

Nicholas T. Arndt
Clément Ganino
Stephen Kesler

Ressources minérales

Origine, nature et exploitation

2^e édition

DUNOD

Illustration de couverture : Sapolite nickélique.
Minerai quadrillé : brèche à éléments de sapolite (ocre) et à ciment de garniérite (vert), Mine de Bonini, Poro, Nouvelle-Calédonie, 2010.

© BRGM – Valérie Laperche.

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du

droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, 2010, 2015

5 rue Laromiguière, 75005 Paris
www.dunod.com

ISBN 978-2-10-072354-6

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	1
Chapitre 1. Introduction à la géologie économique	5
1.1 Qu'est-ce que la géologie économique ?	5
1.2 Qu'est-ce qu'un minerai ? Un gisement minier ?	10
1.2.1 Qu'est-ce qu'un minerai ?	10
1.2.2 Qu'est-ce qu'un gisement ?	15
1.3 Les facteurs qui influencent la possibilité d'exploitation d'un gisement	16
1.3.1 Teneur et tonnage	16
1.3.2 Nature du minerai	19
1.3.3 Localisation du gisement	20
1.3.4 Les facteurs économiques, politiques et techniques	21
Chapitre 2. Classification, répartition et utilisation des minerais et de leurs gisements	23
2.1 Classifications des minerais	23
2.1.1 Classification par utilisation du métal ou du minéral d'intérêt	27
2.1.2 Classification par type de minéraux	28
2.2 Classifications des gisements	28
2.2.1 Une grande diversité de classifications pour une grande diversité de gisements	28
2.2.2 Vers une classification des gisements basée sur les processus minéralisateurs	32
2.3 Répartition mondiale des gisements	33
2.3.1 Les facteurs géologiques	33
2.4 Production globale, consommation et commerce des ressources minérales	39
2.5 Les échanges mondiaux de ressources minérales	47
2.6 Ressources minérales et exploitation minière en France métropolitaine	48

Table des matières

Chapitre 3. Les gisements magmatiques	53
3.1 Introduction	53
3.2 Les gisements de chromites du complexe du Bushveld, formés par une modification de la séquence de cristallisation d'un magma	53
3.3 Les gisements de magnétite et de platinoïdes du complexe du Bushveld	58
3.4 Les gisements de sulfures formés par immiscibilité magmatique	59
3.4.1 Le gisement de sulfures de nickel de Kambalda (Australie)	61
3.4.2 Les gisements de sulfures de nickel de Noril'sk-Talnakh (Russie)	65
3.4.3 Les autres gisements de sulfure de nickel	72
3.5 Les autres gisements magmatiques	73
3.6 Conclusion	74
Chapitre 4. Les gisements hydrothermaux	77
4.1 Introduction	77
4.2 Les facteurs clés pour la formation d'un gisement hydrothermal	78
4.2.1 La source de fluides	78
4.2.2 Source de métaux	84
4.2.3 Le moteur de la circulation des fluides	86
4.2.4 Un site et un mécanisme de précipitation	87
4.3 Les principaux exemples de gisements hydrothermaux illustrant les processus métallogéniques	89
4.3.1 Les systèmes hydrothermaux liés aux eaux météoriques – Gisements épithermaux	89
4.3.2 Les systèmes hydrothermaux liés à l'eau de mer – Gisements VMS (sulfures massifs volcanogéniques) ou d'amas sulfurés	96
4.3.3 Les systèmes hydrothermaux magmatiques : cuivre porphyrique et gisements de skarns	104
4.3.4 Les systèmes hydrothermaux liés à l'eau des bassins : gisements MVT, SEDEX, d'uranium et de cuivre dans les argiles	113
4.3.5 Les systèmes hydrothermaux métamorphiques – Les gisements d'or orogénique	131
4.3.6. Les systèmes hydrothermaux transitionnels	134
4.4 Conclusion	142
Chapitre 5. Les gisements formés par des processus sédimentaires et de surface	145
5.1 Introduction	145
5.2 Les gisements de placers	147
5.2.1 Les placers à or	149
5.2.2 Les minéraux lourds dans les plages de sable	157

5.2.3 Les diamants alluviaux	158
5.2.4 Les autres placers : étain, platine, thorium–uranium	161
5.3 Les gisements de fer sédimentaires	161
5.3.1 Introduction	161
5.3.2 Catégories et caractéristiques des gisements de fer	162
5.4 Les autres gisements sédimentaires : Mn, phosphates, nitrates, sels, soufre	169
5.5 Les latérites	170
5.5.1 La bauxite	170
5.5.2 Les latérites à Ni	176
5.5.3 Les autres gisements latéritiques	179
5.6 L'altération supergène	180
5.7 Conclusion	182
Chapitre 6. Avenir de la géologie économique	185
6.1 Introduction	185
6.2 Le « pic de pétrole » et d'autres substances	186
6.3 L'exploitation des terres rares, éléments peu courants mais nécessaires en petites quantités pour des produits de haute technologie	193
6.4 L'exploitation du lithium, un exemple d'interaction entre géographie, économie, politique, environnement et prospection	195
6.5 L'exploitation et l'exploration minière dans le futur	198
6.6 La position de la Chine dans le marché mondial des minerais	199
6.7 Le permis social d'exploitation minière	203
6.7.1 La prospection de Pebble, en Alaska (États-Unis)	204
6.7.2 Rosia Montană, Roumanie	205
6.7.3 Les mines de fer du nord de la Suède	206
6.7.4 La prospection Tennie en France	207
6.8 Conclusion	208
Références	209
Index	215

AVANT-PROPOS

Pendant l'année qui a précédé l'écriture de ce livre, les prix des métaux se sont élevés à des niveaux record avant de perdre la moitié de leur valeur. L'augmentation des prix a été provoquée par l'accélération de la demande de la Chine et des autres pays émergents ; la chute a été provoquée par la crise économique mondiale. Lorsque les prix étaient élevés, les compagnies d'exploration minière ont lancé de nombreux programmes pour trouver de nouvelles ressources minérales, et ont créé des emplois de géologue explorateur. La chute des prix a étouffé cette demande. Lorsque l'activité économique reprendra, la production repartira à la hausse dans les gisements en exploitation et la prospection de nouveaux gisements sera stimulée. Il y aura de nouveau un besoin en géologues ayant des connaissances sur la formation des gisements et sur la géologie économique.

Contrairement à la plupart des autres pays, la France a été suffisamment avisée pour maintenir des enseignements de géologie dans les programmes du collège et du lycée, et les étudiants débutent leur cursus universitaire avec quelques connaissances rudimentaires sur le fonctionnement de la planète Terre. Les cours proposés par les universités sont très variés et vont de l'étude des processus pétrologiques et des phénomènes sédimentaires, jusqu'à la géophysique du manteau en passant par les questions environnementales. Mais l'enseignement de la formation et de l'exploitation des gisements miniers n'apparaît pas dans les unités d'enseignement proposées. Les étudiants préparant le CAPES ou l'agrégation de sciences de la vie, de la terre et de l'univers sont quasiment les seuls à y être confrontés : les programmes de ces concours les obligent à avoir quelques notions de géologie économique, sans pour autant qu'ils disposent de livres récents en français traitant de ce sujet.

Nous avons choisi d'intituler ce livre *Ressources minérales : origine, nature et exploitation* plutôt que d'utiliser les termes de « géologie », ou « métallogénie », car notre objectif n'est pas uniquement d'apporter des informations sur les questions scientifiques sur la nature et l'origine des gisements, mais également d'expliquer comment, où, et pourquoi les substances minérales sont utilisées dans la société moderne, et d'illustrer à quel point la société a besoin des minerais. Comme nous le montrons dans le premier chapitre, les définitions d'un minerai et d'un gisement sont basées sur des facteurs économiques (un minerai est un matériel dont l'extraction génère un profit). Pour traiter de façon compréhensible le sujet, il est nécessaire de discuter de ce qui distingue les différents gisements miniers et de ce fait, quelques connaissances minimales sur les aspects commerciaux des opérations minières et sur les échanges mondiaux des matières minérales sont indispensables.

L'activité dans ce domaine est cyclique, et si l'industrie minière est temporairement en léger déclin, avec la croissance économique mondiale alimentée par la Chine et les autres pays émergents, les géologues seront bientôt de nouveau convoités. Le développement de l'activité coïncidera avec la prise de conscience croissante de la fragilité de notre planète, particulièrement vis-à-vis du réchauffement climatique. Des appels à un « développement durable » accompagneront la reprise de croissance économique, et l'extraction, le transport, la purification et l'utilisation des ressources minérales seront l'objet de contrôles minutieux. Les étudiants ont peu d'enseignements dans ce domaine et s'ils disposent de cours sur l'écologie et l'environnement, l'activité minière y est présentée comme très néfaste. Par le passé, l'exploration et l'exploitation de gisements miniers ont effectivement entraîné des dommages mais sur des superficies heureusement limitées. Une activité minière ne tenant pas compte des conséquences environnementales ne sera plus permise à l'avenir. Cependant, l'Homme ne peut se passer d'acier et d'aluminium – pour construire des éoliennes, par exemple – ni de cuivre et de silicium pour construire des panneaux solaires. Même si le recyclage des métaux gagne en importance et en efficacité, du minerai devra encore être extrait et cela pour longtemps. Ce sont ces aspects ainsi que d'autres problèmes du même ordre qui sont traités dans notre livre.

Nous avons souhaité ajouter des exercices afin d'illustrer la complexité, les contradictions ainsi que les dilemmes posés par les besoins en ressources naturelles de la société. Nous traitons de la question du moment, ou plus exactement de la possibilité que les ressources en divers métaux soient un jour épuisées. Nous prenons en compte la notion de développement durable et d'atteinte à l'environnement liée à l'exploitation minière. Actuellement les besoins des pays industrialisés sont en partie assouvis par l'importation de minerai des pays moins développés. Nous essayons enfin de considérer les aspects économiques et éthiques de ces échanges. Le premier auteur est de culture anglo-saxonne ayant une certaine expérience dans les activités minières. Il a tendance à accepter les points de vue du second auteur – appartenant à une génération « éco-lo-rationaliste » très sensibilisée aux problèmes liés à la préservation de l'environnement – généralement plus modérés. Enfin, le troisième auteur a une grande expérience des processus minéralisateurs et de la géochimie de l'environnement. Dans cet ouvrage, nous n'avons pas hésité à exprimer nos points de vue différents. Un étudiant français – dont les connaissances sur l'exploitation et les échanges mondiaux des ressources minérales proviennent sans doute des médias locaux – accueillera certains de nos exemples avec surprise, mais nous n'avons pas modéré notre discours pour nous conformer aux opinions dominantes. Au contraire, nous avons illustré cet ouvrage d'exemples délibérément provocateurs pour interroger le lecteur et encourager de véritables discussions sur ces problèmes importants.

Dans les deux premiers chapitres ainsi que dans le dernier, les aspects géologiques et économiques sont traités de façon équilibrée. Nous y définissons les termes de minerai et de gisement, et nous discutons de leurs diverses classifications, expliquant que l'étude des gisements miniers est intrinsèquement liée à des facteurs économiques. Nous y expliquons aussi comment la viabilité des gisements miniers dépend directement du prix du métal, qui dépend lui-même de la balance entre la disponibilité des ressources et les volumes de substances dont la société a besoin. Le thème

central de ces chapitres concerne donc les facteurs qui contrôlent la demande de la société et la manière par laquelle la découverte de nouveaux gisements répond à la demande. Un panorama de la répartition mondiale des gisements est donné – dans quels lieux les minerais sont extraits, où sont-ils purifiés, et où la substance utile finale est-elle consommée. Le second chapitre se termine par quelques éléments – hélas essentiellement historiques – sur les ressources minérales et sur l'exploitation minière en France.

Les trois chapitres qui suivent sont plus géologiques. Nous y traitons de la nature et de l'origine de trois grandes catégories de gisements : ceux formés par des processus magmatiques, ceux qui résultent de la précipitation de minéraux à partir de fluides hydrothermaux et ceux qui se forment lors de processus sédimentaires et de surface. L'accent est mis sur les processus et l'objectif n'est pas de décrire exhaustivement les gisements miniers mais plutôt d'aborder les quelques mécanismes de formation importants en se basant sur des exemples connus. Les ressources « minérales » en eau et en combustibles fossiles sont absentes de cet ouvrage. Les matières carbonées (charbon, houille, pétrole ou gaz naturel) sont des substances exploitées massivement et qui génèrent d'immenses profits pour les pays d'où elles sont extraites. Leur processus de formation par accumulation, préservation et maturation de matière organique n'est pas détaillé ici car il s'agit d'un processus essentiellement biochimique. D'autre part, l'exploitation de l'eau est une activité singulière pour laquelle les ressources sont liées à la fois au climat et aux qualités du sous-sol drainé. Les caractéristiques et l'exploitation des ressources en eau sont l'objet d'étude de l'hydrologie et ne seront donc pas présentées dans ce livre consacré exclusivement aux processus métallogéniques essentiellement pétrologiques et géochimiques.

Le dernier chapitre traite enfin du futur de la géologie économique, en France et par le monde.

Nous tenons à remercier Chris Arndt, Anne-Marie Boullier, Dominique Decobecq, Mélina Ganino, Jon Hronsky, Emilie Janots, Elaine Knuth, Jérôme Nomade, Michel Piboule, Gleb Pokrovski, Céline Ganino, Richard Goldfarb, Richard Kyle, John Thompson, Jeffrey Hedenquist, Kurt Kyser, Mark Hannington, Murray Hitzman, Olivier Vidal et Éric Marcoux pour leur lecture attentive et leurs commentaires et suggestions d'améliorations à cet ouvrage. Nous remercions également Grant Cawthorn, Axel Hofmann, Kurt Konhauser et Peter Mueller pour les photographies qu'ils nous ont fournies.

Nicholas ARNDT, Clément GANINO et Stephen KESLER

INTRODUCTION À LA GÉOLOGIE ÉCONOMIQUE

PLAN

- 1.1 Qu'est-ce que la géologie économique ?
- 1.2 Qu'est-ce qu'un minerai ? Un gisement minier ?
- 1.3 Les facteurs qui influencent la possibilité d'exploitation d'un gisement

OBJECTIFS

- Comprendre en quoi consiste la géologie économique
- Comprendre ce qu'on appelle un gisement minier
- Connaître les facteurs qui contrôlent l'exploitabilité d'un gisement

1.1 QU'EST-CE QUE LA GÉOLOGIE ÉCONOMIQUE ?

Pour commencer ce chapitre, intéressons-nous à la figure 1.1, qui traite de l'évolution du prix du cuivre, des teneurs moyennes en cuivre dans le minerai et de la quantité totale de cuivre extraite depuis 1900. Ainsi qu'à la figure 1.2 qui montre l'évolution des réserves. Au début du siècle dernier, la tonne de cuivre coûtait 7 000 US\$ (prix rapporté à la valeur actuelle du dollar) ; jusqu'en 2002, son prix a été divisé par trois et a baissé jusqu'à 1 800 US\$, puis, au cours des trois dernières années précédant 2008 (année d'écriture de ce livre), son prix a fortement augmenté jusqu'à environ 7 000 US\$. Pendant la même période, la quantité totale de cuivre extraite a augmenté graduellement, à l'exception des périodes au début des années 1920 et au début des années 1930 pendant lesquelles le prix et la production ont baissé. En 2008-2009, le prix et la production ont également chuté avant de remonter lentement après. Comment expliquer ces changements ? Que représentent-ils par rapport à la découverte de gisements, l'extraction de minerai et l'utilisation des métaux par la société ? Comprendre ces concepts est la base de la géologie économique.

La France a été autrefois un pays minier exploitant de riches gisements de charbon, de bauxite, de fer et d'autres métaux, ainsi que d'uranium. Les scientifiques français étaient à l'avant-garde sur le terrain et ont contribué activement à la compréhension des processus de formation des gisements. Comme dans les autres pays, les