



Serge Séguret  
Xavier Emery

# Géostatistique de gisements de cuivre chiliens

35 années de recherche appliquée

Serge Antoine Séguret & Xavier Emery, *Géostatistique de gisements de cuivre chiliens, 35 années de recherche appliquée*, Paris : Presses des Mines, collection Sciences de la Terre et de l'environnement, 2019.

© Presses des MINES - TRANSVALOR, 2019  
60, boulevard Saint-Michel - 75272 Paris Cedex 06 - France  
presses@mines-paristech.fr  
www.pressesdesmines.com

Photo de couverture : Aldo Casali  
ISBN : 978-2-35671-562-3  
Dépôt légal : 2019  
Achevé d'imprimer en 2019 (Paris)

Cette publication a bénéficié du soutien de l'Institut Carnot M.I.N.E.S.  
Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et d'exécution réservés pour tous les pays.

# Géostatistique de gisements de cuivre chiliens

*35 années de recherche appliquée*

## Collection Sciences de la Terre et de l'environnement

### Dans la même collection

- Comité Français de Géologie de l'Ingénieur et de l'Environnement, *Géologie de l'ingénieur : actualité et perspectives*
- F. Pellet, *Mécanique des Roches : défis et enjeux. Actes de la conférence du jubilé du Comité Français de Mécanique des Roches*
- M. Gasc-Barbier, V. Merrien-Soukatchoff et P. Bérest, *Manuel de Mécanique des Roches Tome V - Thermomécanique des Roches*
- N. Jeannée et T. Romary, *Geostatistics for Environmental Applications. GeoEnv2014 - Book of Abstracts*
- Comité français de mécanique des roches, coordonné par P. Duffaut, *Manuel de mécanique des roches. Tome 4.*
- Comité français de mécanique des roches, coordonné par P. Duffaut, *Manuel de mécanique des roches. Tome 3.*
- Coordination I. Cojan, G. Friès, D. Grosheny, O. Parize, *Expression de l'innovation en géosciences - une journée avec Bernard Beaudoin*
- Roger Cojean, Martine Audiguier, *Géologie de l'ingénieur - Engineering geology*
- Michel Demange, *Les textures des roches cristallines*
- Collectif, *7<sup>TH</sup> Conference on the mechanical behavior of Salt*
- Coordination: José Ragot, Mireille Batton-Hubert, Florent Breuil, *Les STIC pour l'environnement*
- Michel Chalhoub, *Massifs rocheux, Homogénéisation et classification numériques*
- Michel Demange, *Les minéraux des roches, Caractères optiques Composition chimique Gisement*
- Bruno Peuportier, *Eco-conception des bâtiments et des quartiers*
- Philippe Jamet, *La quatrième feuille, Trois études naturelles sur le développement durable*
- Gabriele Rossetti, Alessandro Montanari, *Dances with the Earth, The creation of music based on the geology of the Earth*
- Sous la coordination de Franck Guarnieri et Emmanuel Garbolino, *Systèmes d'information et risques naturels*
- Comité français de mécanique des roches, Coordonné par P. Duffaut, *Manuel de mécanique des roches, Tome 2: les applications*
- Bruno Peuportier, *Eco-conception des bâtiments, Bâtir en préservant l'environnement*
- Madeleine Akrich, Philippe Jamet, Cécile Méadel, Vololona Rabeharisoa, Frédérique Vincent, *La griffe de l'ours, Débats & controverses en environnement*
- Lucien Wald, *Data fusion, Definitions and Architectures - Fusion of Images of different spatial resolutions*
- Javier Garcia, Joëlle Colosio, *Air quality indices, Elaboration, Uses and International Comparisons*
- Javier Garcia, Joëlle Colosio, *Les indices de la qualité de l'air, Elaboration, usages et comparaisons internationales*
- Richard Maillot, *Mémento technique des granulats*
- Coordinateurs: K. Scharmer, J. Greif, *The European Solar Radiation Atlas, Vol. 2: Database and Exploitation Software*
- Coordination: K. Scharmer, J. Greif, *The European Solar Radiation Atlas, Vol. 1: Fundamentals and maps*
- Comité français de mécanique des roches, Coordonné par F. Homand et P. Duffaut, *Manuel de mécanique des roches, Tome 1: fondements*
- Jacques Fine, *Le soutènement des galeries minières*

**Serge Antoine Séguret & Xavier Emery**

# Géostatistique de gisements de cuivre chiliens

*35 années de recherche appliquée*



*À Pedro Carrasco,  
l'ami parti si vite.*

*À Romane Séguret et Samuel Emery,  
nos chers enfants.*



## Un peu d'histoire

Trente-cinq années cumulées de recherche appliquée pour deux chercheurs : Xavier Emery, ingénieur civil de l'École des Mines de Paris, actuellement professeur titulaire du Département de Génie Minier (*Departamento de Ingeniería de Minas*) et chercheur principal du Centre Avancé de Technologie Minière (*Advanced Mining Technology Center*, AMTC) à la Faculté des Sciences Physiques et Mathématiques de l'Université du Chili ; Serge Antoine Séguret, ingénieur de recherche à Mines ParisTech (ex-École des Mines de Paris) pendant plus de trente-cinq ans dans le fameux Centre de Géostatistique fondé par Georges Matheron.

Georges Matheron et la Géostatistique, deux noms indissociables. Cet ingénieur du Corps des Mines est le fondateur de la discipline qu'aujourd'hui on appelle aussi, de plus en plus, les « statistiques spatiales », ce qui inclut parfois l'axe du temps dans lequel certaines variables sont régionalisées, quand ce ne sont pas des champs spatiaux de séries temporelles, comme en pollution, qui sont étudiés. Leur histoire – la discipline, son fondateur – commence par une expérience de terrain au Bureau de Recherches Minières d'Algérie (BRMA) où Georges Matheron a travaillé au début de sa carrière.

La lecture de deux articles d'un talentueux ingénieur des mines sud-africain, Danie Krige, publiés en 1951 et 1952 sur l'évaluation des ressources minières et l'effet de support, a suscité un magistral déclic, la « Théorie des Variables Régionalisées », dont une des méthodes de prédiction les plus utilisées par des dizaines de milliers de praticiens partout dans le monde est le « krigeage », un nom forgé par Georges Matheron (Matheron, 1962a,b, 1963a,b, 1965a). Cette dénomination pour que personne, jamais, n'oublie la contribution initiatrice sud-africaine.

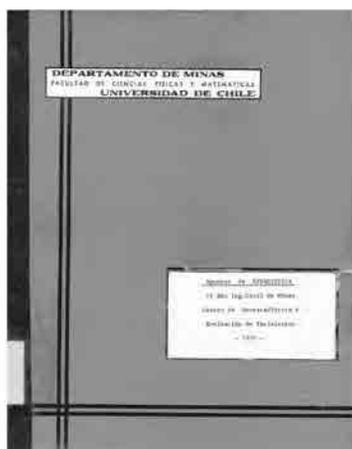
Mais l'aventure n'a vraiment démarré qu'avec l'École des Mines de Paris en 1968, à Fontainebleau, où peu à peu de jeunes chercheurs sont venus rejoindre Georges Matheron pour former une équipe d'une dizaine de passionnés qui ne savaient plus où donner du cerveau tant était grande la demande, conscients aussi de contribuer un petit peu à l'histoire des « maths' applis » au service de l'ingénieur. Cette équipe s'est alors continuellement renouvelée, les deux auteurs de cet ouvrage faisant partie des troisième et quatrième générations. Comme leurs prédécesseurs, ils auront consacré leur vie à leur passion, comme eux ils n'ont pas fait de la géostatistique un « job », ils y sont entrés comme on entre en religion.

Fruit de cette expérience considérable, ce recueil est une invitation au voyage dans plusieurs dimensions :

- le monde minier et ses pratiques ;
- le Chili, pionnier dans le développement et l'application de la géostatistique, un pays peu connu que nous n'allons cesser de sillonner sur un axe long de 2000 km allant des Andes, à l'est de la capitale Santiago, au désert d'Atacama dans le nord ;
- la dimension des méthodes géostatistiques ;

- enfin, sans doute la plus importante, la dimension d'une formidable aventure humaine franco-chilienne qui aura impliqué plus d'une centaine d'acteurs des deux pays et qui débuta dans les années 1960.

À l'époque, pour enseigner aux élèves ingénieurs civils des mines, le Département de Génie Minier de l'Université du Chili avait fait appel à Jacques Damay, un ingénieur français travaillant à Santiago pour la compagnie minière Disputada de Las Condes. Dès 1968, sous l'impulsion de Damay, l'Université du Chili et l'École des Mines de Paris furent le théâtre d'une intense collaboration autour de la « géostatistique » fraîchement créée par Georges Matheron, collaboration qui se traduisit par de nombreux séjours et visites de Chiliens en France et de Français au Chili, en particulier la venue d'Alain Maréchal, chercheur du Centre de Géostatistique de l'École des Mines de Paris et professeur à l'Université du Chili de 1970 à 1973. Elle vit également la fondation d'un *Centro de Geoestadística y Evaluación de Yacimientos* au sein de l'Université du Chili et la publication de la revue *Boletín de Geoestadística* entre 1972 et 1973 (Dagbert et Maréchal, 2008). La bibliothèque de la Faculté des Sciences Physiques et Mathématiques de l'Université du Chili conserve des documents témoignant de cette intense activité : notes de cours de statistiques et évaluations des gisements, numéro spécial dédié à la géostatistique de la revue *Minerales* (avril 1969) éditée par l'Institut des Ingénieurs des Mines du Chili, ou encore les trois tomes du mythique « *Traité de Géostatistique Appliquée* » de Georges Matheron (1962-1963) – les deux premiers publiés comme mémoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), le troisième resté sous forme de note inédite de l'École des Mines de Paris –, introuvables presque partout ailleurs.



*Notes de cours du « Centro de Geoestadística y Evaluación de Yacimientos » de l'Université du Chili (1970) et premier numéro de la revue « Boletín de Geoestadística » (1972).*

Durant la décennie 1970, le Chili fut un laboratoire pour le développement de nouveaux outils, modèles et méthodes géostatistiques. En témoignent les concepts de sélectivité, fonctions de transfert ou fonctions de récupération, le modèle gaussien

discret ou encore les techniques de géostatistique non linéaire tel le krigeage disjonctif, forgés à l'École des Mines de Paris pour répondre aux problèmes de calcul des ressources récupérables dans les gisements chiliens comme Chuquicamata ou El Teniente (Journel et Segovia, 1974 ; Maréchal, 1975, 1982). Ces outils et techniques, nous les retrouvons dans cet ouvrage pour des applications récentes.

À cette même époque, dès 1971, le Chili nationalisait les grandes exploitations de cuivre opérant sur son territoire et en 1976 créait la Corporación Nacional del Cobre de Chile (Codelco) qui allait administrer les gisements nationalisés. Le premier producteur mondial de cuivre venait de naître.

L'École des Mines de Paris, l'Université du Chili, Codelco, trois acteurs qui allaient à nouveau se rencontrer dès la fin des années 1990 et au début des années 2000, à l'initiative du géologue chilien Pedro Carrasco, à qui nous dédions cet ouvrage.

Son diplôme de géologue à peine acquis à l'Université du Chili en 1979, Pedro s'est très vite intéressé à la géostatistique et participa à la première session de ce qui allait devenir le CFSG (Cycle de Formation Spécialisée en Géostatistique) à l'École des Mines de Paris, une formation de dix mois qui perdure encore aujourd'hui et vise à rendre autonomes dans cette discipline des professionnels expérimentés du monde minier, géologues, ingénieurs des mines, métallurgistes, chimistes, géotechniciens et géomécanciens. Pedro a ensuite exercé son métier de géologue géostatisticien en Australie puis au Chili où il est devenu directeur des géosciences à Codelco.

Pedro a été l'un des artisans de la collaboration entre Codelco et l'Université du Chili, d'une part, et entre Codelco et l'École des Mines de Paris. Une première convention, entre 1997 et 2011, permit l'établissement d'une chaire d'évaluation des gisements dans le Département de Génie Minier de l'Université du Chili qui incluait le financement d'activités de recherche et de formation d'ingénieurs civils des mines et d'étudiants de troisième cycle en génie minier ou en géologie. Une deuxième convention, entre 2003 et 2016, fut établie avec l'École des Mines de Paris pour que cette dernière développe des solutions aux problèmes miniers, de l'exploration à la géomécanique en passant par les problèmes d'échantillonnage, et les implémente dans la compagnie au travers d'ateliers pratiques d'une semaine regroupant une dizaine d'ingénieurs qui apprirent à reproduire sur leurs données les solutions proposées.

Ce recueil couvre l'intégralité de ces fructueuses collaborations dont les auteurs ont été les acteurs majeurs, aux côtés de Pedro. Il sera ensuite traduit en espagnol pour permettre aux ingénieurs et géologues chiliens, et plus généralement aux mineurs et aux géoscientifiques d'Amérique Latine, de bénéficier de l'expérience acquise qui, bien que présentée à travers des applications à des gisements porphyriques de cuivre, peut indubitablement se transposer à d'autres types de gisements, métalliques et non métalliques. Une traduction en anglais conclura notre contribution au transfert d'expérience.

Notre motivation essentielle, dans ce travail de rédaction, est d'honorer la mémoire d'un ami qui en fut l'initiateur avec une énergie telle qu'elle a permis de dépasser son départ brutal en juillet 2010 et continue depuis sur sa lancée de nous motiver,

défiant les lois terribles de l'entropie humaine. Elle est également de remercier l'entreprise Codelco pour avoir financé une partie importante de ce travail dont la rédaction est basée sur des publications autorisées. Elle est enfin de transmettre le goût de la recherche appliquée. À cette fin, nous nous sommes permis d'émailler le texte d'anecdotes et d'utiliser souvent des prénoms en gage d'amitié, de reconnaissance, de remerciements par ailleurs détaillés en fin de livre.

La route a été longue pour arriver ici : 35 années cumulées de recherche appliquée ; plusieurs centaines de milliers de kilomètres à sillonner le Chili ou traverser l'Atlantique ; quasiment toutes les problématiques minières abordées ; quasiment toutes les techniques géostatistiques utilisées, évaluées et validées ; une bonne petite poignée d'innovations originales qui font leur chemin tranquillement, la centaine d'amis découverts – les auteurs sont comblés !



*Pedro Carrasco Castelli (1949-2010).*



*Localisation des mines opérées par Codelco étudiées dans ce recueil.*

## Introduction

L'organisation du recueil suit la séquence minière qui part de l'exploration visant à cerner le gisement et à en détailler la géologie. Les formations peuvent être incongrues comme le diatrème en forme de cône inversé de la mine El Teniente, ou plus généralement des domaines définis en fonction de propriétés lithologiques, minéralogiques, structurelles ou d'altération, que nous désignerons dans la suite de cet ouvrage sous le vocable générique de « faciès » communément utilisé en géosciences. En leur sein, le cuivre possède une gamme de teneurs et une variabilité spatiale qui leur sont propres, particularité conduisant directement à la prédiction ou la simulation de teneurs (variables quantitatives) qui tiennent compte des caractéristiques statistiques et spatiales propres à chaque faciès (variable catégorielle).

Retenez bien ces quatre termes, nous y reviendrons : prédiction, simulation, variable quantitative, variable catégorielle.

S'impose alors cette deuxième phase de la séquence minière où le gisement est décomposé en blocs dits de production, de plusieurs centaines de m<sup>3</sup>, dont il faut prédire, entre autres, les teneurs des éléments d'intérêt (produits, sous-produits ou contaminants). Prédire les prochains mois et années de production, c'est enchaîner dans l'espace l'extraction de ces blocs et conditionner le dimensionnement des ouvrages d'extraction et de traitement. À ce niveau, des biais de prédiction peuvent être catastrophiques, surtout si la production est systématiquement sous-évaluée.

Les « ressources récupérables », comme il est d'usage de les désigner, correspondent aux blocs pour lesquels la teneur du produit principal dépasse une teneur de coupure liée à des contraintes techniques et économiques, lesquelles ne sont d'ailleurs pas toujours prises en compte bien qu'elles soient mentionnées par les normes et directives de chaque pays pour le report public des ressources minérales. Pour améliorer ces prédictions, il ne suffit pas de calculer les teneurs moyennes, il faut également en évaluer la variabilité afin de pouvoir calculer le tonnage de minerai au-dessus de la teneur de coupure et la quantité de métal qu'il contient. Les calculs doivent aussi intégrer les volumes de minerai en jeu dans les blocs de production, qui sont infiniment plus grands que ceux des échantillons d'exploration, avec pour conséquence une importante perte de sélectivité, cette capacité de séparer ou non le minerai du stérile. Ce problème fait l'objet du troisième chapitre.

Le modèle de blocs est utilisé par l'ingénieur en planification pour valoriser les ressources, déterminer le contour ultime qu'aura l'exploitation, à ciel ouvert ou souterraine, et définir la stratégie d'exploitation débouchant sur un programme de production pour toute la durée de vie de la mine. Ce plan à long terme doit non seulement être optimal en maximisant la valeur actuelle nette, mais aussi robuste face à des écarts imprévus entre les ressources prédites par les modèles et la réalité – la fameuse incertitude géologique propre à chaque gisement. A ce stade, sont définies les réserves minières, cette fraction des ressources en place qui pourra être

exploitée en tenant compte de critères techniques et économiques connus sous le nom de « facteurs modificateurs ».

Vient la production, avec l'apparition de nouvelles teneurs issues de galeries souterraines ou, pour les exploitations à ciel ouvert, de « trous de tir », ces excavations d'une dizaine de pouces de diamètres et profondes d'une dizaine à une quinzaine de mètres, dans lesquelles l'explosif est introduit pour fragmenter la roche. Comparativement aux mesures issues des sondages d'exploration, ces teneurs représentent une quantité de matière différente et les comparer en raison de leur support volumétrique respectif est un des défis traditionnels de la géostatistique. Le support de l'information doit être pris en compte pour, par exemple, mettre à jour le modèle de blocs à l'aide des informations nouvelles issues de la production. L'information de production permet aussi d'effectuer le classement définitif des réserves en différents types de minerai (processus connu sous le nom de « contrôle des teneurs ») et la planification à court terme de l'exploitation.

Et c'est ainsi que la séquence minière esquisse les cinq premiers chapitres :

1. Géométrie & géologie ;
2. Géologie & teneurs ;
3. Teneurs & ressources récupérables ;
4. Planification à long terme & réserves ;
5. Planification à court terme.

Dès l'exploration, outre la géologie, deux autres disciplines doivent être prises en considération pour leur rôle essentiel dans la conception de la mine et ses infrastructures, et pour le dimensionnement de l'usine de concentration du minerai, des tas de lixiviation ou des piles de stockage, selon le type de minerai qui sera traité : la géotechnique et la géométallurgie.

La première discipline s'intéresse au comportement du massif rocheux et, préoccupation majeure de toute exploitation, à la sécurité des infrastructures et du personnel travaillant dans la mine. Il convient d'étudier les systèmes de discontinuités géologiques, telles les failles ou les fractures, et d'évaluer la fragilité de la roche pour dimensionner au mieux le degré de stabilité des pentes des talus de l'exploitation quand elle est à ciel ouvert, ou encore le renforcement des galeries en exploitation souterraine. La parole est alors donnée à la géotechnique (sixième chapitre) et à ses ingénieurs en charge de telles évaluations et du suivi de l'exploitation.

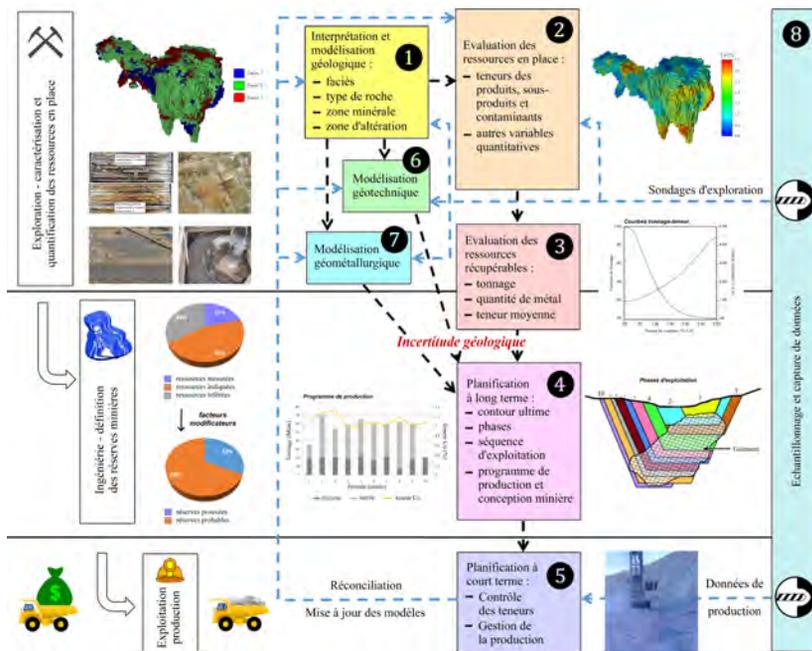
La deuxième discipline concerne le traitement du minerai extrait. Il faut évaluer la teneur et la quantité de métal qui seront effectivement récupérées après un processus complexe dont la performance dépend de nombreux paramètres comme la lithologie, la minéralogie, l'altération, la texture ou la granulométrie du minerai – des variables d'ailleurs souvent liées. Cette partie de l'activité minière connue sous le nom de géométallurgie est aujourd'hui devenue une spécialisation à part entière et fait l'objet du septième chapitre.

Enfin, comment ne pas terminer par le problème de « l'échantillonnage », le terme étant à prendre ici au sens plus large que celui donné par le Français Pierre Gy (1924-2015) dans les années 1950, lorsqu'il s'agissait de réduire la masse d'un échantillon de plusieurs dizaines à centaines de kilos à quelques grammes dont la teneur moyenne doit rester la même que celle de l'échantillon initial. Ce problème de l'échantillonnage est transversal à l'activité minière, il se pose depuis l'étape d'exploration, qui alimente les modèles géologique, géotechnique et géométrurgique, jusqu'à celle de production pour le contrôle des teneurs après échantillonnage de trous de tir ou de galeries souterraines.

Les trois chapitres suivants sont, en conséquence :

6. Géotechnique ;
7. Récupération & géométrurgie ;
8. Échantillonnage & géostatistique.

La séquence des chapitres est ci-dessous schématisée, à l'image de l'enchaînement des opérations minières. Les liaisons entre les différentes problématiques traitées sont représentées par des flèches en pointillés. En rouge, au centre de la figure, est indiqué le concept d'incertitude géologique, essentiel à la planification minière puisqu'il affecte la prise de décisions aussi bien à long terme qu'à court terme. Pour mieux accompagner le lecteur dans son voyage avec nous, ce schéma est reproduit au début de chaque chapitre avec une mise en relief de la problématique abordée.



*Schéma synthétique du plan de l'ouvrage. Les cartouches colorées des colonnes centrales et de droite représentent les problématiques abordées dans les chapitres 1 à 8.*

Pour terminer, un chapitre de conclusions et perspectives nous permettra de constater que, parmi toutes les variables régionalisées étudiées, les fonctions indicatrices auront joué un rôle essentiel ; de voir que la géostatistique multivariée et le cokrigage, son bras armé, s'ils sont séduisants sur le papier, ne représentent pas toujours une complication payante ; de constater que par delà toute méthode, une propriété élémentaire doit être respectée par la variable d'étude : l'additivité, un concept puissant à la signification allant bien au-delà de simplement vouloir donner un sens à une moyenne spatiale. Enfin, nous poserons sur le papier quelques sujets de recherche qui méritent d'être approfondis.

Sont rassemblés en annexe des concepts et considérations pratiques autour de l'analyse exploratoire de données, l'analyse structurale (variographie), le krigeage, le cokrigage et la simulation géostatistique, et une présentation de deux classes particulières de modèles : les représentations transitives et les modèles à base d'objets. Le lecteur pourrait d'ailleurs commencer sa lecture par cette annexe et, si besoin est, par des ouvrages d'introduction à la géostatistique comme Rivoirard (1995), Armstrong et Carignan (1997) ou Arnaud et Emery (2000). Mais seulement après avoir lu ce qui suit.

## 1. « Géostat », késako ?

Telle est la dénomination utilisée entre nous, bien plus simple, et qui évite la courante bévue d'utiliser le terme « géostatistique » au lieu du bon, ce qui a le don d'énerver certains membres un peu radicaux de la confrérie, surtout quand ce terme erroné apparaît dans un courrier où un candidat postule pour un doctorat en « géostatistique », discipline qu'il suit avec intérêt depuis des années, et dont le dynamisme l'encourage à..., etc.

Mais au fait, qu'est-ce que la géostat-istique ? Bien que ce recueil s'adresse majoritairement à des praticiens ou des étudiants en formation, il pourrait très bien tomber entre les mains de personnes simplement curieuses, disons des gens ayant un bon niveau scientifique (ingénieur, géologue, titulaire d'un master, technicien), mais ne connaissant pas notre discipline. C'est à eux que cette section est destinée, avant peut-être d'orienter ce visiteur vers un ouvrage introductif plus complet sur le sujet (mais pas trop rébarbatif, théoriquement parlant), *Mining Geostatistics* d'André Journel et Charles Huijbregts, publié en 1978 et largement réédité depuis, en fait la traduction anglaise d'un cours en français (Journel, 1977) écrit un an plus tôt pour des étudiants de l'École des Mines de Paris, quand les auteurs étaient encore chercheurs au Centre de Géostatistique – pardon, Géostatistique. Bien qu'ancien, cet ouvrage est très bien fait et constitue l'état de l'art à la fin des années soixante-dix. Le comparer au présent recueil peut s'avérer intéressant pour juger des avancées de la recherche appliquée au domaine minier, des directions prises, des modes aussi, et des problèmes qui sont toujours sur la table, sans solution vraiment satisfaisante.

Présenter la géostatistique à des non-spécialistes est un défi que nous avons récemment dû accomplir devant une cinquantaine d'ingénieurs en exploration minière et d'étudiants dont la plus grande majorité ne connaissait rien à la discipline

et n'était pas non spécialisée en statistique ni en probabilité. C'était à Kalgoorlie, dans l'outback australien, un décor de western. Le défi était le suivant : afin d'exposer des cas d'étude dans le court temps imparti, nous ne disposions que de cinq minutes pour présenter la géostatistique, avec au maximum un transparent, et l'interdiction formelle de dégainer les deux mots clefs de notre discipline : variogramme et krigeage, le temps manquait. Autant dire qu'il s'agissait d'engager un duel au revolver, barillet vide, avec les bras noués dans le dos. Et pourtant...

L'exercice repose sur les quatre expressions que nous vous avons ci-dessus prié de noter :

- prédire ou simuler...
- des variables régionalisées quantitatives ou catégorielles.

Prenez pour variable quantitative une teneur en métal et pour variable catégorielle un ensemble de faciès géologiques (figure ci-après, parties (a) et (b)). Cette réalité – les variations spatiales de la teneur, la forme des faciès géologiques coloriés – n'est connue qu'à travers un nombre fini d'échantillons dispersés comme ici à pas régulier, ou non, et notre connaissance se résume aux teneurs et faciès coloriés figurés en (c) et (d).

Partant de cette matière première, la géostatistique va combler les « trous » en tout point désiré, éventuellement pour caractériser des quantités de matière différentes, et ce en vue de remplir deux objectifs rarement compatibles :

- se tromper le moins souvent possible : c'est la prédiction (pour le statisticien) ou plus prosaïquement, l'évaluation, l'interpolation ;

et

- produire un résultat qui ressemble à la réalité.

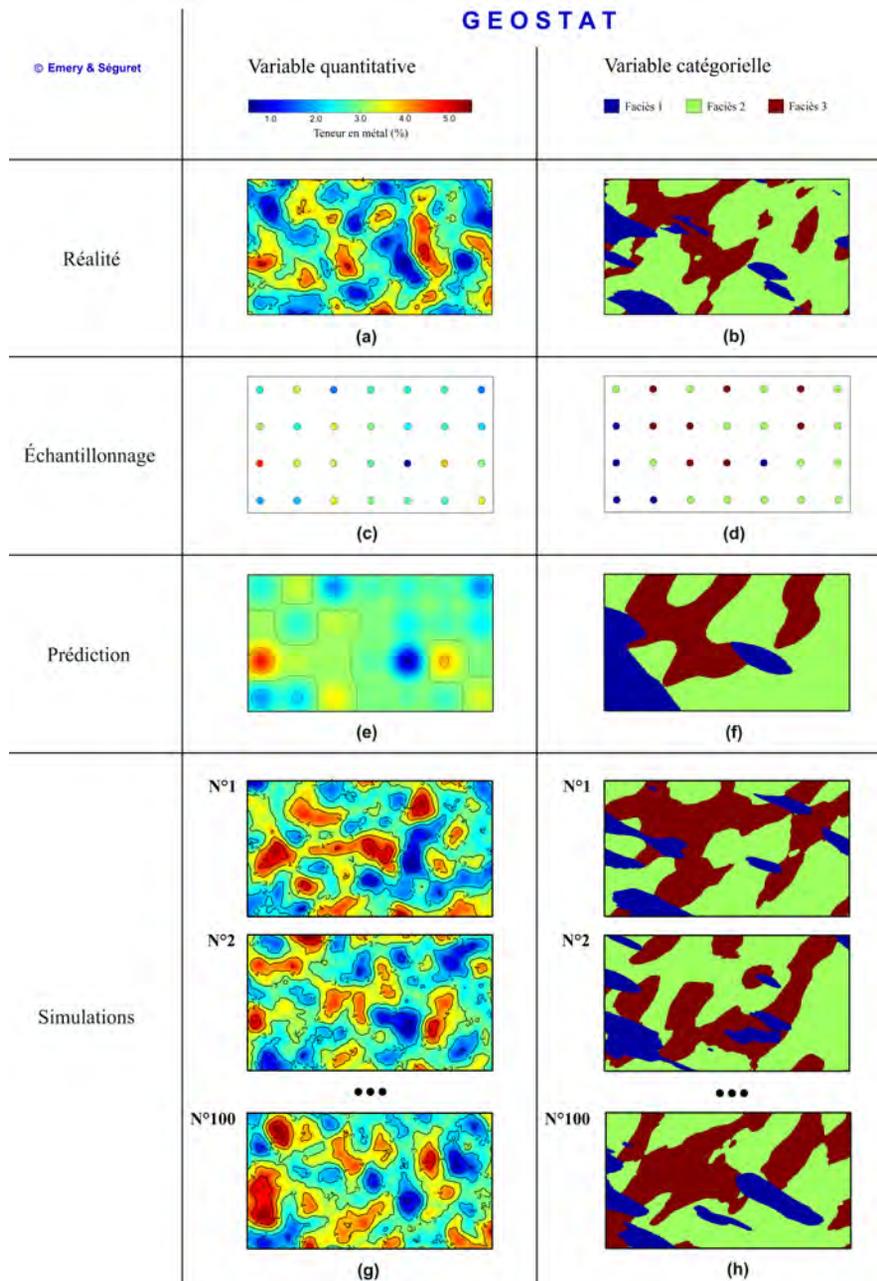
Ceci nous amène aux sous-figures (e) à (h) où sont croisés les quatre concepts clefs guidant la suite.

La prédiction d'une variable quantitative est montrée en (e). Pour se tromper le moins souvent possible, il faut accepter de renoncer au détail et suivre les grandes lignes. Le résultat est une image lisse qui ne ressemble pas à la réalité, elle n'en possède pas la « texture ». Cette image, ses valeurs, permettent de prendre certaines décisions stratégiques basées sur le long terme, à l'exception de celles qui reposent sur la variabilité spatiale, cette texture que la prédiction n'a pas reproduite.

Trois simulations de la même variable quantitative figurent en (g). Aux abords des points de mesure, le résultat est proche des valeurs ; dès qu'on s'en éloigne, un certain nombre de valeurs possibles sont produites dans une gamme donnée par les statistiques de la variable simulée. Une seule simulation est rarement analysée, c'est plusieurs dizaines, voire des centaines ou des milliers, qui le sont, et les décisions à prendre sont basées sur des statistiques issues de ces simulations, pour quantifier un risque autour bien souvent d'une prédiction.

Pour les variables catégorielles, c'est à peu près la même chose, au détail près que la prédiction (f) produit des faciès aux contours lissés, et les simulations (h) des faciès similaires à la géométrie originale. La prédiction peut être le résultat d'une

interprétation d'un géologue ou, comme c'est le cas ici, de l'assignation à chaque point de la région du faciès le plus probable, celui qui se répète le plus souvent parmi les simulations en ce point.



*Variables distribuées dans une région de l'espace ou « régionalisées » : teneur en métal (a), faciès géologiques (b). Données d'échantillonnage : teneur (c) et faciès (d). Une prédiction de la teneur (e) et des faciès (f). Trois simulations de la teneur (g) et des faciès (h).*

Un autre terme mérite d'être ajouté aux quatre mots clefs précédents : « modéliser ». La construction des prédictions et des simulations repose toujours sur une modélisation mathématique des données. Trois niveaux croissants de modélisation, représentant autant de pas vers la réalité telle qu'elle est échantillonnée, peuvent être distingués selon Georges Matheron (1978) :

- constitutif ;
- générique ;
- spécifique.

Le niveau dit constitutif est de nature épistémologique, la variable régionalisée étudiée est interprétée comme le résultat (en langage technique, on parle de réalisation) d'une fonction aléatoire hypothétique, un peu n'importe laquelle, sans contrainte. On reste dans le domaine des mathématiques spéculatives.

Le modèle générique correspond au choix du type de fonction aléatoire qui représente fidèlement les caractéristiques spatiales de la variable. On essaye de coller à une certaine réalité en trouvant un modèle mathématique qui permette de reproduire l'observable et, en même temps, ne dépende que d'un petit nombre de paramètres. Des hypothèses limitatives sur les distributions de probabilité définissant la fonction aléatoire choisie sont alors introduites. Certaines relèvent de choix méthodologiques, d'autres revêtent un caractère plus « objectif », en ce sens qu'elles sont vérifiables ou falsifiables sur la base d'un grand nombre d'observations. Ces choix et hypothèses constituent une information supplémentaire aux données d'échantillonnage, précieuse pour la prédiction ou la simulation de la variable étudiée.

Le dernier niveau est le plus détaillé – on parle alors de modèle spécifique. Pour lui, les paramètres caractérisant les distributions de probabilité de la fonction aléatoire choisie sont estimés sur la base des données disponibles. Si l'on suppose que le nombre de données est suffisant, que leur mesure est correcte et que les distributions sont calculées sans erreur, il devient possible d'identifier, d'une certaine manière, le phénomène naturel ayant engendré les mesures à cette fonction aléatoire. Il y a comme une fusion entre les mathématiques et l'expérience, même si, comme le rappelle Georges Matheron dans son ouvrage majeur « Estimer et Choisir » édité en 1978 et traduit en anglais en 1989, *il n'y a pas de probabilité en soi, il n'y a que des modèles probabilistes*.

Signalons pour finir que la modélisation d'une variable régionalisée par une fonction aléatoire n'admet pas de solution unique : plusieurs modèles sont concevables pour représenter une même réalité avec un certain degré de réalisme. Ils dépendent de l'expérience, du savoir-faire, de l'intuition et des préférences du géostatisticien, ainsi que de deux caractéristiques spatiales de la variable étudiée :

- son « support », terme se référant à l'élément de surface ou de volume sur lequel elle est mesurée. Le support des données d'échantillonnage est très souvent assimilé à un point, mais il s'agit d'une idéalisation. Par exemple, une carotte de sondage est, en première approximation, un cylindre dont la longueur varie de quelques dizaines de centimètres pour les gisements

filoniens à plusieurs mètres pour les gisements plus massifs. Augmenter le support des données en créant des échantillons composites régularisés à une longueur plus grande lisse la variabilité spatiale de la variable régionalisée – le fameux « effet de support » mis en évidence par Danie Krige et formalisé plus tard par Georges Matheron – et, par conséquent, affecte les paramètres de la fonction aléatoire associée ;

- l'échelle à laquelle la variable régionalisée est observée. La théorie conçoit le modèle de fonction aléatoire dans l'espace à deux ou trois dimensions, sans limites, mais il s'agit là encore d'une idéalisation car la variable est toujours définie dans une région bornée, appelée « champ » ou plus simplement « domaine ». Selon les objectifs de l'étude et le nombre d'échantillons disponibles, le géostatisticien peut travailler à l'échelle du champ entier ou celle d'un voisinage local et concevoir, pour une même variable régionalisée mesurée sur un même support volumétrique, des modèles différents de fonction aléatoire, qui dépendent de l'échelle de travail.

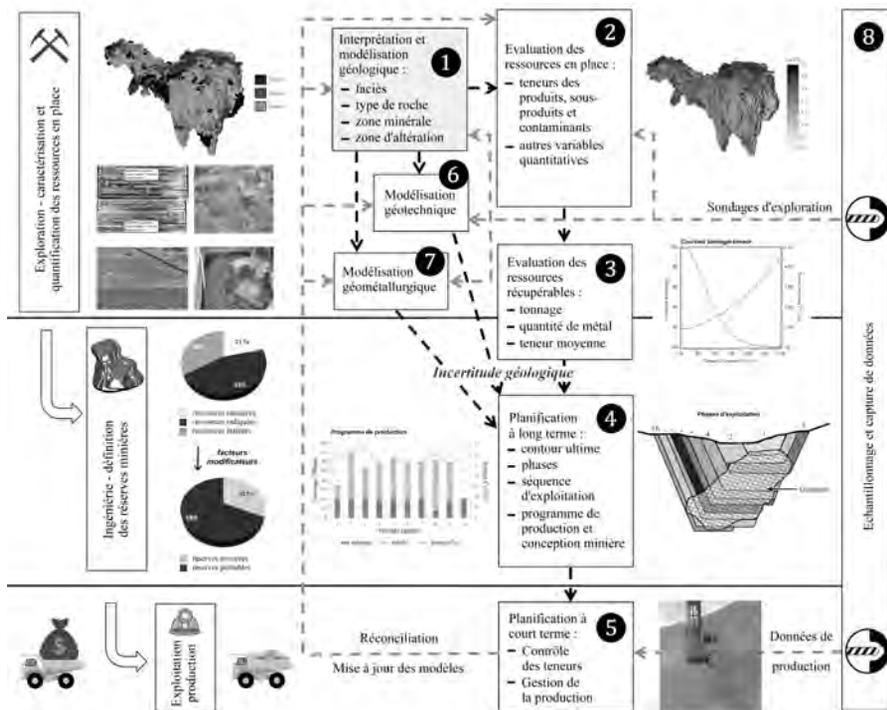
Et voilà, vous en savez presque autant que nous, il est temps de prendre vos valises pour nous accompagner dans ce voyage, afin de gommer ce « presque » pesant.

Vous êtes prêt ? C'est parti !



*« Il n'y a pas de probabilité en soi. Il n'y a que des modèles probabilistes ». Haut relief de 2 m par 1 m en grès érigé dans le hall d'entrée du Centre de Géostatistique de Mines ParisTech à Fontainebleau, fruit d'une souscription mondiale ayant réuni plusieurs centaines de personnes et dizaines d'institutions dans un élan unanime visant à rendre hommage à Georges Matheron un an après son départ.*

Géométrie & géologie



Sont présentés trois exemples de modélisation géologique qui utilisent la géostatistique. Le premier concerne une géométrie simple et interpelle sur l'utilisation ou non de la géostatistique. La « pipe » de la mine El Teniente est un diatème – cheminée emplie de brèches faiblement minéralisées – ayant approximativement la forme d'un cône symbolisé par une multitude de mesures mises à 1, perdues au milieu d'un champ infini de 0 indiquant son absence. Dans ce contexte, est-il licite d'utiliser un formalisme basé sur les fonctions aléatoires qui repose toujours, d'une manière ou d'une autre, sur une forme de stationnarité, c'est-à-dire la permanence de propriétés statistiques telles que la moyenne, la variance ou le variogramme, lors d'une translation dans l'espace ?

Dans les deuxième et troisième exemples, sont modélisés des brèches minéralisées et les faciès qui les entourent, caractéristiques des gisements de type « porphyre cuprifère ». Ces gisements constituent la principale ressource de cuivre et molybdène dans le monde et doivent leur nom à ce qu'ils sont fréquemment associés à des roches de texture dite porphyrique (adjectif d'étymologie grecque, *porphyra* signifiant « pourpre », en référence à la variété rouge la plus connue de ces roches), lesquelles se distinguent par la présence de phénocristaux de feldspath noyés dans

une matrice fine. Le principal défi de la modélisation est ici de respecter les transitions naturelles qui existent en passant d'un faciès à l'autre, cette manière dont les types de roches s'entremêlent dans l'espace.

## 1. La « pipe Braden » d'El Teniente

Réputée opérer depuis 1905 le plus important gisement de cuivre porphyrique au monde, la mine souterraine d'El Teniente, dans la région de Rancagua (Chili central) à environ 70 km au sud-est de la capitale Santiago, est actuellement exploitée en *panel caving* (Hustrulid et Bullock, 2001) avec plus de 3000 km de galeries. Elle est fameuse aussi auprès des géologues pour son diatrème, une intrusion stérile ayant sensiblement la forme d'un cône vertical inversé, haut de 1 kilomètre pour 1 kilomètre de plus grand diamètre à son sommet (Skewes *et al.*, 2002 ; Maskaev *et al.*, 2004). Surnommé la « pipe Braden » ou « brèche Braden » par les géologues et mineurs chiliens, cet objet faiblement minéralisé traverse le gisement et constitue la limite intérieure des exploitations minières (figure 1.1). Il faut en évaluer la surface. Nous parlons ici de géométrie, par opposition aux prédictions des teneurs de cuivre qui sont souvent faites conditionnellement à cette définition de la géométrie, comme ce sera vu par la suite.

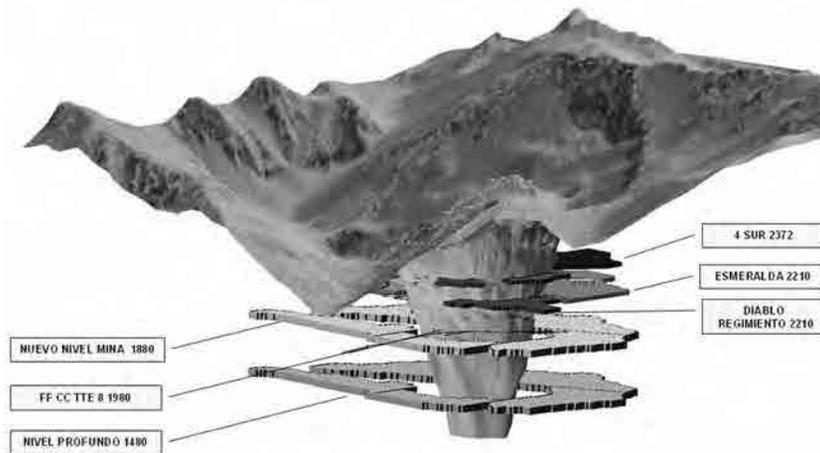


Figure 1.1. La topographie du terrain et le diatrème (pipe Braden) d'El Teniente. Les cadres en légende représentent les niveaux exploités depuis les années 1940 et ceux du futur. Après plus de cent ans d'exploitation, le sommet du diatrème commence à apparaître sur les vues satellitaires (crédit : Felipe Celhay).

Nous disposons de 4500 sondages découpés en tronçons (échantillons) de 6 mètres et traversant le diatrème de part en part selon des angles variables. Les 90000 échantillons résultants sont codés par des 0 (hors diatrème) ou des 1 (dedans). Plusieurs approches sont testées :

- approche 2D : pour chaque sondage, seule l'altitude du passage d'un 0 à un 1 ou l'inverse est retenue. La variable régionalisée est alors l'altitude des points de la surface du diatrème, étudiée d'une manière traditionnelle (variogramme puis krigeage) ;
- approche binaire (3D) : ce sont directement sur les 0 et les 1 dans l'espace tridimensionnel que sont appliquées les techniques usuelles de la géostatistique stationnaire, la variable régionalisée étant la fonction indicatrice du diatrème ;
- approche intermédiaire (3D) : la variable d'étude prend les trois états 0, 1 et 0.5.

Détaillons cette troisième approche. Le krigeage d'une variable binaire produit des valeurs généralement comprises dans l'intervalle  $[0,1]$  et la question est de savoir à partir de quelle valeur il faut se considérer à l'intérieur de l'objet, le géologue étant intéressé par les coordonnées de la surface et non par une pseudo-probabilité. Pour répondre à cette question, considérons un point de l'espace situé exactement au milieu de deux échantillons codés 1 et 0. Comme rien dans le modèle ne spécifie un quelconque lien entre distance (entre les points ou échantillons) et valeurs (0 ou 1), le point médian sera en moyenne sur la surface recherchée. Or un krigeage qui s'appuierait sur les deux échantillons affecterait, à cet endroit à mi-chemin des deux informations, le même poids  $\frac{1}{2}$  à chaque échantillon, donnant finalement une prédiction finale égale à 0.5. En conséquence, la valeur 0.5 constitue le seuil au-delà duquel il est judicieux de se considérer dans le diatrème. L'amélioration apportée par cette troisième approche dite « intermédiaire » a consisté à affecter la valeur 0.5 aux points de l'approche 2D identifiés précédemment comme étant proches de la surface. La variable régionalisée n'est alors plus binaire mais à trois états : 0, 0.5, 1.

À chaque jeu de données, un modèle est inféré et un krigeage mis en œuvre. Les résultats des différentes approches sont évalués par validation croisée (prédiction de valeurs connues masquées pendant l'exercice) et comparées à ce que fit à la main le géologue de Codelco, Felipe Celhay, 20 ans plus tôt. Ancien élève de Mines-ParisTech et coauteur de la publication de cette étude (Séguret et Celhay, 2013), Felipe utilisa les mêmes mesures qu'ici, en procédant niveau par niveau à une époque où les géomodeleurs n'existaient pas.

Analysons maintenant les résultats. Pour l'approche 2D qui utilise environ 1000 points détectés comme étant aux abords de la surface du diatrème, certaines incohérences apparaissent (figure 1.2), comme le point n° 1 pour lequel l'altitude est nettement sous-évaluée. Pourquoi ? Ce point est situé à plus de 2500 m d'altitude, en surface, au contact de l'air. Le passage à 2D le projette vers le centre de la carte, dans un endroit où la majorité des mesures touchent une surface plus profonde dont l'altitude est nettement inférieure, de l'ordre de 2000 m. En privilégiant ces voisins, le krigeage leur affecte un poids important en raison de leur proximité car rien n'indique dans le modèle que la cible de la prédiction n'est pas de même nature qu'eux. En fin de compte, l'altitude prédite est trop faible. Tel est le prix à payer de cette simplification, réduire de 1 la dimensionnalité du problème. En se déplaçant

vers le centre de la figure, les mesures sont censées diminuer. La même analyse peut être faite pour le point n° 2, dont l'altitude est cette fois surévaluée parce que le point est situé en marge de la couronne des données où ce sont essentiellement de fortes altitudes qui sont rencontrées. Ce point marginal est situé sur une excroissance profonde du diatrème.

Pour les approches binaire et intermédiaire, la vérification expérimentale porte, par validation croisée, sur les points de l'approche 2D où il est attendu que le krigeage produise 0.5 en moyenne, ce qui est effectivement constaté sur les histogrammes de la figure 1.3, ils sont bien centrés sur cette valeur. La qualité des prédictions est mesurée par l'écart-type autour de 0.5. Dans l'approche intermédiaire, cet écart-type est presque divisé par 2 car, près de la surface, existent de nombreux points dont la valeur a été forcée à 0.5. Leur proximité avec la cible de la prédiction leur donne d'importants poids de krigeage.

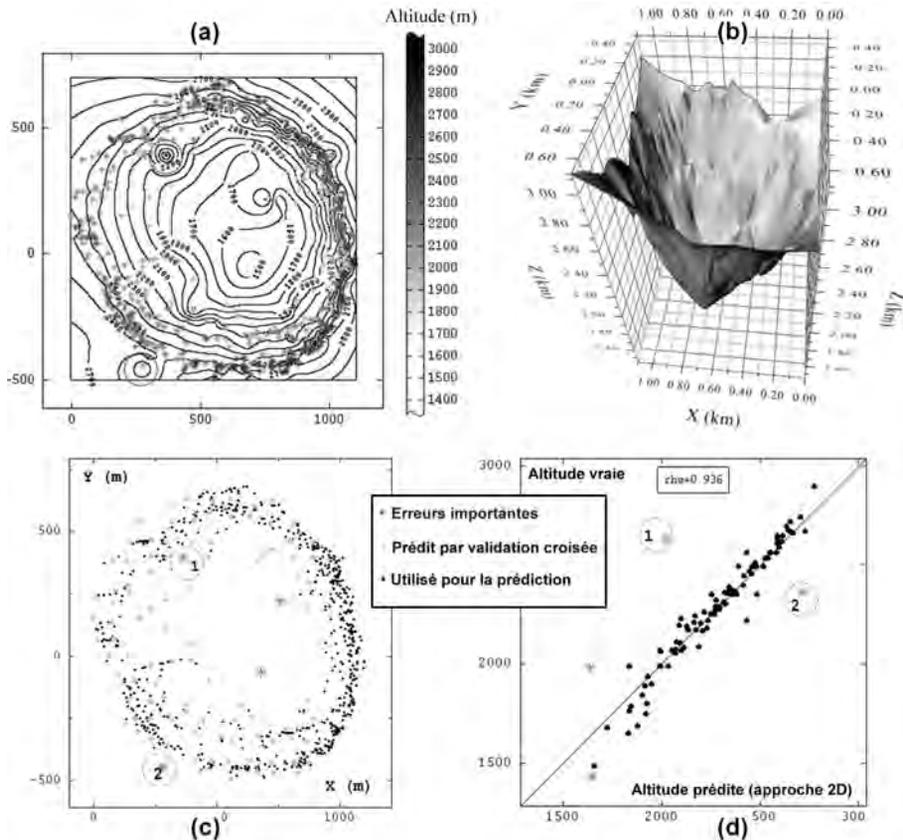


Figure 1.2. Approche 2D. La surface prédite représentée en (a) isovaleurs ou (b) développement vertical ; (c) en gris clair les points prédits par validation croisée en utilisant les autres points de données ; (d) diagramme croisé entre prédiction (axe horizontal) et valeur vraie (axe vertical). Les points n° 1 et 2 sont analysés dans le texte.

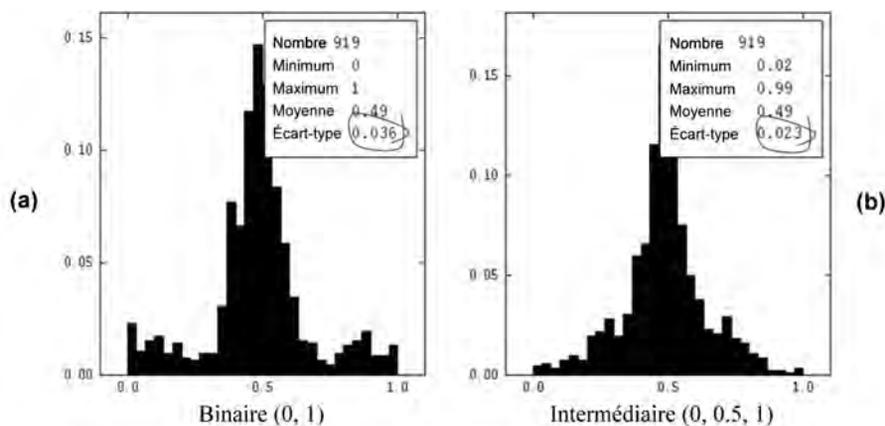


Figure 1.3. Comparaison des différentes approches (1/2). (a) Histogramme des prédictions aux abords de la surface en utilisant les valeurs 0 et 1 de l'approche binaire ; (b) histogramme des prédictions aux mêmes endroits en utilisant les valeurs 0, 1 et 0.5 de l'approche intermédiaire.

Les courbes isovaleurs 0.5 de la figure 1.4.a montrent bien comment ces points, mis à 0.5, attirent à eux la courbe rouge de l'approche intermédiaire. La comparaison des différentes courbes avec le tracé du géologue (figures 1.4.b et 1.4.c) frappe par la bonne concordance des différentes approches. L'explication est donnée par la figure 1.4.d qui représente une section horizontale du résultat du krigeage binaire interprété comme (une estimation de) la probabilité d'être ou non dans le diatrème. Aux abords de la surface, l'épaisseur de l'intervalle [0.25, 1] est en moyenne d'environ quarante mètres, une valeur faible comparativement aux dimensions du diatrème. Les informations sont tellement denses que des techniques même très différentes conduisent à des résultats similaires.

La proximité des calculs 2D, qui n'utilisent qu'environ 1% du nombre d'échantillons initiaux, avec les résultats de l'approche 3D, est due à ce que 80% des 90000 échantillons initiaux sont constitués de 0 dont l'influence est nulle sur le tracé de la surface du diatrème à des distances supérieures à 250 m, le diamètre du voisinage glissant utilisé lors du krigeage, et de même avec les 20% restants de 1 au cœur du diatrème. Aux abords de la surface où les méthodes pourraient diverger, la densité des échantillons est certes toujours favorable à l'approche 3D, mais d'un facteur 10 et non plus 100. Le géologue dit préférer les résultats de l'approche 2D qui donnent des courbes plus lisses et très proches de son tracé à la main.

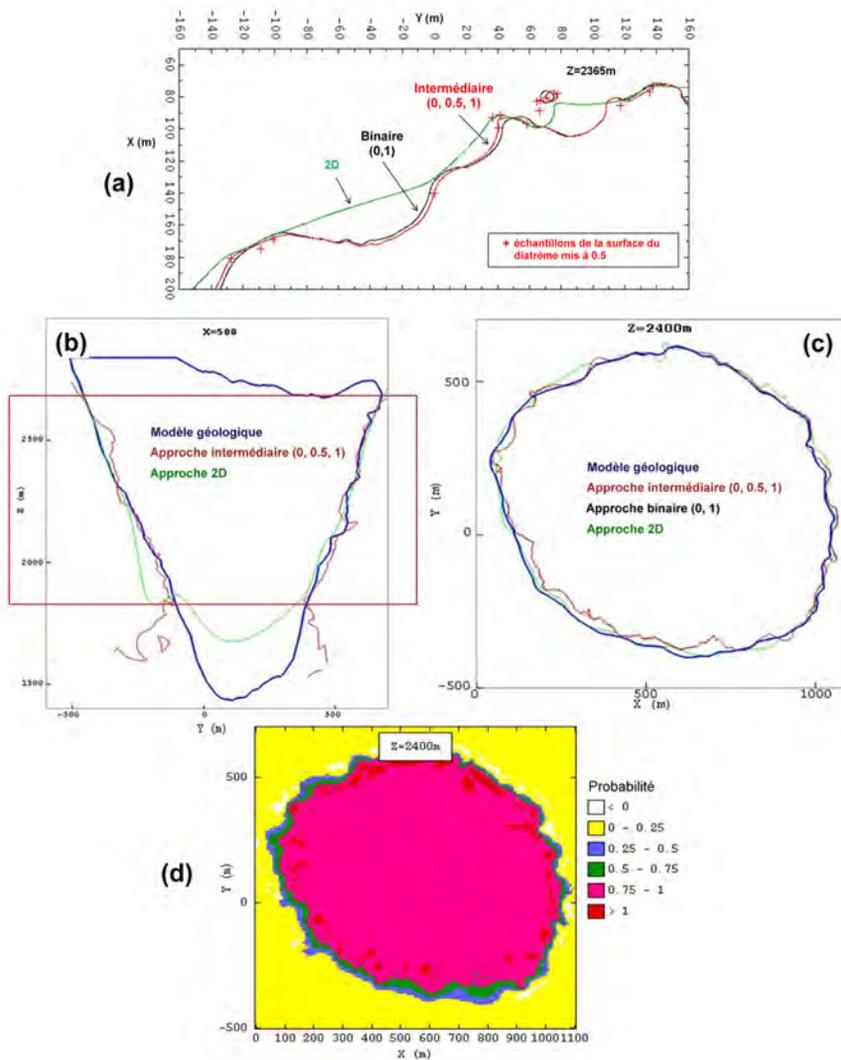


Figure 1.4. Comparaison des différentes approches (2/2). (a) En rouge, la courbe isovaleur de l'approche intermédiaire pour l'altitude 2365 m, en noir celle de l'approche binaire, en vert le profil de la surface obtenue en 2D. Les croix rouges sont les points connus de la surface, forcés à 0.5 et qui sont dans l'environnement immédiat de l'altitude considérée. (b) Section verticale du diatème, le rectangle représente la zone utile ; (c) section horizontale. À ces échelles, les approches binaire (courbe noire) et intermédiaire (en rouge) sont tellement proches qu'il est impossible de les distinguer. Dans les deux cas, ce sont les isovaleurs 0.5 qui sont tracées. Le tracé du géologue en bleu et les calculs à 2D en vert, se ressemblent par leur caractère plus lisse que les approches 3D. (d) Section horizontale du krigeage binaire. Les couleurs représentent des (estimations de) probabilités.

### 1.1. Discussion, perspectives

Au départ, ce travail était avant tout un exercice un peu provocateur visant à étirer le domaine d'application de la géostatistique aux limites de ses possibilités. En effet, un amas de 1 (le diatrème) au centre d'une plaine infinie de 0, constitue l'antithèse de toute géostatistique par la non-stationnarité du problème. En géostatistique, à un moment ou à un autre, une hypothèse de stationnarité est requise pour inférer un modèle, ce qui est contestable à l'échelle du diatrème. En analysant les résultats de la prédiction dans ce contexte défavorable, il apparaît qu'en fait, seule compte la stationnarité à l'échelle du voisinage glissant, près de la surface, l'hypothèse implicite étant que le variogramme de l'indicatrice soit le même partout. Dit autrement, la rugosité de la surface du diatrème est supposée homogène.

Il n'en est pas de même de l'approche à 2D, toujours pour un problème de stationnarité. La figure 1.5.a présente le variogramme de l'altitude de la surface du diatrème le long des quatre directions principales (N0°E, N45°E, N90°E, N135°E) du plan horizontal. Le comportement est isotrope sur les 150 premiers mètres, ce qui justifie l'utilisation du variogramme moyen de la figure 1.5.b. Mais la représentation en isovalues du diatrème (figure 1.5.c) pose question : comment est-il possible d'obtenir un variogramme linéaire, basé sur des accroissements stationnaires (hypothèse dite de stationnarité « intrinsèque »), sur de telles variations d'altitude à de si petites distances ?

Prenons l'exemple d'un variogramme directionnel nord-sud et déplaçons dans le domaine une paire de points alignés nord-sud. Quand la paire se trouve dans le domaine « A » de la figure, elle produit des différences d'altitude qui, élevées au carré, donnent un variogramme parabolique en puissance supérieure à 2 (figure 1.5.d), un comportement qui sort du contexte de la géostatistique intrinsèque. Le recours au krigeage universel (krigeage d'une fonction aléatoire dont la moyenne varie dans l'espace) ou à sa généralisation, le krigeage d'une fonction aléatoire intrinsèque d'ordre  $k$  (Chilès et Delfiner, 2012), devient alors indispensable tant sont forts les gradients de la surface à toute échelle. Pourtant, ce comportement parabolique n'apparaît pas dans les résultats car il est tempéré par les couples de données qui, prises dans le domaine « B » de la figure 1.5.c sont parallèles aux lignes d'isovalues et produisent des différences d'autant plus proches de 0 qu'elles sont élevées au carré. En conséquence, le variogramme linéaire de la figure 1.5.b est une moyenne de ces comportements extrêmes, son caractère intrinsèque est une illusion. Ceci vaut quelle que soit la direction d'analyse, le diatrème étant proche d'une figure de révolution autour de la verticale. Il y a là comme une conjonction malheureuse entre une méthodologie, par ailleurs classique et inattaquable, et une forme géométrique, ce qui rendrait probablement inacceptables les résultats de l'approche 2D s'ils n'étaient aussi proches du résultat des autres approches et du tracé du géologue.

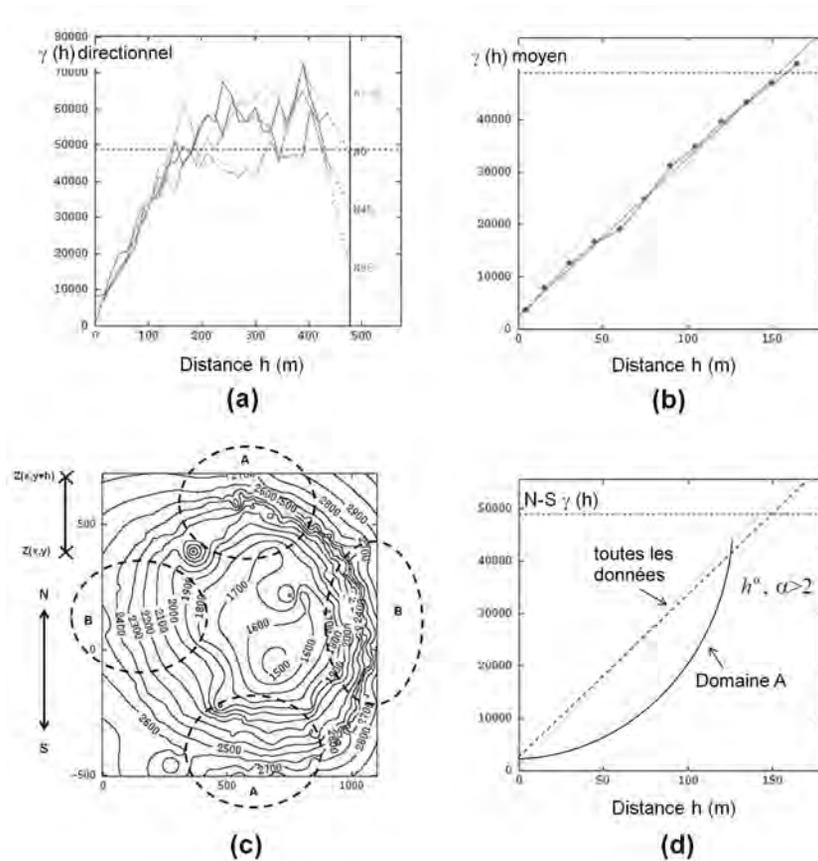


Figure 1.5. Stationnarité illusoire. (a) Variogrammes directionnels des altitudes de l'approche 2D, le long des directions N0°E, N45°E, N90°E et N135°E ; (b) variogramme moyen ; (c) carte des altitudes prédites et domaines caractéristiques ; (d) schéma du variogramme directionnel (N0°E) parabolique obtenu quand seules les paires de données du domaine « A » sont utilisées.

D'exercice, ce problème de prédiction de la profondeur du diatrème d'El Teniente est devenu un défi international. Ayant obtenu de la part de Codelco l'autorisation de fournir le jeu de données 2D à quiconque souhaite s'exercer dessus, il passe depuis de main en main et a valu quelques publications, comme celles de Fouedjio (2016) et Fouedjio et Séguret (2016) qui ont testé dessus des covariances non stationnaires et des techniques de déformations d'espace. Citons aussi Arman Melkumyan (2015) à l'origine d'un travail remarquable où la surface du diatrème est représentée dans un système de coordonnées cylindriques, « déplié », puis périodisé pour assurer la continuité au passage de 360° à 0° (figure 1.6). L'avantage est qu'à rayon fixé, la stationnarité dans l'espace angulaire permet d'utiliser les simplifications de la géostatistique stationnaire.

# Table des matières

<b>Un peu d'histoire .....</b>	<b>9</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>13</b>
<b>Chapitre 1 - Géométrie &amp; géologie .....</b>	<b>21</b>
1. La « pipe Braden » d'El Teniente.....	22
2. Gisement porphyrique Ministro Hales .....	29
3. Gisement porphyrique Río Blanco-Los Bronces.....	35
<b>Chapitre 2 - Géologie &amp; teneurs .....</b>	<b>41</b>
1. Effets de bordure & teneurs partielles .....	42
2. Simulation de faciès et teneurs .....	57
<b>Chapitre 3 - Teneurs &amp; ressources récupérables .....</b>	<b>71</b>
1. Ressources récupérables globales.....	73
2. Ressources récupérables locales .....	83
3. L'effet d'information .....	91
4. Synthèse.....	93
<b>Chapitre 4 - Planification à long terme &amp; réserves .....</b>	<b>95</b>
1. Modélisation de l'incertitude géologique à MMH .....	97
2. Définition d'un plan à long terme.....	102
3. Sensibilité du plan à l'incertitude géologique .....	107
4. À la recherche du contour ultime optimal .....	109
5. Classification des ressources et réserves minières .....	113
<b>Chapitre 5 - Planification à court terme.....</b>	<b>115</b>
1. Mise à jour du modèle de blocs pour la production .....	116
2. Minéralogie et planification à court terme .....	125
<b>Chapitre 6 - Géotechnique.....</b>	<b>131</b>
1. Intensité de fracturation ( $P_{32}$ ) .....	132
2. Fréquence de fracturation ( $FF$ ).....	138
3. Désignation de la qualité de la roche ( $RQD$ ).....	148
4. $RQD$ et $FF$ .....	151
<b>Chapitre 7 - Récupération &amp; géométallurgie.....</b>	<b>155</b>
1. Minerai de cuivre sulfuré.....	156
2. Minerai de cuivre oxydé .....	167
<b>Chapitre 8 - Échantillonnage &amp; géostatistique .....</b>	<b>181</b>
1. Qualité de l'information .....	181
2. Incohérences entre échantillons de différentes sources .....	185
3. Échantillonnages préférentiels.....	193

---

<b>Chapitre 9 - Conclusions &amp; perspectives .....</b>	<b>199</b>
1. L'importance des indicatrices d'ensemble .....	199
2. Une approche multivariable omniprésente .....	200
3. Additivité & géostatistique .....	204
4. Des porphyres cuprifères aux autres gisements.....	207
5. Perspectives .....	208
<b>Annexe - Concepts &amp; pratiques .....</b>	<b>211</b>
1. Analyse exploratoire et préparatoire des données .....	211
2. Analyse structurale .....	214
3. Krigeage et cokrigeage .....	228
4. Simulation conditionnelle.....	234
5. Représentations transitives et à base d'objets.....	240
<b>Bibliographie.....</b>	<b>247</b>
<b>Remerciements.....</b>	<b>261</b>

L'ouvrage couvre les principales problématiques minières où la géostatistique, discipline fondée dans les années 1960 pour étudier les variables mesurées en un nombre limité de points de l'espace, joue un rôle essentiel. Sont concernés l'interprétation et la modélisation géologique, l'exploitation et le contrôle des teneurs, l'évaluation des ressources, la planification minière, la géotechnique, la géométtallurgie et l'échantillonnage. Riche de plus de 150 illustrations, la présentation est systématiquement orientée vers une exposition pratique des problèmes posés par l'industrie et des solutions mises en œuvre.

Transposables à d'autres types de gisements, les cas concrets concernent ici des gisements porphyriques cuprifères chiliens, études publiées par les auteurs et réalisées en collaboration avec l'entreprise chilienne Codelco depuis la fin des années 1990. L'éventail des problèmes abordés et leur présentation pratique rendent l'ouvrage utilisable par un large public – entre autres étudiants, chercheurs, géologues, ingénieurs, géotechniciens et métallurgistes.

*« Un livre écrit par des passionnés et des amoureux véritables de la géostatistique et des applications minières. Il sera particulièrement apprécié par le lecteur ayant une certaine expérience de la géostatistique, comme par l'étudiant de niveau maîtrise, maîtrise, ou doctorat, qui y trouvera une mine de bonnes idées et d'erreurs à éviter. »*

Professeur Denis Marcotte, Polytechnique Montréal

Serge Antoine Séguret, pendant plus de 35 ans ingénieur de recherche dans le Centre de Géostatistique fondé par Georges Matheron en 1968 (École des Mines de Paris, Centre de Géosciences).

Xavier Emery, Professeur titulaire au Département de Génie Minier et chercheur principal à l'Advanced Mining Technology Center (Université du Chili).