

La géostatistique et ses applications dans les estimations minières

Ph. JACQUIN

Une estimation minière est une évaluation des caractéristiques locales ou globales d'un gisement puissance, (tonnage, teneurs ponctuelles ou moyennes...) basée sur les mesures expérimentales disponibles à un instant donné.

Toute estimation est entachée d'une incertitude dont le caractère aléatoire est dû à la position des points expérimentaux utilisés et à l'irrégularité du gisement.

La géostatistique a pour but de prendre en compte cette incertitude aléatoire en étudiant et en quantifiant la variabilité à l'échelle ponctuelle du caractère étudié.

Deux fonctions représentent chaque variable : la dérive, ou espérance mathématique, et le variogramme ou variance autour de la dérive en fonction de la distance.

L'utilisation de la géostatistique permet de définir pour toute estimation : la valeur la plus probable, et la variance de l'erreur commise. On peut donc définir à partir de ces renseignements une fourchette de probabilité pour l'estimation.

En plus de ces calculs a posteriori, elle permet de définir en connaissance de cause la stratégie de la suite des reconnaissances par sondages.

La Société Aluminium Pechiney utilise la géostatistique avec succès depuis environ 5 ans.

1. INTRODUCTION

L'évaluation quantitative et qualitative des gisements de minerai a souvent été la cause de graves surprises: des différences importantes entre les prévisions et les réalisations nous ont amené, comme bien d'autres, à nous poser des questions sur la validité des méthodes d'estimation.

C'est un condensé des solutions utilisées actuellement qui va vous être présenté.

2. LES ESTIMATIONS MINIÈRES

2.1. Qu'est-ce qu'une estimation minière ?

Dans une région où l'on connaît la présence d'un minerai, on a procédé à un ensemble de prélèvements, soit en surface, soit par sondages profonds.

Cet échantillonnage a permis de recueillir des données chiffrées en quelques points du gisement:

- présence ou absence de minerai;
- profondeur;
- épaisseur;
- analyses chimiques dans de petits volumes;
- propriétés physiques, etc.

Le problème, dans l'estimation minière, est de reconstituer le mieux possible, à partir de ces quelques données chiffrées ponctuelles, la réalité d'une partie ou de la totalité du gisement:

- forme et étendue de la lentille;
- quantité de minerai;
- qualités moyennes, etc.

Cette synthèse s'obtient en s'appuyant de manière judicieuse sur chacun des résultats expérimentaux.

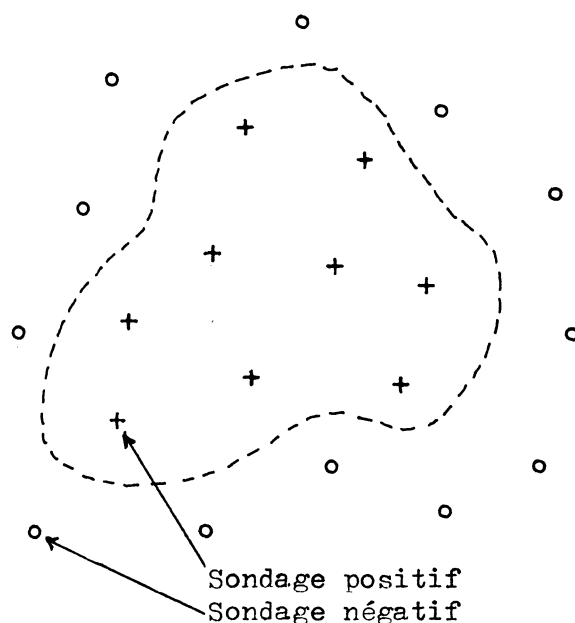


Fig. 1

Exemple : l'épaisseur moyenne de minerai dans une lentille peut être calculée comme une valeur moyenne des différentes épaisseurs mesurées. Une pondération des épaisseurs par les surfaces d'influence des sondages pourrait être appliquée si la répartition de ceux-ci n'avait pas été régulière.

Second exemple : Pour estimer une épaisseur en un point non sondé, on peut utiliser une méthode d'interpolation adéquate, donnant par exemple une importance plus grande au sondage le plus proche.

2.2. Inconvénient de ces méthodes déterministes

Le calcul permet dans tous les cas d'obtenir un résultat numérique au problème d'estimation. Malheureusement, ce résultat chiffré ne représente jamais la réalité exacte, mais n'en est qu'une estimation plus ou moins approchée. Les deux idées suivantes mettent en évidence cette erreur d'estimation:

— deux personnes sont chargées d'estimer indépendamment le même gisement à partir des mêmes données: elles aboutiront fatalement à deux résultats différents, car leur subjectivité interviendra;

— deux campagnes de sondages effectuées indépendamment sur le même gisement fournissent ordinairement des séries de valeurs chiffrées différentes: les estimations qui en résultent ne seront pas identiques. Les irrégularités du dépôt de minerai auront perturbé l'approche de la réalité.

2.3. Comment formuler le problème de l'estimation ?

La connaissance exacte d'un gisement paraît donc impossible à partir des résultats fournis par une campagne de prélèvements. Toute estimation ne sera qu'approchée.

Le problème de l'estimation minière peut s'énoncer en ces termes: « à partir des données disponibles, calculer l'estimation la plus proche de la réalité, ainsi que l'ordre de grandeur de l'erreur qui a pu être commise ».

2.4. Tentative d'utilisation de la statistique

Le hasard semble avoir une grande importance dans la collecte des renseignements expérimentaux. On a donc songé très tôt à utiliser les théories statistiques pour résoudre les problèmes de l'estimation.

On a considéré que les résultats des sondages comme les éléments d'une population statistique que l'on a cherché à raccorder à un modèle (loi normale, loi lognormale...). La valeur moyenne de cette loi représentait l'estimation souhaitée et l'erreur d'estimation était calculée à partir de la variance de la loi et du nombre de sondages.

Cette manière simple de traiter le problème ne prend malheureusement pas en compte la position relative des sondages. Considérons en effet les deux séries de nombres suivants (épaisseurs de minerai par exemple):

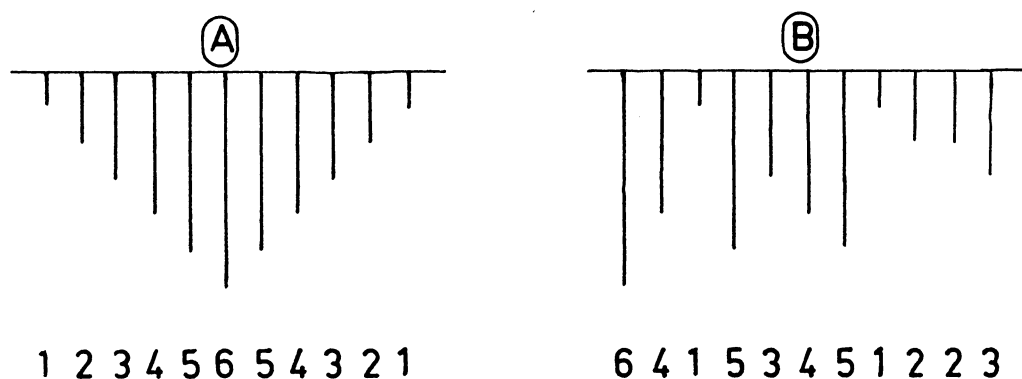


Fig. 2

Les structures de ces deux gisements sont extrêmement différentes et pourtant les deux séries de nombres contiennent les mêmes chiffres. La statistique classique les considérera de la même manière, puisqu'ils ont même moyenne et même variance. En fait une opération d'estimation dans le gisement A à structure régulière doit être plus simple et plus précise que dans le gisement B, où les variations de puissance d'un sondage à l'autre sont très importantes.

Pour bien résoudre le problème d'estimation minière, il faudrait pouvoir faire intervenir dans la statistique la position de chaque prélèvement et mettre ainsi en relief la structure du gisement: c'est justement ce que fait la géostatistique.

3. LA GÉOSTATISTIQUE

Cette théorie a été formulée par M. G. Matheron, Centre de Morphologie Mathématique de l'Ecole des Mines de Paris, 35, rue St Honoré, 77300-Fontainebleau.

Des développements mathématiques et probabilistes très élaborés en forment des bases, que nous ne tenterons absolument pas d'aborder dans cet exposé.

3.1. Les principes de base de la géostatistique

La géostatistique étudie des variables dont la valeur est liée à leur position et dites *variables régionalisées*. Tout gisement peut se découper en zones homogènes, en regard à la variable étudiée.

Pour chaque zone les *variations* de la variable se composent :

— d'une *partie régulière* que l'on peut décrire par une formule mathématique. Elle reçoit le nom de *dérive* ou d'espérance mathématique de la variable.

— d'une *partie irrégulière, aléatoire*, autour de cette dérive, appelée *résidu*.

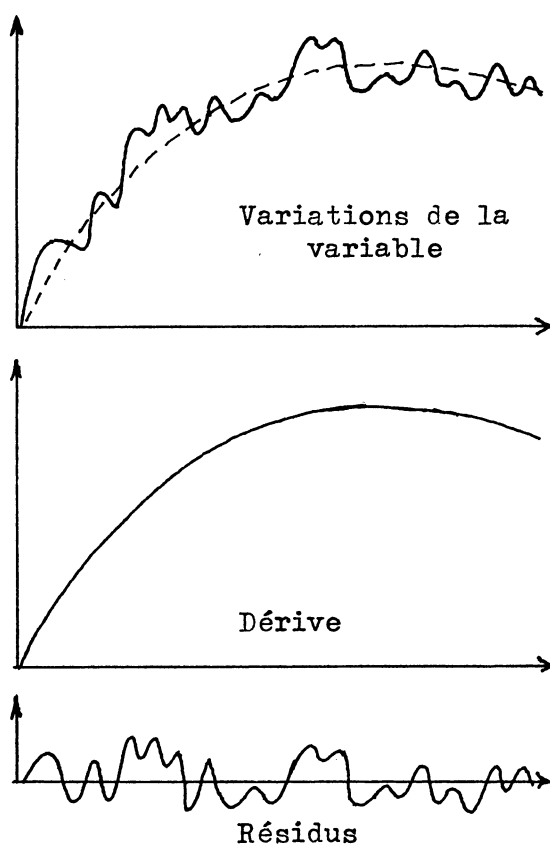


Fig. 3

Ces résidus possèdent cependant une structure: ils sont en moyenne plus forts, entre deux points éloignés qu'entre deux points proches.

La variance statistique de ces irrégularités aléatoires n'est pas constante: c'est une fonction de la distance h entre les points étudiés.

Cette fonction qui caractérise la structure des résidus est appelée *variogramme* en géostatistique.

3.2. Exemple de variogramme obtenu en bauxite

Les études déjà réalisées depuis 5 ans sur nos gisements de bauxite ont mis en évidence un type de variogramme courant appelé *variogramme sphérique* et schématisé ci-dessous. Le variogramme qui est nul pour des points confondus ($h = 0$) prend très vite une valeur C_0 (effet de pépité) pour h de l'ordre de quelques mètres. Ensuite la croissance est régulière, puis s'applatit pour atteindre un palier de valeur $C + C_0$ quand $h = a$ (a appelé la portée du variogramme et peut varier selon les cas de 50 à 300 mètres).

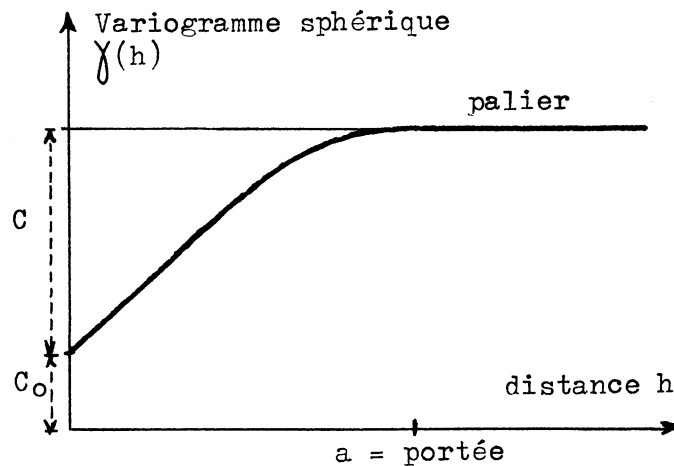


Fig. 4

Le variogramme est différent dans les diverses directions d'étude (par exemple les irrégularités dans les directions N.S. et E.O. peuvent être de nature différente: de même qu'également entre une ligne de pente et une ligne de niveau...).

Chaque variable étudiée (puissance, teneurs...) est caractérisée par un variogramme différent.

Le calcul des dérivées et des variogrammes se fait généralement par ordinateur en utilisant les résultats et la position des sondages.

3.3. Utilisation du variogramme et de la dérive

Une fois que l'on a déterminé la dérive et le variogramme pour chaque variable étudiée, on peut commencer à réaliser des estimations.

La dérive, ou espérance mathématique de la variable, définie par une fonction mathématique sur tout le gisement, va fournir *la partie principale de l'estimation* désirée.

Les écarts, ou résidus, différences entre la valeur théorique (dérivée) et la valeur expérimentale en chacun des sondages, vont apporter une *correction* à cette partie principale.

Cette correction sera calculée par une pondération judicieuse de tous ces résidus, déterminée par la position des sondages entre eux et par rapport à la zone à estimer, ainsi que par la fonction variogramme.

En complément de cette estimation, le calcul fournira *la variance* statistique de l'erreur d'estimation, différence entre la valeur estimée et la valeur réelle inconnue. La recherche d'une variance d'estimation minimum compte tenu des données utilisées fournit la pondération judicieuse à apporter aux résultats de chacun des sondages.

Retenons donc que la géostatistique est en mesure de tirer parti de l'ensemble des données expérimentales disponibles pour fournir toute estimation souhaitée: l'erreur d'estimation sera connue en variance et sera la plus faible possible.

3.4. Exemple pratique simplifié d'estimation géostatistique

Un gisement de bauxite a été sondé à la maille régulière de 200 m.

10 sondages ont été positifs, 19 négatifs.

Les puissances mesurées sont indiquées ci-après :

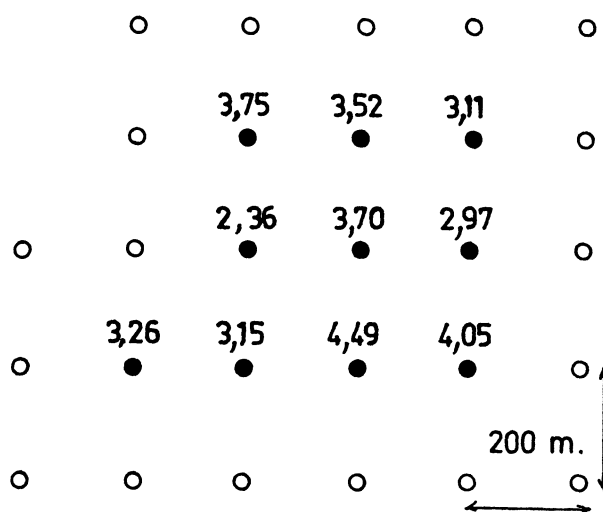


Fig. 5

Problème : estimer la surface minéralisée, la puissance moyenne et le tonnage.

L'étude des résultats expérimentaux montre que la dérive peut être prise constante et égale à 3,44 m, et que le variogramme des puissances a la forme ci-dessous.

On a grossièrement un effet de pépité de 0,15 m², un palier de 0,35 m² et une portée voisine de 400 m.

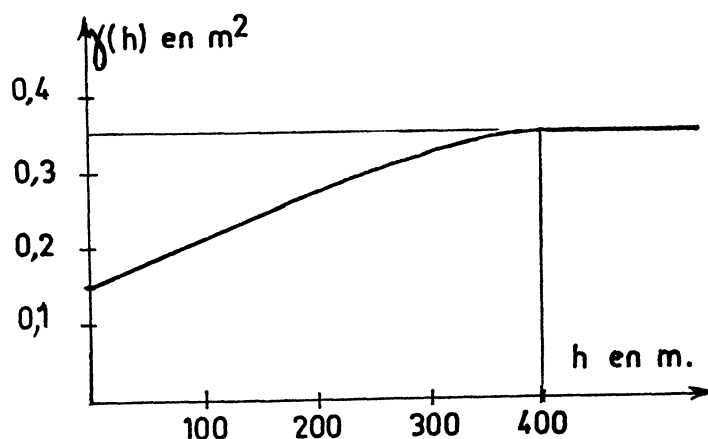


Fig. 6

La surface minéralisée probable est égale à $10 \times 200 \times 200 = 400000 \text{ m}^2$.

Un calcul d'erreur géostatistique indique une variance d'estimation de surface de $0,25 \cdot 10^{10} \text{ m}^4$ soit un écart type de 50000 m^2 .

La puissance moyenne est estimée à 3,44 m avec une variance d'estimation de $0,03 \text{ m}^2$ soit un écart type de 0,17 m.

Le tonnage en place, avec une densité de 2,6 (supposée connue exactement) est estimé à $400000 \text{ m}^2 \times 3,44 \text{ m} \times 2,6 \text{ t/m}^3 \approx 3,6 \text{ Mt}$.

La variance d'estimation du tonnage vaut $7,6 \cdot 10^{10} \text{ t}^2$, ce qui donne un écart type de 0,5 Mt.

3.5. Estimation globale du gisement

Surface	$S = 400000 \text{ m}^2$	$\sigma S = 50000 \text{ m}^2$
Puissance	$p = 3,44 \text{ m}$	$\sigma p = 0,17 \text{ m}$
Tonnage	$T = 3,6 \text{ Mt}$	$\sigma T = 0,5 \text{ Mt}$

On notera que l'erreur d'estimation du tonnage tient compte :

- des irrégularités du gisement (variogramme des puissances);
- de la forme du gisement (erreur d'estimation de la surface);
- de la régularité d'implantation des sondages et de leur nombre.

Il est intéressant de constater également que la connaissance de T et σT permet de situer des réserves de minerai dans l'une des classes A, B, C_1 ou C_2 de la classification bien connue des mineurs. En effet, la classe B, par exemple, est telle que les réserves réelles doivent se trouver avec une probabilité d'au moins 80% dans une fourchette de $\pm 20\%$ autour de la valeur calculée.

Grâce à la statistique, on en déduit que pour être en classe B, un gisement doit avoir un rapport $\sigma T/T$ compris entre deux valeurs limites (0,063 et 0,156).

Le calcul géostatistique nous fournit donc un moyen objectif de classer les réserves en fonction de leur niveau de reconnaissance.

3.6. Applications courantes de la géostatistique en estimations minières

A) Estimations globales

C'est l'exemple que nous venons de traiter dans lequel nous avons cherché à connaître les caractéristiques globales du gisement.

A partir de là, des études économiques permettent de déterminer si le niveau de reconnaissance est suffisant et si l'on ne prend pas des risques trop importants en décidant dès à présent la mise en exploitation du gisement.

B) Stratégie de reconnaissance

Dès que l'on connaît grossièrement les paramètres géostatistiques d'un gisement, on peut chercher à définir la meilleure poursuite de la reconnaissance à mettre en place.

Les différents schémas, à coût égal, seront comparés en fonction de la précision qu'ils pourront fournir dans leurs résultats.

C) Cartographie d'un gisement

Dans certains cas, on souhaite dresser une carte de ce que peut être le gisement, à partir des données connues à ce moment.

La méthode géostatistique est parfaitement adaptée à ce travail; mais comme cela est prévisible, elle fournira aux points cartographiés des valeurs probables, assorties des variances d'estimations correspondantes.

D) Prévision des qualités à la production

Dans notre gisement des Baux-de-Provence, nouvellement mis en exploitation, nous avons pu prévoir les variations dans la qualité moyenne de la bauxite qui serait livrée à l'usine d'alumine. Il importait de connaître l'ordre de grandeur et la fréquence des variations de teneurs sur une production d'un mois, d'une semaine ou d'une journée.

4. CONCLUSION

Cet aperçu rapide sur la géostatistique et ses applications n'a eu pour seul but que de donner une idée générale de la méthode qui est utilisée depuis cinq ans à la Société Aluminium Pechiney.

Les quelques exemples indiqués plus haut sont loin d'avoir fait un inventaire global de ses possibilités.

Retenons cependant que la géostatique ne fait que tirer le meilleur parti des données expérimentales disponibles. La qualité d'une estimation sera évidemment fonction de la rigueur qui aura pu présider à la campagne de reconnaissance.

Si l'on se souvient que la géostatique est une méthode scientifique qui n'a aucun don de divination, on saura en tirer des enseignements extrêmement profitables et qui se vérifieront parfaitement par la suite.

*Société Aluminium Pechiney, Division Bauxite
B.P. 06, 13290 Les Milles (France)*