentent la teneur de coupure et le profit de la mine ; il affiche et stocke les résultats, si non on choisi le deuxième facteur limitatif "concentrateur" pour cela le programme va calculer la teneur de coupure et le profit c2 et v2 (page 70), si non il existe la dernière possibilité ; c'est le facteur limitatif est le "marché" ; la détermination de leur teneur de coupure et le profit correspond au choix dans le programme choisie les relations c3 et v3 (page 70-71).

Si aucun facteur limitatif n'est choisi un message d'erreur s'affiche en signalant "choisissez un facteur limitatif pour calculer la teneur de coupure et le profit.

### IV-7 Mode d'emploi de l'application sous Access

L'application de calcul de la teneur de coupure et le profit est représentée dans un formulaire,

Pour calculer la teneur de coupure et le profit on considère les étapes suivantes :

- 1- On choisi le gisement et inscrit les informations dans le sous formulaire « gisement » ainsi les variables de calcul de la teneur de coupure et le profit.
- 2- En indiquant un facteur limitatif et par le clic sur le bouton « calculer » ; le programme affiche les résultats de la teneur de coupure et le profit ; Si aucun facteur limitatif n'est choisi alors un message d'erreur s'affiche pour nous renvoyer vers le choix d'un facteur limitatif (que ce soit "Mine", "Concentrateur", "Marché").

**IV-8 Présentation de l'application sous Access :** l'affichage des résultats est représenté dans ce formulaire, pour chaque fenêtre du gisement il y a plusieurs teneurs de coupure et le profit.

Pour un gisement on choisie un facteur limitatif et à partir de plusieurs paramètres de calcul qui représentes dans un formulaire (Figure IV-2) ; on détermine la teneur de coupure et le profit.

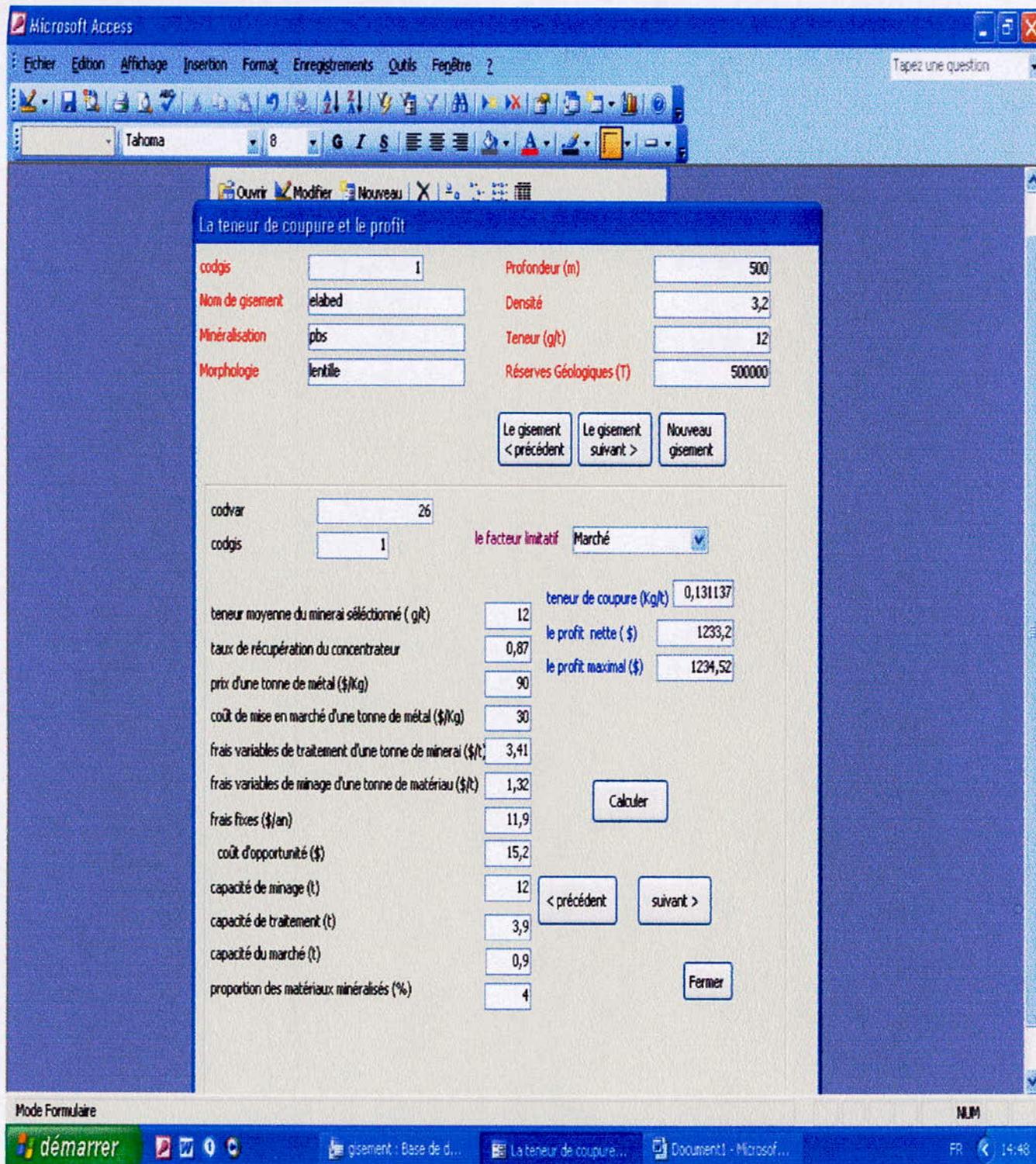


Figure IV-2 fenêtre de calcul de la teneur de coupure et le profit

# Conclusion Générale

## **Conclusion générale :**

Au terme de notre étude sur l'influence de la teneur de coupure d'un projet minier, nous avons pu synthétiser l'information en faisant une recherche bibliographique assez succincte. C'est un pas vers un calcul plus élaboré du profit minier en inspirant des équations de Lane et Taylor pour pouvoir s'affranchir des difficultés de décision concernant l'investissement ou non d'un nouveau projet minier. Nous avons volontairement écarté de nous calcul la fonction d'opportunité qui reste néanmoins difficile à déterminer.

Le calcul de la teneur de coupure et le profit minier a été fait en développant une application sous ACCESS ainsi qu'une programmation avec visual basic comme module intégré à ACCESS.

Lane et Taylor définissent le profit de l'exploitation pour la reconnaissance de l'efficacité économique du projet minier. On note que le profit le plus précis est par l'approche de Lane parce qu'il basé sur deux autres facteurs importants qui viennent influencer sur la détermination de la teneur de coupure ce sont :

- Les attentes concernant l'évolution du prix des métaux.
- La capacité technologique de récupérer ultérieurement le minerai délaissé.

Pour connaître le profit généré par un bloc, il est suffisant de connaître la teneur moyenne et la teneur de coupure du bloc et les coûts pour exploiter ce bloc.

On considère la courbe de profit conventionnel, cette fonction est remarquable car augmente toujours pour une teneur de coupure fixé lorsque la sélectivité de l'opération augmente. La sélectivité augmente lorsque la sélection est faite :

À tonnage extrait égal :

- effet support : On récupère toujours moins de métal avec des gros blocs qu'avec des petits blocs.
- effet information : A partir d'estimation des teneurs de blocs plus précises et sans biais conditionnel c'est à dire on récupère toujours moins de métal avec des estimés qu'avec les vraies valeurs.

La géostatistique permet théoriquement de :

- Prévoir l'ampleur de ces effets
- Minimiser ces effets
- Prendre des décisions éclairées au vu de ces effets

# Bibliographie

# Bibliographie

- [1] P.Routhier : Les gisements métallifères : Géologie et principe de recherche (1962).
- [2] Sandier : Mise en valeur des gisements métallifères (1963).
- [3] F.Auclair : Industrie minérale, Vocabulaire de l'exploitation à ciel ouvert  
Ed Société de l'industrie minérale (France) Janvier 1987
- [4] [www.mrn.gouv.qc.ca/](http://www.mrn.gouv.qc.ca/)
- [5] [www.stat.gouv.qc.ca/donstat/economie/economiq/](http://www.stat.gouv.qc.ca/donstat/economie/economiq/)
- [6] [www.nrcan.gc.ca/mms/daef/dsmam/](http://www.nrcan.gc.ca/mms/daef/dsmam/)
- [7] [www.minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/](http://www.minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/)
- [8] Taylor, 1972. Trans.Inst.min.metall, 81, A160-A179. Taylor.1985. Trans.Inst.min.metall., 94.A204-A216
- [9] Geology of Canadian deposit types, 1995, Ekstrand, Sinclair et Thorpe, eds  
CGC, Rapport de géologie 36 1986, type de gisements minéraux du Canada,  
Eckstrand(ed)  
[www.em.gov.bc.ca/minig/geolsurv/EconomiqGeology/metallicminerals/](http://www.em.gov.bc.ca/minig/geolsurv/EconomiqGeology/metallicminerals/mdp/mdpdeind.htm)  
[mdp/mdpdeind.htm](http://mdp/mdpdeind.htm)
- [10] Cours de DR CHABOU ENP 2005
- [11] j.Rivoirard : Rapport de concept et méthodes de la géostatistique, 1995
- [12] [www.Cerna.ensmp.fr](http://www.Cerna.ensmp.fr) (revue d'économie industrielle, n° 72. 31646 1995.
- [13] [www.oilcrisis.com/laherrere/](http://www.oilcrisis.com/laherrere/)
- [14] [www.sedar.com](http://www.sedar.com)
- [15] Liens/Links : Centre de Géostatistique, Ecole des Mines de Paris, Armines (promotion 2000 paris)
- [16] [www.geostat.com](http://www.geostat.com)
- [17] Géologie minière Examen intra- trimestriel (22 oct 1999 paris)
- [18] [www.combior.com](http://www.combior.com)
- [19] Annuaire des minéraux du Canada, 1999
- [20] Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'école des mines de paris, spécialité « géostatistique » soutenue publiquement par sarah gorla (30 mars 2004)
- [21] <http://www.metanor.ca/>
- [22] [www.madagascardiplomatie.ch/files/Mines/Gisement%20de%20Substances/nickel%20et%20cobalt.pdf](http://www.madagascardiplomatie.ch/files/Mines/Gisement%20de%20Substances/nickel%20et%20cobalt.pdf)
- [23] [www.cnw.ca/fr/releases/orgDisplay.cgi?okey=8887](http://www.cnw.ca/fr/releases/orgDisplay.cgi?okey=8887)

- [24] [www.forum.webfin.com/dcboard.php?az=show\\_topic&forum=105&topic\\_id=865&mesg\\_id=865&page=](http://www.forum.webfin.com/dcboard.php?az=show_topic&forum=105&topic_id=865&mesg_id=865&page=)
- [25] [www.wesdomegoldmines.com/documents/WGM\\_1999\\_Annual.pdf](http://www.wesdomegoldmines.com/documents/WGM_1999_Annual.pdf)
- [26] [www.agnico-eagle.com/](http://www.agnico-eagle.com/)
- [27] [www.enbridge.com/investor/financialInformation/reportsFilings/pdf/base-shelf-prospectus-french.pdf](http://www.enbridge.com/investor/financialInformation/reportsFilings/pdf/base-shelf-prospectus-french.pdf)
- [28] Cambior, Rapport du quatrième trimestre 2004 et de fin d'exercice
- [29] survols des tendances observées dans l'exploitation minière canadienne
- [30] [www.industrie.gouv.fr/energie](http://www.industrie.gouv.fr/energie) (presse du 20 janvier 2004 au 20 février 2004 : ECONOMIE ; Revue d'actualité des minéraux et des métaux
- [31] [www.brgm.fr](http://www.brgm.fr) (ressources minérales)
- [32] [www.dynatec.ca](http://www.dynatec.ca)
- [33] [www.iepf.org/docs/lef/IEPFLEF62.pdf](http://www.iepf.org/docs/lef/IEPFLEF62.pdf)
- [34] M.Armstrong, Basic linear geostatistic, Springer. 1998