



**HAL**  
open science

# Géométallurgie : De la genèse du gisement à une exploitation optimisée

Isabelle Duhamel-Achin, Jérôme Bodin, Quentin Dehaine

► **To cite this version:**

Isabelle Duhamel-Achin, Jérôme Bodin, Quentin Dehaine. Géométallurgie : De la genèse du gisement à une exploitation optimisée. Géosciences, 2022. hal-03767242

**HAL Id: hal-03767242**

**<https://brgm.hal.science/hal-03767242>**

Submitted on 1 Sep 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



# DE LA GENÈSE DU GISEMENT À UNE EXPLOITATION OPTIMISÉE

L'appauvrissement progressif des gisements métalliques primaires et la diminution des teneurs et tonnages disponibles en surface sont à l'origine du développement des sciences de la métallogénie et de la géomé-tallurgie.

La métallogénie s'intéresse aux phénomènes liés à l'origine de la formation des concentrations métalliques pour cibler les régions à fort potentiel et définir où prospecter de nouvelles ressources. La géomé-tallurgie est quant à elle une approche multidisciplinaire quasi holistique visant à la meilleure utilisation possible des ressources minérales en termes de revenus, d'efficacité énergétique et d'impact environnemental. Il s'agit de comprendre et de mesurer les propriétés géologiques, minéralogiques et métallurgiques afin de les intégrer dans un modèle spatial et prédictif du gisement pour orienter les choix de traitement des minerais et la stratégie de planification minière des projets futurs ou existants (Dehaine *et al.*, 2021). Au cours du cycle minier, ce double apport de connaissances a pour principal objectif d'optimiser les performances économiques, techniques et environnementales de l'opération minière (figure 1).

## Comprendre les processus de formation des gisements pour définir les meilleures cibles de demain

Notre approche de la métallogénie a beaucoup évolué ces dernières décennies grâce entre autres aux connaissances apportées par les nouveaux moyens d'investigation du sous-sol (télé-détection et géophysique

AUTEURS



**Quentin DEHAINE**  
Chercheur senior en géomé-tallurgie,  
Geological survey of Finland (GTK)  
✉ [quentin.dehaine@gtk.fi](mailto:quentin.dehaine@gtk.fi)



**Isabelle DUHAMEL-ACHIN**  
Directrice régionale Provence-Alpes-Côte  
d'Azur, direction des actions territoriales, BRGM  
✉ [i.duhamelachin@brgm.fr](mailto:i.duhamelachin@brgm.fr)



**Jérôme BODIN**  
Ingénieur métallogéniste, direction Eau,  
Environnement, Procédés et Analyses, BRGM  
✉ [j.bodin@brgm.fr](mailto:j.bodin@brgm.fr)

▲ PHOTO 1  
Étude pétro-  
structurale du  
complexe magmatique  
et métamorphique  
de Julianehåb  
(Province de Kujalleq,  
Groenland, 2013).

© J. TUDURI, BRGM

notamment), de caractérisation des minerais (analyses portables de terrain ou de laboratoire) et grâce aux développements des outils numériques d'analyses statistiques des données géoscientifiques et de modélisation des systèmes complexes. À différentes échelles, du minéral au gisement et à son environnement géologique, local ou régional, la formation des concentrations minérales est issue d'une convergence de phénomènes physico-chimiques et de conditions favorables de sources, de transport et de piégeage. Ces processus, conjugués dans le temps et la durée, ont permis de donner naissance à des concentrations d'une ou plusieurs espèces minérales contenant la ou les substances recherchées. Leurs concentrations doivent être suffisantes en volume et en teneur, à des profondeurs techniquement atteignables, pour que l'exploitation soit rentable. Appréhender la profondeur de formation des concentrations (pression et température de genèse), les contextes géodynamiques où elles se forment et reconstituer la chronologie des événements de l'histoire géologique qui les a vus naître permet concrètement de déterminer les critères favorables et pertinents nécessaires pour découvrir de nouveaux gisements.

### Géologie, caractérisation du gisement et planification minière

Un minerai est un assemblage de minéraux porteurs d'une ressource principale que l'on cherche à séparer du reste des minéraux de gangue. Cette ressource est le plus souvent constituée des métaux de base ou précieux qui font la valeur majeure du gisement. Plusieurs éléments potentiellement valorisables peuvent également être présents comme coproduits ou sous-produits et apporter une plus-value supplémentaire substantielle lorsqu'ils peuvent être extraits.

Traditionnellement, on déterminait via des analyses statistiques une teneur de coupure moyenne à partir de laquelle la récupération était rentable, permettant par-là de définir les volumes à exploiter. Cependant, les gisements et leurs minerais sont des objets hétérogènes dans l'espace. Au-delà de la teneur des différents éléments que l'on cherche à valoriser, la variabilité intrinsèque des propriétés du minerai (leur minéralogie, granulométrie, densité, dureté/broyabilité, etc.) impacte les performances opérationnelles de séparation et les résultats économiques escomptés. Pour une même composition chimique moyenne de minerai et une même teneur en éléments de valeur, la nature des espèces minérales et leurs propriétés physico-chimiques peuvent varier et influencer leur comportement dans le procédé et donc les futurs résultats opérationnels.

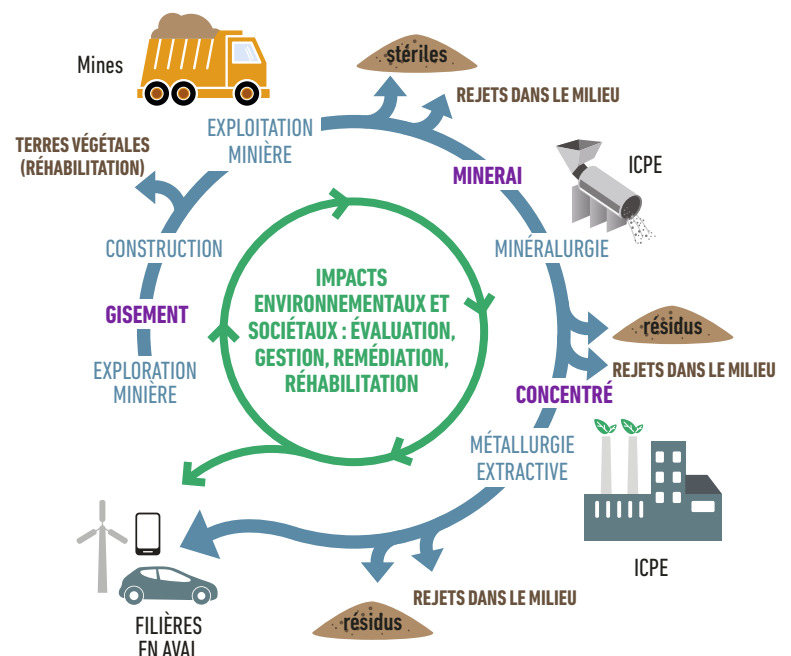
Aussi, l'étape de la planification minière consiste à anticiper et élaborer un calendrier des opérations

d'extraction en découpant le gisement en domaines ou blocs (bloc modèle 3D) selon des critères et des paramètres multivariés afin de réaliser des assemblages homogènes qui viendront alimenter l'usine de traitement en continu dans la durée. La composition globale moyenne de l'alimentation de l'usine est ainsi paramétrée et vérifiée régulièrement pour optimiser la performance des procédés dans le temps et éviter les aléas de production en sortie des produits en assurant une qualité constante. C'est pourquoi, avant toute extraction minière, dès les phases d'exploration avancée, les données de forage permettent de modéliser la répartition de grands domaines aux caractéristiques différentes dans l'espace. En augmentant le nombre de forages et en réduisant leur espacement (maillage), on réduit les incertitudes spatiales et la prise de risques en améliorant les connaissances du gisement. Bien connaître son gisement, par des profils géophysiques 2D, des sondages multiples et modèles géologiques 3D, ainsi que des plans d'échantillonnages et d'analyses physico-chimiques bien répartis et distribués permet de minimiser les risques financiers. Anticiper les étapes successives des secteurs à exploiter suivant la progression pas à pas de l'excavation permet de dresser le plan d'exploitation et le planning opérationnel de gestion

« Minimiser les risques miniers en connaissant mieux son gisement. »

FIGURE 1 / Le cycle minier, les étapes d'extraction, d'élaboration de produits métalliques et les résidus restants.

SOURCE : BRGM (REDESSINÉE)



stratégique jusqu'à évaluer au final la durée de vie du futur projet minier. Les investissements sont lourds avant la première mise en production d'un concentré ou d'un produit. La récupération des investissements, des dépenses d'exploration, se fait bien souvent des années après la découverte du gisement (10-15 ans généralement) et quelques années après la mise en service de l'usine.

Le développement de nouveaux projets miniers est toujours limité par la rentabilité économique de l'extraction de métaux au regard des technologies actuelles, mais celles-ci progressent constamment. Aussi, certains gisements non exploitables aujourd'hui le seront peut-être demain et la préservation des connaissances des gîtes et occurrences reste cruciale.

### Une approche intégrée pour des opérations minières plus résilientes

À l'échelle de l'histoire humaine, nous sommes passés de petits gisements de surface très riches, monosubstance, à des gisements polymétalliques dits de classe mondiale, moins riches et plus profonds, le plus souvent avec une substance majeure et des coproduits valorisés. Les investissements sur les projets miniers sont donc de plus en plus lourds et risqués. L'augmentation des volumes exploités se traduit par une hétérogénéité spatiale des gisements et minerais, en termes de

teneur, minéralogie et textures. La forme et la taille des espèces minérales porteuses des éléments valorisables dans le minerai sont tout aussi importantes que la teneur élémentaire et la chimie globale du minerai ; elles sont souvent déterminantes pour la performance des procédés de traitement, notamment des taux de récupération. Certaines minéralisations fines ou en inclusion sont trop dispersées pour être récupérées, à moins de dépenser une énergie colossale pour les libérer lors du broyage. Certains minéraux sont également réfractaires, ne peuvent être fondus ou chimiquement réduits qu'à des températures élevées nécessitant des apports énergétiques très élevés. Ou encore, certaines phases associées aux minéraux de gangue, tels que les carbonates parfois combinés aux éléments de valeurs, peuvent dégrader l'efficacité ou neutraliser les effets de certains réactifs en hydrométallurgie, comme les acides.

Les variations de composition et d'associations minérales d'un minerai (proportions et paragenèse) peuvent être corrélées à une gamme de performance de comminution (réduction de taille des particules constituant la matière en fonction de la dureté, de l'abrasivité et de la granulométrie) et/ou à des techniques métallurgiques de séparation des minéraux (susceptibilité magnétique, densité, etc.). La dépense énergétique lors du broyage pour libérer les minéraux porteurs

## ► PLAT'INN, LA MONTÉE EN ÉCHELLE DES HALLES PILOTE

PLAT'INN est une plateforme technique de R&D destinée au développement et à l'optimisation de procédés de traitement des matières minérales et de recyclage des déchets. PLAT'INN abrite plus de 200 équipements permettant d'enchaîner des opérations unitaires et de travailler de l'échelle du gramme à plusieurs tonnes.

Cette diversité de capacités expérimentales permet, dans un premier temps, de tester des procédés à petite échelle (du gramme au kilogramme) sans mobiliser de budgets trop conséquents. Ces essais permettent de valider des principes de traitement et d'ajuster, si nécessaire, les dispositifs. La plateforme permet ensuite de mettre en œuvre des traitements à l'échelle du pilote (du kilogramme à plusieurs tonnes). Ce travail de pilotage est essentiel pour valider de nouveaux procédés, mais aussi pour optimiser le

fonctionnement des installations existantes, alimenter les modèles numériques de ces opérations et mesurer leurs performances techniques, économiques et environnementales. Dernièrement, cette capacité de pilotage a été utilisée pour tester un procédé de traitement des disques durs (800 kg) et un procédé de retraitement de déchets miniers sulfurés (4 tonnes). Les résultats obtenus ont permis d'alimenter un bilan environnemental et technico-économique.

Cette plateforme permet une grande flexibilité dans les études et se caractérise par la diversité des essais qui y sont menés – échantillonnage, comminution, séparations physiques et physico-chimiques, traitements thermiques, hydrométallurgie –, avec une forte composante sur la partie dissolution et la catalyse bactérienne, et par la diversité des objets qui y sont traités



Un procédé de traitement à Plat'Inn. © D. DEPOORTER

(déchets BTP, DEEE, déchets miniers, minerais...). Elle constitue un dispositif unique en France et rare en Europe, ouverte à tous types de collaborations avec des acteurs économiques de toutes tailles (des TPE aux grands groupes). Son action et son expertise s'inscrivent dans la mise en place d'une économie plus circulaire, à l'échelle européenne, mais également à l'échelle des territoires comme celui de la région Centre-Val de Loire. —

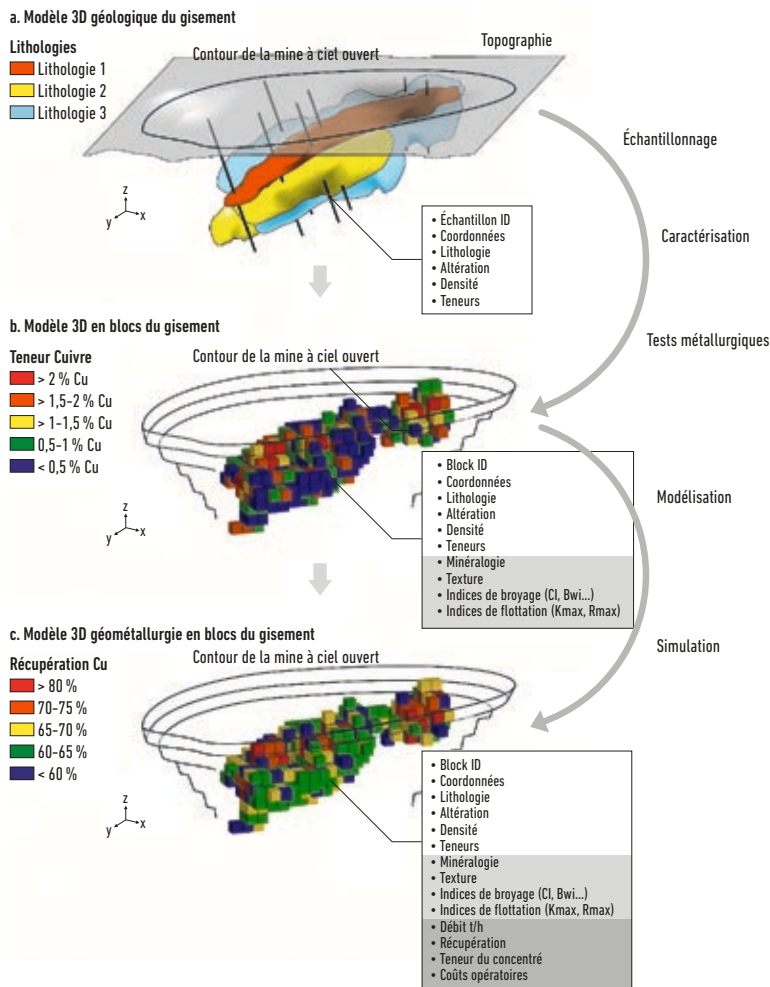
Solène TOUZE – BRGM



PHOTO 2  
Mine de bentonite sur  
l'île de Milos, en Grèce.  
© N. CHARLES, BRGM

FIGURE 3 / Illustration des étapes d'un programme géométallurgique et définition d'un modèle 3D de gisement pour la planification minière.

© QUENTIN DEHAINE (GTK)



de métaux s'accroît avec la finesse, la dispersion et la complexité minéralogique des minerais. À elles seules, ces opérations de comminution consomment 30 à 50 % de la puissance énergétique d'un site minier et environ 2 % de l'énergie mondiale (Napier-Munn, 2015). De vrais enjeux en termes de gains financiers et environnementaux tiennent à l'amélioration de ces opérations de traitement.

C'est dans ce contexte que l'industrie minière a vu l'émergence de la géométallurgie, une approche intégrée et transdisciplinaire entre les métiers de la géologie, de la minéralogie, de la mine, de la métallurgie et de la géostatistique. Elle vise à appréhender l'hétérogénéité spatiale des gisements en incorporant dans le modèle 3D les propriétés clés du minerai influençant les performances des procédés de valorisation et ainsi permettre d'évaluer ces dernières, d'établir un plan minier et une analyse financière plus robuste (figure 3). In fine, l'objectif est d'améliorer la gestion des ressources, l'efficacité énergétique des opérations de comminution, la performance des procédés métallurgiques et ainsi la valeur actualisée nette (VAN) d'un projet minier, tout en réduisant les risques opérationnels et techniques (Dominy *et al.*, 2018). Cependant, au-delà de l'aspect technique et économique, cette approche vise également l'optimisation des performances environnementales de l'exploitation, par exemple en permettant de définir les volumes et une stratégie de gestion des résidus miniers plus adaptée à l'hétérogénéité du gisement exploité et aux contextes spatio-temporels de l'exploitation (Pell *et al.*, 2021).

▼ PHOTO 3  
**Entrée du minerai sulfuré de zinc et cuivre dans un concasseur, mine souterraine de Pyhäsalmi en Finlande**

© I. DUHAMEL-ACHIN, BRGM

Métallogénie et géométagologie sont ainsi toutes deux des disciplines fondées sur la connaissance accrue des gisements et des corps minéralisés. Cette compréhension avancée permet d'exploiter et de traiter des minéralisations que l'on croyait auparavant impossibles à exploiter de façon rentable. Si l'approche géométagologique peut permettre de transformer une ancienne minéralisation en nouveau gisement, elle peut également aider à découvrir de nouveaux gisements. La réussite des campagnes d'exploration dépend de modèles métallogéniques bien développés et d'une connaissance approfondie des gisements existants. Plus le pouvoir prédictif d'un modèle de ciblage est élevé, plus la découverte de nouveaux gisements est probable. Alors que la géométagologie utilise ces données pour améliorer la performance des procédés et leur conception, les mêmes données peuvent être utilisées par les explorateurs pour améliorer les modèles métallogéniques et donc le ciblage de gisements plus rentables.

### Objectif zéro déchets

Le choix du procédé de traitement du minerai, les technologies employées et l'ordre dans lequel les combiner reposent sur un ensemble de critères économiques, techniques mais aussi sociaux et environnementaux. En fonction de la répartition des éléments valorisés et

des proportions volumiques des minéraux porteurs, ce seront aussi les volumes de résidus et déchets miniers ainsi que les impacts associés qui seront plus ou moins importants. Vérifier l'absence d'éléments pénalisants (métaux lourds, radioéléments...) permettra de garantir que la toxicité résiduelle de la matière rejetée reste négligeable ou acceptable. Les teneurs et la nature en sulfures résiduels par exemple permettront de calculer la quantité d'adjuvants de neutralisation qui seront nécessaires pour se prémunir contre le drainage minier acide (DMA). Des minéraux porteurs de radioéléments sont aussi très souvent associés aux minerais de terres rares. La recherche de ces éléments pénalisants, potentiellement dangereux pour l'environnement, permet de garantir la sécurité et la santé des travailleurs et des populations avoisinantes (présence d'amiante, de métaux lourds, de sulfures sensibles à l'oxydation et acidogènes...).

Au-delà de minimiser aussi les coûts opérationnels ou de réduire les risques industriels et la durée de la gestion après-mine, il s'avère aujourd'hui important de réduire également l'impact environnemental des projets miniers, de garantir un développement durable et de préserver la biodiversité de notre milieu de vie. La connaissance accrue des minerais fournie par la métallogénie et la géométagologie permet l'anticipation



des impacts sanitaires ou environnementaux possiblement associés et de faire des choix éclairés quant à la façon de les traiter, et de neutraliser, entreposer et stocker les résidus (Dominy *et al.*, 2018). Le cycle de vie de la matière dans une mine, de l'extraction jusqu'à la sortie d'usine, est aujourd'hui complètement repensé pour tirer profit au maximum et rentabiliser le coût de l'extraction tout en réduisant l'empreinte des stocks résiduels persistant après la fin de vie de l'exploitation. L'approche « zéro déchet » vise ainsi à maximiser la valorisation et l'utilisation des roches et minéraux extraites. De la même manière que certains minéraux porteurs de métaux peuvent être récupérés comme coproduits, les minéraux de gangue, non métalliques, peuvent également être valorisés en tant que minéraux industriels comme le quartz et les feldspaths extraits des granitoïdes et pegmatites à métaux rares. Les résidus miniers et stériles, une fois neutralisés, peuvent être utilisés comme matériaux de remblais, en granulats, ou pour la conception de matériaux innovants, comme des ciments bas carbone. À l'inverse, des projets de minéraux industriels peuvent également produire des coproduits métalliques (Dehaine et Filipov, 2015; Dehaine *et al.*, 2019). Cette démarche vise à tendre vers une économie plus circulaire et à rationaliser l'énergie dépensée pour extraire la matière du sous-sol, réduire les volumes de déchets et limiter l'utilisation de produits chimiques.

### Conclusion

La meilleure chance de voir aboutir un projet minier responsable et de garantir sa rentabilité sera de combiner les deux approches : coupler une bonne connaissance des caractéristiques physico-chimiques et spatiales du gisement avec la gestion dynamique opérationnelle du projet et l'anticipation des résultats prévisionnels, mais aussi des impacts potentiels et des risques. Ainsi, l'approche géométallurgique permet d'allier l'optimisation de la rentabilité des projets miniers avec la responsabilité sociétale et environnementale. C'est de nos jours d'autant plus indispensable que le développement des projets miniers n'est maintenant possible qu'avec l'assurance de garanties d'excellence et le consentement de la société civile consultée pour l'obtention des titres et autorisations d'exploiter auprès des autorités compétentes. ●



PHOTO 4  
Valorisation de cérusite par séparation gravimétrique dans le cadre du développement de technologies mobiles et modulaires de « small-scale mining » (Olovo, Bosnis-Herzégovine, Juillet 2019).

© J. BODIN, BRGM

**BIBLIOGRAPHIE** Dehaine Q., Tijsseling L.T., Glass H.J., Törmänen T., Butcher A.R. Geometallurgy of cobalt ores: A review. *Minerals Engineering* 2021, 160, 106656, doi: 10.1016/j.mineng.2020.106656. Napier-Munn T., Is progress in energy-efficient comminution doomed? *Minerals Engineering*, Vol. 73, 2015, p. 1-6, ISSN 0892-6875, doi.org/10.1016/j.mineng.2014.06.009. Pell R., Tijsseling L., Goodenough K., Wall F., Dehaine Q., Grant A., Deak D., Yan X., Whattoff P. Towards sustainable extraction of technology materials through integrated approaches. *Nature Reviews Earth & Environment* 2021, 2, 665-679, doi: 10.1038/s43017-021-00211-6. Dominy S.C., O'Connor L., Parbhakar-Fox A., Glass H.J., Pureverger S. Geometallurgy – A route to more resilient mine operations. *Minerals* 2018, 8, 560. Dehaine Q., Filipov L.O., Glass H.J., Rollinson G.K. Rare-metal granites as a potential source of critical metals: A geometallurgical case study. *Ore Geology Reviews* 2019, 104, 384-402, doi: 10.1016/j.oregeorev.2018.11.012. Dehaine Q., Filipov L.O. Rare earth (La, Ce, Nd) and rare metals (Sn, Nb, W) as by-product of kaolin production, Cornwall: Part1: Selection and characterisation of the valuable stream. *Minerals Engineering* 2015, 76, 141-153, doi: 10.1016/j.mineng.2014.10.006.