

# La géostatistique au service de la modélisation géologique 3D

Par Didier RENARD

et Christian LAJAUNIE

Centre de Géosciences, MINES ParisTech – PSL University

Simon LOPEZ

Direction Géoressources/Unité GSO (BRGM)

Cécile ALLANIC

Direction Géoressources/Unité GBS (BRGM)

Gabriel COURRIOUX

et Bernard BOURGINE

Direction Géoressources/Unité GSO (BRGM)

et Philippe CALCAGNO

Direction Géoressources/Unité REG (BRGM)

Bureau de Recherches géologiques et minières (BRGM)

Version moderne de la cartographie géologique 2D, la modélisation géologique 3D est appelée à jouer un rôle fondamental dans l'exécution des missions relevant du Référentiel Géologique de la France. Elle intègre des données variées, relatives tant à la surface qu'à la profondeur, et permet une représentation cohérente, bien qu'imparfaite, du sous-sol. Elle permet aussi au (géo) modélisateur de tester et de visualiser des hypothèses de façon à éprouver la pertinence de ses interprétations. Les outils développés et mis en place au BRGM reposent sur des modèles géostatistiques sous-jacents. La méthode du champ de potentiel, simple et flexible, faite de relations géologiques et de champs stochastiques, assure l'intégration des données sous une forme cohérente et permet de chiffrer les incertitudes. Ainsi, loin de s'opposer, l'interprétation du géologue et la représentation stochastique peuvent se nourrir l'une de l'autre.

Les missions résultant du Référentiel Géologique de la France consistent à collecter des informations relatives à la surface et au sous-sol, à les combiner et à offrir une nouvelle représentation géologique du territoire français<sup>(1)</sup>. Le RGF est une réponse aux enjeux actuels et futurs des géosciences : « gestion des ressources en eau, approvisionnement en matières premières, recherche de nouvelles ressources énergétiques, stockage d'énergie, de CO<sub>2</sub> et de déchets, protection des populations et de l'environnement... ce qui nécessite de pouvoir fournir aux acteurs publics et privés une description aussi complète que possible de la structure du sol et du sous-sol ».

Alors que la Carte Géologique de la France visait une couverture en deux dimensions du territoire, le RGF s'intéresse à une représentation en trois dimensions de la géologie française. Dans ce contexte, la modélisation géologique est appelée à jouer un rôle central. La transition entre ces deux approches est décrite avec précision dans un article récent de Lopez *et al.* (2017), auquel

nous emprunterons plusieurs éléments<sup>(2)</sup>. À l'heure du numérique, de la donnée massive et de l'algorithmique, il nous est apparu intéressant de revenir, ici, sur l'élément moteur qui permet de tirer plus des données qu'elles n'en contiennent réellement, en formulant des hypothèses et en élaborant des modèles. Classiquement, il peut s'agir de l'interprétation qu'est amené à faire le géologue de ses données, pour aboutir à son *modèle géologique*. Dans le présent article, il sera plutôt question de la démarche géostatistique qui permet de représenter une réalité imparfaitement connue par un *modèle géostatistique* stochastique, mais par ailleurs assez simple, aboutissant à une modélisation 3D à travers laquelle l'interprétation du

(1) <http://rgf.brgm.fr/page/mission-referentiel-geologique-france> (consulté le 1<sup>er</sup> février 2019).

(2) LOPEZ S., ALLANIC C., COURRIOUX G., BOURGINE B., CALCAGNO P., CARITG S. & GABALDA S. (2017), « La Modélisation géologique 3D : un outil pour la cartographie », Revue officielle de la Société géologique de France, 193, pp. 48-53.

géologue et représentation stochastique sont en perpétuelle interaction.

La modélisation géologique est essentiellement une démarche d'intégration et de mise en cohérence de connaissances et d'interprétations. Elle est alimentée par des données diverses : il peut s'agir d'observations faites par le géologue directement sur le terrain (affleurements, contacts lithologiques, mesures structurales), de données de sondages, de géophysique, mais aussi de modèles numériques de terrain, de cartes, de coupes... La troisième dimension, souterraine, est souvent beaucoup plus incertaine, car elle est caractérisée de manière indirecte (méthodes géophysiques) ou de façon très ponctuelle et partielle (forages). Cependant, même pour le géologue cartographe du XIX<sup>e</sup> siècle qui n'avait accès qu'à des données de surface, la troisième dimension n'était jamais bien loin. C'est par le biais de coupes verticales judicieusement choisies que le géologue élaborait son interprétation de la réalité géologique et de l'histoire de celle-ci, et renforçait la cohérence de son modèle et de la cartographie 2D. Naturellement, l'enjeu ne sera pas le même dans un contexte géologique calme que dans un contexte chahuté par des déformations tectoniques.

La question des incertitudes pesant sur la géométrie ou sur les propriétés de milieux géologiques n'est pas nouvelle. C'est notamment cette question qui a donné naissance, à partir des années 1950, à la géostatistique. Née de l'activité minière, il s'agissait de tirer le meilleur parti possible des données disponibles (obtenues par sondages, échantillonnages) pour évaluer les ressources d'un gisement. Georges Matheron (1930-2000) en a théorisé les concepts majeurs au Centre de géostatistique de l'École des Mines de Paris, après son passage au BRGM (1954-1963). Le développement de la discipline s'est poursuivi depuis, au sein de ce qui est devenu le Centre de géosciences de MINES-ParisTech, en liaison avec ses partenaires. La géostatistique<sup>(3)</sup> est aujourd'hui une étape incontournable de l'évaluation des ressources minérales. Elle s'est aussi étendue à nombre de domaines dans lesquels une variable *spatialisée* (ou *régionalisée*) se déploie dans l'espace : ressources naturelles, ressource halieutique, environnement, pollution du sol, de l'eau, de l'air... Il peut être question de profondeur ou d'épaisseur de couche, de concentration en métal, en hydrocarbure, en polluants, en biomasse...

Une caractéristique fréquente de tels phénomènes (une minéralisation, par exemple) ou de telles variables (la teneur de cette minéralisation) est de présenter un aspect à la fois structuré et aléatoire : structuré, parce que les mesures opérées en deux points proches auront tendance à être plus approchantes que celles opérées en deux points distants (on parle de *variogramme* ou de *corrélacion spatiale*) ; aléatoire, parce que leur prévision échappe à tout modèle déterministe. Empiriquement, le calcul du *variogramme* ou de la *covariance* à partir des données collectées permet de faire la part entre le côté structuré et ce qui paraît aléatoire. Il est alors extrêmement commode de considérer la variable régionalisée comme une réalisation d'un modèle probabiliste de fonction aléatoire caractérisé

par sa structure géostatistique. Il n'est pas question ici de métaphysique. En particulier, il ne s'agit pas de considérer qu'un phénomène est « dû [ou non] au hasard »<sup>(4)</sup>, mais de proposer une représentation commode des configurations possibles, qui soient cohérentes avec les observations disponibles. On peut alors, notamment, procéder à des estimations *optimales* (*kriègeage*) pour répondre à des besoins d'interpolation ou de cartographie. De telles cartes ne permettent évidemment pas de reproduire des détails qui auraient échappé aux mesures disponibles, mais elles peuvent être assorties de *variances d'erreur* quantifiant leur incertitude. On peut également procéder à des simulations géostatistiques qui reproduiront la variabilité existante et qui sont censées ressembler à la réalité, tout en en étant différentes.

Au BRGM, la boîte à outils géostatistique développée au départ avec l'École des Mines de Paris est progressivement devenue le logiciel GDM (*Geological Data Management*).

Ce dernier s'intéresse aux thématiques des géosciences (mine, hydrogéologie, géotechnique, environnement...). Il permet d'interpoler différentes variables : propriétés, teneurs, ou encore épaisseur ou profondeur représentant des géométries peu tectonisées. En matière de géométrie, il intègre de nombreux tests automatiques visant à vérifier la cohérence des données, des tests indispensables pour combiner de façon efficace des milliers d'informations diverses (forages et cartes géologiques). Les surfaces interpolées peuvent être combinées entre elles en considérant certains événements géologiques, comme l'érosion ou le dépôt.

Du point de vue mathématique, cette approche est essentiellement bidimensionnelle : chaque surface ne peut être rencontrée plus d'une fois le long d'une verticale, elle ne peut donc pas présenter de replis. La cartographie de nombreuses données d'orientation (azimut, pendage, polarité des stratifications, schistosités...) en sus des points de passage des interfaces géologiques, ainsi que le besoin de modélisation de structures géologiques complexes, ont motivé dans les années 1990 de nouveaux travaux de recherche. Menés conjointement par le BRGM et l'École des Mines de Paris, ils ont débouché sur l'élaboration d'un nouvel outil géostatistique : la méthode du potentiel<sup>(5)</sup> qui, implémentée dans l'outil GeoModeller, permet de prendre en compte simultanément les données d'interfaces et d'orientation (voir la Figure 1 de la page suivante).

Dans ce modèle, les interfaces géologiques sont modélisées par des surfaces définies de manière implicite comme des lieux d'isovaleurs d'un champ scalaire 3D, dont les gradients sont contraints par les données d'orientation. Le champ est obtenu par une interpolation multivariable de ces données (*cokriègeage* universel). L'utilisation des

(3) CHILES J.-P. & DELFINER P. (1999), *Geostatistics: Modeling spatial uncertainty*, Wiley, New York, 695 p.

(4) MATHERON G. (1989), *Estimating and Choosing, an Essay on Probability in Practice*, Springer.

(5) LAJAUNIE C., COURRIOUX G. & MANUEL L. (1997), "Foliation Fields and 3D Cartography in Geology: Principles of a Method Based on Potential Interpolation", *Mathematical Geology* 29(4), pp. 571-584.

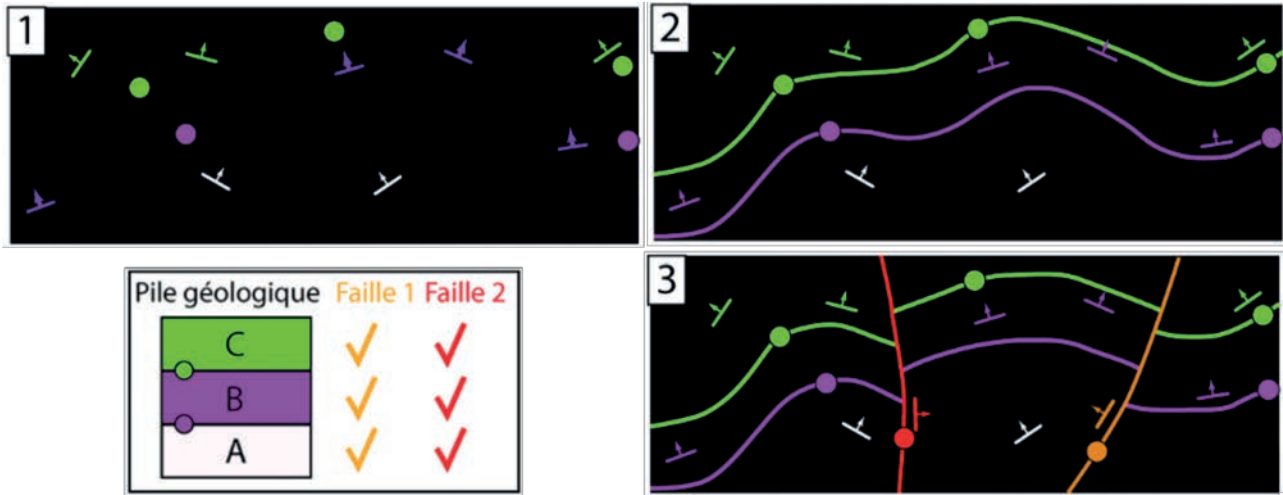


Figure 1 : Représentation 1 – Méthode de modélisation géologique par interpolation de champs de potentiels : points de passage et de données d'orientation éparses provenant de l'observation du terrain ; représentation 2 – Interfaces géologiques correspondant aux surfaces d'isovaleurs du potentiel ; représentation 3 – Intégration de fonctions de dérive discontinues pour la modélisation des failles.

gradients du champ scalaire interpolé a conduit à l'assimiler à un champ de potentiel ; de fait, la méthode a été qualifiée de méthode de *modélisation géologique par champ de potentiel*.

Un même champ de potentiel, connu dans tout l'espace, permet de modéliser des formations présentant des géométries assez proches ayant une histoire commune, et dont les interfaces correspondent à différentes valeurs, inconnues *a priori*, du potentiel. La terminologie de *série* a été retenue pour désigner cet ensemble de formations. Ainsi, on peut reconstruire, à partir de quelques données de surface, des structures ayant enregistré des déformations identiques (voir la Figure 2 de la page suivante). De même, la reconstruction d'architectures plus complexes est possible grâce à l'utilisation d'une pile géologique qui permet d'établir une chronologie à la fois des dépôts et des relations spatiales entre les différentes séries<sup>(6)</sup>, et de traduire des relations géologiques d'érosion ou de dépôt. À ce titre, cette pile constitue un élément à part entière de la construction et de l'interprétation du modèle géologique 3D et une synthèse de la connaissance associée, qui permet de combiner automatiquement des séries construites indépendamment les unes des autres.

Enfin, en introduisant des discontinuités dans la dérive du *krigeage* universel utilisé pour calculer le champ de potentiel, on peut reproduire l'effet de failles (voir la Figure 1 ci-dessus). Leur rejet est alors automatiquement déduit des points de passage utilisés pour définir les formations qu'elles affectent. La géométrie de ces failles est quelconque, finie ou infinie, et est également construite en utilisant un champ de potentiel spécifique. À l'instar de celles mises en évidence par la pile géologique dans le cas des formations, des relations permettent de définir simplement les interactions des failles et de modéliser de véritables réseaux structuraux (voir la Figure 3 de la page suivante).

L'outil de modélisation géologique ainsi obtenu est particulièrement bien adapté aux besoins et aux spécificités de la cartographie géologique. Il est générique et permet

de construire directement des objets géologiques tridimensionnels dans de nombreux contextes. Sa combinaison avec la topographie fait que les coupes réalisées dans le modèle et la carte sont forcément cohérentes. Cette cohérence est la plus-value fondamentale qu'apporte cette approche, mais c'est aussi une contrainte qui ne tolère aucune approximation : toutes les coupes étant possibles et cohérentes, on ne peut se contenter d'en choisir quelques-unes pour étayer un *a priori* conceptuel. Ainsi, la production d'un modèle géologique demande de réaliser un travail conséquent de réflexion afin de pouvoir intégrer, après les avoir synthétisées, le plus grand nombre de données disponibles.

De plus, le formalisme géostatistique sous-jacent à l'interpolation du champ de potentiel permet de quantifier l'incertitude associée à un tracé cartographique. En effet, la structure spatiale du potentiel peut être inférée à partir des données d'orientation. Il est alors possible, à l'aide des variances de *cokrigage*, de cartographier une variable mesurant la probabilité de l'appartenance d'un point à une interface, ce qui permet de localiser les zones d'incertitude élevée.

D'un point de vue épistémologique, il est intéressant de constater que l'outil permettant d'obtenir le *modèle géologique* à trois dimensions n'est au fond bâti que sur des champs stochastiques de potentiels, lesquels sont caractérisés par leur plus ou moins forte régularité (covariance spatiale), et sont reliés par un ensemble de règles d'assemblage (*la pile géologique*). Ainsi, sans nécessairement le savoir, le géologue modélisateur développe son interprétation grâce à une approche géostatistique. C'est la simplicité et la souplesse de ce modèle géostatistique

(6) CALCAGNO P., CHILES J.-P., COURRIOUX G. & GUILLEN A. (2008), "Geological modeling from field data and geological knowledge (Part I). Modeling method coupling 3D potential-field interpolation and geological rules", *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 171(1-4), pp. 147-157.

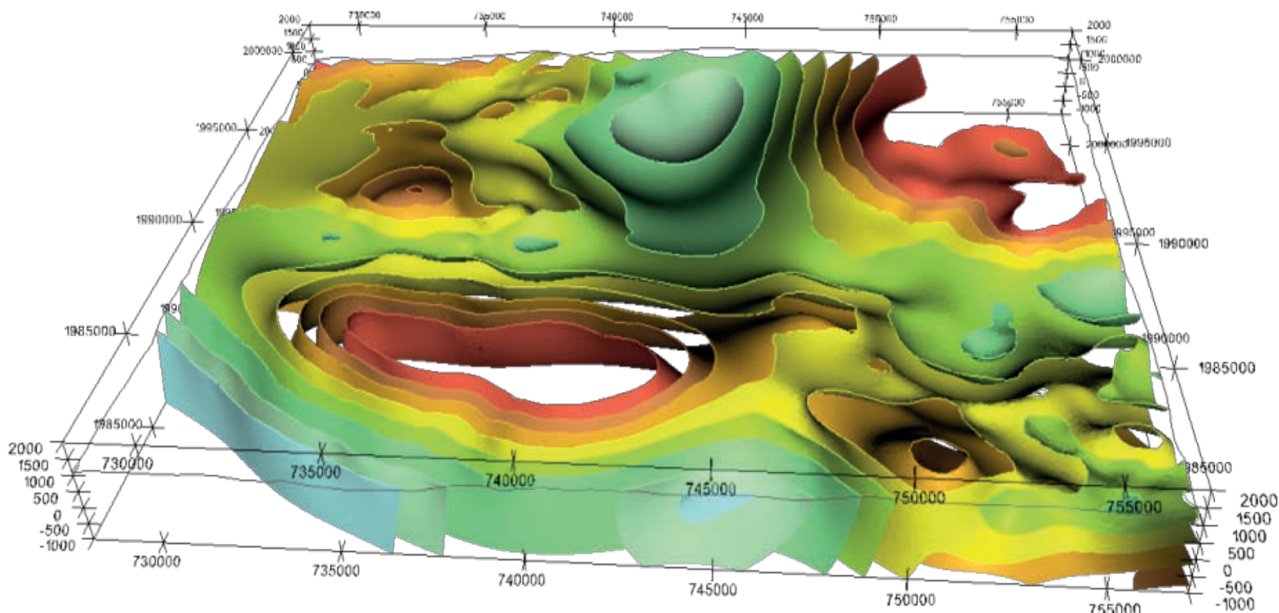


Figure 2 : Modèle géologique 3D de la région du Monastier-sur-Gazeille <sup>(7)</sup>, lequel a été produit à partir du relevé sur le terrain de données de passage et d'orientation (voir méthodologie – représentation 1, dans la Figure 1 de la page précédente).

sous-jacent qui permettent l'intégration de données variées dans un ensemble cohérent.

Par ailleurs, ce cadre se prête bien à la question de la multiplicité des représentations cohérentes avec les observations, liée à la caractérisation et à la quantification des incertitudes. Ainsi, loin de se substituer au travail du géologue, la modélisation vient l'appuyer. D'une part, en modifiant le modèle géostatistique sous-jacent, le géologue peut explorer rapidement et visuellement différentes hypothèses scientifiques compatibles avec ses connaissances en produisant pour chacune d'elles une cartographie 3D compatible avec les données disponibles. Il peut alors cibler les zones où la géométrie des formations reste problématique et organiser stratégiquement les nouvelles campagnes d'acquisition. D'autre part, pour un même modèle géostatistique, il devrait pouvoir à l'avenir générer différentes simulations (on parle aussi de *réalisations*) de ce modèle, dans l'optique de reproduire la variabilité spatiale présumée de la géologie.

La modélisation géologique permet ainsi de revenir aux fondamentaux que sont la donnée et la description des géométries. De plus, son aspect intégrateur permet de mutualiser des données et de confronter les points de vue. En ce sens, la production d'un modèle géologique est donc une démarche pluridisciplinaire qui doit aboutir à une vision partagée du sous-sol et de sa géologie. Par rapport à la carte, lorsqu'il est discrétisé de manière adéquate par un maillage, il peut également servir de support à la simulation de phénomènes physiques dynamiques : propagation des ondes sismiques, transferts souterrains de masses et/ou d'énergie... qui permettent d'étudier le fonctionnement des systèmes géologiques et les impacts anthropiques. C'est pour l'ensemble de ces raisons que

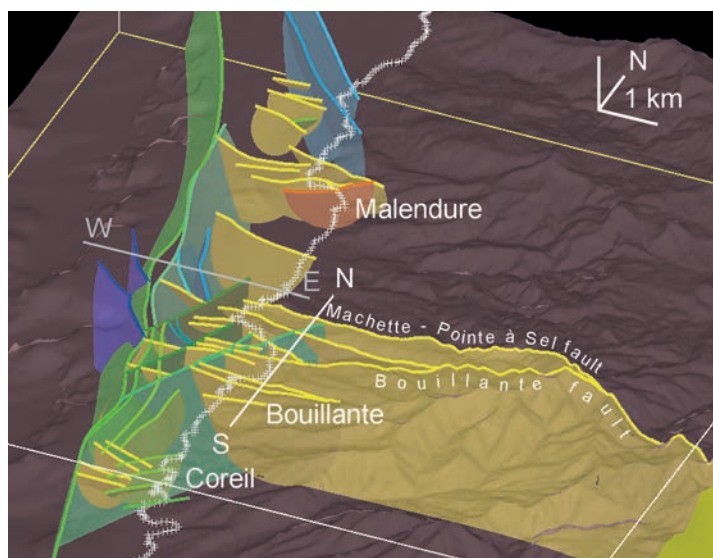


Figure 3 : Construction d'un réseau discret de failles identifiées dans la région de Bouillante <sup>(8)</sup> (Guadeloupe). Deux familles distinctes de failles sont mises en évidence et modélisées (en vert et en jaune). La structuration E-W de l'île de Basse-Terre dans le prolongement du graben de Marie-Galante est représentée en 3D.

la modélisation géologique 3D constitue un outil central pour le Référentiel Géologique de la France.

(7) DEFIVE E., COURRIOUX G. & LEDRU P. (2011), « Carte géologique de Le Monastier-sur-Gazeille (Haute-Loire) », Carte géologique de la France au 1:50 000, Orléans, BRGM, ISBN 978-2-7159-1816-0.  
 (8) CALCAGNO P., BOUCHOT V., THINON I. & BOURGINE B. (2012), "A new 3D fault model of the Bouillante geothermal province combining onshore and offshore structural knowledge (French West Indies)", Tectonophysics 526-529, pp.185-195.