L’apport des Simulations Géostatistiques à l'estimation et la classification des ressources minières

Jacques Deraisme

2 Février 2012

Geovariances

Where no one has gone before

Sommaire

- Rappels de la géostatistique et de ses méthodes
- Définition des simulations géostatistiques
- Applications des simulations à l'estimation des ressources minières
- Conclusions

Modélisations géostatistiques

- La géostatistique repose sur le concept de variable régionalisée, réalisation d'une fonction aléatoire qui se déploie dans l'espace.
- Moyennant certaines hypothèses, en particulier de stationnarité, on peut aboutir à des modélisations pertinentes de la réalité.

Modélisations géostatistiques

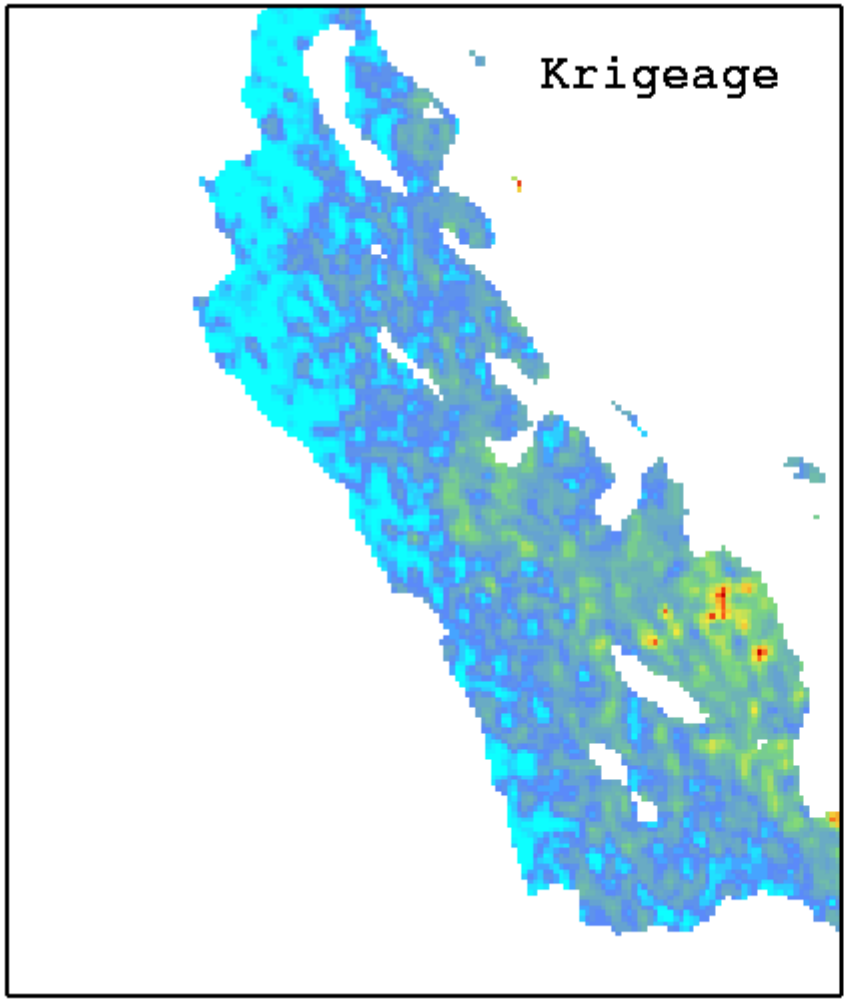
- Mais il y a plusieurs façons de générer le modèle:
  - Par des méthodes d'interpolation: on cherche une estimation (une valeur probable) de la variable en tout point connaissant les données expérimentales qui minimise l'erreur = Krigeage
  - Par des méthodes de simulations : on cherche à reproduire la variabilité réelle du phénomène étudié en générant d'autres réalisations de la même fonction aléatoire. = Simulations Conditionnelles

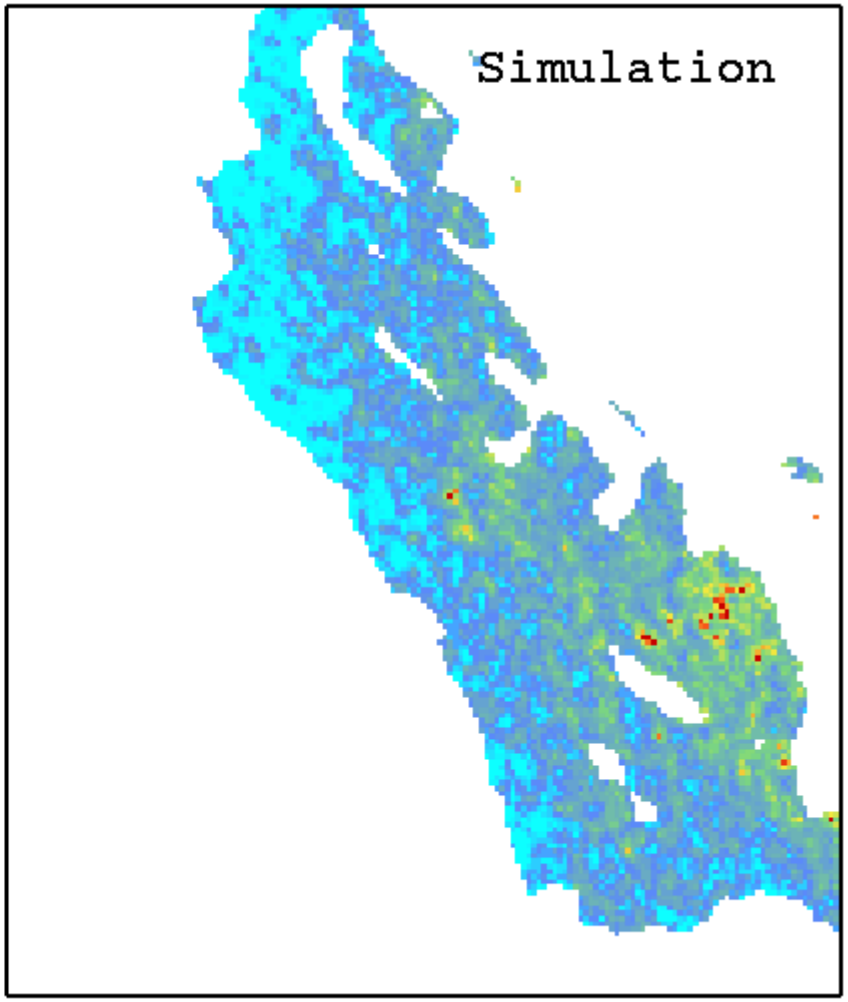
Geovariances
Where no one has gone before

Modélisations géostatistiques

- Les simulations sont nécessaires dès que l'on a pour objectif d'obtenir un modèle de gisement qui a les mêmes caractéristiques de variabilité que le phénomène réel.
- Le krigeage ne remplit pas cet objectif car il lisse la variabilité.

Modélisations géostatistiques

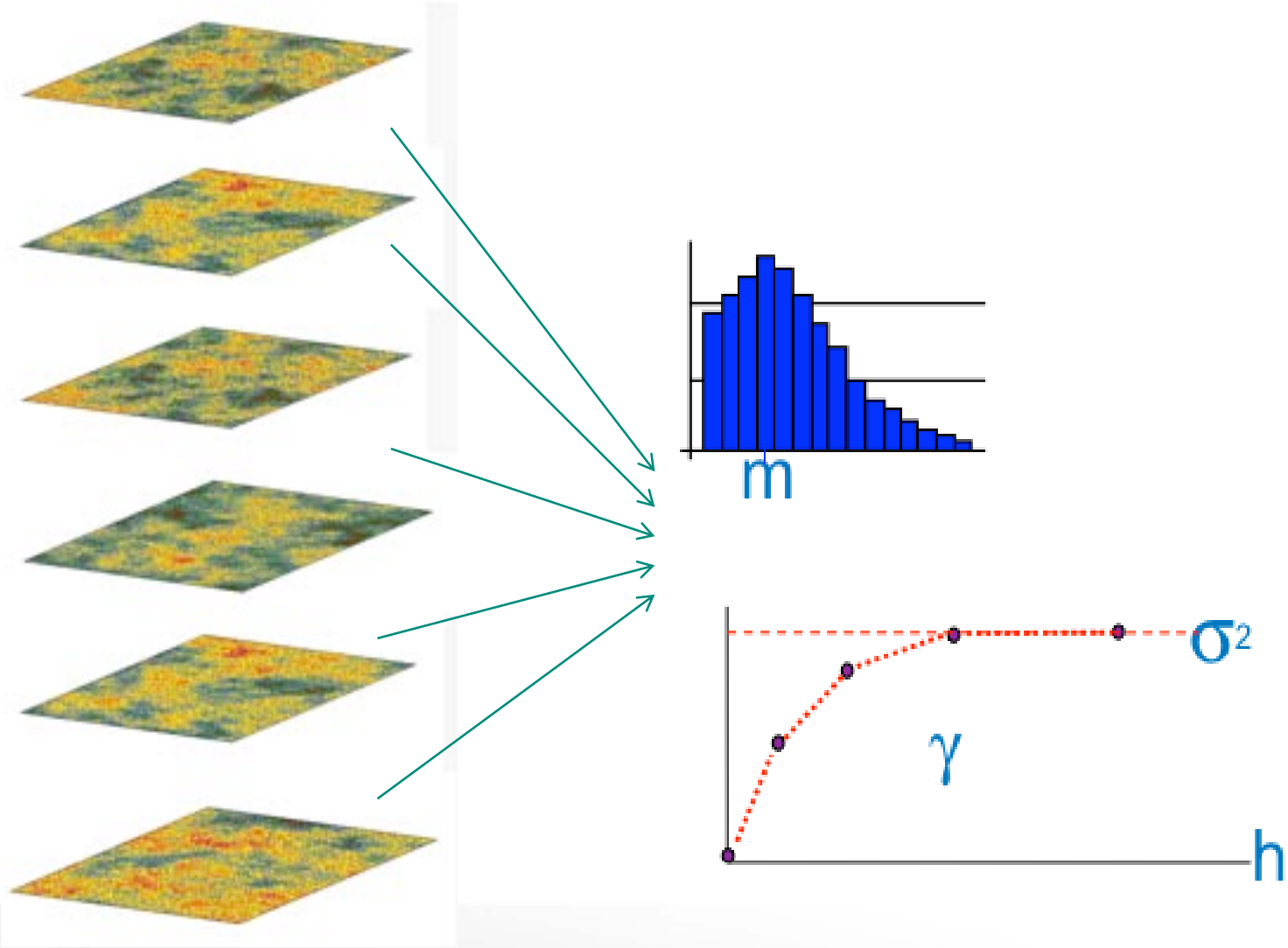




Geovariances
Where no one has gone before

Simulations géostatistiques

Modèle de Fonction Aléatoire



Geovariances
Where no one has gone before

Simulations

- La géostatistique non linéaire a développé des méthodes appropriées à l'estimation des ressources récupérables.
- Mais à la différence des simulations, ces méthodes non linéaires ne permettent pas:
  - d'estimer les tonnages et teneurs récupérées lorsque le critère est un peu compliqué, e.g.:
    - coupure sur une combinaison de plusieurs éléments d'un gisement polymétallique;
    - contraintes d'exploitation (accessibilité des infrastructures …).
  - de quantifier la confiance dans les estimateurs.

Geovariances
Where no one has gone before

Simulations

- Trois exemples d'application des simulations géostatistiques:
  - Estimation du tonnage et de la teneur Ni récupérée dans les gisements de Nickel de N^{elle} Calédonie.
  - Optimisation de la maille de sondages d'un gisement de cuivre ("porphyry copper").
  - Evaluation du risque pour la classification de ressources.

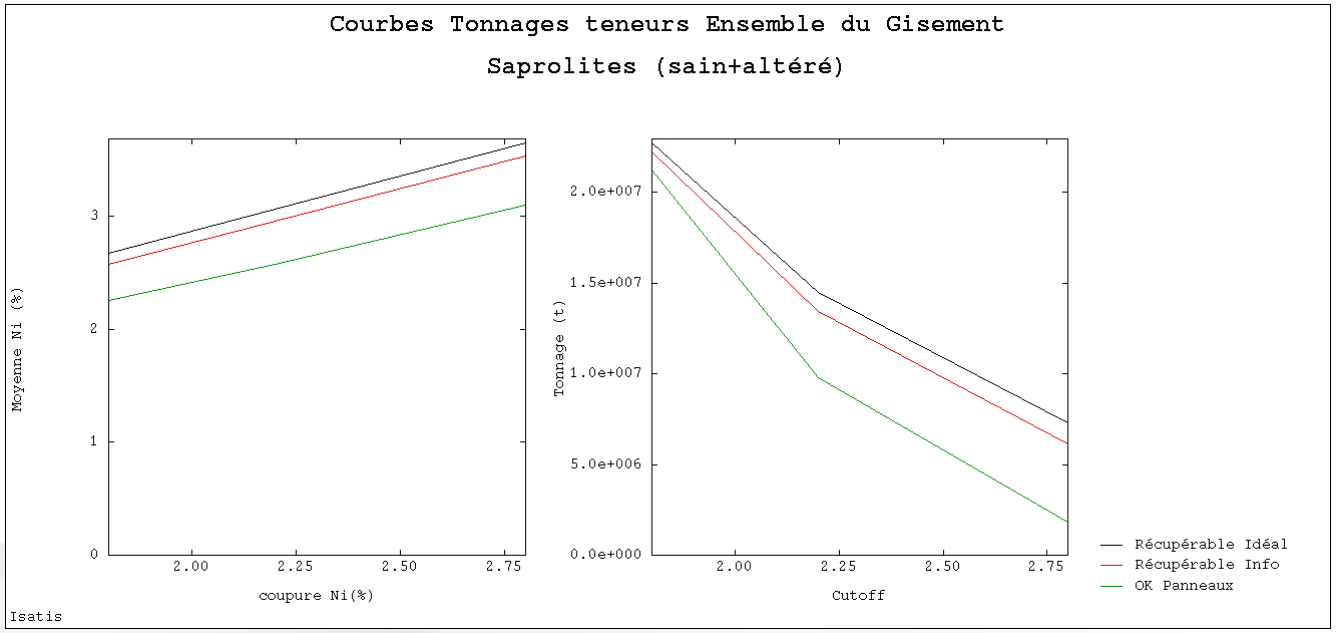
Estimation de récupérable (Nickel de N^elle Calédonie)

- Les gisements de Nickel sont constitués par l'altération de la roche mère (péridotites).
- Les teneurs des parties altérées de la roche ne sont pas additives.
- Pour prendre en compte l'effet de support*, il faut donc estimer les tonnages et quantités de métal pour en déduire la teneur.

* L'effet de support traduit l'influence de la taille du volume sur la distribution des teneurs: la distribution des teneurs de blocs a la même moyenne que celle des teneurs d'échantillons, par contre la variance est nécessairement plus faible.

Estimation de récupérable (Nickel de N^elle Calédonie)

- Problème d'additivité: la teneur Ni utilisée pour sélectionner les blocs = quantité de métal (Ni*Tsm3) divisée par le tonnage (Tsm3, tonnes sèches par m^3).
- Recours à un jeu de co-simulations sur petits blocs (5x5x3 m^3) fixant le degré de sélectivité.



Geovariances
Where no one has gone before

Optimisation de maille (Cuivre, Chili)

- La mineralisation est concentrée dans un système de veines sub-verticales situées sous une zone lixiviée.
- La modélisation du gisement est effectuée en trois étapes:
  - Modélisation de la surface à la base de la zone lixiviée,
  - Modélisation des veines
  - Modélisation des teneurs Cu et As dans les veines minéralisées.

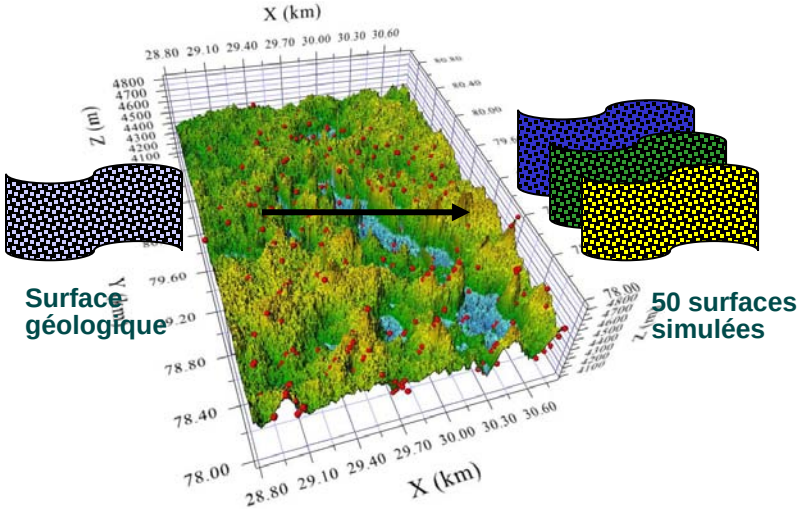
Geovariances
Where no one has gone before

Optimisation de maille (Cuivre, Chili)

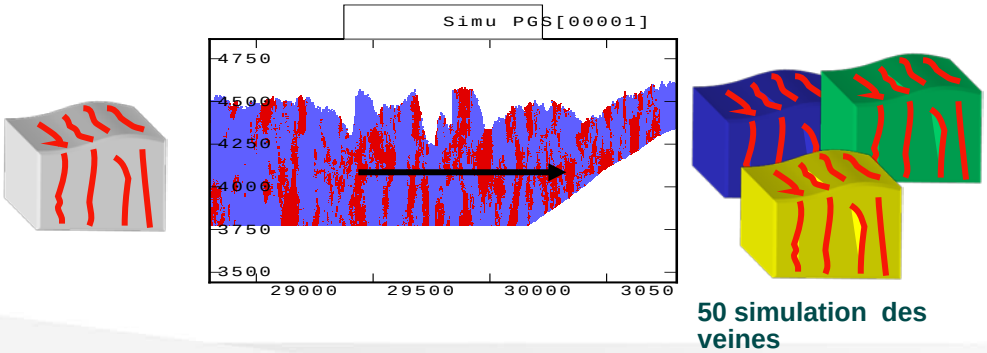
- Une méthodologie d'estimation a été mise en place afin de déterminer la maille de sondages nécessaire pour estimer les ressources avec un degré de confiance suffisant.
- L'idée consiste à réaliser des simulations de la géologie et des teneurs Cu-As pour en déduire des intervalles de confiance.

Optimisation de maille (Cuivre, Chili)

i. Simulation de la base de la zone lixiviée



ii. Simulation des veines minéralisées



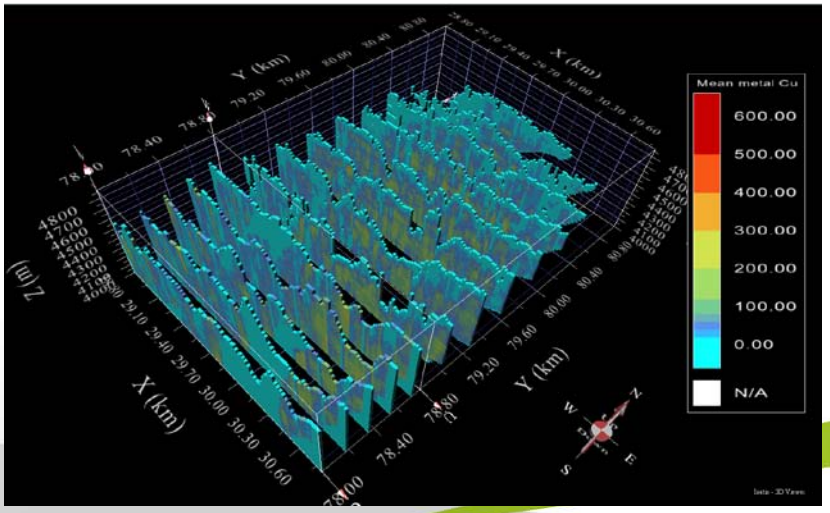
iii. Simulation des teneurs

25 Tonnage et Quantité de Metal simulés
(25 Z_i i.e. 25 réalités « possible »)
regroupés dans des blocs 20*20*15

RESULTATS

Moyenne(Z) de 25 Tonnage et Quantité de Métal simulés fournit un estimateur Z*

Z_i – Z* = 25 Erreurs
- **moyenne et variance d'erreurs**
- **Intervalles de confiance**
- **Probabilité d'être au-dessus d'une coupure**



Geovariances
Where no one has gone before

Optimisation de maille (Cuivre, Chili)

- Dans une seconde étape, les modèles simulés sont échantillonnés par des sondages fictifs.
- Ces nouveaux sondages sont alors utilisés pour conditionner un nouveau jeu de simulations. On compare alors la simulation initiale (“réalité”) à la moyenne des nouvelles simulations.
- On peut alors quantifier la réduction de l’incertitude provenant des nouveaux sondages.

Optimisation de maille (Cuivre, Chili)

- Les statistiques sur des regroupements de blocs (une semaine de production) permettent d'évaluer le gain de précision apporté par des sondages supplémentaires (2/3 de plus que les sondages actuels).

		Actual Drillholes	Fictitious Drillholes	Gain on stdev
	Count	Mean	Mean	
Stdev error Tonnage	2192	95.9	70.93	26.0%
Stdev error Metal Cu	2192	1710.4	1406.8	17.8%
Stdev error Metal As	2192	49374.8	44217.7	10.4%

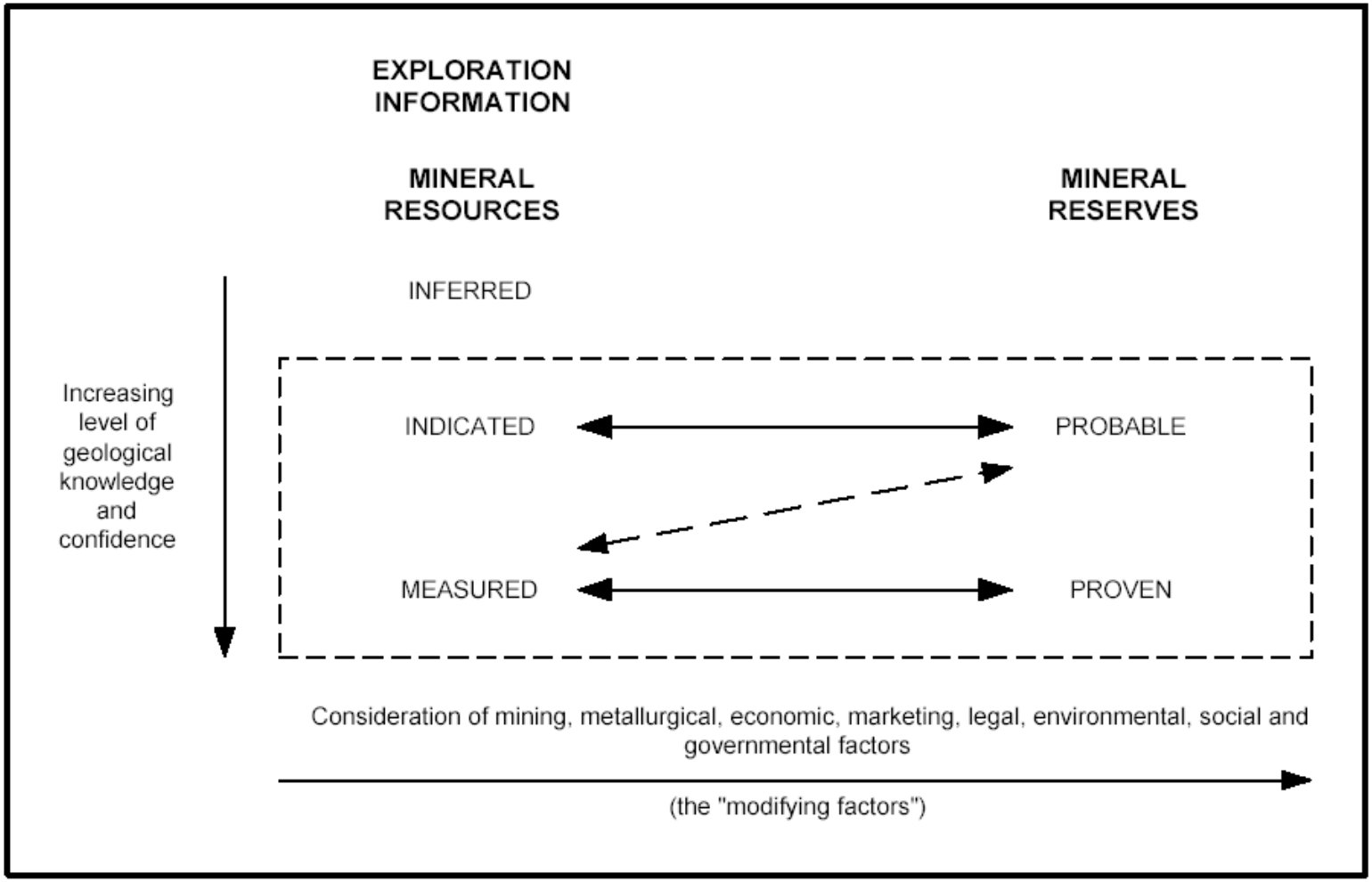
Geovariances
Where no one has gone before

Classification de ressources

- Les compagnies minières doivent faire une catégorisation des ressources et réserves.
- Les codes miniers (CIMM, JORC, SAMREC, PERC …) ne sont pas prescriptifs.
- La pratique montre deux tendances:
  - Utiliser des critères géomètriques (distance des sondages aux blocs) ou déduits d'un krigeage de blocs (variance de krigeage, pente de la régression valeur vraie|valeur estimée, …).
  - Calculer un critère faisant appel à la notion de risque.

Geovariances
Where no one has gone before

Ressources et Réserves Minières



Geovariances
Where no one has gone before

Codes for Reporting Reserves

- L’objectif des codes miniers est de proposer des définitions et des guides pour établir les rapports sur les ressources et réserves des gisements miniers.
- La classification en différentes catégories implique que l’on a établi des niveaux de confiance dans les estimations compte-tenu de l’information disponible et des interprétations.

Geovariances
Where no one has gone before

Ressources Minières

- La Géostatistique developpe des modèles dans un cadre probabiliste;
- Ce cadre est approprié pour appréhender la notion de risque;
- Des méthodes caractérisant la confiance dans les estimateurs peuvent être mises en oeuvre.

Geovariances
Where no one has gone before

Ressources Minières

- Des critères simples déduits du krigeage ne permettent pas de caractériser des intervalles de confiance(CI)
- Une approche “usuelle” déduit les intervalles de confiance en supposant que les erreurs ont une distribution gaussienne;
- Dans ce cas CI au risque de 5% est $Z^*+/-2\sigma_k$;
- L’hypothèse de distribution gaussienne des erreurs est vraisemblablement forte et ne peut être vérifiée.

Geovariances
Where no one has gone before

Ressources Minières

- La question principale est donc:

"Comment calculer les tonnages mesurés/indiqués/inférés?"

- Comptabiliser les blocs qui ont un degré de confiance suffisant n'est pas satisfaisant, (bloc élémentaire trop petit pour que la notion de ressource ait un sens);
- Ainsi si chacun des blocs a une faible confiance:
  - cela ne signifie pas que les ressources du gisement sont nulles.
  - ou qu'il faille un nombre prohibitif de sondages pour avoir une part significative de ressources mesurées.

Geovariances
Where no one has gone before

Classification des Ressources

- Le calcul des tonnages des différentes catégories est réalisable si l'on a spécifié:
  - le critère explicitement utilisé?
  - le support où le critère s'applique?

Geovariances
Where no one has gone before

Resource Classification

- Une proposition a été faite il y a une dizaine d'années par Dr Harry Parker (AMEC), qui a le mérite de spécifier clairement ces 2 points.

Mesuré = +/- 15% avec une probabilité de 90% sur les estimations d'une production trimestrielle

Indiqué = +/-15% avec une probabilité de 90% sur les estimations d'une production annuelle.

Geovariances
Where no one has gone before

Resource Classification

- En effectuant un nombre suffisant de simulations on a accès à de véritables intervalles de confiance;
- En regroupant des simulations de petits volumes pour générer des volumes plus importants on a un moyen pratique de calculer numériquement les tonnages des différentes catégories.

Resource Classification

- Cette approche est retenue par de plus en plus de compagnies;
- Elles engagent des décisions valables au niveau de l'entreprise en ligne avec les risques communément acceptés;
- Le critère de +/-15% peut être discuté, mais:
  - Il résulte d'une décision de la compagnie ;
  - Il est clairement décrit;
  - La plupart des opérations peuvent faire face à des variations de l'ordre de 15% et ajuster les plans en conséquence.

Geovariances
Where no one has gone before

Conclusions

- Les simulations géostatistiques permettent de répondre à beaucoup de questions pratiques.
- Les points clés sont:
  - Le cadre probabiliste est favorable à la conduite d'analyse de risque;
  - L'effet de support est pris en compte;
  - Les calculs peuvent être faits pour des critères très différents, d'une complexité plus ou moins grande.
- La puissance de calcul des ordinateurs actuels rend accessible la réalisation d'un nombre suffisant de simulations.

Geovariances
Where no one has gone before

Merci de votre attention!

Geovariances
Where no one has gone before