

6. Ressources récupérables

Lorsqu'une mine est exploitée de **façon sélective**, i.e. que la décision d'expédier un bloc au concentrateur ou aux rebuts 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 3 ppm, pourront montrer une rentabilité très différente selon la variabilité des teneurs de blocs (unités de sélection), et selon leur mode d'exploitation.

Exemple (tiré de Rivoirard¹): Les teneurs des blocs sont fournies (tonnage 1). Comparez les projets d'exploitation optimums obtenus pour des tonnages extraits de 1, 2...8 sous les conditions suivantes:

- a) sélection libre,
- b) extraction en une passe verticale unique
- c) extraction à ciel ouvert (avec pentes verticales)

5
5
5
5
0
0
0
10

Ainsi, pour un tonnage extrait de 7, le mode a) fournit 30 unités de métal, le mode b) 25, et le mode c) 20.

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 chapitre 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.

Effet support

Le premier point à considérer est la taille des blocs sur lesquels s'effectue la sélection. On a vu (Chap. 3) que la variance des blocs dépendait de leur taille et on sait comment les calculer connaissant le variogramme.

¹ J. Rivoirard, Concepts et méthodes de la géostatistique, 1995, CG, C-158.

Effet information

La sélection sera effectuée en réalité sur des valeurs estimées (par krigeage). On doit donc connaître la distribution des valeurs krigées. La variance théorique des valeurs krigées peut être calculée connaissant le variogramme ($Var(Z_v^*) = \sum \sum \lambda_i \lambda_j Cov(Z_i, Z_j)$). Cette variance correspond à la variance théorique de l'estimateur dans un champ infini. Sa restriction à un domaine fini, ou variance de dispersion de l'estimateur, est plutôt $D^2(Z_v^* | G) = Var(Z_v^*) - \bar{C}(G, G)$. Cette variance peut aussi être obtenue expérimentalement directement des valeurs krigées si la sélection s'effectue sur les estimations actuelles. Si la sélection doit s'effectuer plutôt sur des estimations à fournir lorsque plus d'informations seront disponibles, alors on peut quand même calculer la valeur théorique de la variance pourvu que l'on sache dans quelles conditions le krigeage sera réalisé (dans ce cas, on suppose que les nouvelles données ne modifieront pas le variogramme).

Note: $Var(Z_v^*)$ et donc $D^2(Z_v^* | G)$ dépend de la configuration utilisée pour le krigeage.

Exemple : Mine à ciel ouvert (le gisement est très grand de sorte que $\bar{C}(G, G) \approx 0$). Supposons que le variogramme est sphérique, isotrope, de palier 81, avec portée de 50m et sans effet de pépite. La sélection se fait sur des blocs de 20m x 20m. Au moment de décider de traiter ou non le bloc, on disposera de forages sur une grille de 20m (centre des blocs) et l'estimation de chaque bloc sera faite utilisant les 9 forages les plus près.

La variance de ces valeurs estimées (futures) sera alors : 51.35

La variance d'estimation est 5.01

La variance de bloc est 56.37

Le multiplicateur de Lagrange est 0.006

On a bien $51.35 + 5.01 + 2 \cdot 0.006 = 56.37$

Alors que les ressources in-situ devraient être calculées avec la variance de bloc 56.37, les ressources récupérables (futures) devraient l'être avec la variance 51.35. Les contraintes minières, dont on n'a pas tenu compte, ne peuvent que faire décroître les ressources ainsi calculées.

Estimation des ressources globales

Pour déterminer les ressources (i.e. tonnage et teneur) connaissant la moyenne du gisement et la variance des unités de sélection, il faut aussi spécifier la loi de distribution. Dans certains gisements (ex. Fe) la loi normale peut être acceptable. Toutefois, la loi lognormale est plus courante pour des gisements de Cu, d'Au, etc. On rappelle ici les formules déjà présentées au Chap. 1.:

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

où : f : fonction de densité d'une $N(0,1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2}}$

F : fonction de distribution d'une $N(0,1)$ (Table ou formule d'approximation)

m : moyenne des Z

σ écart-type des Z

β : écart-type des $\ln Z$

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

Lorsque la loi n'est ni normale ni lognormale, on peut tenter d'ajuster des lois lognormales à 3 voir à 4 paramètres.

Ex. Loi à 3 paramètres: $\text{Log}(cZ+t)$ ($c=1$ ou -1) est distribué suivant une normale. Évidemment, $cZ+t$ est lognormale et l'on peut utiliser la distribution lognormale pour calculer les ressources de $cZ+t$, et donc de Z (pour $c=-1$, il faut adapter les formules précédentes).

Note: Il existe des transformations plus générales vers la loi normale (Ex. Z^t suit une loi normale; transformations graphiques; transformation avec des polynômes, etc.). Toutefois, ce n'est pas parce que, disons, $Z(x)^t$ suit une loi normale qu'il en sera de même pour Z_v^t .

Remarques: 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). On a vu au chapitre 5

que le biais conditionnel était directement lié à la valeur du multiplicateur de Lagrange et que l'absence de biais conditionnel impliquait que la variance de l'estimateur devait être inférieure à la variance de bloc. On cherchera donc des voisinages pour le krigeage assurant cette condition et, pour le calcul des ressources, l'on s'abstiendra d'utiliser les blocs présentant une variance supérieure à la variance de bloc.

Application: Détermination d'une grille optimale de forages

Comme on l'a vu, il est possible de calculer la variance de l'estimateur futur. Connaissant cette variance, la moyenne du gisement et le type de distribution (ex. normale ou lognormale), il est possible de calculer les ressources que l'on devrait obtenir après sélection sur les estimations futures. L'ajout de forages diminue la variance de krigeage et augmente nécessairement la variance théorique des valeurs krigées et la sélectivité de l'opération, et donc les revenus bruts. En comparant le coût des différentes options par rapport aux revenus, on peut déterminer une grille optimale de forage.

Exemple: Un gisement présente une loi de distribution des teneurs ponctuelles lognormale et on suppose qu'il en est ainsi pour les blocs (SMU) et leurs estimations. La moyenne du gisement est 1.3% et la teneur de coupure est de 1% (reflète les coûts d'extraction et de traitement). Un krigeage avec les forages actuels a fourni une variance de dispersion des valeurs krigées de 24%². On se propose d'ajouter des forages de façon à améliorer l'estimation. Un tel ajout porterait la variance des valeurs krigées à 26%². Combien serait-on prêt à dépenser pour ce programme de forages si le gisement fait 50Mt (T_0) et que le prix du cuivre est 2\$/kg?

Rép. On calcule les ressources globales en utilisant la loi lognormale et les formules précédentes en prenant à tour de rôle les variances 24%² et 26%². On trouve:

Forages actuels ($\sigma^2 = 24\%^2$): $T(1\%)/T_0=0.253$, $Q(1\%)/T_0=1.089\%$, $m(c)=4.307$

Forages futurs ($\sigma^2 = 26\%^2$): $T(1\%)/T_0=0.249$, $Q(1\%)/T_0=1.092\%$, $m(c)=4.392$

Le profit conventionnel est donné par $P(c)=Q(c)-T(c)*c$

Les revenus seront donc accrus par la campagne additionnelle de:

$T_0*[1.092\%-1\%*0.249]-(1.089\%-1\%*0.253)]=.007\%*T_0$.

Cette quantité représente le métal additionnel que l'on compte dégager de la meilleure estimation. En dollars, ceci représente $0.007\%*50Mt*2\$/kg=7M\$$. C'est le montant que l'on est prêt à dépenser pour la nouvelle campagne de forages. Ce chiffre suppose que la teneur moyenne du gisement et le variogramme ne seront pas modifiés suite à l'obtention de nouvelles analyses. Il faut aussi tenir compte qu'un des avantages, non quantifié, d'augmenter la grille de forages, est d'améliorer la répartition des ressources entre les différentes catégories (mesurées, indiquées et inférées) en augmentant le niveau de confiance dans les estimations fournies. Bref, même si les estimations demeuraient les mêmes, on aurait acquis néanmoins une plus grande confiance en celles-ci, ce qui peut avoir des incidences importantes quant aux possibilités de financement de l'entreprise et à la valeur des actions.

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

- i. on construit l'histogramme des teneurs des observations (habituellement quasi-ponctuelles).
- ii. on calcule le variogramme des valeurs ponctuelles que l'on modélise.
- iii. à l'aide des formules vues au chapitre 3, on calcule la variance des blocs de la taille des unités de sélection.
- iv. on "corrige" (sous certaines hypothèses) l'histogramme des valeurs ponctuelles de façon à ce que la nouvelle distribution présente la variance calculée en iii.
- v. 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.

Exemples:

- a) correction normale. Lorsque les valeurs ponctuelles présentent une distribution normale, on suppose que les blocs présenteront aussi une distribution normale avec une variance $D^2(v|G)$ au lieu de $D^2(\bullet|G)$
- b) correction lognormale. Comme a) mais en supposant la permanence de la lognormalité. (Cette hypothèse est incompatible avec le théorème de la limite centrale et est donc plus plausible pour de petits blocs. Toutefois, pour de grands blocs, la variance de blocs est faible et dans ce cas la distribution lognormale est très proche d'une distribution normale).
- c) correction affine. On sait que dans le cas où Z et Z_v suivent une loi normale, on aura nécessairement égalité des valeurs centrées-réduites i.e.

$$\frac{(Z_v - m)}{D^2(v|G)} = \frac{(Z - m)}{D^2(\bullet|G)}$$

On suppose que cette égalité demeure valide même si la distribution n'est pas normale. Ainsi, on arrive à l'égalité suivante:

$$F(z_v) = F\left((z - m) \left\{ \frac{D^2(v|G)}{D^2(\bullet|G)} \right\}^{0.5} + m\right)$$

Cette équation donne la distribution des teneurs de bloc connaissant la distribution des teneurs ponctuelles et à partir de laquelle on peut calculer les ressources. (Cette hypothèse est incompatible avec le théorème de la limite centrale. Ainsi, si la distribution ponctuelle comporte 2 modes il y aura également 2 modes sur la distribution de blocs peu importe leur taille. De plus ce modèle impose artificiellement une teneur minimale de

$m \left(1 - \left\{ \frac{D^2(v|G)}{D^2(\bullet|G)} \right\}^{0.5} \right) > 0$, ce qui n'a pas de sens physiquement. On réserve ce modèle à de faibles changements de supports).

Note: Dans toutes les expressions précédentes, on veut prévoir la variance des blocs (ou des estimateurs) à l'intérieur des limites physiques du gisement. Pour cette raison, on doit prendre $D^2(\bullet|G)$ et $D^2(v|G)$ au lieu de σ^2 et σ_v^2 .

Ressources récupérables locales

Lorsqu'on désire prédire les ressources récupérables 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 approches que l'on a vu précédemment pour effectuer ce changement de support. On est ici en plein domaine de la géostatistique non-linéaire qui dépasse le cadre de ce cours. Ce problème de l'estimation des ressources récupérables a été un secteur de recherche très actif au cours des années 1980, toutefois, depuis quelques années, les méthodes de simulation ont tendance à remplacer les

méthodes non-linéaires car elles sont plus simples à mettre en oeuvre, fournissent une information plus complète et demandent moins d'hypothèses (bien que ces hypothèses puissent être dans certains cas plus fortes que celles des méthodes non-linéaires).

6.1 Catégories de ressources, apport de la géostatistique

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 de la compagnie. Le rapport doit être préparé par une personne compétente.

Niveau de confiance et connaissance géologique croissants.	Facteurs économiques et miniers pris en compte ?	
	non : Ressource	oui: Réserve
↓	Inférée	
	Indiquée	→ Probable
	Mesurée	→ Prouvées

Normalement, l'ingénieur géologue, que ce soit par méthodes traditionnelles ou par géostatistique, ne peut fournir des estimations que sur des ressources. La classification en réserves demande des études de faisabilité minière et économique.

Les indications sur le niveau de confiance correspondant à chaque catégorie sont plutôt qualitatives. Voici un exemple d'indications que l'on peut retrouver dans le guide de la SME (Society for mining, metallurgy and exploration) :

Inférée: niveau de confiance faible, minéralisation identifiée dans quelques échantillons mais la continuité géologique et la continuité des teneurs ne peut être démontrée. Typiquement, sont disponibles des données d'affleurements, tranchées, développements et forages. La confiance dans les estimations n'est pas suffisante pour permettre une analyse économique. (Il n'y a donc jamais de réserves correspondant à ce niveau de ressources).

Indiquée: niveau de confiance raisonnable. Données suffisamment abondantes pour supposer (sans démontrer) la continuité géologique et/ou de la minéralisation. La confiance dans les estimations est suffisante pour permettre une analyse économique.

Mesurée: niveau de confiance élevé. Les données sont assez abondantes et rapprochées pour démontrer la continuité géologique et/ou de la minéralisation. La confiance dans les estimations est suffisante pour permettre une analyse économique.

La géostatistique, grâce à la variance de krigeage, permet de quantifier la précision des estimations fournies. Toutefois, il faut garder présent à l'esprit que: i. la variance de krigeage donne une précision que l'on aurait en moyenne sur l'ensemble du gisement et donc indépendamment des teneurs observées localement, ii. la variance de krigeage dépend directement du modèle de variogramme adopté, lequel peut être parfois assez difficile à déterminer, iii. malgré son apparent caractère objectif, plusieurs décisions plus subjectives doivent être prises lors de la modélisation du variogramme (limites du domaine d'étude, zones considérées homogènes, traitement des données extrêmes, etc.). Néanmoins, plusieurs propositions ont été avancées par divers auteurs pour utiliser la variance de krigeage comme index pour déterminer les catégories de ressources et il y a peu de doutes que la tendance est à l'utilisation accrue, certainement non-exclusive, de la géostatistique pour la

catégorisation des ressources. En voici quelques exemples:

- i. M. David (communication personnelle), suggère de présenter aux ingénieurs de la mine des plans et sections représentant les données disponibles et les variances de krigeage dans des zones bien échantillonnées. Il les invite ensuite, se basant sur la disposition des données, à indiquer ce qu'ils considèrent comme mesuré, indiqué et inféré. Par la suite, il établit la correspondance entre les indications des ingénieurs et les variances de krigeage pour déterminer des seuils et classer chaque bloc.
- ii. R. Sabourin (1984) propose de diviser les variances de krigeage par les variances de bloc afin d'obtenir une mesure plus robuste face au choix du modèle de variogramme. Il établit 3 seuils pour ces rapports (0.2, 0.4 et 0.8) correspondants aux 3 types de ressources. Ces seuils pourraient être modifiés pour certains gisements en accord avec les ingénieurs de la mine.
- iii. Plusieurs auteurs ont proposé d'utiliser les écarts-types de krigeage relatifs (i.e. écart-type de krigeage divisé par la teneur estimée).
- iv. Arik (1999) propose de combiner la variance de krigeage avec une variance expérimentale calculée localement avec les observations ayant servi au krigeage.

L'avenir, les simulations ?

Les simulations permettent davantage. En générant plusieurs réalisations conditionnelles aux données observées, on peut simplement calculer la probabilité qu'à 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.

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

Simulation: 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 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.

Estimation: 3 estimateurs sont utilisés:

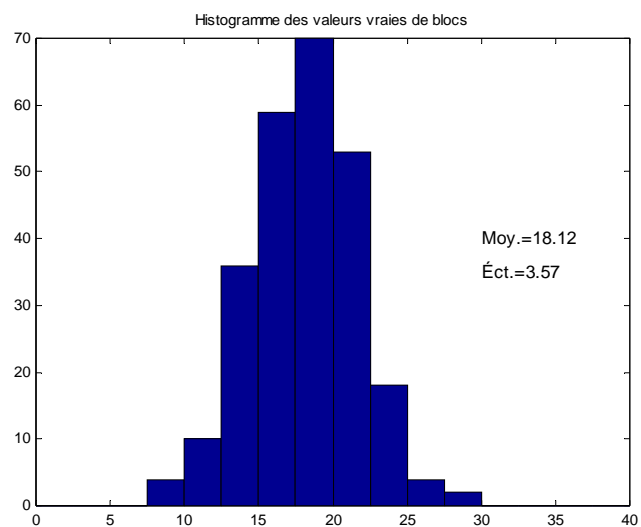
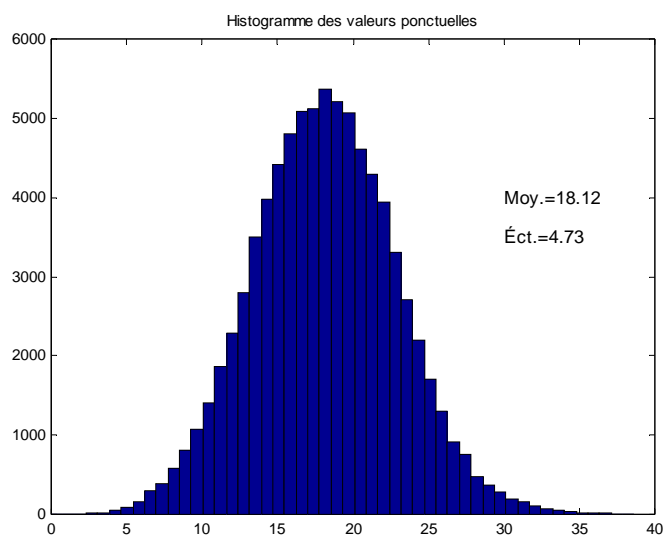
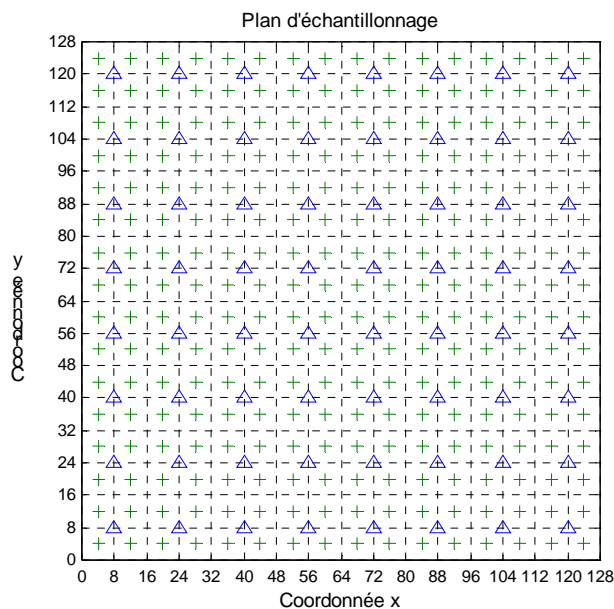
- Polygonal: Méthode polygonale. Chaque bloc est estimé par l'intersection centrale.
- Krigeage 1: Krigeage ordinaire. Chaque bloc est estimé par les 16 voisins les plus proches, en utilisant les mêmes observations que pour la méthode polygonale (triangles sur la figure 1).
- Krigeage 2: Krigeage ordinaire. 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 suivante. On a donc ici 4 fois plus d'observations pour effectuer le krigeage.

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.



Résultats:Valeurs vraies, points vs blocs vs estimateurs

Les histogrammes des teneurs ponctuelles et de bloc sont indiqués ainsi que les moyennes et les écart-types.

Les valeurs théoriques calculées à partir du variogramme pour les écart-types sont :

$$\{D^2(\bullet | V)\}^{0.5} = 4.74$$

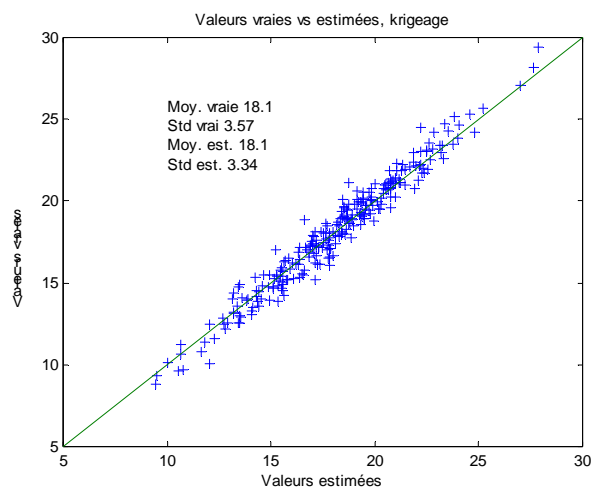
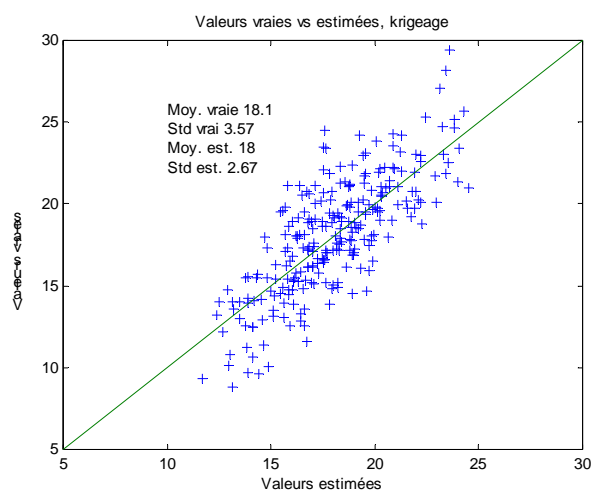
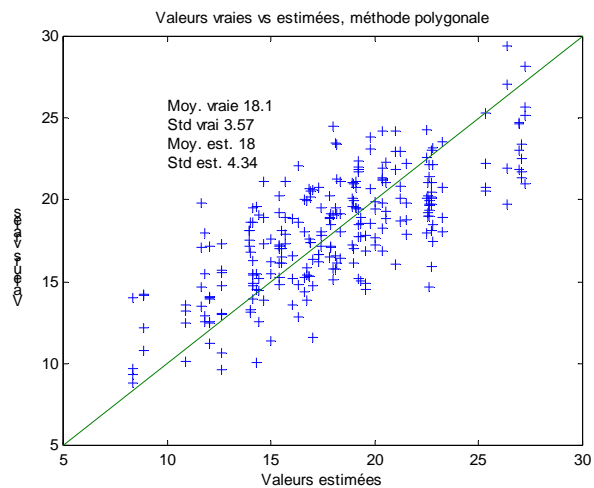
$$\{D^2(v | V)\}^{0.5} = 3.79$$

Ces deux valeurs coïncident assez bien avec les valeurs expérimentales indiquées sur les histogrammes. Ceci illustre la valeur du concept de variance de dispersion et l'effet support.

Estimateurs vs vraies valeurs

La figure suivante montre les diagrammes binaires de valeurs vraies des blocs vs valeurs estimées des blocs pour les 3 estimateurs. On constate que:

1. Les 3 estimateurs sont sans biais globalement.
2. 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).
3. 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.
4. On trouve un écart-type de dispersion théorique (voir formules du chapitre 5) 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.
5. 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).



Comparaison des ressources et profits

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 et de traitement 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.

	Item	T(c)/T0	m(c)	P(c)/T0
Coupure 14	Blocs, vraies teneurs	0.88	18.97	4.35
	Polygonale, prédit	0.83	19.3	4.37
	Krigeage 1, prédit	0.93	18.37	4.05
	Krigeage 2, prédit	0.88	18.82	4.26
	Polygonale, réalisé	0.83	18.97	4.11
	Krigeage 1, réalisé	0.93	18.56	4.22
	Krigeage 2, réalisé	0.88	18.90	4.33
	Krigeage 1, loi normale	0.94	18.44	4.17
	Krigeage 2, loi normale	0.88	18.86	4.30
Coupure 17	Blocs, vraies teneurs	0.65	20.19	2.07
	Polygonale, prédit	0.58	20.91	2.26
	Krigeage 1, prédit	0.63	19.57	1.62
	Krigeage 2, prédit	0.66	19.95	1.94
	Polygonale, réalisé	0.58	19.26	1.69
	Krigeage 1, réalisé	0.63	19.79	1.76
	Krigeage 2, réalisé	0.66	20.09	2.03
	Krigeage 1, loi normale	0.66	19.57	1.70
	Krigeage 2, loi normale	0.63	20.19	1.99
Coupure 21	Blocs, vraies teneurs	0.21	22.85	0.40
	Polygonale, prédit	0.23	23.83	0.66
	Krigeage 1, prédit	0.13	22.58	0.21
	Krigeage 2, prédit	0.18	22.87	0.33
	Polygonale, réalisé	0.23	21.22	0.05
	Krigeage 1, réalisé	0.13	22.51	0.20
	Krigeage 2, réalisé	0.18	23.19	0.39
	Krigeage 1, loi normale	0.14	22.35	0.19
	Krigeage 2, loi normale	0.20	22.92	0.38

1. À quantité d'information égale (i.e. mêmes 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
	Krigeage 1	97.0
17	Polygonale	81.6
	Krigeage 1	85.0
21	Polygonale	12.5
	Krigeage 1	$(0.21/0.40) = 50.0$

On notera que l'avantage du krigeage croît avec 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.

Coupure	Méthode	% optimum
14	Polygonale	95.0
14	Krigeage 1	97.0
14	Krigeage 2	99.5
17	Polygonale	82.0
17	Krigeage 1	85.0
17	Krigeage 2	98.1
21	Polygonale	12.5
21	Krigeage 1	50.0
21	Krigeage 2	97.5

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 faible teneur de coupure.

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.

Coupure	Méthode	(réalisé-prédit)/réalisé*100
14	Polygonale	-6.3
	Krigeage 1	4.2
	Krigeage 2	1.7
17	Polygonale	-33.8
	Krigeage 1	8.1
	Krigeage 2	4.5
21	Polygonale	-1189.0
	Krigeage 1	$(0.20-0.21)/0.20 = -4.8$
	Krigeage 2	14.5

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.

Coupure	Méthode	(réalisé-prédit (normal))/réalisé*100 (%)
14.0	Krigeage 1	1.2
	Krigeage 2	0.8
17.0	Krigeage 1	3.4
	Krigeage 2	1.7
21.0	Krigeage 1	$(.20-.19)/.20 = 7.6$
	Krigeage 2	0.4

Les écarts observés sont très faibles et s'expliquent en bonne partie par les fluctuations dues à l'échantillon. Avec un bon modèle, on peut prédire très tôt la performance future de tout plan d'échantillonnage.

5. *Il est possible de prédire, avec une bonne précision, le gain effectif que devraient procurer des forages additionnels.*

Coupure	gain prévu/gain réalisé*100
14.0	115.8
17.0	109.1
21.0	107.4

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 $(0.383-0.185)/(0.385-0.201)*100=107.4$ (aux arrondis près)).