

RESSOURCES MINÉRALES

Origine, nature et exploitation

Nicholas T. Arndt

Professeur à l'université Joseph-Fourier, Grenoble

Clément Ganino

Maître de conférences
à l'université de Nice - Sophia Antipolis

Préface de Claude Allègre

DUNOD

Illustration de couverture : fer rubané de la mine de fer Tom Price, Palabora, Australie
(Photographie de Kurt Konhauser).

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, Paris, 2010
ISBN 978-2-10-055081-4

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° 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.

PRÉFACE

Depuis le milieu du XIX^e siècle, l'étude des gisements minéraux a occupé une place centrale dans l'enseignement et la recherche des sciences géologiques. Du coup, la géologie occupait une place centrale dans l'économie.

Dans les années soixante-dix, à la suite du célèbre rapport au Club de Rome « Halte à la croissance » qui annonçait une pénurie généralisée de matières premières, il y eut de par le monde des initiatives et des financements pour stimuler encore plus les recherches dans ces domaines.

Puis, très brutalement, l'intérêt est retombé et, en conséquence, l'activité aussi.

La raison était économique.

En partie à cause de l'évolution technologique qui a minimisé leur usage, en partie par suite de l'essor d'une industrie du recyclage, les réserves de matières premières sont apparues comme suffisantes. Les cours ont chuté. L'industrie minière s'est reconcentrée sur quelques grands groupes. La prospection minière a considérablement diminué, et les emplois de géologues avec. Du coup, l'activité d'enseignement et de recherche a chuté dans tous les grands pays industrialisés, sauf peut-être au Canada et en Australie.

Aujourd'hui, nouveau choc, la conjoncture se retourne.

L'essor économique des grands pays asiatiques, Chine, Inde, Corée, bientôt Indonésie, nécessite de plus en plus de matières premières minérales. Le développement des nouvelles technologies, soit énergétiques, soit informatiques, nécessite l'usage de métaux rares qu'on a jusque-là peu prospectés (indium, lithium, tantale, terres rares) et dont les réserves prouvées semblent très insuffisantes. Avec la reprise du développement du nucléaire, l'uranium devient lui aussi une ressource potentiellement rare.

Du coup, la nécessité de reprendre l'activité de prospection minière devient une urgence. Mais il y a un hic, il y a un préalable, c'est de former des spécialistes. Car la majorité des anciens experts sont à la retraite. Il faut aussi s'engager vers une activité de recherche fondamentale en géochimie afin de prospecter les métaux rares et l'uranium et les gisements métalliques à faibles teneurs.

Ce livre concerne la métallogénie, c'est-à-dire la science des gisements minéraux. Cette science est au carrefour de la géochimie, de la pétrographie, de la géologie structurale mais aussi de la chimie et de la métallurgie. Science carrefour, science difficile et pourtant, comme on l'a dit, indispensable aux sociétés humaines. Mais les gisements minéraux posent un extraordinaire et fascinant problème géochimique

Préface

en eux-mêmes. Comment et pourquoi des éléments chimiques habituellement dispersés dans l'écorce terrestre se concentrent-ils en quelques lieux ? Si l'on comprend ces processus, on comprendra à coup sûr quelques mécanismes géochimiques fondamentaux.

C'est dans ce contexte que doit être situé le livre de Nicholas Arndt et Clément Ganino.

Il va opportunément combler une grande lacune.

Bien documenté, bien écrit, combinant descriptions géologiques précises et interprétations géochimiques, cherchant à replacer les problèmes géologiques dans le contexte économique mondial, il constitue un excellent livre de référence pour les étudiants, mais aussi les chercheurs en géosciences qui voudraient apprendre ou se réorienter vers un domaine qui va à coup sûr connaître une seconde jeunesse.

Il faut chaleureusement féliciter les auteurs pour cette excellente initiative qui vient à point nommé !

Claude ALLÈGRE

TABLE DES MATIÈRES

Préface de Claude ALLÈGRE	V
Avant-propos	XI
Chapitre 1 • Introduction à la géologie économique	1
1.1 Qu'est-ce que la géologie économique ?	1
1.2 « Pic » de cuivre et d'autres substances	5
1.3 Qu'est-ce qu'un minerai ? Un gisement minier ?	10
1.3.1 Qu'est-ce qu'un minerai ?	10
1.3.2 Qu'est-ce qu'un gisement ?	14
1.4 Les facteurs qui influencent la possibilité d'exploitation d'un gisement	16
1.4.1 Teneur et tonnage	16
1.4.2 Nature du minerai	18
1.4.3 Localisation du gisement	20
1.4.4 Les facteurs économiques, politiques et techniques	20
Bibliographie	21
Chapitre 2 • Classification, répartition et utilisation des minerais et 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	29
2.2.1 Une grande diversité de classifications pour une grande diversité de gisements	29
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	34
2.3.2 Les facteurs géographiques, économiques, politiques et sociologiques	36
2.4 Production globale, consommation et commerce des ressources minérales	36
2.5 Ressources minérales et exploitation minière en France métropolitaine	47
Bibliographie	50

Table des matières

Chapitre 3 • Les gisements magmatiques	51
3.1 Introduction	51
3.2 Les gisements de chromites du complexe du Bushveld, formés par une modification de la séquence de cristallisation d'un magma	51
3.3 Les gisements de magnétite et de platinoïdes du complexe du Bushveld, formés par des processus magmatiques et/ou hydrothermaux	56
3.4 Les gisements de sulfures formés par immiscibilité magmatique	58
3.4.1 Le gisement de sulfures de nickel de Kambalda (Australie)	59
3.4.2 Les gisements de sulfures de nickel de Noril'sk-Talnakh (Russie)	64
3.4.3 Les autres gisements de sulfure de nickel	72
3.5 Les autres gisements magmatiques	72
3.6 Conclusion	74
Bibliographie	74
 Chapitre 4 • Les gisements hydrothermaux	 77
4.1 Introduction	77
4.2 Les facteurs clés pour la formation d'un gisement hydrothermal	77
4.2.1 Source de métaux	78
4.2.2 Source et nature des fluides	79
4.2.3 Le moteur de la circulation des fluides	81
4.2.4 Un site et un mécanisme de précipitation	82
4.3 Les principaux exemples de gisements hydrothermaux illustrant les processus métallogéniques	83
4.3.1 Les gisements d'amas sulfurés ou « sulfures massifs volcanogéniques » (ou VMS <i>Volcanogenic Massive Sulfide</i>)	84
4.3.2 Les gisements de porphyres	93
4.3.3 Les gisements sédimentaires exhalatifs (SEDEX)	101
4.3.4 Les gisements de type Vallée du Mississippi ou « Mississippi Valley Type » (MVT)	105
4.4 Les autres types de gisements hydrothermaux	108
4.4.1 Les gisements stratiformes de cuivre contenus dans les sédiments	109
4.4.2 Les gisements d'uranium	110
4.4.3 Les gisements d'oxyde de fer, cuivre, or (en anglais <i>Iron-Oxide copper gold (IOCG) deposits</i>)	113
4.4.4 Les gisements d'or	114
4.4.5 Les gisements de skarn	118
4.5 Conclusion	118
Bibliographie	119

Chapitre 5 • Les gisements formés par des processus sédimentaires et de surface	121
5.1 Introduction	121
5.2 Les gisements de placers	123
5.2.1 Les placers à or	125
5.2.2 Les minéraux lourds dans les plages de sable	132
5.2.3 Les diamants alluviaux	134
5.2.4 Les autres placers : étain, platine, thorium–uranium	136
5.3 Les gisements de fer sédimentaires	136
5.3.1 Introduction	136
5.3.2 Catégories et caractéristiques des gisements de fer	138
5.4 Les autres gisements sédimentaires : Mn, phosphates, nitrates, sels, soufre	143
5.5 Les latérites	145
5.5.1 La bauxite	145
5.5.2 Les latérites à Ni	150
5.5.3 Les autres gisements latéritiques	152
5.6 L'altération supergène	152
Conclusion	155
Bibliographie	155
Chapitre 6 • Avenir de la géologie économique	157
6.1 Introduction	157
6.2 L'exploitation des terres-rares, éléments peu courants mais nécessaires en petites quantités pour des produits de haute technologie	158
6.3 L'exploitation du lithium, un exemple d'interaction entre géographie, économie, politique, environnement et prospection	159
6.4 Conclusion : l'exploitation et l'exploration minière dans le futur	162
Références	165
Index	169

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 ultralibérale : il ne se déconcerte pas et croit sincèrement tout ce qui est écrit dans ce livre ; les points de vue du second auteur – appartenant à une génération « écolo-rationaliste » sensibilisée aux problèmes liés à la préservation de l'environnement – sont plus nuancés. 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, Marie Dubernet, Mélina Ganino, Jon Hronsky, Emilie Janots, Elaine Knuth, Jérôme Nomade, Michel Piboule, Gleb Pokrovski et Chrystèle Verati 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 et Clément GANINO

INTRODUCTION À LA GÉOLOGIE ÉCONOMIQUE

1

PLAN

- 1.1 Qu'est ce que la géologie économique ?
- 1.2 « Pic » de cuivre et d'autres substances
- 1.3 Qu'est ce qu'un minerai et qu'est ce qu'un gisement minier ?
- 1.4 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. 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. 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 disciplines

comme la gîtologie, la géologie minière et la métallogénie étaient enseignées dans toutes les universités et de nombreux géologues trouvaient des emplois dans ces domaines en France ou dans ses colonies. Tout cela a changé lors des dernières décennies du ^{xx}e siècle, tandis que les mines ont fermé les unes après les autres en France et tandis que les colonies ont gagné leur indépendance. Dans les années 1990, très peu de cours de géologie minière ont été proposés dans les formations universitaires. Cependant, au cours des dernières années, les choses ont très rapidement changé, les étudiants trouvent facilement des emplois de géologue sur le terrain (rarement en France mais très couramment à l'étranger) et les cours sur les gisements métallifères ouvrent de nouveau. Les raisons de ce changement sont celles présentées dans la figure 1.1, à savoir, la hausse du coût des matières premières.

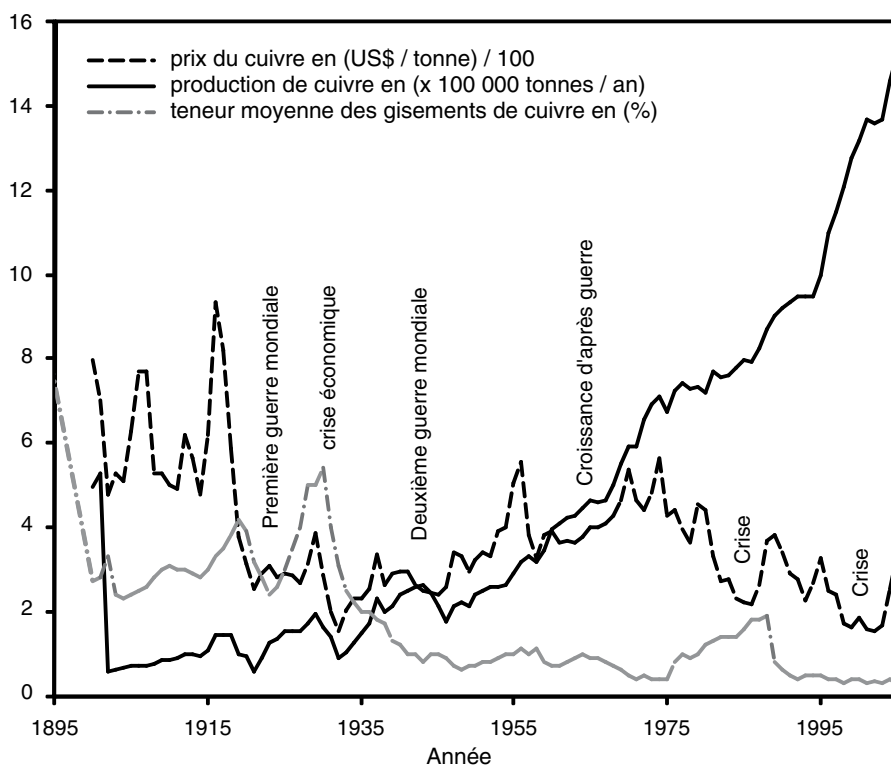


Figure 1.1 – Évolution de la production et du prix du cuivre au cours des 120 dernières années.

Statistiques de l'USGS, Mineral Resources Program, disponibles sur internet à l'adresse <http://minerals.usgs.gov/products/index.html>.

Comment expliquer les tendances globales ; la large corrélation entre prix et teneur du minerai, l'anticorrélation entre prix et production et les périodes qui mentent à la règle dans les années 1930 et dans les dernières années ? Considérons tout d'abord

la tendance globale de baisse des prix. Pourquoi le prix du cuivre en l'an 2000 atteignait-il seulement 30 % de son prix un siècle plus tôt ? Réfléchissons aux raisons fondamentales de cette baisse de prix :

1. Une première raison en apparence contradictoire est l'épuisement des gisements riches et facilement exploitables. Ces gisements n'étant plus exploités, on s'est intéressé aux gisements avec de plus faibles concentrations en cuivre. La teneur moyenne en cuivre des gisements exploités est passée d'environ 1 % à la fin du XIX^e siècle à environ 0,5 % au début du XXI^e siècle. Pendant la même période, les exploitations à proximité des centres industriels en Europe et aux États-Unis ont fermé, tandis que de nouvelles mines ont été ouvertes, souvent sous des climats hostiles et avec des conditions d'exploitation difficiles, loin des régions où le métal est utilisé. On pourrait penser que cette tendance est associée à une raréfaction du cuivre, une baisse de l'offre qui, selon le principe économique de l'offre et la demande, devrait avoir entraîné une hausse du prix. C'est en fait l'inverse qui s'est produit à l'échelle du siècle. Pourquoi ?
2. La raison principale qui explique la diminution du prix du cuivre est l'amélioration de la technologie : l'augmentation de l'efficacité de l'exploitation des mines, qui comprend un certain nombre d'étapes depuis la recherche de nouveaux gisements, jusqu'à l'extraction du minerai et enfin la purification des métaux à partir du minerai. Il y a cent ans, il était possible d'exploiter uniquement les gisements contenant des teneurs relativement élevées en cuivre, à condition qu'ils soient proches de la surface et localisés à proximité des centres industriels. Seuls quelques gisements exceptionnellement grands et présentant des teneurs très élevées étaient exploités dans des régions éloignées (par exemple le gisement de Cu-Ni-platinoïdes de Sudbury au Canada ou le gisement de Broken Hill en Australie). Les améliorations des techniques d'extraction et de purification ont tout changé. Les mines de cuivre sont désormais de gigantesques exploitations, la plupart du temps des mines à ciel ouvert, qui extraient des centaines de milliers de tonnes de minerai par jour. En plus de cet avantage d'échelle, l'utilisation de techniques modernes rend désormais possible l'exploitation de minerai dont les teneurs en cuivre sont relativement faibles (de l'ordre de 0,5 %).

Intéressons nous maintenant aux détails des évolutions illustrées dans la figure 1.1. La baisse du prix du cuivre dans les années 1930 et la diminution de la production du cuivre correspondante coïncident avec la grande dépression. L'économie mondiale s'est effondrée, la demande en cuivre a baissé, entraînant immédiatement des répercussions sur le prix. L'inverse s'est produit au début du XXI^e siècle. Les « miracles économiques » en Chine et, dans une moindre mesure, en Inde, ont fait exploser les demandes industrielles et sociales de près de 2 milliards d'individus (figure 1.2). La construction des téléphones portables et des centrales électriques dont ils ont besoin (pour vivre d'une façon comparable aux Européens ou Nord-Américains), a rendu nécessaire une accélération de la production de cuivre. L'offre a en fait augmenté bien plus lentement que la demande et le prix de ce métal s'est rapidement élevé.

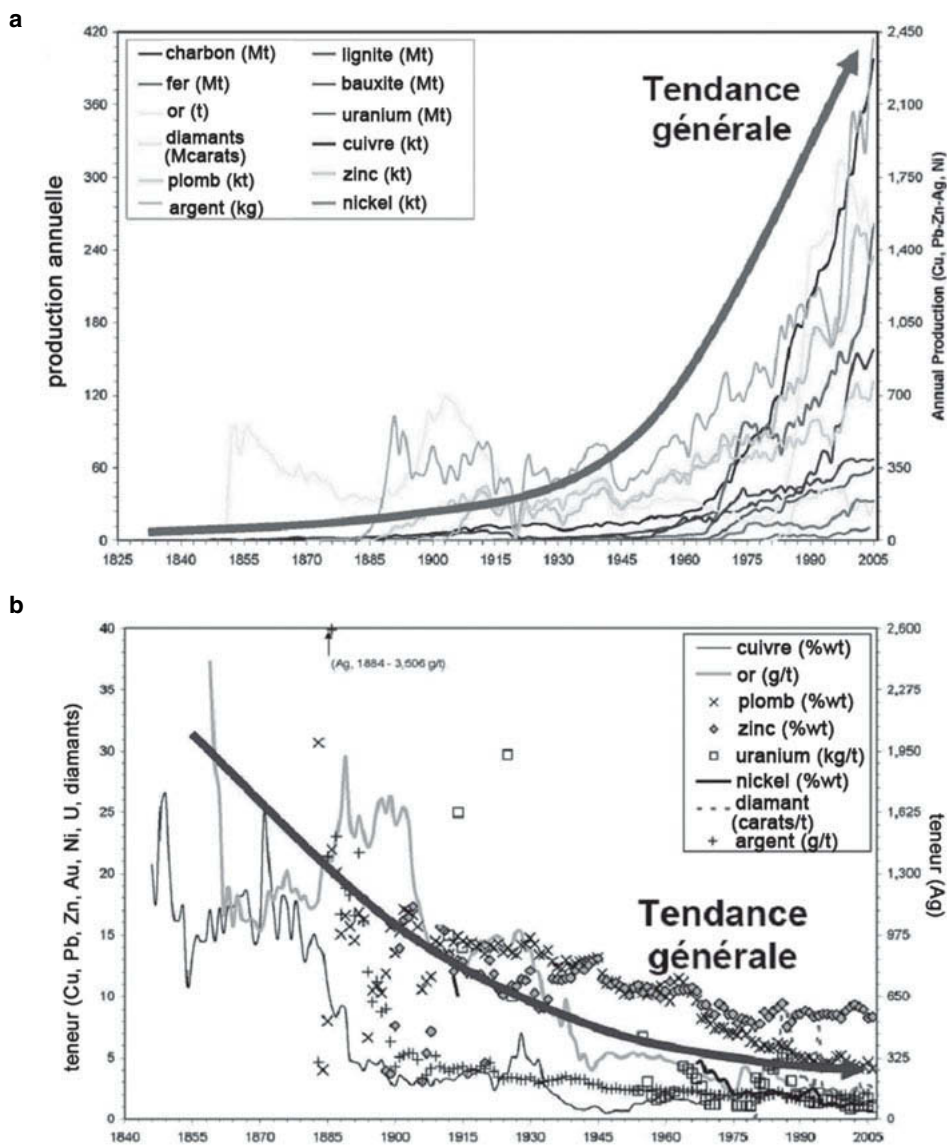


Figure 1.2 – (a) Évolution de la production de métaux depuis le milieu du XIX^e siècle. (b) Évolution de la teneur moyenne des gisements depuis le milieu du XIX^e siècle.

Source : Mudd (2007).

Comment cette forte demande a-t-elle été accueillie ? Il n'est pas possible de découvrir quotidiennement de nouveaux gisements et en moyenne, il s'écoule 7 à 12 ans entre la mise en place d'un nouveau programme d'exploration et le démarrage de l'exploitation du gisement. La production de cuivre a augmenté régulièrement pendant les deux dernières décennies. Cette augmentation a débuté pendant une période de

baisse de prix et s'est poursuivie avant 2008 alors que le prix du cuivre a triplé. Depuis, la crise financière a largement réduit la production industrielle, la demande en matières premières et finalement le prix du cuivre.

Dans un premier temps, l'augmentation de la production a été possible grâce à l'amélioration des techniques d'extraction et de purification et grâce à l'ouverture de nouvelles grandes mines à forte production (particulièrement en Amérique du Sud et en Océanie). Mais pendant les années 1990, de nombreuses mines ont été déficitaires, le coût d'exploitation étant difficilement couvert par la vente du métal. Depuis 2005, alors que le prix du cuivre a augmenté, les mines jusqu'alors déficitaires ont soudainement réalisé d'importants profits. D'autres gisements, découverts et évalués par les compagnies d'explorations mais dont l'exploitation – qui n'était pas rentable dans les années 1990 avec des prix du cuivre très bas – n'avait pas été engagée, sont subitement devenus intéressants. Le gisement n'a pas été modifié, il contient toujours la même concentration et la même quantité de cuivre, ainsi que la même position géographique et géologique. Mais un gisement qui n'était pas économiquement rentable en 1998 est devenu potentiellement très rentable en 2008. Ces idées nous amènent à considérer plusieurs définitions fondamentales pour la géologie économique.

1.2 « PIC » DE CUIVRE ET D'AUTRES SUBSTANCES

Exercice 1.1

Étudiez les déclarations suivantes et expliquez en quoi elles nous renseignent sur les idées répandues à propos de la géologie économique et de l'industrie minière.

Les écologistes anglais ont proposé l'application d'un nouvel impôt sur les métaux « rares » comme l'argent, le plomb et le cuivre. Que pensez-vous de cette suggestion ?

Un journaliste a récemment suggéré qu'une guerre pourrait se déclarer à propos des dernières gouttes de pétrole. Est-ce un concept raisonnable et réaliste ?

Dans les années 1990 un chercheur japonais a développé un nouveau type de catalyseur dans lequel le platine (Pt) est remplacé par du manganèse (Mn). Est-ce une découverte importante ?

ÉLÉMENTS DE SOLUTION. Considérons la dernière déclaration. Pourquoi le remplacement du platine par du manganèse dans les catalyseurs assemblés sur les nouvelles voitures serait une découverte importante ? La réponse est liée au prix de ces deux métaux. En février 2008, le platine était vendu 100 € par gramme et le manganèse 10 cents par gramme (10 000 €/t) soit 1 000 fois moins cher. Il est clair que si le manganèse pouvait remplacer le platine, les catalyseurs seraient alors beaucoup moins coûteux. Actuellement, le coût du métal correspond à la moitié du coût du catalyseur, donc si le manganèse remplaçait le platine, le coût serait à peu près divisé par deux (hélas, ce processus ne fonctionne pas et le platine continue d'être un métal très recherché). Mais la question qui est soulevée ici

est : pourquoi le platine est-il beaucoup plus cher que le manganèse ? Considérons les deux autres déclarations. Elles reposent sur l'idée que nos ressources naturelles en certains métaux et en pétrole vont bientôt être totalement extraites et épuisées. Est-ce un concept raisonnable ? Une façon d'exprimer cette idée est celle du « *peak-oil* » (pic de pétrole), idée que la production globale de pétrole est passée (ou va passer très bientôt) par un maximum et que la croissance mondiale va connaître de graves difficultés (Peut être avez-vous vu une émission à la télévision montrant une flotte aérienne échouée dans un aéroport, les dernières gouttes de kérosène ayant été utilisées).

Historiquement, les seules ressources naturelles qui ont été presque totalement épuisées sont paradoxalement renouvelables.

Le spermaceti est ainsi un organe très riche en lipides situé dans le crâne des cachalots, qui a été un produit très rentable de l'industrie baleinière au XVIII^e et XIX^e siècles. Il était utilisé comme huile de haute qualité pour les lampes, et comme lubrifiant. Un « pic de spermaceti » s'est déroulé au début du XX^e siècle alors que la pêche excessive avait réduit considérablement le nombre de cachalots. Les prix ont augmenté drastiquement ce qui a conduit à la recherche et à la découverte de substituts : l'électricité à la place des lampes à huile et l'huile de jojoba en tant que lubrifiant. La demande pour le spermaceti a alors connu une chute, alimentée par la pression écologique de réduire ou d'interdire la chasse à la baleine et maintenant, les « stocks de cachalots » se reconstruisent lentement tandis que même les baleiniers japonais ne parlent plus de les chasser.

Exercice 1.2 – « *Pic de spermaceti* » = « *pic de pétrole* » ?

Dans ce premier chapitre, nous venons de faire une comparaison entre la production et la consommation de deux substances très différentes : le spermaceti et le pétrole. La première est un produit naturel renouvelable (à condition que les cachalots ne soient pas chassés jusqu'à extinction ou menacés par les multiples pollutions anthropiques). La seconde est une ressource fossile, dont le processus de formation a duré plusieurs millions d'années et qui ne sera plus produite en quantité dans les quelques années à venir. Le spermaceti a été utilisé pendant le XIX^e siècle, mais uniquement par une partie privilégiée et très limitée de la population mondiale. Le pétrole est utilisé actuellement partout sur la planète. Il est source d'énergie pour les populations riches comme pour les populations plus pauvres, et joue un rôle essentiel dans notre société industrialisée moderne. L'épuisement des ressources pétrolières, si elle se produit dans les années à venir, aurait sans doute des conséquences beaucoup plus dramatiques que l'absence de spermaceti. Est-il ridicule d'associer spermaceti et pétrole (comme l'a exprimé l'un des lecteurs attentifs de ce livre), ou est-ce que cette comparaison a un sens ? Discutez.

Un parallèle peut être fait avec l'exploitation de tout autre produit naturel, pétrole inclus. Même s'il y a peu de doute que la production d'hydrocarbures et de gaz naturel passera bientôt par un « pic », peut être cette décennie, peut être beaucoup plus tard, cela ne signifie pas clairement que le « pic » est lié à l'épuisement des réserves de pétroles. Comme l'offre diminue, ou est perçue comme en diminution, le prix va connaître une hausse qui entraînera inévitablement une baisse de la demande. L'utilisation du pétrole va décliner et nous apprendrons à moins gaspiller d'énergie (amélioration des systèmes de transport, chauffage plus efficace) ou à trouver des sources d'énergie alternatives ; de la même manière que les pressions de la société et du corps scientifique ont contribué à bannir la chasse au cachalot, elles vont désormais limiter l'utilisation du pétrole afin de réduire la vitesse du réchauffement climatique.

Un autre parallèle peut être proposé avec la production des ardoises, qui ont été très utiles pour couvrir les toitures des maisons. Le « pic d'ardoises » a eu lieu au début du ^{xx}e siècle, puis la production a diminué sans que l'on puisse pour autant mettre en cause l'épuisement des ressources. Le coût et les efforts importants nécessaires à la construction des toits en ardoises ont simplement été les facteurs limitants, et des matériaux de substitution ont été trouvés.

Récemment, des articles de journaux et des blogs ont commencé à parler du « pic de cuivre ». L'idée que nous allons bientôt manquer de ressources naturelles, métaux inclus, n'est pourtant pas nouvelle. Malthus dans son fameux article de 1798 intitulé « An Essay on the Principle of Population, as it Affects the Future Improvement of Society with Remarks on the Speculations of Mr. Godwin, M. Condorcet, and Other Writers », prédisait que l'augmentation de la population épuiserait rapidement l'offre en nourriture et en ressources naturelles. Cette idée a depuis été régulièrement diffusée. Dans le livre « Limits to Growth », Meadows et ses collaborateurs ont élaboré des modèles dans lesquels la population et la consommation augmentent exponentiellement tandis que le taux de découverte de nouvelles ressources augmente linéairement ou pas du tout.

La conséquence, présentée dans la figure 1.3, est l'épuisement rapide des ressources naturelles auxquelles appartiennent les ressources minières. D'après ce modèle, présenté en 1970 lorsque le livre de Meadows a été écrit, tout le cuivre devrait avoir été épuisé en 2009 lorsque nous écrivons ce livre. Ce n'est pas du tout ce qui s'est passé et le cuivre continue d'être exploité de par le monde. En 1970, en prenant en compte la consommation de cuivre de l'époque, la quantité totale de métal connue dans des gisements clairement identifiés était suffisante pour répondre à la demande pendant 21 à 48 ans selon les hypothèses faites. Le tableau 1.1 compare les échéances prévues pour l'épuisement du cuivre et de six autres métaux, telles qu'estimées par Meadows et ses collaborateurs, à d'autres estimations faites en 2009 par Mining Environmental Management, un journal industriel. Malgré 40 ans de consommation, les estimations des échéances avant épuisement de ces métaux ont très peu changé, et dans certains cas elles ont même augmenté ! Comment cela est-il possible ?

Tableau 1.1 – Échéances avant épuisement de plusieurs métaux, telles qu'estimées en 1972 et en 2009.

	1972 (S)	1972(L)	2009
Aluminium	31 *	55	131
Cuivre	21	48	32
Or	9	29	16
Fer	93	173	178
Nickel	53	96	41
Argent	13	42	13
Zinc	18	50	17

* nombre d'années estimé avant que le métal ne devienne cher et son offre limitée.

1972 (S) – Indice exponentiel de Meadows *et al.* (1972).

1972 (L) – Indice exponentiel de Meadows *et al.* (1972) en prenant en compte des ressources cinq fois supérieures à celles connues à l'époque.

2009 – Estimation du Mining Environmental Management.

Plusieurs facteurs sont en fait entrés en jeu. Le premier facteur est tout d'abord, la découverte de nouveaux gisements. Il est important de comprendre que les compagnies minières et les agences gouvernementales n'ont aucun intérêt à dépenser de l'argent pour trouver des ressources qui ne seront pas exploitées dans un avenir proche. Si une compagnie minière ou un gouvernement ont prouvé qu'il existe suffisamment de cuivre dans les gisements connus pour les 2 ou 3 prochaines décennies, et que ce cuivre peut être exploité avec les technologies actuelles, il n'est pas utile de chercher davantage de ressources.

Le second facteur, qui n'a pas été considéré à sa juste valeur par Meadows, est l'impact des progrès technologiques. Ils permettent à des gisements d'être exploités même s'ils sont de faible teneur, et ils rendent économiquement viable l'extraction des substances utiles à partir d'autres ressources minérales. Plusieurs exemples de l'évolution des techniques d'extraction et de purification du minerai seront donnés dans les prochains chapitres.

Pour ces raisons, plusieurs spécialistes estiment que l'offre en métaux et en autres substances minérales sera suffisante pour les besoins de la société pour les décennies à venir. Les autres paramètres, associés à l'augmentation de la population mondiale et qui avaient été correctement identifiés par Meadows et ses collaborateurs en 1972, pourraient avoir des conséquences plus graves. Même si l'on pense qu'avec l'amélioration des modes de vie et du niveau d'éducation dans les pays en voie de développement, le taux de croissance de la population devrait diminuer, l'addition de 1 à 2 milliards de personnes à la population déjà existante exercera une contrainte sévère sur l'exploitation des ressources de la planète. La compétition croissante pour la nourriture et l'eau, les diverses conséquences d'une pollution de plus en plus

1.2 • « Pic » de cuivre et d'autres substances

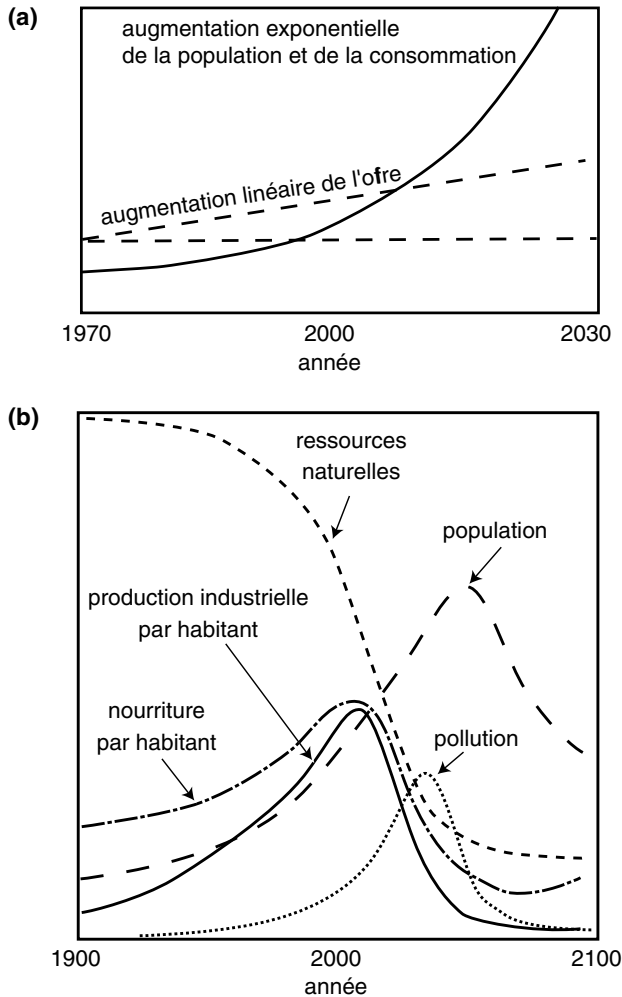


Figure 1.3 - Modèle d'évolution des ressources naturelles, de la nourriture et de la production industrielle par habitant, ainsi que de la pollution et de la population.

D'après Meadows, *The Limits to Growth*.

importante et de façon plus limitée la raréfaction du pétrole, seront des défis majeurs pour l'humanité. Au contraire, et même si une véritable vision à long terme est très difficile, nous déclarons que les ressources en cuivre et en la plupart des autres substances minérales ne seront JAMAIS épuisées.

Pour comprendre pourquoi nous devons discuter de la définition d'un gisement.

1.3 QU'EST-CE QU'UN MINERAI ? UN GISEMENT MINIER ?

1.3.1 Qu'est-ce qu'un minerai ?

D'après la définition généralement acceptée, un minerai est un matériau solide naturel qui contient une substance utile dont l'extraction génère des profits. Il y a plusieurs éléments clés dans cette définition. On entend par « substance utile » l'idée que la matière doit être utile voire essentielle à la société, comme le sont par exemple les métaux, les ressources énergétiques, ou certains minéraux présentant des propriétés particulières. Une liste représentative des substances utiles est proposée dans le tableau 1.2.

Tableau 1.2 – Propriétés et utilisation de quelques substances utiles (éléments, minéraux et roches).

Famille	Substance utile	Utilisations/propriétés
Métaux alcalins	Césium (Cs)	Source de radioactivité (horloge atomiques, médecine)
	Lithium (Li)	Anode de batterie
	Potassium (K)	Industrie pharmaceutique
	Rubidium (Rb)	Cellules photovoltaïques, verre de sécurité
	Sodium (Na)	Industrie pharmaceutique, cosmétique, pesticides
Métaux alcalino-terreux	Baryum (Ba)	Piégeage des gaz résiduels dans les tubes cathodiques
	Béryllium (Be)	Agent durcissant de certains alliages
	Calcium (Ca)	Production d'alliages
	Magnésium (Mg)	Industries chimiques et pharmaceutiques, production d'alliages
	Radium (Ra)	Luminescence (aiguilles de montre)
	Strontium (Sr)	Vernis et glaçures des céramiques, tubes cathodiques
Métaux de transition	Argent (Ag)	Joannerie, orfèvrerie, photographie
	Cadmium (Cd)	Accumulateurs électriques, alliages
	Chrome (Cr)	Alliage (résistance à la corrosion et brillance de l'acier inoxydable)
	Cobalt (Co)	Alliages, catalyseur dans l'industrie chimique et pétrolière
	Cuivre (Cu)	Conducteurs électriques, alliages

1.3 • Qu'est-ce qu'un minerai ? Un gisement minier ?

Tableau 1.2 – Propriétés et utilisation de quelques substances utiles (éléments, minéraux et roches). (Suite)

Famille	Substance utile	Utilisations/propriétés
Métaux de transition (suite)	Fer (Fe)	Constructions métalliques
	Hafnium (Hf)	Filaments des lampes à incandescence, réacteurs nucléaire, alliages, processeurs
	Iridium (Ir)	Alliages (durcissement des alliages de platine), traitement des lunettes de ski (aspect miroir)
	Manganèse (Mn)	Alliages, piles électriques, engrais
	Mercure (Hg)	Industrie pharmaceutique, cathodes, lampes à fluorescence, plombages dentaires, piles électriques, thermomètres
	Molybdène (Mo)	Alliages (durcissement de l'acier), catalyseur (industrie pétrolière)
	Nickel (Ni)	Alliages, accumulateurs électriques, cordes de guitare
	Niobium (Nb)	Alliages, aimants supraconducteurs
	Or (Au)	Joannerie, orfèvrerie, monnaie, dorure
	Osmium (Os)	Alliages (avec les platinoïdes) : pointes de stylo plumes, pacemaker
	Palladium (Pd)	Composants électroniques (téléphones cellulaires, ordinateurs...), catalyseur, capteur d'hydrogène, joannerie
	Platine (Pt)	Catalyseur, capteur d'hydrogène, alliages (résistance à la température), joannerie
	Rhénium (Re)	Alliages, joints des cellules à enclumes de diamant
	Rhodium (Rh)	Catalyseur, tubes à rayons X, miroir (réverbération et dureté), joannerie
	Ruthénium (Ru)	Alliages (renforce la résistance du titane à la corrosion), disques durs, supraconducteurs
	Scandium (Sc)	Alliages (surtout d'aluminium), lampe à halogène métallique
	Tantale (Ta)	Condensateurs électroniques
	Technétium (Tc)	Imagerie médicale
	Titane (Ti)	Pigment, alliages
	Tungstène (W)	Carbure de tungstène utilisé dans la formation des pièces d'usure industrielles
	Vanadium (V)	Additif dans l'acier, catalyseur

Tableau 1.2 – Propriétés et utilisation de quelques substances utiles (éléments, minéraux et roches). (Suite)

Famille	Substance utile	Utilisations/propriétés
Métaux de transition (suite)	Yttrium (Y)	Tubes cathodiques, laser (YAG), alliages supraconducteurs
	Zinc (Zn)	Galvanisation (protection de l'acier contre la corrosion par dépôt d'une fine couche de Zn), laiton (alliage cuivre-zinc)
	Zirconium (Zr)	Enveloppe du combustible nucléaire, faux diamants
Métaux pauvres	Aluminium (Al)	Transport, emballage, construction, fils électriques
	Bismuth (Bi)	Fusible, verre, céramiques, industries pharmaceutique et cosmétique
	Étain (Sn)	Bronze (cuivre et étain), fer blanc (acier recouvert d'étain) des boîtes de conserves, électronique (étamage et soudures), monnaies
	Indium (In)	Cellules photovoltaïques, détecteurs infrarouges, médecine nucléaire
	Plomb (Pb)	Accumulateurs électriques (batteries de voiture), conduites d'eau, gouttières, cristallerie, munitions
	Thallium (Tl)	Thermomètres basse température, détecteurs infrarouges
Minéraux et roches	Diamant	Dureté, propriétés esthétiques
	Corindon ou « émeri »	Dureté
	Talc	Douceur, propriétés lubrifiantes
	Pierre ponce	Abbrasivité
	Amiante	Résistance au feu
	Mica	Résistance au feu, isolation électrique
	Diatomite	Propriétés filtrantes
	Barytine	Densité (boue de forage)
	Andalousite	Caractère réfractaire
	Disthène	Caractère réfractaire
	Albite	Fusibilité
	Halite	Alimentation, aptitude à baisser la température de fusion de l'eau (déneigage)
	Calcite	Propriétés optiques (rend les papiers et peintures brillants)

Les utilisations du cuivre, le métal pris en exemple jusqu'à présent, sont évidentes. Sans ce métal (ou d'autres métaux aux propriétés similaires), il n'y aurait pas de postes de télévision, de centrales électriques, de TGV ou d'ustensiles de cuisine en laiton. Les autres métaux, comme le fer, le manganèse, le titane et l'or, ont une multitude d'utilités différentes dans la société dans laquelle on vit et quelques-unes sont énumérées sur le site internet de l'USGS (United States Geological Survey) à l'adresse <http://minerals.usgs.gov/granted.html>. Mais la définition de minerai inclut également les ressources énergétiques, et en particulier le charbon et l'uranium. Le pétrole est normalement exclu de la définition qui est restreinte aux solides, mais le bitume que l'on trouve dans des gisements comme les sables bitumineux d'Athabasca au Canada pourrait être considéré comme un minerai. Enfin, il existe toute une gamme de substances, généralement de faible coût, qui sont extraites et sont également considérées comme des ressources minérales : cette liste comprend les matériaux utilisés en construction comme les calcaires dont on fait le ciment, mais également les granulats dont on fait les routes, les engrais, les abrasifs, et même le sel.



ENCART 1.1 Le « criticality index » du United States Geological Survey (USGS)

En 2007, un comité de géologues et d'économistes travaillant dans plusieurs organisations gouvernementales et universités des États-Unis, a publié un rapport dans lequel l'offre en un grand nombre de métaux et de substances minérales est évaluée. Ce rapport (disponible à l'adresse internet http://dels.nas.edu/dels/rpt_briefs/critical_minerals_final.pdf) est consacré à la situation américaine, mais les principales conclusions s'appliquent également aux pays européens. Le comité a défini un indice, nommé « criticality index » (figure 1.4) qui considère l'importance de la substance dans notre société industrielle (axe des abscisses) et le risque de restriction de son offre (axe des ordonnées). L'importance d'une substance ne dépend finalement pas tant de la quantité qu'on en utilise, mais de si elle est critique pour certaines utilisations, et de si elle peut être substituée par d'autres matériaux. De son côté, le risque de restriction de l'offre dépend de facteurs comme la possibilité pour un produit d'être produit localement ou la nécessité d'importation, la localisation des sources et la stabilité politique des pays exportateurs. Dans la figure 1.4, nous voyons que le cuivre est relativement important mais ne comporte pas de risque réel d'approvisionnement dans la mesure où ce métal est produit à la fois au États-Unis et dans de nombreuses régions du monde. Les terres rares et les platinoïdes, au contraire, sont utilisés de façon très spécifique et sont très difficiles à remplacer. Comme ils sont produits dans un nombre assez restreint de régions pas forcément très stables, leur « criticality index » est très élevé.

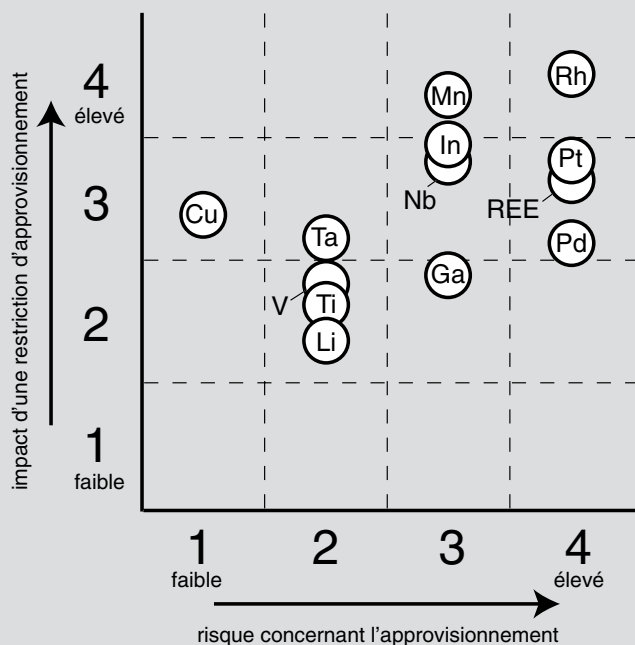


Figure 1.4 – Le « criticality index » de l'USGS pour quelques métaux.
Le Rh est parmi les métaux les plus « critiques ».

1.3.2 Qu'est-ce qu'un gisement ?

Un gisement est une accumulation de substance utile qui est présente en concentration suffisante pour être extraite en générant des profits. Dans cette définition se trouvent à la fois les termes « substance utile » et « profit » : c'est une définition géologique et économique. Pour comprendre ces idées, considérons l'exercice suivant.

Exercice 1.3 – Choix d'un site d'exploitation

Imaginons que vous soyez directeur d'une compagnie minière et qu'un prospecteur vienne vous proposer d'acheter une propriété parmi la liste suivante. Votre tâche serait alors de décider quel est le meilleur gisement pour une exploitation dans les 5 à 10 ans à venir.

1. Un gisement de 10 millions de tonnes avec 0,2 % de Cu à Lille.
2. Un gisement de 1 million de tonnes avec 1 % de Cu à Lille.

3. *Un gisement de 10 millions de tonnes avec 2 % de Cu à Maamorilik (côte ouest de Groenland).*
4. *Un gisement de 10 millions de tonnes avec 5 % de Cu dans le nord-ouest du Pakistan.*
5. *Un gisement de 5 millions de tonnes avec 1 % de Cu à Lille.*
6. *Un gisement de 1 000 millions de tonnes avec 0,8 % de Cu à Lille.*
7. *Un gisement de 1 000 millions de tonnes avec 0,8 % de Cu dans le Parc des Écrins (Alpes).*

ÉLÉMENTS DE SOLUTION. Vous pouvez voir que cette liste comprend sept gisements de cuivre qui se distinguent par leur taille, leur teneur en cuivre et leur localisation. Pour faire un choix, le plus facile est d'éliminer les gisements les moins attractifs parce qu'ils sont trop petits, parce que leur teneur en cuivre est trop faible, ou parce qu'ils sont situés dans des régions inhospitalières. Pour vous aider dans ce choix, vous vous rappellerez que nous avons dit dans la partie précédente que les gisements de cuivre exploités contiennent en général plusieurs centaines de millions de tonnes de minerai dont la teneur moyenne en cuivre est environ 0,8 %. Avec cette information, nous pouvons éliminer le gisement numéro 1, dont la teneur en cuivre est trop faible, et le gisement numéro 2 qui est trop petit. Le gisement de Maamorilik, situé sur la côte ouest du Groenland à environ 500 km au nord du cercle arctique, est peu attractif à cause de sa taille (assez petite) et de sa localisation¹ (dans une région au climat extrême et éloignée des centres industriels). Compte tenu de l'état de guerre qui existe dans la « zone tribale » du nord-ouest du Pakistan (gisement numéro 4), aucune compagnie minière responsable n'envisagerait d'exploiter un gisement dans cette région. Le gisement 7 est situé dans un Parc National. Il ne fait aucun doute que l'ouverture d'une exploitation minière dans ce site naturel ferait face à de vives protestations de la population et à des pressions politiques. Le département du Pas-de-Calais, dans laquelle se trouvent les deux derniers gisements, a eu une longue histoire minière. Si une exploitation devait être ouverte en France métropolitaine, c'est sans doute dans cette région qu'elle serait le mieux accueillie. Pour choisir entre ces deux gisements on peut comparer la masse totale de métal : le gisement numéro 5 contient 50 000 tonnes, alors que le gisement numéro 6 contient 8 millions de tonnes (Mt). La très grande quantité de métal contenue dans le gisement 6 pourrait compenser l'excédent de dépense lors de l'exploitation d'un minerai un peu moins concentré.

1. Des gisements plus importants pourraient être intéressants. Le gisement de Pb-Zn de Black Angel, également situé à Maamorilik, a été exploité à partir de 1973 et a fermé en 1990 à cause de la diminution du prix des métaux (l'évolution des prix du plomb et du zinc a suivi une même tendance que celle du prix du cuivre montrée en figure 1.1). En 2006, le retrait d'un glacier sur la côte du Groenland a fait apparaître un gisement immense de Zn-Pb-Ag dont le minerai, très riche en métaux, est actuellement exploité – enfin un effet positif du réchauffement climatique ?

1.4 LES FACTEURS QUI INFLUENCENT LA POSSIBILITÉ D'EXPLOITATION D'UN GISEMENT

1.4.1 Teneur et tonnage

Quelques éléments sur les relations entre la teneur, le tonnage et la viabilité d'un gisement ont été montrés dans l'exercice 1. Pour qu'un gisement soit exploitable, il faut qu'il contienne plus qu'une concentration minimale et un tonnage minimal d'une valeur marchande. La figure 1.5a montre de façon très schématique que les gisements sont disposés sur une courbe entre de très petits gisements très riches comme les monocristaux de cuivre et l'immense gisement de teneur beaucoup plus faible que forme la Terre entière. La plupart des gisements qui sont à la fois grands et de fortes teneurs ont été exploités et il reste désormais des gisements petits et à fortes teneurs et d'autres gisements beaucoup plus grands mais avec de plus faibles teneurs.

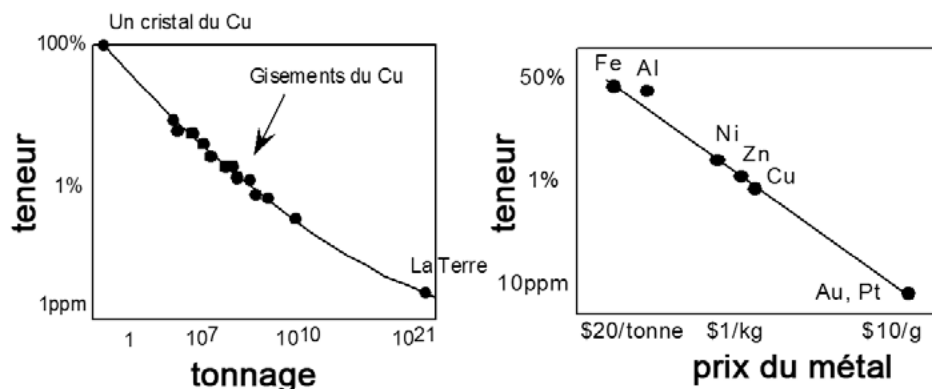


Figure 1.5 – Teneur moyenne des gisements en fonction de leur tonnage (a) et en fonction du prix du métal (b).

La figure 1.5b donne une idée grossière de la relation qui existe entre la teneur dans les gisements et le prix des métaux (cette relation sera examinée en détail dans une section ultérieure). La plupart des métaux abondants et présents en concentrations élevées dans les minerais ont un prix relativement faible ; d'autres métaux présents dans des concentrations beaucoup plus faibles ont un prix beaucoup plus élevé.

Dans tout gisement, la teneur du minerai est variable, depuis de petites zones de minerai riche jusqu'à de plus grandes zones avec des teneurs inférieures. Les valeurs présentées dans la figure 1.5a sont les teneurs moyennes du minerai extrait, mélange de minerai de haute et basse teneur en métal. La partie du gisement pour laquelle on n'extrait pas le métal est généralement très similaire au minerai duquel le métal est extrait, mais sa concentration en métal est inférieure à un certain seuil. Ce paramètre important est la teneur-limite (*cut-off grade* en anglais). Inclure ce minerai « pauvre » au minerai « riche » extrait serait une opération non rentable : le coût de l'exploitation

1.4 • Les facteurs qui influencent la possibilité d'exploitation d'un gisement

minière du minerai « pauvre » dépasserait la valeur du métal récupéré. Mais que se passe-t-il si le prix du métal augmente ?

Exercice 1.4 – Estimation des réserves exploitables d'un gisement en fonction de l'évolution de la teneur limite

La figure 1.6 est un schéma théorique d'un hypothétique dépôt de minerai : un cœur riche, comprenant du minerai à forte teneur en métaux est entouré par un volume plus important de roche dont les teneurs en métaux sont plus faibles. On considère que la densité moyenne du minerai est 2,9. Les teneurs sont en pourcentages massiques. Supposons que le prix du cuivre augmente de 4 000 \$ à 8 000 \$ par tonne, comme il l'a fait au cours de la période 2004 à 2008. Comment évoluent (1) la teneur-limite, (2) la quantité de minerai pouvant être exploitée et (3) la masse de cuivre extraite ?

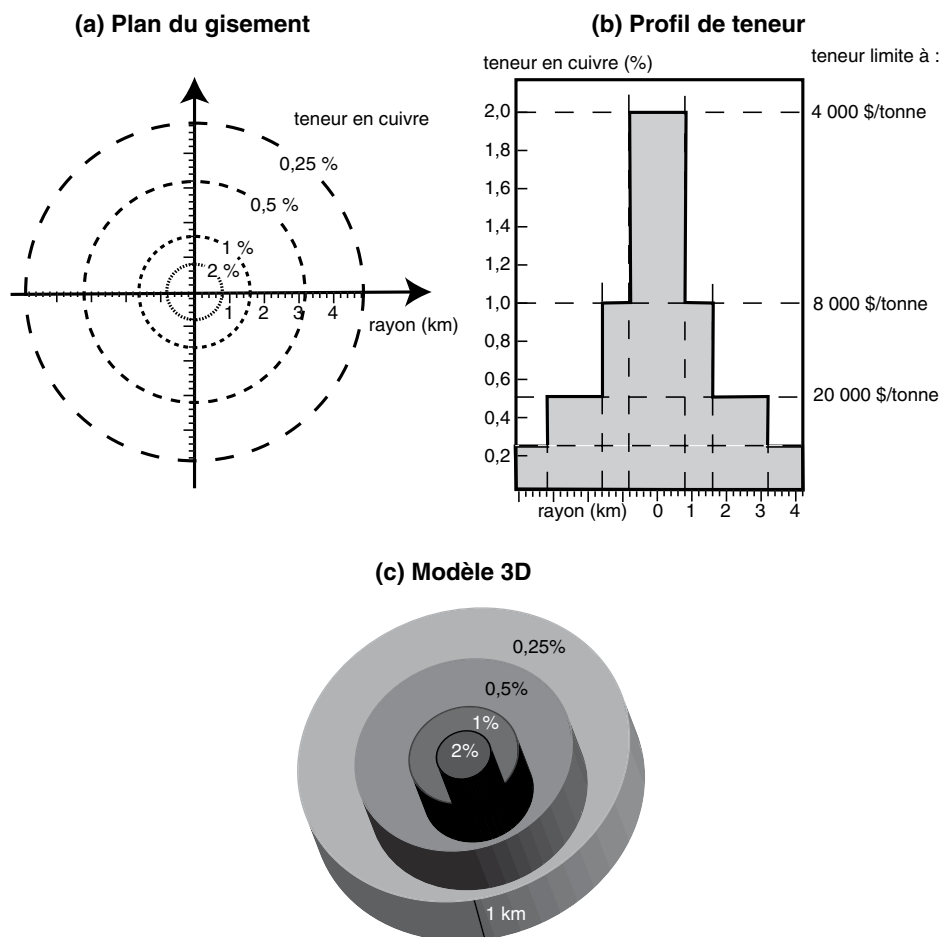


Figure 1.6 – Cas d'un gisement théorique cylindrique de cuivre.

ÉLÉMENTS DE SOLUTION.

(1) L'augmentation du prix conduit à une baisse de la teneur-limite (figure 1.6b).
(2) La conséquence est qu'une quantité beaucoup plus grande de minerai peut être exploitée et que la (3) quantité de cuivre extraite augmente. Dans l'exemple, le rayon de la zone qui peut être exploitée augmente de 1,6 à 2,7 km lorsque la teneur-limite baisse de 1 % à 0,5 %. La masse de minerai qui peut être exploité dépend du carré de cette distance (en supposant que la profondeur maximale de l'exploitation minière reste fixé à 1 km) et le volume passe de $8,0 \text{ km}^3$ ($= \pi \times 1,6^2 \times 1$) à $22,9 \text{ km}^3$ ($= \pi \times 2,7^2 \times 1$). La masse de minerai extrait passe donc de $23,3 \times 10^9$ tonnes à $66,4 \times 10^9$ tonnes. En prenant en compte le minerai de plus faible teneur désormais exploitable, (0,5 % au lieu de 1 %), la masse de cuivre extrait augmente fortement, passant de 233×10^6 tonnes (Mt) à 449×10^6 tonnes.

Cet exemple illustre clairement comment la quantité de métal que l'on peut extraire dépend de son prix. En poursuivant cette idée, si la société exige un métal pour lequel aucun substitut n'existe, son prix augmente régulièrement au fur et à mesure que les roches faiblement concentrées en métal deviennent du minerai et nécessitent des purifications coûteuses. Il y a bien sûr des limites et des complications à ce modèle, mais ce type d'argument nous amène à penser que théoriquement, les ressources en de nombreux métaux ne seront jamais épuisées, mais que les prix seront amenés à augmenter.

1.4.2 Nature du minerai

Plusieurs autres facteurs influencent fortement la possibilité d'exploitation d'un gisement. Un facteur important est la nature du minerai. Les caractéristiques à prendre en considération sont par exemple le type de minéraux, la taille des grains et la texture du minerai, qui influencent le coût de l'exploitation minière et de la purification du métal. Prenons, par exemple les deux principaux types de minerai de nickel : magmatique et latéritiques. Dans le minerai magmatique on exploite des minéraux sulfurés – principalement la pentlandite, $(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$, alors que dans le minerai latéritique on exploite la garniérine (une argile) ou la goethite (hydroxyde de Fe). Chaque minerai a ses avantages et ses inconvénients. L'énergie nécessaire pour extraire le minerai de nickel est beaucoup plus importante dans le cas des minerais latéritiques, et c'est un inconvénient majeur dans la période actuelle où le coût de l'énergie augmente. En contrepartie dans le cas du minerai magmatique, la purification du nickel à partir de minerai sulfuré produit de grandes quantités de soufre dont seule une partie est vendue. Le reste constitue un polluant et un déchet toxique qui doit être éliminé. Selon les pressions politiques et économiques sur l'utilisation de l'énergie et sur l'élimination des déchets, l'un ou l'autre des types de gisement est privilégié.

1.4 • Les facteurs qui influencent la possibilité d'exploitation d'un gisement

La taille des grains et la dureté du minerai influencent le coût de son broyage en fine poudre. Cette opération est généralement nécessaire pour les purifications en raffinerie ou en fonderie. Les trois gisements de Pb-Zn ($\pm$ Cu) australiens sont un exemple frappant (figure 1.7) : tous ont des teneurs identiques en métaux, mais le dépôt à Broken Hill a été métamorphisé sous le faciès granulite. Le métamorphisme a entraîné la formation de gros minéraux, très faciles à traiter ; le gisement du Mt Isa a été moins fortement métamorphisé et son minerai à grains fins est moins attractif ; enfin le minerai de McArthur River n'est presque pas métamorphisé et son minerai à des grains si fins que les sulfures ne peuvent pas être séparés des autres minéraux par un simple broyage.

Mentionnons également dans cette partie les éléments mineurs qui augmentent ou diminuent la valeur d'un minerai. Dans de nombreux cas, le minerai contient d'autres métaux à des concentrations inférieures aux teneurs-limites d'exploitation, mais si ces métaux sont récupérés lors de la purification du minerai principal, ils peuvent contribuer de manière significative à la rentabilité d'un gisement. Des exemples de ces métaux « bonus » sont l'or ou l'argent contenus dans les minerais de cuivre et les platinoïdes contenus dans les minerais Ni. En revanche, la présence de petites quantités d'autres métaux peut compliquer le processus d'extraction et de diminuer la valeur du minerai. C'est le cas des métaux « toxiques » parmi lesquels le phosphore que contient parfois le minerai de fer.

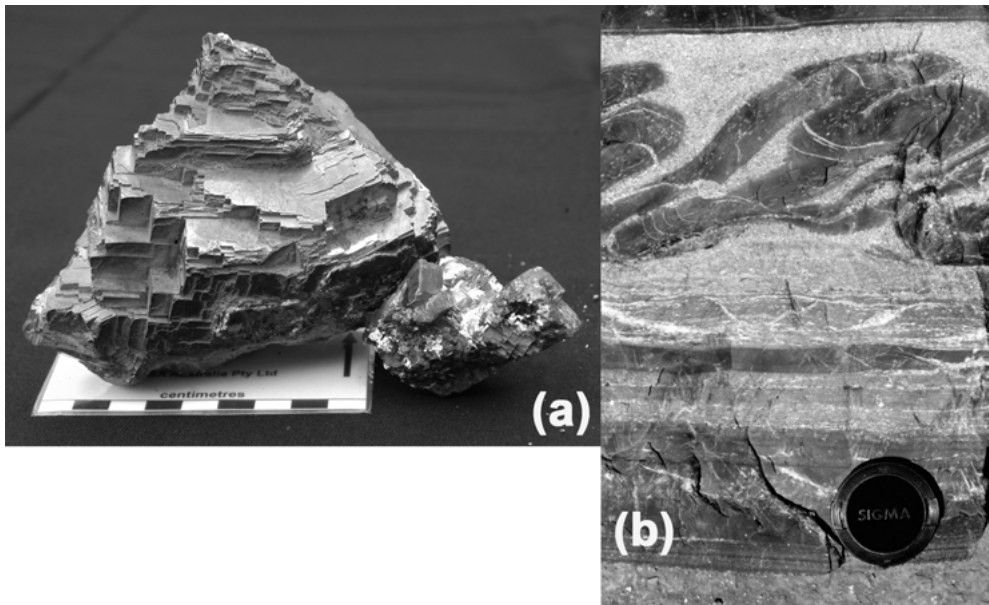


Figure 1.7 – Influence de la taille de grain sur : (a) les cristaux massifs de galène du minerai de Pb-Zn du gisement de Broken Hills, Australie (photographie : Chris Arndt) et (b) le minerai de Pb-Zn à grains fins du gisement de Mt Isa , Australie (photographie : Peter Muhling).

1.4.3 Localisation du gisement

Dans l'exercice 1.1, nous avons souligné l'influence de la localisation d'un gisement. Sa valeur et sa viabilité sont réduites lorsqu'il est éloigné des régions industrielles et peuplées, lorsqu'il est situé dans un climat hostile ou dans une région politiquement instable. Tous ces facteurs augmentent le coût de l'exploitation minière, le coût du transport des produits et le risque d'installation d'une exploitation.

La localisation géologique est également un paramètre important : le plus grand gisement de nickel que nous connaissons est au centre de la Terre. Le noyau contient quelque 10^{19} tonnes de nickel métal mais il est évidemment totalement inaccessible (sauf pour les héros de films américains). La profondeur d'un gisement a une influence majeure sur le coût d'exploitation. Un gisement peu profond peut être exploité dans une mine à ciel ouvert, qui est une alternative bien moins onéreuse que l'exploitation d'une mine souterraine, nécessaire pour les gisements plus profonds.

D'autre part, la nature du minerai peut être importante pour son coût d'exploitation. Les minerais sédimentaires friables et peu résistants sont creusés plus facilement que les roches magmatiques plus dures.

Enfin, un corps minéralisé compact et regroupé est beaucoup plus facile à exploiter qu'un corps minéralisé discontinu et entrecoupé de failles. Deux gisements de platine au sud de l'Afrique apportent une illustration intéressante. Les gisements de platine de l'intrusion du Bushveld (Afrique du Sud) sont formés de couches quasi continues, qui rendent l'exploitation prévisible et très efficace. Au contraire, les gisements situés dans une autre intrusion, le « Great Dyke » du Zimbabwe, même s'ils ont des teneurs équivalentes, sont tellement irréguliers et découpés par des failles que leur exploitation est rendue très difficile. Le déséquilibre politique et la fragilisation de l'économie du pays rend toute exploitation encore plus difficile.

1.4.4 Les facteurs économiques, politiques et techniques

Comme illustré dans les exemples discutés précédemment, les critères économiques et diplomatiques peuvent influencer considérablement la viabilité d'un gisement. Dans certains cas, ils favorisent l'installation d'une exploitation et augmentent la valeur d'un gisement, tandis que dans d'autres cas, ils empêchent toute exploitation.

Le développement technologique a une influence positive sur les exploitations minières : c'est grâce à l'amélioration des techniques d'extraction et de purification que nous sommes capables d'exploiter des minerais de cuivre de moins en moins concentrés comme nous l'avons illustré en début de chapitre.

Un autre exemple marquant est le retour en activité des mines d'or en Australie. Les minerais de la région Coolgardie-Kalgoorlie ont été découverts en 1892 et au début, l'exploitation n'a porté que sur l'or alluvial. L'exploitation s'est poursuivie au début du XX^e siècle par la création de mines souterraines. Les haldes contenant les « déchets » des mines se sont multipliés aux alentours des villes qui se développaient

1.4 • Les facteurs qui influencent la possibilité d'exploitation d'un gisement

rapidement. Dans la seconde partie du siècle, les gravats contenus dans les haldes ont été retraités 3 ou 4 fois, et à chaque traitement, de l'or a été de nouveau extrait. Ce phénomène est lié à la hausse brutale du cours de l'or, notamment avec la fin de la position de l'or comme référence pour définir les monnaies en 1971 et la plus récente augmentation du prix de l'or liée au boom du prix des métaux. Mais, de façon concomitante avec ces pressions économiques, il y a également eu des progrès technologiques considérables, qui ont notamment permis l'extraction d'or à partir du minerai qui était jusqu'alors impossible. Les progrès les plus récents dans ce domaine consistent en un lessivage des haldes par des fluides contenant des bactéries qui phagocytent l'or. Des progrès énormes ont également été faits dans l'exploitation des mines, comme en témoignent les immenses mines à ciel ouvert consacrées aux grands gisements peu profond et de faible teneur de cuivre, or, et autres métaux.

Enfin, l'économie globale et locale, ainsi que la situation politique, peuvent influencer fortement la viabilité d'un gisement, comme nous l'avons illustré dans les exemples décrits précédemment.

Bibliographie

JAQUES A.L., HULEATT M.B., RATAJKOSKI M. et TOWNER R.R., « Exploration and discovery of Australia's copper, nickel, lead and zinc resources 1976-2005 » (2005), *Resources Policy*, 30, 168-185.

MEADOWS D.H., MEADOWS D.L., RANDERS J. et BEHRENS, *The Limits to Growth* (1972), W.W. New York Library, 207 pp.

MUDD G.M., « Quantifying Sustainable Mining : Production, Reporting and Beyond (2007) », Minerals Council of Australia – Sustainable development conference, Cairns.

USGS Mineral Resources Websites

<http://minerals.usgs.gov>

<http://minerals.usgs.gov/minerals/>

CLASSIFICATION, RÉPARTITION ET UTILISATION DES MINÉRAIS ET GISEMENTS

2

PLAN	2.1 Classifications des minerais 2.2 Classifications des gisements 2.3 Répartition mondiale des gisements 2.4 Production globale, consommation, et commerce des ressources minérales. 2.5 Ressources minérales et exploitation minière en France métropolitaine
OBJECTIFS	➤ Comprendre pourquoi il existe de nombreuses classifications des minerais et des gisements, et comprendre l'intérêt de chacune ➤ Avoir une vision globale de la répartition mondiale des gisements en relation avec les contextes géodynamiques et les processus de formation des minerais ➤ Avoir quelques notions d'économie sur les échanges mondiaux des ressources minérales

2.1 CLASSIFICATIONS DES MINÉRAIS

On trouve dans la littérature des classifications variées, basées sur toute une diversité de critères. Certaines classifications se fondent sur des critères économiques, comme l'utilisation finale de la substance utile extraite, alors que d'autres se fondent sur des facteurs géologiques. Quelques exemples sont donnés dans les tableaux 2.1 et 2.2.

Tableau 2.1 – Classification des ressources minérales en fonction de l'utilisation du produit.

Minerais métalliques	Métaux ferreux (utilisé dans la fabrication d'acier)	Fer
		Chrome
		Manganèse
		Nickel
		Molybdène
	Métaux de base (métaux communs, utilisé dans l'industrie)	Cuivre
		Zinc
		Plomb
		Étain
		Antimoine
		Cobalt
	Métaux de haute-technologie	Gallium
		Lithium
		Niobium
		Platine (et autres métaux de ce groupe)
		Tantale
		Terres-rares
		Titane
	Métaux précieux	Or
		Platine
		Argent
	Autres	Aluminium
Sources d'énergie	Uranium, pétrole, gaz, charbon	
Matériaux de construction	Sables, graviers, argiles	
Minéraux industriels	Silice, kaolin, gypse, talc, potasse, phosphate, sillimanite	
Pierres précieuses	Diamant, émeraude, opale, rubis, saphir	
Pierres fines	Agate, améthyste, béryl, grenat, jade, lapis-lazuli, malachite, topaze, tourmaline, turquoise, zircon	

Note : cette classification est indicative mais certains éléments ne peuvent pas être rangés dans une seule catégorie : le nickel est à la fois un métal de base et un métal ferreux ; le titane est à la fois un métal ferreux et un métal de haute-technologie.

Tableau 2.2 – Classification des minerais à partir des types de minéraux.

<i>Sulfures et sulfosels</i>	
	Covellite – CuS
	Chalcocite – Cu ₂ S
	Chalcopyrite – CuFeS ₂
	Bornite – Cu ₈ FeS ₄
	Tetraédrite – (Cu, Ag) ₁₂ Sb ₄ S ₁₃
	Galène – PbS
	Sphalérite – (Zn,Fe)S
	Cinabre – HgS
	Cobaltite – (Co, Fe)AsS
	Molybdénite – MoS ₂
	Pentlandite – (Fe, Ni) ₉ S ₈
	Millerite – NiS
	Realgar – AsS
	Stibine – Sb ₂ S ₃
	Sperrylite – PtAs ₂
	Laurite – RuS ₂
<i>Oxydes et hydroxydes</i>	
Bauxite	Gibbsite – Al(OH) ₃
	Boehmite – (–AlO(OH))
	Diaspore – (–AlO(OH))
	Cassitérite – SnO ₂
	Chalcotrichite – Cu ₂ O
	Tenorite – CuO
	Chromite – (Fe, Mg)Cr ₂ O ₄
Columbite	– tantalite ou coltan
	– (Fe, Mn)(Nb, Ta) ₂ O ₆
	Hématite – Fe ₂ O ₃
	Ilménite – FeTiO ₃
	Magnétite – Fe ₃ O ₄
	Pyrolusite – MnO ₂
	Rutile – TiO ₂
	Uraninite (pechblende) – UO ₂

Tableau 2.2 – Classification des minerais à partir des types de minéraux. (Suite)

<i>Oxyels</i>
Calcite – CaCO_3 Rhodochrosite – MnCO_3 Smithsonite – ZnCO_3 Malachite – $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ Barytine – BaSO_4 Gypse – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ Chalcocyanite – CuSO_4 Brochantite – $\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$ Scheelite – CaWO_4 Wolframite – $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{WO}_4$ Apatite – $\text{Ca}_8 (\text{PO}_4)_3 (\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$
<i>Halogènes</i>
Halite – NaCl Sylvite – KCl Fluorite – CaF_2
<i>Métaux et éléments natifs</i>
Or – Au Argent – Ag Platinoïdes – $\text{Pt}, \text{Pd}, \text{Ru}$ Cuivre – Cu Carbone – C (diamant, graphite)
<i>Silicates</i>
Beryl – $\text{Be}_3 \text{Al}_2 (\text{SiO}_3)_6$ Grenat – $\text{Fe}_3 \text{Al}_2 (\text{SiO}_4)_3$ Garnierite – mélange d'hydrosilicates de Ni et Mg Kaolinite – $\text{Al}_4 \text{Si}_4 \text{O}_8 (\text{OH})_8$ Sillimanite – $\text{Al}_2 \text{SiO}_8$ Spodumène – $\text{LiAlSi}_2 \text{O}_6$ Talc – $\text{Mg}_3 \text{Si}_4 \text{O}_8 (\text{OH})_2$ Zircon – ZrSiO_4

2.1.1 Classification par utilisation du métal ou du minéral d'intérêt

Dans les ouvrages plus anciens, il est courant de lire des classifications se fondant sur le type de métal ou l'utilisation de la substance extraite des gisements. Le tableau 2.2 présente par exemple une liste des minéraux extraits des mines de cuivre. On remarque que ce métal est extrait de différents types de sulfures et de sulfosels, de sulfates, de carbonates, d'oxydes et dans quelques rares cas sous forme de cuivre natif. Le cuivre est l'un des « métaux de base », terme qui fait référence à un groupe de métaux communs, dominé par les éléments de transition, qui sont très utilisés dans l'industrie. Les autres catégories de minerais (tableau 2.1) comprennent les minéraux qui sont utilisés sous leur forme naturelle sans purification ou extraction d'un élément spécifique. La barytine, par exemple, est un sulfate de baryum – élément relativement lourd – utilisé pour augmenter la densité des boues de forages pétroliers. L'uranium et le charbon sont des sources d'énergie. De nombreux types de minéraux sont utilisés comme abrasifs ; les grenats, les émeris et les diamants sont trois exemples, mais on utilise également les feldspaths (la prochaine fois que vous achèterez un tube de dentifrice, regardez s'il contient des « silicates de sodium et d'aluminium »). Ce type de tableau propose des liens utiles entre les divers types de minerais et le type d'utilisation sociale qui en est fait.



ENCART 2.1 Le cuivre, un métal très versatile

Le cuivre et l'or ont été les premiers métaux utilisés par l'Homme, et sont encore très largement utilisés aujourd'hui. Le cuivre est extrait dans toutes les parties du globe (à l'exception de l'Europe centrale où les gisements connus ont été épuisés et de nouveaux gisements n'ont pas encore été découverts) et très largement utilisé dans l'industrie. Les principaux pays producteurs de cuivre sont le Chili et les États-Unis. On peut dire qu'environ tous les pays consomment du cuivre, dans des volumes dépendant de la population et du degré d'industrialisation. Les utilisations courantes du cuivre sont présentées dans le tableau 2.3. Sa forte conductivité thermique et électrique, sa résistance à la corrosion et sa couleur attractive ont permis un vaste champ d'utilisations. On y remarque que l'essentiel

Tableau 2.3 - Utilisation du cuivre dans l'industrie.

Électricité/Électronique	42 %
Construction	28 %
Transports	12 %
Machinerie industrielle	9 %
Autres utilisations (monnaie, médicaments, fongicide)	9 %

Source : Standard CIB Global Research www.standardbank.co.za

du cuivre est utilisé dans des câbles en tant que conducteur électrique ; de grandes quantités sont utilisées en alliage avec le zinc (laiton), l'étain (bronze) ou avec d'autres métaux dans les ustensiles ou les pièces de monnaie. Le développement de nouveaux types d'alliages a permis de nouvelles utilisations dans les superconducteurs et les batteries ; et les composés cuivrés sont également utilisés dans une large gamme de produits agricoles (bouillie bordelaise), de médicaments, etc.

Dans les pays industrialisés, l'augmentation de la consommation individuelle de cuivre est restée modeste au cours des dernières décennies. Les nouvelles utilisations du cuivre ne nécessitent que des quantités limitées de métal et ces nouveaux besoins sont largement compensés par l'abandon d'utilisations industrielles massives et par les volumes croissants de métaux recyclés. Cependant, la demande croissante des pays en voie de développement nécessitera une augmentation massive de la production de cuivre ; cette augmentation ne sera pas possible sans la découverte de nouveaux gisements et leur exploitation efficace.

2.1.2 Classification par type de minéraux

Le type de minéral peut être utilisé comme autre critère de classification comme le montre le tableau 2.2. Dans ce tableau, nous voyons qu'un grand nombre de métaux sont extraits sous forme de sulfures (par exemple le Cu sous forme de chalcoppyrite, le Pb sous forme de galène, le Ni sous forme de pentlandite). Une autre catégorie importante est celle des gisements d'oxydes, qui procurent l'étain sous forme de cassitérite (SnO_2), le fer sous forme de magnétite (Fe_3O_4), ou l'uranium sous forme de pechblende (U_3O_8). Les autres métaux sont extraits de carbonates ou de sulfates, généralement dans les zones d'altération au-dessus des gisements primaires.

Très peu de métaux sont extraits des mines sous forme native, les seuls exemples courants étant l'or et les éléments du groupe du platine. Le carbone est également extrait sous forme native de diamant ou de graphite, et sous forme impure dans les charbons. Même si le cuivre existe dans la nature sous forme native, sa présence sous cette forme est plutôt un inconvénient qu'un avantage : certes, le cuivre natif contient 100 % Cu et augmente la teneur globale en cuivre du minerai, mais il est malléable et a tendance à s'amalgamer dans les broyeurs conçus pour les sulfures et silicates cassants.

Les silicates sont de loin les principaux minéraux dans la plupart des roches, mais ils sont peu fréquents dans les listes de minéraux d'intérêt économique. Les exceptions sont la garniérine, un minéral du groupe des serpentines qui constitue l'essentiel des latérites à Ni, les zircons, minéraux détritiques lourds exploités comme source de métal Zr, et les grenats, utilisés comme abrasifs. Le quartz est en phase de devenir de plus en plus important en tant que source de silicium, utilisé dans les semi-conducteurs et les panneaux solaires.

2.2 CLASSIFICATIONS DES GISEMENTS

2.2.1 Une grande diversité de classifications pour une grande diversité de gisements

Il existe des similitudes entre la diversité de classement des minerais et celle des classements de gisements. Dans les ouvrages plus anciens, les gisements sont classés selon leur type de production : les gisements de cuivre, les gisements d'or, les sources d'énergie (fissile – l'uranium, ou fossile – les charbons et hydrocarbures), etc. Ce

Tableau 2.4 – Classification des gisements de Lindgren
(modifiée d'après Lindgren, 1933 et Evans, 1993).

	Profondeur	Température (°C)	Occurrence	Métaux
Gisements téléthermaux	En surface	± 100	Dans les roches sédimentaires ou les coulées de laves ; gisements dans des fractures ouvertes et des cavités. Pas de processus de remplacement.	Pb, Zn, Cd, Ge
Gisements épithermaux	Depuis la surface jusqu'à 1,5 km	50-200	Dans les roches sédimentaires ou ignées ; Gisements souvent localisés dans des systèmes de failles ; sous forme de simples veines ou sous forme cylindrique ou de stockwork. Processus de remplacement limités.	Pb, Zn, Au, Ag, Hg, Sb, Cu, Se, Bi, U
Gisements mésothermaux	1,2 à 4,5 km	200-300	Généralement à proximité ou au sein même de roches ignées ; associés à des failles régionales ; gisements de remplacement en extension ou remplissage de fractures ; corps tabulaires, stockworks, corps cylindriques.	Au, Ag, Cu, As, Pb, Zn, Ni, Co, W, Mo, U, etc.
Gisements hypothermaux	3 à 15 km	300-600	A proximité ou au sein même de roches plutoniques mises en place à des profondeurs importantes. Affleurent là où l'exhumation a été importante. Remplissage de fractures ou zones de remplacement de forme tabulaires, ou irrégulière.	Au, Sn, Mo, W, Cu, Pb, Zn, As

type de classement peut être utile dans un contexte purement économique, mais n'est pas utilisé dans ce texte dans lequel nous traitons des processus de formation.

Au cours du xx^e siècle, de nombreuses classifications se sont basées sur le type de roche dans lequel se trouvent les gisements où sur la géométrie du gisement et sa relation avec son encaissant. Un exemple est donné dans le tableau 2.4. Ainsi, les gisements dans des roches plutoniques étaient distingués de ceux dans des roches sédimentaires ; les gisements sous forme de veine étaient distingués des couches concordant avec la stratification des roches hôte ; les minerais massifs étaient distingués des minerais disséminés. Une classification populaire proposée par Lindgren – influent géologue américain spécialisé dans l'étude des gisements – distingue les gisements formés dans les différents niveaux de la croûte (tableau 2.4). De nos jours, les termes « épithermal », « mésothermal », et « catathernal » sont encore utilisés pour décrire les gisements de faible profondeur, de profondeur intermédiaire, et les gisements formés en profondeur. Une distinction est ensuite faite entre les gisements « syngénétiques » formés en même temps que leur roche hôte des gisements « épigénétiques » formés par la cristallisation tardive des minéraux d'intérêt économique, dans les roches déjà consolidées.

À la fin du xx^e siècle, le développement de la théorie de la tectonique des plaques a répandu toute une série de classifications liées au contexte tectonique. Comme le montre le tableau 2.5, les gisements dans les bassins océaniques étaient distingués de ceux dans les zones en convergence ou ceux dans des contextes intracratoniques. Cette catégorie de classification est encore utilisée, particulièrement lorsque l'on discute de la répartition à l'échelle planétaire des gisements, comme nous le ferons dans la partie suivante. Cependant, ces types de classifications ont désormais été largement remplacés par d'autres types de classifications dans lesquels le critère de base est le processus responsable de la minéralisation (tableau 2.6).

Tableau 2.5 – Classification des gisements en fonction du contexte géodynamique (classification tectonique).

I. Gisements de rides océaniques (frontières de plaques en divergence)

Gisements de sulfures massifs volcanogéniques « VMS » (Cu, Zn)

Gisements exaltifs « SEDEX » (Zn, Cu, Pb, Au and Ag). Par exemple la mer Rouge.

Nodules de manganèse (Mn, Ni, Cu, Co...)

Amiantes riches en chrome et platinoïdes dans les roches ultramafiques (Cr, PGE)

II. Gisements dans les marges en convergence

Gisements de porphyres de cuivre (Cu-Mo)

Gisements de métaux de base (Cu, Pb, Zn, Mo), de métaux précieux (Pt, Au, Ag) et d'autres métaux (Sn, W, Sb, Hg).

Veines à Pb-Zn-Ag et gisements métasomatiques.

Tableau 2.5 – Classification des gisements en fonction du contexte géodynamique (classification tectonique). (Suite)

III. Gisements dans les systèmes de rifts intra-cratoniques Gisements de Sn, fluorine, barytine dans les granites. Evaporites dans les bassins des rifts. Gisements de carbonatites sources de Nb, P, REE, U, Th et autres éléments rares.
IV. Gisements en contexte intracontinental Gisements de Ni et platinoïdes dans les intrusions basiques litées Gisements de Ti dans les anorthosites Gisements d'oxyde de fer – cuivre – or Gisements de Pb-Zn-Ag dans les calcaires et les sédiments clastiques Gisements de cuivre sédimentaires Latérites à Ni et Al Diamants dans les kimberlites

Tableau 2.6 – Classification des gisements en fonction des processus minéralisateurs.

Les gisements magmatiques Les gisements de chromites des complexes basiques-ultrabasiques, formés par une modification de la séquence de cristallisation d'un magma Les gisements de magnétite et de platinoïdes des complexes basiques-ultrabasiques, formés par des processus magmatiques et/ou hydrothermaux Les gisements de sulfures formés par immiscibilité magmatique Les autres gisements magmatiques
Les gisements hydrothermaux Les gisements de sulfures massifs volcanogènes ou VMS (Volcanogenic Massive Sulfide) Les gisements de porphyres Les gisements sédimentaires exhalatifs (SEDEX) Les gisements de type Vallée du Mississippi ou « Mississippi Valley Type » (MVT) Les autres types de gisements hydrothermaux
Les gisements formés par des processus sédimentaires et de surface Les gisements de placers Les gisements de fer sédimentaires Les autres gisements sédimentaires : Mn, phosphates, nitrates, sels, soufre Les latérites L'altération supergène

Bien qu'on puisse reprocher à ce type de classification de ne pas être suffisamment rigoureuse car reposant sur des propriétés supposées plutôt que sur des paramètres objectifs qui pourraient être mesurés et quantifiés, c'est toutefois celui que nous utiliserons dans cet ouvrage. La classification que nous avons choisie présente des inconvénients : comme nous le verrons dans les prochains chapitres, il est parfois difficile pour certains gisements de choisir une catégorie unique. Cependant, elle a l'énorme avantage de mettre en évidence le fait que les gisements ne proviennent que de processus géologiques « normaux », tels ceux qui forment les roches magmatiques ou sédimentaires classiques. Elle constitue une incitation à passer de la discipline de la « gîtologie » – qui établit un catalogue essentiellement descriptif des gisements – à une discipline interprétative plus moderne. Cette approche permet enfin d'utiliser les connaissances des processus géologiques normaux comme le partage des éléments entre les liquides et les cristaux, le tri des minéraux selon leur densité lors de leur transport fluvial, ou la stabilité des phases minérales dans les solutions aqueuses, pour comprendre comment – physiquement et chimiquement – les gisements se sont formés.

2.2.2 Vers une classification des gisements basée sur les processus minéralisateurs

La liste des titres du tableau 2.6 correspond en quelque sorte à la liste des processus géologiques que l'on peut trouver dans un livre d'introduction à la géologie. Nous voyons par exemple que certains gisements sont formés par des processus magmatiques, d'autres par sédimentation, et d'autres encore par l'érosion et l'altération en surface. Ce qui distingue les deux listes, c'est l'absence du métamorphisme dans la liste des processus minéralisateurs importants. On trouve à sa place la catégorie majeure des gisements associés à la circulation des fluides hydrothermaux. Les processus métamorphiques sont en effet impliqués dans un nombre très restreint de gisements – par exemple les gisements à grenats, formés lors de la cristallisation du grenat aux dépens d'autres phases minérales instables pendant l'épisode métamorphique – qui n'ont pas une immense importance économique. Dans les livres d'introduction à la géologie, lorsque l'on considère la Terre dans son intégralité, la circulation de fluides aqueux chauds n'est mentionnée qu'en tant qu'agent d'altération qui modifie la composition et la texture des roches magmatiques et sédimentaires ; ce même processus est à l'origine de la formation d'une immense diversité de gisements qui représentent plus de la moitié des ressources connues.

Considérons maintenant la première catégorie du tableau 2.6 : les gisements formés par des processus magmatiques. On remarque que de nombreux types de gisements se trouvent dans des roches basiques et ultrabasiques et que les types de gisements localisés dans des roches différenciées felsiques et siliceuses sont un peu moins nombreux. Un grand nombre de gisements sont en réalité localisés dans des granites, on pense actuellement qu'ils sont issus de la précipitation de minéraux d'intérêt à partir de fluides aqueux et non pas à partir du magma lui-même. Il y a un lien direct entre les types de minéraux d'intérêt et la composition de la roche dans

laquelle ils se trouvent. Les gisements de Ni, Cr, et de platinoïdes – éléments qui ont un fort coefficient de partage pour les minéraux qui cristallisent tôt dans une différenciation magmatique normale – se trouvent dans les roches mafiques et ultramafiques. Les roches felsiques, au contraire, contiennent des gisements d'éléments qui se concentrent dans les liquides magmatiques évolués. Certains sont présents dans les phases cristallisant tardivement comme l'ilménite, qui contient du Ti, et la cassitérite, minéral d'étain ; d'autres s'échappent par les fluides riches en eau qui se séparent du liquide silicaté et sont redéposés dans des pegmatites ou dans des gisements hydrothermaux. Les pegmatites sont des sources importantes de métaux rares de plus en plus utilisés comme le lithium, le béryllium et les terres rares.

Certains métaux ne se trouvent que dans un seul type de gisement, le meilleur exemple étant sans doute le chrome qui est extrait quasi exclusivement sous forme de chromite, un oxyde magmatique qui s'accumule pendant la cristallisation des magmas mafiques et ultramafiques. Des gisements sédimentaires de placers à chromite très mineurs ont été exploités, mais aucun gisement hydrothermal n'est connu. Plus de 98 % de l'aluminium provient de la bauxite, un sol latéritique qui se forme sous les climats chauds et humides ; mais ce même métal est également extrait dans une mine russe de syénite à néphéline, une roche magmatique. La plupart des métaux, cependant, se trouvent dans des origines diverses. Des alliages de platinoïdes et de cassitérite (oxyde d'étain) sont cités comme exemple de type de gisement d'origine magmatique, mais lorsque la roche magmatique hôte affleure en surface, les mêmes minéraux peuvent être concentrés de nouveau par les processus fluviaux formant des placers. Les métaux comme le cuivre et l'or se trouvent dans à peu près tous les types de gisements présentés dans la liste. Les relations entre les métaux des gisements et les types de processus minéralisateurs seront discutées dans les chapitres suivants.

2.3 RÉPARTITION MONDIALE DES GISEMENTS

Les gisements ne sont pas répartis de façon homogène sur la surface du globe. De vastes étendues de terre sont dépourvues de gisements viables alors que d'autres territoires, que les Anglo-Saxons appellent « *metal provinces* » (« provinces métalliques » d'après Routhier), comportent une proportion inhabituelle de gisements d'un ou plusieurs types. Des exemples notables sont les alignements d'énormes gisements de cuivre le long de la cordillère américaine, depuis l'Alaska jusqu'au Chili, les regroupements de gisements de plomb-zinc dans des calcaires au centre des États-Unis, les gisements d'étain dans les granites d'Asie du sud-est. Pour des raisons géologiques et économiques, il est important de connaître quelques grands traits de la répartition des gisements. D'un point de vue géologique, la répartition des gisements apporte des indices importants sur les processus minéralisateurs ; d'un point de vue économique, la répartition irrégulière influence fortement le prix des métaux et les échanges mondiaux ; c'est un facteur important qui influence les relations internationales et explique parfois alliances et conflits.

Dans les classifications des gisements liées à la tectonique des plaques, l'accent est assez naturellement mis sur le contexte tectonique dans lequel le gisement se trouve,

mais de nombreux gisements se forment dans des contextes sédimentaires ou par des processus de surface (altération/érosion) ; pour ces exemples, la géomorphologie, le relief, et les climats actuels et passés exercent des contrôles additionnels sur la localisation des gisements. Tous ces facteurs sont présentés brièvement dans la partie qui suit et seront développés par la suite dans les chapitres ultérieurs.

2.3.1 Les facteurs géologiques

La répartition mondiale des gisements est illustrée dans la série de cartes et de listes de gisements majeurs rassemblées dans la figure 2.1. Nous n'avons sélectionné que quelques substances utiles majeures qui illustrent les principes de base qui gouvernent la distribution des gisements ; des informations plus détaillées et plus exhaustives sont disponibles sur des sites internet (voir liste à la fin du chapitre).

Commençons par le cuivre, un métal utilisé dans l'industrie dans tous les pays et exploité sur tous les continents (figure 2.2a). Une grande partie des ressources en cuivre provient d'un unique type de gisement, les « porphyres de cuivre », ou « gisements de porphyres » (voir chapitre 4). Ces gisements sont directement associés aux zones de subductions et se trouvent principalement dans les arcs insulaires et dans les marges en convergence. C'est la raison expliquant l'alignement de gisements qui s'étend le long de la côte ouest de l'Amérique du nord et de l'Amérique du sud, mais également dans tout le Pacifique du sud-ouest. De grands gisements de cette même catégorie sont également présents dans les arcs insulaires accrétés qui ont été incorporés dans les chaînes de collision, comme dans la chaîne Alpes-Carpates-Himalaya. Une autre catégorie majeure de gisements de cuivre se forme dans les roches sédimentaires matures dans les bassins intracratoniques, comme c'est le cas des gisements de la « ceinture de cuivre » (*copperbelt*) centrafricaine. Le cuivre se trouve également dans des intrusions magmatiques diverses pour lesquelles il est plus difficile de trouver un lien avec le contexte tectonique. L'exemple type est le gisement de Sudbury au Canada, qui s'est formé lors de la cristallisation d'un magma créé par un grand impact de météorite. Un autre exemple est le gisement de l'intrusion de Palabora, résultat de la mise en place d'un magma riche en carbonates dans le craton archéen du Kaapvaal (Afrique du Sud).

Dans de nombreux gisements magmatiques, le cuivre est associé au nickel (figure 2.2c). C'est le cas de la plupart des gisements de ce type, pas seulement pour Sudbury mais également pour Noril'sk en Russie et Jinchuan en Chine. Une autre catégorie de gisement de nickel se trouve dans des komatiites – roches formées par la cristallisation de laves ultramafiques, qui se sont mises en place à l'Archéen et au Protérozoïque inférieur. Les gisements de Ni-Cu au sein de komatiites, sont cependant restreints aux parties les plus anciennes de la croûte terrestre, dans les ceintures de roches vertes en Australie, au Canada, et au Zimbabwe. Mais tous les gisements de Ni ne sont pas magmatiques. Une autre catégorie majeure comprend les gisements latéritiques, pour lesquels la distribution est assez différente. Alors que les paramètres contrôlant la localisation des gisements magmatiques sont la structure de la croûte et

le contexte tectonique, les paramètres contrôlant la formation des latérites sont climatiques : un sol latéritique se développe sous un climat chaud et humide. Tous les gisements de ce type se situent dans les régions relativement proches de l'équateur, ou étaient situés à proximité de l'équateur lors de leur formation. Les gisements majeurs de Ni latéritiques sont en Nouvelle-Calédonie, en Indonésie, au Brésil et en Australie.

La plupart des gisements de fer (figure 2.2c) se sont formés dans un environnement géologique très spécifique, pendant une période particulière de l'histoire de la Terre. Près de 90 % du minerai de fer est extrait des formations de fers rubanés, un type de sédiments formé par précipitation chimique dans l'eau de mer sur les plateformes continentales de faible profondeur, pendant le Protérozoïque inférieur. Comme nous l'expliquons dans le chapitre 5, cette période de l'histoire de la Terre a connu une forte augmentation de la teneur en oxygène de l'atmosphère et des océans, phénomène qui a entraîné la précipitation d'oxydes du fer qui était dissous dans l'eau de mer. Les plus grands gisements de fer au monde se trouvent ainsi dans les séquences sédimentaires recouvrant les cratons archéens, au Brésil, en Australie, au Canada et en Russie.

Le titane (figure 2.2d) est quant à lui extrait de deux types de gisements. Le minerai le plus courant est l'ilménite, phase minérale accessoire d'un grand nombre de roches métamorphiques et magmatiques, qui est présente en proportion beaucoup plus grande dans les anorthosites. Cette roche, est composée essentiellement de plagioclases calciques, de quelques pour-cent de minéraux ferromagnésiens, et de teneurs variables en oxydes de fer et titane. Un genre particulier nommé « massifs d'anorthosite » s'est mis en place dans la croûte continentale au milieu du Protérozoïque et contient généralement des concentrations exploitables d'ilménite. Les grands gisements de cette catégorie se trouvent dans une bande qui s'étend du Québec (Canada) jusqu'en Norvège.

Lorsque les roches magmatiques ou métamorphiques sont soumises à l'altération et à l'érosion, l'ilménite – minéral stable sous les conditions de surface – est libérée et transportée dans les rivières avant d'être déposée le long des côtes, lorsque les rivières atteignent l'océan. Lorsque la croûte continentale est stable et soumise à des périodes prolongées d'altération et lorsque le littoral est une marge passive stable, de grandes accumulations de minéraux stables et denses peuvent être formées dans les plages de sable. Des gisements majeurs d'ilménite, associée avec d'autres minéraux lourds comme le rutil (autre source de Ti), le zircon (source de Zr), et la monazite (source de Th et de terres rares) sont situés dans les plages de sable le long des côtes australienne, indienne, et sud-africaine.

La dernière ressource que nous avons sélectionnée est le diamant. Ce minéral est également exploité dans deux types de gisements. Les sources principales et primaires sont les kimberlites, roches ultramafiques assez rares qui se mettent en place sous forme d'intrusions tubulaires (« pipe ») au sein ou à proximité des cratons archéens. Et lorsqu'une kimberlite est érodée, les diamants qu'elle libère s'accumulent dans les gisements alluviaux des rivières et dans les sables et graviers des plages sur le

littoral. Historiquement, ce sont des gisements alluviaux d'Inde – dont la source primaire est toujours inconnue – d'où l'on extrayait la plupart des diamants. Ensuite les gisements majeurs d'Afrique du Sud, à la fois kimberlitiques et alluviaux, ont été découverts et ont produit l'essentiel des diamants extraits pendant tout le ^{xx}^e siècle. Pendant la dernière décennie, de nouveaux gisements ont été découverts dans presque tous les pays sur des cratons archéens stables ; en Russie, en Australie, au Canada, au Brésil, au Groenland et en Finlande.

2.3.2 Les facteurs géographiques, économiques, politiques et sociologiques

La répartition mondiale des gisements telle qu'elle est présentée précédemment ne prend en considération que les gisements dont l'existence a été attestée et qui pour l'essentiel sont exploités. Nous avons traité dans le chapitre 1 des multiples facteurs autres que géologiques, qui pouvaient expliquer une prospection limitée et donc une méconnaissance de l'existence de certains gisements qui figureront peut être dans de futures cartes de répartitions. Très peu de campagnes d'exploration ont été menées dans les territoires aux climats hostiles comme c'est le cas du Groenland et de l'Antarctique ou de l'Afrique ou de l'Asie centrale qui seront certainement parmi les plus grands enjeux du siècle à venir. L'absence d'infrastructures routières de qualité peut également engendrer des surcoûts lors du développement d'exploitations dans des pays en voie de développement et être un facteur limitant à l'exploration et finalement à la connaissance des ressources géologiques d'un territoire. C'est également le cas des territoires qui connaissent des conflits, ou une instabilité politique. Ces derniers ne connaissent pas les ressources dont ils disposent et interdisent ou freinent les campagnes d'exploration de compagnies étrangères.

2.4 PRODUCTION GLOBALE, CONSOMMATION ET COMMERCE DES RESSOURCES MINÉRALES

Les tableaux 2.7 et 2.8 sont des listes qui indiquent le lieu où les métaux et les minéraux d'intérêt économique sont extraits, et les lieux d'où l'essentiel des ressources minérales sont exportées et où elles sont importées. La première liste classe les pays en fonction de leur production d'une petite sélection de substances utiles ; la seconde liste classe les pays en fonction des quantités de substances utiles qu'elles exportent et importent. Précisons que le pétrole n'est pas inclus dans cette sélection de substances minérales utiles. Même si les pays les plus grands figurent dans les premières places de chaque liste, comme on pouvait l'attendre, il y a quelques anomalies qui apportent des renseignements essentiels sur le fonctionnement global de l'industrie minière.

Tableau 2.7 – Liste des principaux pays producteurs d'une sélection de métaux et minerais.

	Aluminium	Tonnes × 1000	Bauxite	Tonnes × 1000	Acier	Tonnes × 1000	Minerai de fer	Tonnes × 1000	Cuivre	Tonnes × 1000	Or	kg	Platine	kg
1	Chine	12 600	Chine	19 500	Chine	500,5	Chine	707 000	Chili	5,7	Chine	275 000	Afrique du Sud	165 833
2	Russie	3 955	Australie	18 844	Japon	118,7	Brésil	354 674	Pérou	1,2	Afrique du Sud	252 344	Russie	27 000
3	Canada	3 083	Brésil	6 890	États-Unis	91,4	Australie	299 009	États-Unis	1,19	Australie	246 000	Canada	6 200
4	États-Unis	2 554	Jamaïque	3 941	Russie	68,5	Inde	180 000	Chine	920	États-Unis	238 000	Zimbabwe	5 300
5	Australie	1 960	États-Unis	3 900	Inde	55,2	Russie	105 000	Australie	860	Pérou	170 128	États-Unis	3 860
6	Brésil	1 610	Russie	3 300	Corée du Sud	53,6	Ukraine	77 900	Indonésie	780	Russie	156 912	Colombie	1 400
7	Norvège	1 304	Inde	2 900	Allemagne	45,8	États-Unis	52 500	Russie	730	Indonésie	117 851	Finlande	800
8	Inde	1 223	Surinam	2 200	Ukraine	37,1	Afrique du Sud	42 083	Canada	585	Canada	101 440	Japon	770
9	Afrique du Sud	899	Venezuela	1 900	Brésil	33,7	Canada	32 834	Zambie	530	Ouzbekistan	85 000	Botswana	300
10	Émirats arabes unis	890	Ukraine	1 700	Italie	30,6	Iran	31 538	Pologne	470	Ghana	77 349	Australie	130

Source : U.S., Department of the Interior, U.S. Geological Survey.

Tableau 2.8 - Liste des principaux pays importateurs et exportateurs de minerais, en 2007.

(a) Importateurs

	Pays	Montant (\$US)
1	Chine	85 280 550
2	Japon	28 365 440
3	Allemagne	9 307 674
4	Corée	6 623 871
5	Inde	5 250 223
6	Royaume Uni	4 679 500
7	États-Unis	4 487 631
8	Belgique	3 183 008
9	Pays-Bas	3 081 213
10	Italie	2 912 043
11	Finlande	2 896 519
12	Canada	2 775 180
13	France	2 630 696
14	Russie	2 307 253
15	Espagne	2 217 288

(b) Exportateurs

	Pays	Montant (\$US)
1	Australie	34 546 550
2	Brésil	18 726 620
3	Chili	14 888 160
4	Pérou	7 273 738
5	Afrique du Sud	7 268 294
6	Inde	6 519 472
7	États-Unis	6 487 638
8	Canada	6 053 128
9	Indonésie	4 295 629
10	Suède	2 628 527
11	Kazakhstan	2 412 308
12	Russie	2 374 813
13	Ukraine	2 153 611
14	Iran	1 579 345
15	Congo	1 555 942

Source : <http://www.trademap.org/>

Dans chaque liste, nous voyons trois catégories de pays : (1) les grands pays industrialisés qui possèdent de grandes ressources propres ; (2) les pays avec peu ou pas de ressources minérales ; et (3) les pays avec de grandes ressources mais relativement peu de population, ou faiblement industrialisés. La première catégorie de pays, pour laquelle nous pouvons prendre comme exemples la Russie, les États-Unis et la Chine, sont aux sommets des listes des producteurs (tableau 2.6) et des consommateurs (tableaux 2.7 et 2.8) ; ils produisent une grande quantité de métaux qu'ils consomment dans leur usage domestique. La seconde catégorie de pays dans laquelle l'on trouve des pays comme le Japon et l'Allemagne, qui ont très peu de gisements mais une industrie très active qui consomme de grandes quantités de matériaux bruts. Ces pays sont des importateurs majeurs de minerai et de métaux purifiés. Enfin, les pays de la troisième catégorie – ayant d'importantes ressources mais une faible population ou une industrialisation limitée – sont les principaux exportateurs de minerai (tableau 2.8). Des exemples sont l'Australie, l'Afrique du Sud, le Chili, et le Brésil.

Il y a bien entendu de nombreuses exceptions à ces observations générales. Les États-Unis ont très peu de grands gisements de Ni et Cr et leurs ressources propres en ces métaux – essentiels à la production d'acier – ne sont pas suffisantes pour leurs besoins. Ils font ainsi partie des principaux pays importateurs pour ces métaux. De même, l'explosion industrielle en Chine a multiplié les besoins en divers métaux et ses ressources domestiques bien qu'importantes sont largement insuffisantes. La Chine est un important importateur de nombreuses substances minérales. Par contre, la Chine possède de très grands gisements de tungstène et en produit plus que ce qu'elle consomme ; c'est un exportateur de ce métal. L'Australie, pays ayant d'abondantes ressources en presque tous les types de minerais, est un exportateur majeur pour de nombreuses ressources mais elle manque de chrome et doit importer ce métal.

Exercice 2.1 – Développement d'une mine de platine au Groenland

Le retrait des glaciers continentaux dans de nombreuses parties du Groenland a permis aux compagnies minières d'explorer de nouveaux gisements dans des zones qui étaient auparavant recouvertes de glace. Les principales cibles sont les gisements de platinoïdes. Comme nous le détaillerons dans le chapitre suivant, ces gisements se trouvent dans les intrusions basiques et ultrabasiques litées, particulièrement (mais pas exclusivement) dans les terrains du Précambrien.

Dans cet exercice :

(a) Utilisez vos connaissances sur les formations géologiques et sur le contexte tectonique du Groenland pour cibler des zones d'intérêt où l'exploration pourrait être menée. (Des cartes géologiques sont disponibles sur internet par exemple à l'adresse : <http://www.geus.dk/program-areas/raw-materials-greenl-map/greenland/gr-map/kostart-uk.htm>).

(b) Discutez les aspects économique, politique et environnemental du développement d'une mine de platinoïde dans la région. Dans cette discussion, vous prendrez en compte les positions éventuelles des gisements recherchés, le climat et les autres aspects qui influencent l'exploitation d'un gisement ; la distance aux pays importateurs ; l'utilisation actuelle et future des platinoïdes ; et les aspects politiques. Le Groenland est-il un producteur minier potentiel stable, et comment le positionneriez-vous face aux autres producteurs ?

De nouvelles complications arrivent lorsqu'on distingue la production de métaux purifiés (concentrés), de minerai brut ou de produits intermédiaires. Dans certains cas, le minerai est exporté sous forme non brute, plus ou moins tel qu'il est extrait des mines. C'est le cas pour certains minerais de fer qui sont directement transportés de mines en Australie ou au Brésil vers des usines au Japon ou en Chine. Totalement à l'opposé on trouve l'or et les diamants qui sont quasi systématiquement extraits d'une gangue et concentrés sur place, avant d'être transportés sous forme de métal pur ou de pierres précieuses non taillées. Dans la plupart des autres cas, le minerai ou des produits à des stades divers de purification sont exportés. L'encart 2.2 illustre les processus de séparation du nickel à partir de ses différents minerais. Comme pour la purification des autres minerais, ces processus comportent plusieurs étapes majeures. Pendant l'extraction, un effort est fait pour choisir préférentiellement le minerai qui contient un maximum de minéraux riches en métal ; dans une seconde étape, les minéraux nickélifères sont séparés des minéraux de la gangue et concentrés ; dans une troisième étape, le Ni est purifié par électrolyse.



ENCART 2.2 L'extraction et la purification du minerai de nickel

(I) L'extraction

On trouve le nickel dans deux types très différents de minerais, entraînant deux modes d'extraction distincts : (1) Les gisements de sulfures sont généralement extraits dans des mines souterraines ou dans d'immenses mines à ciel ouvert profondes dans le cas de quelques gisements nouvellement exploités. (2) Les latérites sont quant à elles extraites de carrières peu profondes en utilisant des engins de terrassement comme de grandes pelleteuses, des pelles à bennes traînantes ou des tractopelles.

Les minerais de sulfures sont séparés de leur gangue par un processus de flottaison : on les lave dans de grandes cuves dans lesquels ils sont soumis à des acides gras et des huiles qui augmentent le caractère hydrophobe des particules de sulfures. Un dispositif mécanique et pneumatique mélange la suspension afin de former des bulles d'air auxquelles se lient les particules de sulfures. Elles remontent alors en surface où elles sont récupérées avec la mousse. Les propriétés magnétiques des sulfures de Fe-Ni sont également utilisées pour faciliter leur tri.

Les substances concentrées en nickel sont ensuite séchées et brassées par un flux d'air chaud (à environ 1 350 °C) et oxydant dans des fonderies. La réaction de l'oxygène avec le fer et le soufre des sulfures produit une partie de la chaleur nécessaire à la fonte. Cette réaction n'a pas lieu dans le cas des minerais latéritiques (oxydes plutôt que sulfures) et plus d'énergie doit être apportée pour maintenir la température adéquate. Le produit formé lors de cette étape est en général un sulfure de Ni-Fe artificiel que l'on appelle matte de nickel et qui contient 25 à 45 % Ni. Le fer est alors transformé en oxyde, puis est soumis à un flux de silice pour former un résidu. Une fois le résidu évacué, la matte de nickel contient 70 à 75 % Ni.

(II) Le raffinage et la fonte

Le minerai passe d'abord dans de grandes meules où il est broyé en poudre dont la taille est plus fine que la taille moyenne des minéraux.

Après cette étape, la matte de nickel peut être traitée selon deux protocoles différents : elle peut être lessivée à haute pression avec de l'ammoniac – dans ce cas, le métal est récupéré dans la solution – elle peut sinon être brûlée afin de produire un oxyde riche en Ni.

(III) L'électrolyse

L'étape finale est un électro-raffinage : l'oxyde de nickel est dissous dans des solutions de chlorures ou de sulfates dans des cellules électrolytiques et du métal nickel pur se dépose sur la cathode.

(IV) Les désagréments de la purification du nickel

De grandes quantités de soufre sont émises lors de plusieurs étapes de la purification du nickel magmatique. Une partie de ce soufre est récupérée pour des usages industriels ou agricoles, mais une grande proportion s'échappe dans la fumée des fonderies et entraîne une pollution considérable.

Les minerais de nickel latéritiques ne contiennent pas de soufre et ne posent pas véritablement ce problème de pollution, mais leur raffinage requiert beaucoup plus d'énergie. Les minéraux nickélifères sont des oxydes ou des silicates et ne sont pas facilement séparables par décantation. Le minerai hydraté et la gangue sont riches en eau et celle-ci doit être évacuée par séchage et brûlage dans des fours à haute température. L'oxyde de nickel est ensuite fondu dans des fourneaux à des températures comprises entre 1 360 et 1 610 °C. De telles températures sont indispensables à cause des fortes teneurs en magnésium. La plupart des fonderies à latérites produisent un alliage de fer et de nickel qui est directement vendu aux aciéries.

À chaque étape, le prix du produit augmente, comme l'illustre l'exercice 2.2. Ce document soulève le problème de la rentabilité de construire des raffineries et fonderies très onéreuses dans les pays extracteurs de minerais. De telles infrastructures permettent d'exporter des produits transformés de plus grande valeur que le minerai brut mais leur construction nécessite un endettement important et un véritable retour sur investissement n'est pas garanti.

Exercice 2.2 – Débat sur les politiques d'exportation – matériaux bruts ou produits transformés ?

Tous les exportateurs de substances utiles minérales sont exposés à un dilemme majeur : doivent-ils exporter du minerai non raffiné ou du métal ou du minéral pur après raffinage ? Lorsque l'on sait le prix des produits raffinés est plusieurs fois supérieur à celui du minerai brut la réponse paraît évidente : son exportation apporterait beaucoup plus de revenus aux pays. De plus, la construction et la maintenance des raffineries et des fonderies sont sources d'emplois, d'infrastructures industrielles et elles développent des compétences nouvelles dont bénéficierait le pays exportateur. Par contre, les coûts importants de la construction et de la mise en service des raffineries et des fonderies sont des points négatifs à considérer. Pour que la construction de ces usines ait un intérêt économique, il faut qu'un certain volume de minerai puisse être traité ; si les gisements sont trop petits, la construction – même d'une raffinerie beaucoup moins onéreuse qu'une fonderie – n'est en général pas viable. De plus, de grands investissements sont nécessaires pour construire les usines et de nombreux pays ne disposant pas de ressources suffisantes auraient à emprunter et rembourser des intérêts.

Considérons l'exemple suivant. Un gisement de nickel contenant 10 Mt de minerai à 2 % Ni est trouvé au Zimbongo, un petit pays d'Afrique centrale. Le gisement contient 200 000 t de Ni dont 70 % peuvent être extraites, ce qui représente une masse de Ni exploitable de 140 000 t. S'il est vendu raffiné, cette masse a une valeur de 2 milliards d'euros, si l'on considère le prix actuel du métal (15 000 euros/tonne). Dans le futur, le prix du Ni et les bénéfices de l'exploitation sont amenés à augmenter. Le prix du minerai non raffiné est 70 euros/tonne ; le gisement a donc une valeur marchande en minerai brut de seulement 140 millions d'euros (soit 7 % de sa valeur s'il exporte du métal raffiné). Ces valeurs ne prennent pas en compte les coûts d'extraction, de raffinage et d'exportation du minerai et du métal, que nous ignorons dans cet exercice. La durée d'exploitation estimée est d'environ 20 ans, avant que le gisement ne soit totalement épuisé. D'autres gisements pourraient cependant être découverts dans la région dans le futur.

Le coût total de la construction de la raffinerie et de la fonderie nécessaires à la purification du métal est d'environ 3 milliards d'euros. Le Zimbongo ne dispose pas des ressources nécessaires et serait amené à emprunter sur les marchés internationaux. Le coût total du prêt sur une période de 20 ans serait comparable au montant nécessaire, c'est-à-dire 3 milliards d'euros. Vous paraît-il intéressant pour le Zimbongo qu'il fasse construire les infrastructures industrielles nécessaires à la purification du Ni ?

Dans l'exercice 2.2, la question de la viabilité d'une fonderie à Ni dépend d'une grande diversité de facteurs parmi lesquels le prix des métaux très difficile à prévoir. D'autres facteurs sont importants dans les échanges internationaux comme le coût

de l'énergie nécessaire à la purification du minerai. Dans le chapitre 5, nous évoquons de la situation singulière de l'aluminium dont la purification nécessite beaucoup d'énergie et qui est transporté à travers le globe depuis la Jamaïque ou l'Australie d'où le minerai est extrait, vers l'Islande où le minerai est purifié. Malgré le scepticisme probable des écologistes les plus intégristes, ces transferts minimisent les émissions de gaz à effet de serre, grâce à la disponibilité en Islande d'énergies hydraulique et géothermique propres. Nous traitons également dans le chapitre 5 des problèmes associés à la production de minerai dans les pays en voie de développement. Les exemples choisis sont les gisements riches et importants de cuivre en Afrique centrale, qui auraient dû procurer des revenus aux pays extrêmement pauvres de la région qui n'ont jamais vraiment profité de cette ressource à cause des pays colonisateurs dans un premier temps puis à cause de l'inefficacité et de la corruption des gouvernements dans un second temps.

Les tendances des échanges internationaux de minerai sont résumées dans la figure 2.2. Les flèches montrent la direction des échanges. La plupart des flèches partent des pays producteurs comme le Chili dans le cas du cuivre, et vont vers les grands pays industrialisés comme les États-Unis, le Japon, la Chine ou l'Europe. La position géographique des producteurs et consommateurs influence la direction des échanges : l'essentiel du cuivre chilien est transporté à travers l'Océan Pacifique vers les États-Unis, le Japon et la Chine et ne passent pas le Cap Horn pour aller en Europe (les énormes navires transportant les minerais ne peuvent pas passer le canal de Panama). Mais d'autres facteurs sont également à prendre à compte. L'Australie a un avantage géographique particulier pour vendre son minerai de fer à la Chine et au Japon, et serait capable de fournir l'essentiel des besoins de ces pays, mais ces pays importent également du minerai du Brésil. Ce minerai doit traverser une grande partie de la planète, mais les pays consommateurs sont disposés à payer le coût du transport. Avoir un second fournisseur leur permet de négocier les prix du minerai de façon plus efficace que si l'Australie était en situation de monopole.

Dans le tableau 2.7, on note également la nature précaire des sources de quelques substances utiles. Actuellement, les principaux pays producteurs de platinoïdes – métaux essentiels pour l'industrie de haute technologie et particulièrement pour la fabrication des pots catalytiques des voitures – sont au nombre de trois : le premier est le Canada, qui restera un fournisseur stable et fiable dans les années à venir. Le second est la Russie, un pays dont la confiance en tant que fournisseur de ressources a été entachée par les problèmes de transfert de gaz naturel vers l'Europe. Le troisième pays – de loin le principal producteur – est l'Afrique du sud, notamment grâce aux énormes ressources du complexe du Bushveld (chapitre 3). Tant que le gouvernement ANC (African National Congress) élu démocratiquement, relativement stable et honnête, est au pouvoir, et tant qu'il poursuit sa politique orientée vers les marchés internationaux, le pays restera un fournisseur de platinoïdes de confiance. Mais si la politique du gouvernement était amenée à changer, ou si des troubles sociaux éclataient dans le pays, il y aurait une crise globale d'approvisionnement en ces métaux. Quelles seraient les conséquences ? À court terme, le prix des métaux grimperait en

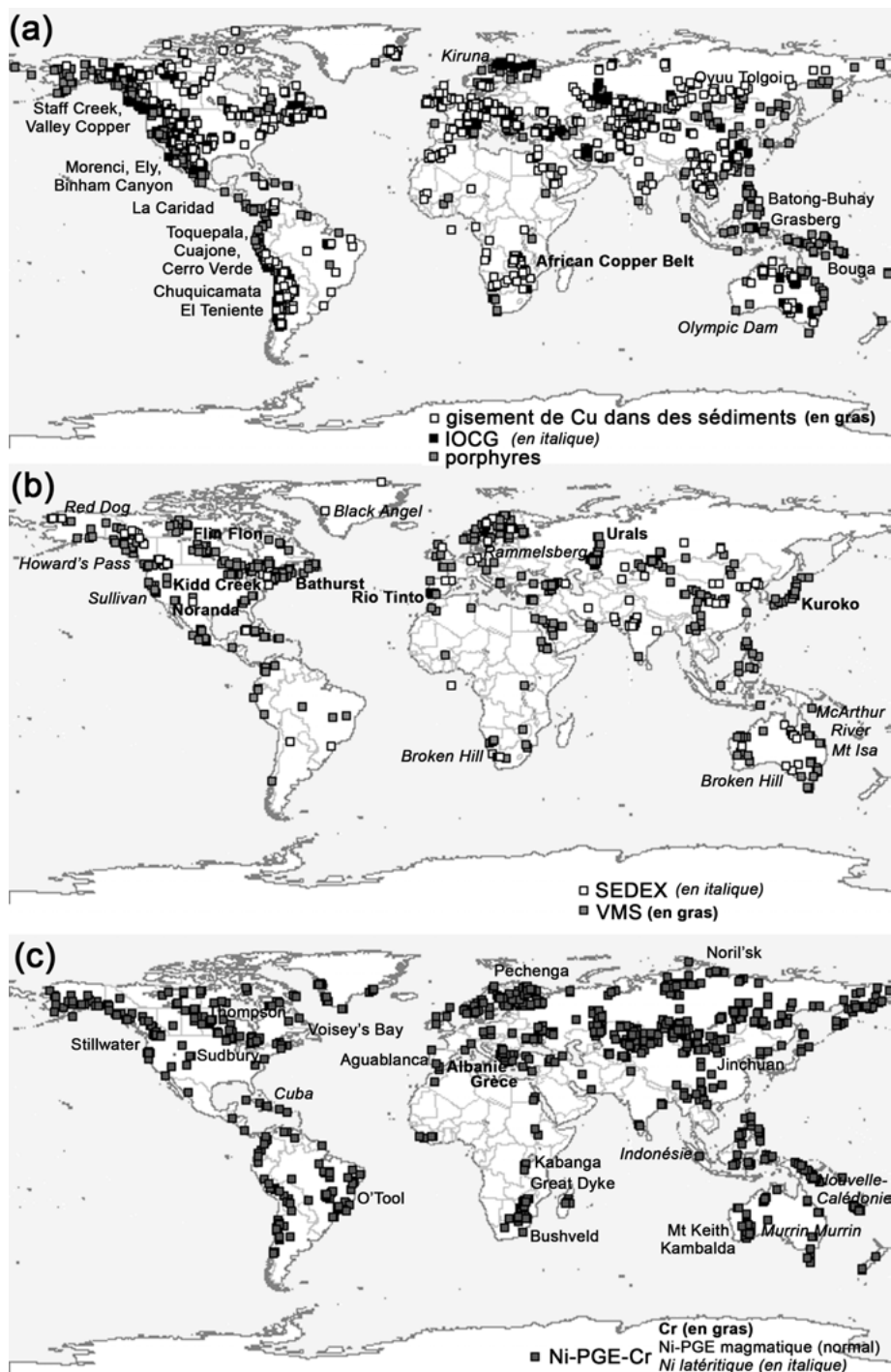


Figure 2.1 – Distribution mondiale des gisements et des ressources minérales.
Source pour les cartes a), b), c), d), e) : http://edg.rncan.gc.ca/minres/index_f.php

2.4 • Production globale, consommation et commerce des ressources minérales

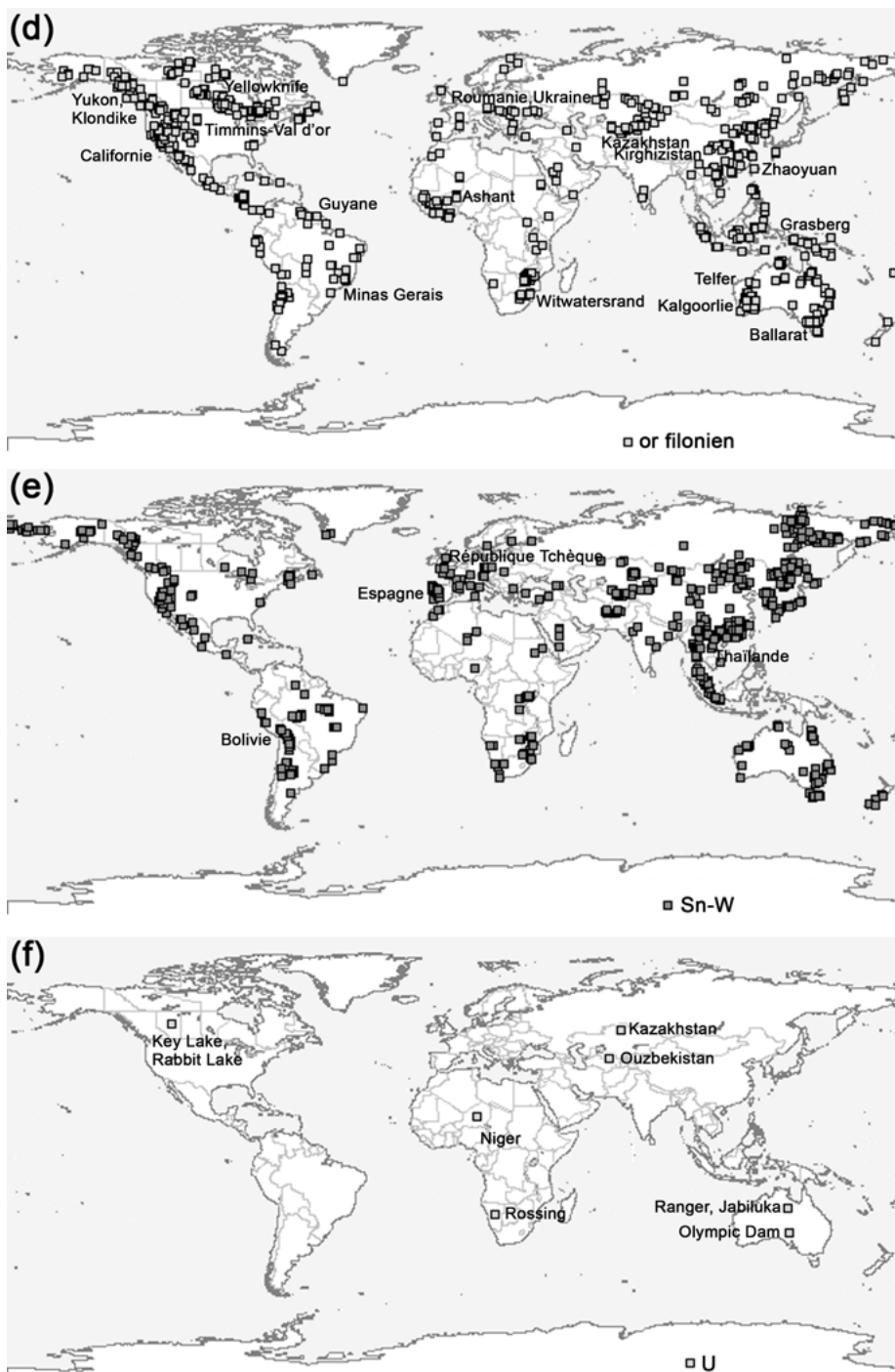


Figure 2.1 – Distribution mondiale des gisements et des ressources minérales. (Suite)

Source pour les cartes a), b), c), d), e) : http://edg.rncan.gc.ca/minres/index_f.php

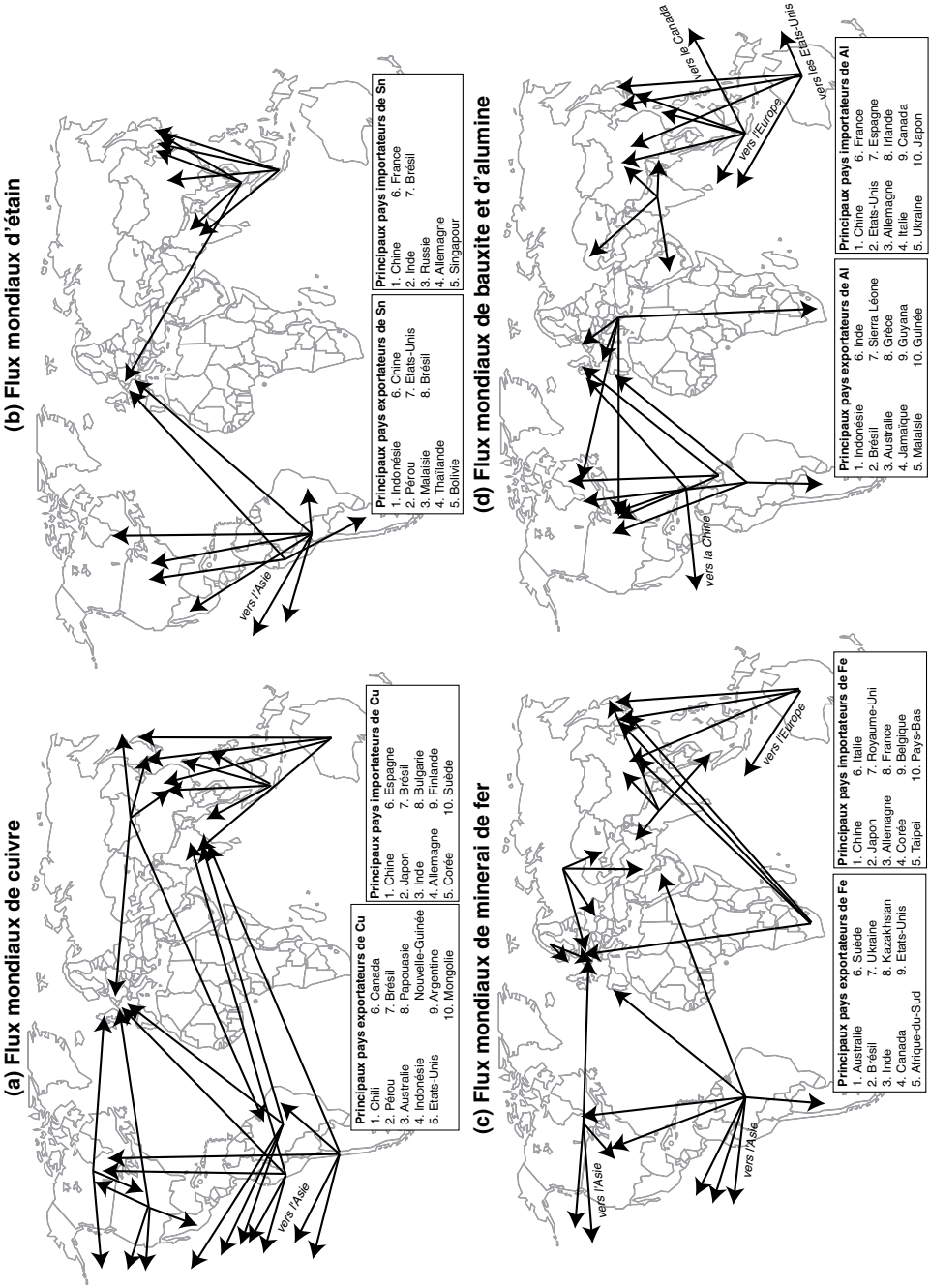


Figure 2.2 – Tendances des échanges mondiaux de substances minérales.

Source d'informations : <http://www.trademap.org/>

flèche, et le coût de production des voitures et autres produits qui utilisent les platinoïdes augmenterait fortement ; dans certains cas, la production serait sans doute arrêtée si les ressources en métaux sont suffisantes. À plus long terme cependant, on peut espérer que le prix élevé des métaux stimulerait la prospection de nouveaux gisements et la recherche de métaux de remplacement pour les platinoïdes.

2.5 RESSOURCES MINÉRALES ET EXPLOITATION MINIÈRE EN FRANCE MÉTROPOLITAINE

Tout comme le Royaume-Uni et l'Allemagne, la France a exploité efficacement ses ressources minières qui ont permis son essor industriel et commercial au XIX^e et au XX^e siècle. Les substances ayant été extraites sont essentiellement des combustibles (charbon et lignite), des minerais de métaux (fer, plomb, zinc, un peu l'antimoine, manganèse, cuivre...), et des substances industrielles (sel, potasse, schistes bitumineux, fluorine, uranium...). Décrire l'industrie minière en France métropolitaine aujourd'hui est hélas un exercice d'historien. Pendant la première moitié du XX^e siècle, la France était un producteur majeur d'une longue liste de substances minérales, comme en témoigne le grand nombre de mines et exploitations sur la carte de France métropolitaine (figure 2.3). Parmi cette longue liste de substances, les productions les plus significatives ont été (1) l'aluminium, purifié à partir des gisements de bauxite du Crétacé dans le sud de la France, (2) le fer, extrait de la « minette » du bassin de Lorraine, (3) le charbon, substance dont nous ne parlons pas dans cet ouvrage mais qui a été exploitée dans divers sites en France, (4) la potasse, substance d'assez faible valeur marchande par unité de poids, mais dont l'exploitation dans les mines d'Alsace a été durable (5) l'uranium, extrait de plusieurs centaines de gisements il y a quelques années encore et (6) l'or, dont l'exploitation à Salsigne a été la dernière mine de France métropolitaine à fermer (7), les métaux de base (Zn, Cu, Pb, Ag...) qui ont été exploités dans beaucoup de petites mines en Bretagne et dans le Massif central.

1. La France a participé très activement à l'histoire de l'aluminium (voir également l'encart 5.3), depuis la découverte du minerai de bauxite près du village des Baux de Provence (13) par le chimiste Berthier en 1821, jusqu'au développement de processus physico-chimiques de purification, en passant par l'extraction d'immenses quantités de bauxite. Le bassin de Brignoles (83) a été pendant un siècle le principal gisement français de bauxite, et même un temps le plus important du monde. L'origine des gisements de bauxite est l'altération sous un climat chaud et humide de roches relativement variées qui a conduit à la formation d'une latérite. Lors de cette pédogénèse tout à fait particulière et décrite dans le chapitre 5, les éléments majeurs sont en grande partie lessivés. Les éléments suffisamment insolubles, comme l'aluminium, restent et se voient ainsi concentrés. La production a chuté à la fin du XX^e siècle, les effectifs passant de 990 salariés en 1975 à 225 en 1989. Un plan progressif de fermeture des mines s'est mis en place : le bassin

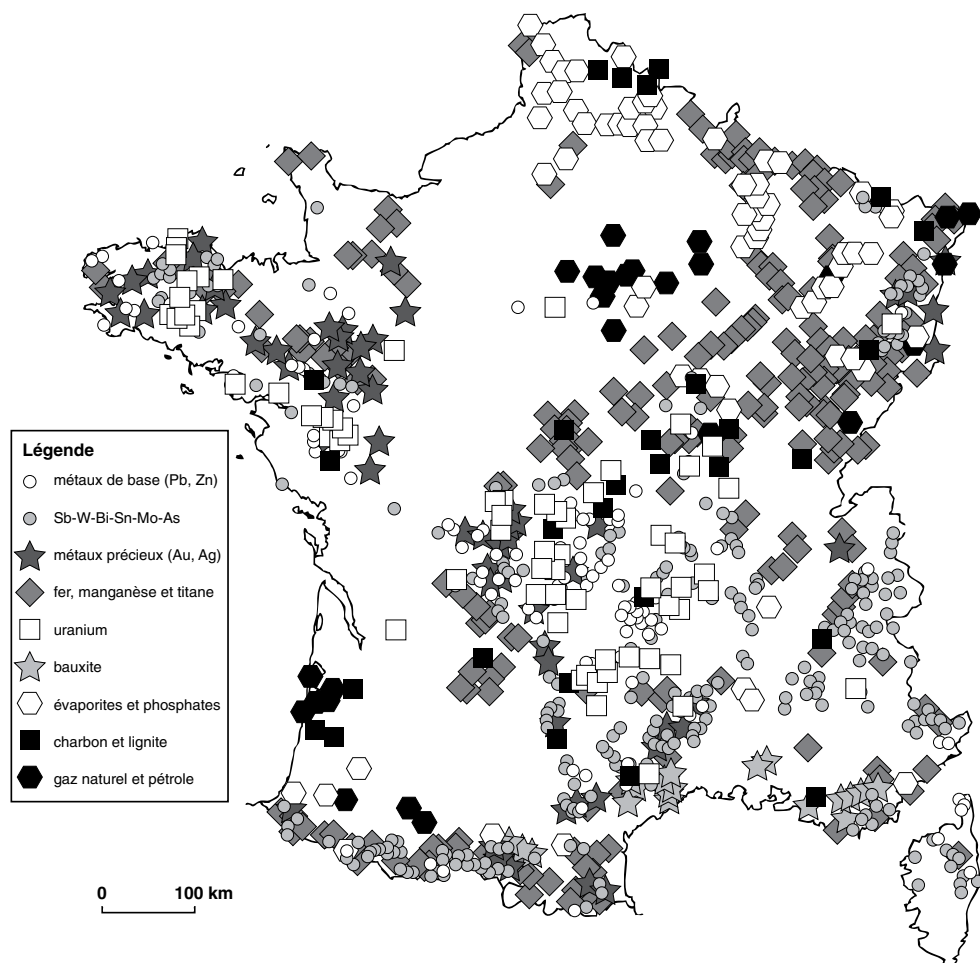


Figure 2.3 - Carte simplifiée des mines et exploitations en France métropolitaine.

Ouest (Mazaugues) a été fermé le premier. L'exploitation à ciel ouvert de Doze, près de Cabasse, a été avec celle des Baux de Provence la dernière fermée en 1990.

2. L'extraction du minerai de fer oolithique en Lorraine remonte à des temps très reculés, des exploitations datant de l'époque romaine ayant été identifiées. Le processus de formation de ce type de gisement est également présenté dans le chapitre 5. Ces gisements ont été un moteur de l'industrie française pendant la révolution industrielle, leur rentabilité n'a cependant pas été suffisante pour qu'ils continuent d'être exploités à la fin du xx^e siècle. En 1993 la partie sud des mines de fer de Briey-Longwy-Thionville, fermait et toute exploitation de la « minette » de Lorraine a réellement cessé depuis 1997, date de cessation d'activité de la mine des Terres Rouges à Audun-le-Tiche en Moselle. Sur l'ensemble du bassin

2.5 • Ressources minérales et exploitation minière en France métropolitaine

de Lorraine (1 700 km²), 3,1 milliards de tonnes de minerai de fer ont été extraites (source : DRIRE Lorraine).

3. Autres exploitations hautement symboliques de la révolution industrielle, les mines de charbons dont l'activité a permis le développement prospère de plusieurs villes. Malgré les richesses en charbon de son sous-sol, la France n'a jamais été autosuffisante. Même lorsque la production a été maximale (dans les années 1960), la France a toujours importé du charbon étranger. Au cours des deux dernières décennies toutes les mines de charbon de France métropolitaine ont elles aussi fermé les unes après les autres alors que leur rentabilité devenait très mauvaise.
4. La potasse exploitée historiquement et en quantité en Alsace, devait être extraite jusqu'en 2003, mais la fermeture du site – très déficitaire – a été anticipée après un incendie survenu dans les locaux en septembre 2002. La potasse d'Alsace est une formation évaporitique liée à l'évaporation à l'Oligocène d'un bras de mer qui s'étendait depuis la Belgique jusqu'aux bassins périalpins. Dans un contexte géodynamique en extension, le rift alsacien est devenu un réservoir d'évaporation d'eau salée, avec en intermittence des faciès de lagunes d'eau douce et de marais salants.
5. Il y a quelques années, la France comptait 210 mines d'uranium. C'est une illustration de l'attachement français à l'énergie nucléaire qui persiste depuis la présidence de Charles de Gaulle et sa volonté d'autonomie stratégique dans les secteurs militaires et de l'énergie. Plus aucun de ces gisements n'est désormais exploité, la dernière mine ayant fermé en 2001 (Le Bernardan, 87). L'essentiel des ressources uranifères françaises se trouve dans des gisements filoniens associés à des granites en Vendée, dans le Forez ou Limousin. Les minerais primaires sont essentiellement composés de pechblende (UO₂) et de coffinite (U(SiO₄)_{1-x}(OH)_{4x}). Des minéraux secondaires, produits par l'altération des minerais primaires, se rencontrent parfois dans la partie superficielle des gisements. Ils ne constituent pas à eux seuls des gisements exploitables, à l'exception du gisement de Margnac (87). Quelques gisements sont d'origine sédimentaire comme les gisements formés au Permien à Lodève (34) et Cérilly (03) ou les gisements de Saint-Pierre (15) et Coutras (24) formés pendant l'ère tertiaire. Dans le cas de ces gisements, les composés d'uranium ont été réduits et ont précipité au contact de la matière organique à laquelle ils sont désormais associés.
6. Enfin, la mine d'or de Salsigne, qui produisait 2 000 tonnes d'or par an et employait près de 170 mineurs au début des années 2000, a également dû fermer en 2004, avec mise en place d'un plan ordonné au niveau social et environnemental.
7. Les gisements de métaux (Ag, Pb, Sn, Zn, Cu, Ni, Cr, etc.) français ont pour la plupart été formés par la circulation de fluides riches en métaux lors d'une « crise métallifère » pendant l'orogénèse varisque (ou hercynienne) il y a 320 à 300 Ma. La carte simplifiée des mines et exploitations en France métropolitaine, présentée dans la figure 2.3 montre très clairement que les gisements de métaux de base et de métaux précieux sont situés dans les terrains varisques (Bretagne, Massif central et chaînes alpine et pyrénéenne). D'autres filons sont plus récents (Jurassique) et sont associés à l'ouverture de la Tethys.

La fin de l'extraction minière en France métropolitaine a marqué le début d'une nouvelle période : celle de « l'après-mine ». L'état a confié au BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières) les missions de surveillance et de maintien en sécurité des sites. Dans le bassin ferrifère de Lorraine par exemple, l'extraction du minerai a été à l'origine d'un risque de mouvements de terrains susceptibles de se produire des décennies après la fin de l'exploitation minière et contraignant les règles de constructibilité. À moins d'un envol du prix des matières premières qui pourrait rendre de nouveau rentable l'exploitation de certains gisements, il est plus probable que dans un futur proche, les anciennes mines soient exclusivement l'objet de développement de structures touristiques et de conservation du patrimoine industriel historique.

N'oublions pas cependant les mines rentables et en activité dans les départements, régions et collectivités d'outre-mer comme les mines d'or et de diamants en Guyane et les mines de nickel en Nouvelle-Calédonie dont nous parlerons dans le chapitre 5.

Bibliographie

Site internet américain de l'USGS sur les ressources minérales :

<http://minerals.usgs.gov/minerals/>

Site internet de la commission géologique du Canada sur les gîtes minéraux du monde et du Canada : *http://apps1.gdr.nrcan.gc.ca/gsc_minerals/index.phtml?language=fr-CA*

Site internet français sur l'industrie minérale dont le BRGM est partenaire :

<http://www.mineralinfo.org>

Système d'information géographique du BRGM sur les mines en France :

<http://sigminesfrance.brgm.fr/sig.asp>

LES GISEMENTS MAGMATIQUES

3

PLAN	3.1 Introduction
	3.2 Les gisements de chromites du complexe du Bushveld, formés par une modification de la séquence de cristallisation d'un magma
	3.3 Les gisements de magnétite et de platinoïdes du complexe du Bushveld, formés par des processus magmatiques et/ou hydrothermaux
	3.4 Les gisements de sulfures formés par immiscibilité magmatique
	3.5 Les autres gisements magmatiques
OBJECTIFS	➤ Comprendre comment de petites perturbations des processus magmatiques classiques sont à la base de la formation de gisements.
	➤ Connaître les gisements d'origine magmatiques d'importance mondiale et les substances utiles qu'ils procurent.

3.1 INTRODUCTION

Les minerais magmatiques sont formés d'accumulations de minéraux magmatiques. Quelques-unes de ces minéraux sont extrêmement rares et jamais rencontrés dans les roches usuelles, comme dans le cas des alliages de platinoïdes ; d'autres minéraux, comme la magnétite, sont courants et sont observés en petites quantités dans un très grand nombre de roches. Ils forment des gisements de minerai lorsqu'ils sont présents en grande quantité dans des concentrations exceptionnellement élevées. L'enjeu de cette partie est de comprendre les processus aboutissant à de telles concentrations.

3.2 LES GISEMENTS DE CHROMITES DU COMPLEXE DU BUSHVELD, FORMÉS PAR UNE MODIFICATION DE LA SÉQUENCE DE CRISTALLISATION D'UN MAGMA

Pour illustrer les processus de concentration, voyons tout d'abord l'exemple des gisements de chromites dans le complexe du Bushveld en Afrique du Sud. Les chromites

ENCART 3.1 Les gisements magmatiques du complexe du Bushveld

Le complexe du Bushveld en Afrique du Sud est sans doute la plus célèbre intrusion mafique-ultramafique au monde notamment pour ces niveaux à chromites (figure 3.1). Comme le montre la figure 3.2 ci-dessous, sur une carte géologique



Figure 3.1 - Veine de chromite à Dwars River, dans le complexe du Bushveld en Afrique du Sud.

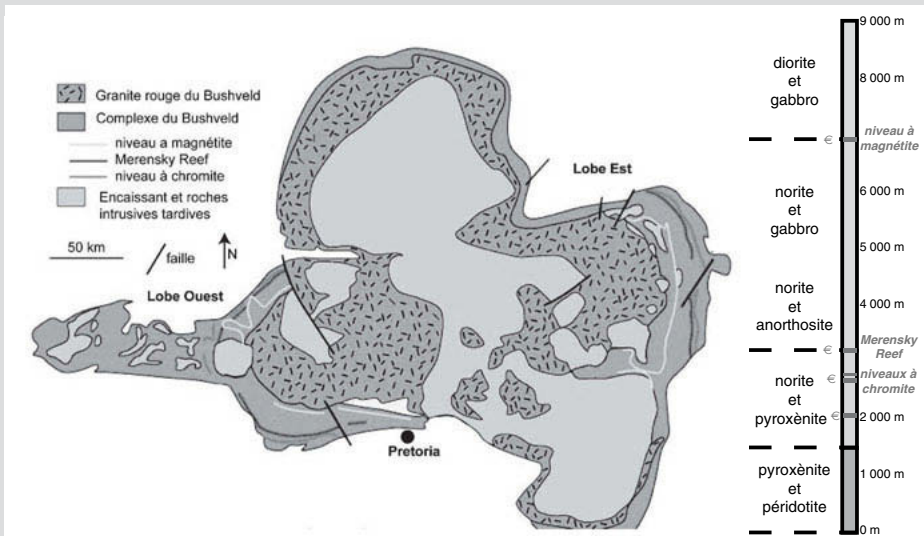


Figure 3.2 - Le meilleur exemple de gisement magmatique : les chromites du complexe du Bushveld en Afrique du Sud.

simplifiée, ce complexe comprend toute une série d'intrusions plus ou moins circulaires. En coupe, ce complexe comprendrait probablement plusieurs corps magmatiques en forme d'entonnoirs. Les roches ont un léger pendage vers l'intérieur, laissant ainsi les parties inférieures de l'intrusion à l'affleurement en périphérie. Le log stratigraphique montre que la lithologie évolue depuis des roches ultramafiques à la base de l'intrusion vers des roches intermédiaires au sommet. Les roches en position inférieure sont des cumulats à olivines et pyroxènes ; au dessus, on trouve des cumulats à pyroxènes et plagioclases ; enfin, le tiers supérieur du complexe est essentiellement composé de diorites.

Le complexe du Bushveld contient trois types de gisements : (1) des gisements de chromites, comme les veines illustrées dans la photographie, qui se trouvent au sein des cumulats ultramafiques. Ces gisements sont exploités pour le chrome et dans certains cas pour les platinoïdes. (2) Des gisements de platinoïdes sont également présents dans le célèbre Merensky Reef situé dans la zone critique, où la lithologie passe de roches ultrabasiques à des roches basiques. (3) Enfin des gisements de magnétite situés dans la partie supérieure du complexe sont exploités pour le vanadium qu'ils contiennent.

Les gisements du complexe du Bushveld répondent à une grande proportion de la consommation globale en ces métaux. La production de chrome représente 50 % de la production mondiale et les productions de platine et de palladium représentent respectivement 72 % et 34 % des productions mondiales.

sont des oxydes de fer et chrome qui constituent la principale source de métal chrome. La figure 3.1, une photographie de veines de chromite dans la Dwars River, à l'ouest du complexe du Bushveld, montre quelques aspects importants des gisements de chromite. Les minéraux sont disposés en couches dont l'épaisseur peut être supérieure à un mètre, qui alternent avec des couches composées d'autres minéraux magmatiques. La roche est un cumulat formé par la cristallisation de minéraux magmatiques à la base de la chambre magmatique du Bushveld. Le complexe du Bushveld lui-même (figure 3.2) est une vaste intrusion différenciée en forme d'entonnoir, dont la partie inférieure, ultrabasique, est composée d'une alternance de cumulats d'olivines et de pyroxènes, la partie intermédiaire, basique, est composée de cumulats de pyroxènes et de plagioclases, et la partie supérieure, plus différenciée, est composée de diorite et gabbro. Des descriptions plus précises sont disponibles dans les articles de Cawthorn et collaborateurs (Cawthorn, 1996). La chromite, minéral composant le minerai, est présente dans toute la partie inférieure, mais normalement sa concentration est limitée à quelques pourcents.

Le gisement de chromite est situé dans la portion supérieure de la zone ultrabasique localisée dans la partie inférieure du complexe qui affleure sur toute sa périphérie.

La teneur en chrome des gisements est de l'ordre de 30-40 % Cr. A titre de comparaison, la teneur moyenne en chrome de croûte continentale est de l'ordre de quelques dizaines de ppm (0,000 1 %), mais le calcul d'une teneur crustale moyenne n'est pas pertinent pour le chrome : l'essentiel du chrome est localisé dans des

roches ultrabasiques dans lesquelles les concentrations sont beaucoup plus élevées. Même si l'on considère que les teneurs en chrome typiques des intrusions ultrabasiques sont de l'ordre de 3 000 ppm, le facteur d'enrichissement (rapport entre la concentration dans le minerai et la concentration de base) est de l'ordre de 100. Quel processus géologique produit de tels degrés d'enrichissement ?

Neil Irvine a apporté une explication claire dans un article publié en 1977 (Irvine, 1977). Son diagramme modifié dans la figure 3.3, montre que sous des conditions normales, 1 à 2 % de chromite cristallise simultanément avec l'olivine. Pour qu'une couche de chromite pure soit produite, la cristallisation de l'olivine et des autres silicates doit être différée. Irvine a proposé deux explications pour différer la cristallisation de ces minéraux, toutes deux illustrées dans la figure 3.4. Dans ce diagramme de phases relativement simple, un cotectique courbe sépare les champs d'apparition de l'olivine et de la chromite. La composition des liquides basiques et ultrabasiques normaux, comme celle du magma parent du complexe du Bushveld, est dans le champ d'apparition de l'olivine. Dans de tels liquides, l'olivine cristallise en premier, et la composition résiduelle du liquide évolue vers la ligne cotectique à partir de laquelle la chromite cristallise également. La chromite et l'olivine cristallisent alors simultanément (dans des proportions variables données par l'intersection de la tangente au cotectique et l'angle olivine-chromite du diagramme). La proportion de chromite est alors comprise entre 1,4 et 1,8 %, quantité observée dans les cumulats à olivine normaux du complexe du Bushveld.

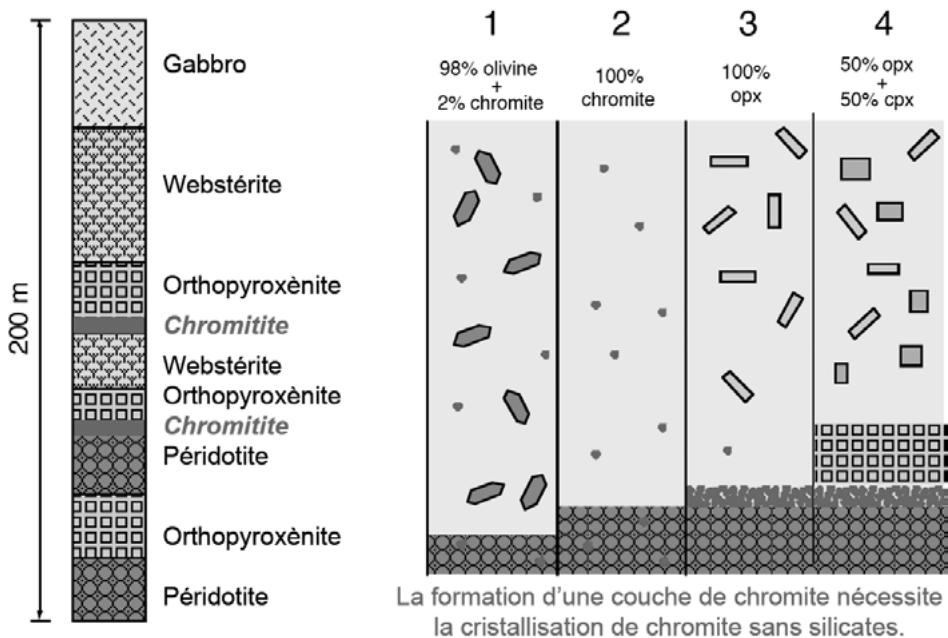


Figure 3.3 - Formation des veines de chromite dans l'intrusion Muskox, Canada.

3.2 • Les gisements de chromites du complexe du Bushveld

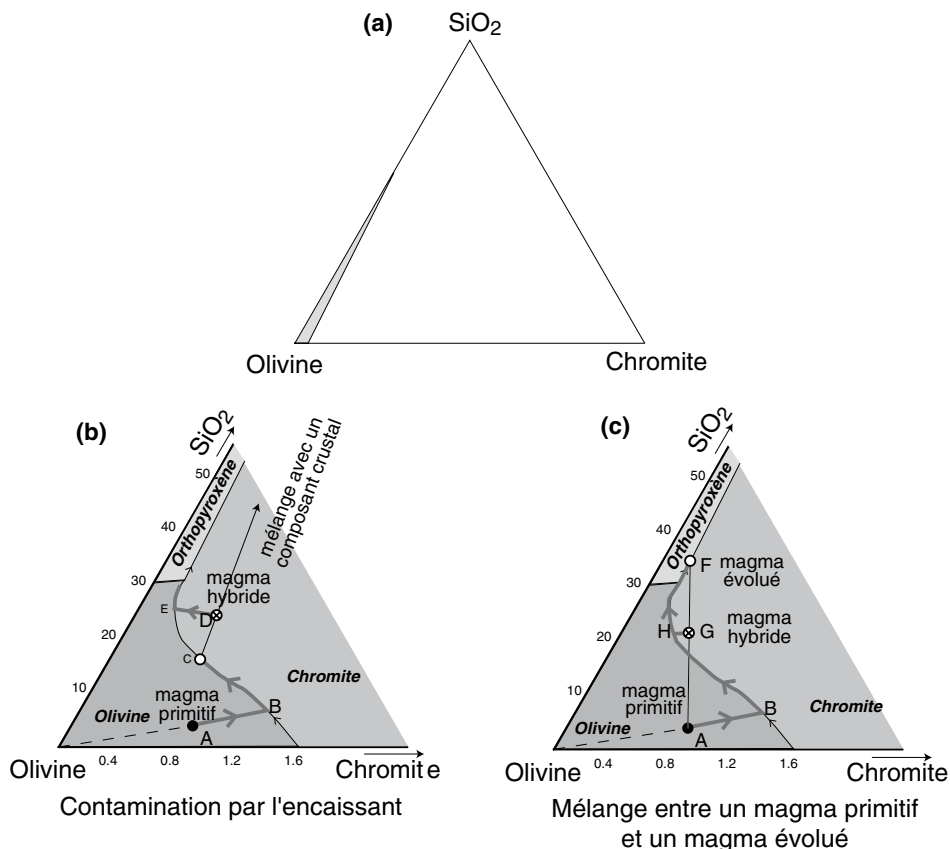


Figure 3.4 – Mécanismes de Irvine (1975 ; 1977) pour expliquer la formation des gisements de chromites du Bushveld.

(a) Représentation dans le diagramme triangulaire (Silice-Olivine-Chromite) des gammes de compositions naturelles. (b) Cas de contamination par l'encaissant : le magma primitif (A) évolue lors de la cristallisation d'olivines vers le point (B). Il suit ensuite la ligne cotectique en direction du point (C). Si à ce moment, il est enrichi en silice par une contamination de l'encaissant (granite), le magma hybride (D) se trouve dans le champ de stabilité de la chromite. Entre (D) et (E) le magma hybride ne cristallise que des chromites. C'est cette cristallisation exclusive de chromite qui crée une concentration suffisante pour former le gisement. (c) Cas de mélange entre un magma primitif (A) et un magma évolué (F) : un tel mélange produit un magma hybride (G) dont la composition chimique entraîne une cristallisation exclusive de chromite sur le trajet de (G) vers (H).

Pour que la chromite cristallise seule, la composition du liquide magmatique doit être déplacée de l'autre côté du cotectique, à l'intérieur du champ d'apparition de la chromite. Une première possibilité est que le magma soit contaminé par une roche de l'encaissant siliceuse (positionné vers le pôle SiO₂ dans la figure 3.4). Le magma hybride contaminé a alors une composition intermédiaire entre la composition du magma initiale et le pôle SiO₂, à un point noté D situé dans le champ d'apparition de

chromite. Lors du refroidissement du liquide magmatique, des chromites cristallisent seules jusqu'à ce que la composition du magma rejoigne la courbe cotectique en E. L'intervalle durant lequel la chromite cristallise seule paraît limité, mais dans de grandes intrusions comme celle du Bushveld, les chromites formées sont en quantité suffisante pour former une couche épaisse exploitable après leur ségrégation par densité dans le fond de la chambre magmatique.

Une seconde explication possible est liée à la forme fortement courbée de la courbe cotectique. À cause de cette forme, lorsqu'un liquide évolué situé dans la chambre magmatique se mélange à un liquide plus primitif qui entre dans la chambre magmatique, la composition du liquide hybride est dans le champ de stabilité des chromites (point G sur la figure 3.4c). Comme dans le cas du liquide contaminé par l'encaissant siliceux, des chromites cristallisent seules dans un tel liquide hybride jusqu'à ce que sa composition parvienne en F sur la courbe cotectique. Il est probable que les deux phénomènes – contamination et mélange de magmas – aient eu lieu lors de la formation des chromites du complexe du Bushveld. La ségrégation par densité des chromites dont la masse volumique ($\sim 4\,600\text{ kg/m}^3$) est largement supérieure à celle du magma ($\sim 2\,800\text{ kg/m}^3$) explique la concentration en couches.

L'explication de la formation des gisements de chromite illustre un principe important : le minéral d'importance économique, dans ce cas la chromite, est un constituant « normal » de nombreuses intrusions magmatiques ultrabasiques et cristallise lors de processus magmatiques « normaux ». Dans des circonstances ordinaires, il est présent en faibles concentrations et les roches « normales » ne constituent pas un minerai. Pour qu'un gisement soit formé, il faut que le processus normal de cristallisation soit perturbé et que le minéral d'intérêt économique soit accumulé dans des concentrations bien plus importantes. Dans le cas des gisements de chromites, la contamination ou le mélange de magma sont les éléments perturbateurs. Comme nous allons le voir dans les chapitres qui suivent, une grande diversité de « perturbations » peuvent modifier les processus pétrologiques, qu'ils soient magmatiques, sédimentaires ou hydrothermaux, et sont responsables de concentrations inhabituelles et anormales (« anormale ») à la base de gisements.

3.3 LES GISEMENTS DE MAGNÉTITE ET DE PLATINOÏDES DU COMPLEXE DU BUSHVELD, FORMÉS PAR DES PROCESSUS MAGMATIQUES ET/OU HYDROTHERMAUX

Le complexe du Bushveld comporte également deux autres types de gisements importants. Dans la partie supérieure de l'intrusion, des couches de magnétites sont exploitées pour leur forte teneur en vanadium. Ces gisements magmatiques, ont probablement été formés par des processus comparables à ceux qui ont formé les gisements de chromite. Les autres types de gisements, de loin les plus importants

3.3 • Les gisements de magnétite et de platinoïdes du complexe du Bushveld

économiquement, sont ceux de platinoïdes (PGE pour « *Platinum Group Element* » ou « éléments du groupe du platine »). Le complexe du Bushveld possède environ 60 % des réserves mondiales en ces métaux précieux, principalement dans deux couches spécifiques de la partie inférieure de l'intrusion. La couche supérieure est la célèbre « Merensky Reef », une fine couche (1-10 m) de pyroxénite pegmatoïde située dans la zone critique ou « *Critical Zone* » (figure 3.2). Principalement à la base du Merensky Reef, on trouve des concentrations en platinoïdes associés aux sulfures qui paraissent faibles mais qui sont économiquement viables (5 à 500 ppm). Grâce au coût élevé des éléments du groupe du platine, même de faibles concentrations en métaux peuvent être exploitées. La deuxième couche, « UG2 », comporte une succession de niveaux de chromite qui sont exploités pour leur forte teneur en Cr, en plus de leur forte teneur en PGE.



ENCART 3.2 Les modèles de formation des gisements de platinoïdes en concurrence

Il n'y a pas encore de consensus sur l'origine des gisements de platinoïdes et diverses hypothèses ont été avancées. Une école présente des arguments pour une formation liée à des processus magmatique : Campbell et Naldrett, par exemple, ont proposé qu'un panache de liquide primitif ait été injecté à la base de la chambre magmatique et se soit ensuite mélangé avec un magma évolué pour produire un magma hybride saturé en sulfures. Des petites gouttes de liquide sulfuré auraient alors subi une ségrégation depuis le liquide silicaté, en concentrant les éléments du groupe du platine qui sont chalcophiles (à forte affinité pour le soufre contenu dans les sulfures). Les gouttelettes de sulfures auraient alors colonisé la base de l'intrusion formant lentement la couche de minerai. L'école opposée, à laquelle appartiennent Boudreau et Mathez propose un rôle central de la migration de fluides riches en éléments volatils qui auraient traversé le cumulus durant leur ascension, lessivant les minéraux du cumulus de leur PGE avant de les redéposer en traversant un horizon favorable.

Que peut-on faire de ces deux hypothèses ? N'est-il pas étonnant que l'on ne comprenne pas mieux l'origine de gisements parmi les plus importants, qui sont pourtant parfaitement accessibles grâce à d'excellents affleurements et à la présence de mines, et qui ont été étudiés pendant près d'un siècle ? Pourquoi ces deux écoles auxquelles appartiennent des géologues d'expérience et très respectés ont développé des modèles si différents ? Pour répondre à ces questions, nous vous encourageons à consulter la littérature abondante sur le sujet et vous faire votre propre idée.

Les éléments du groupe du platine sont spécifiquement exploités dans d'autres grandes intrusions basiques-ultrabasiques litées, comme Stillwater aux États-Unis et Great Dyke au Zimbabwe, qui constituent la source majeure en ces métaux. Mais ces éléments sont également extraits, en proportions variables comme sous-produit (ou « résidu ») de l'exploitation des gisements de sulfures magmatiques, notre troisième exemple de gisement magmatique.

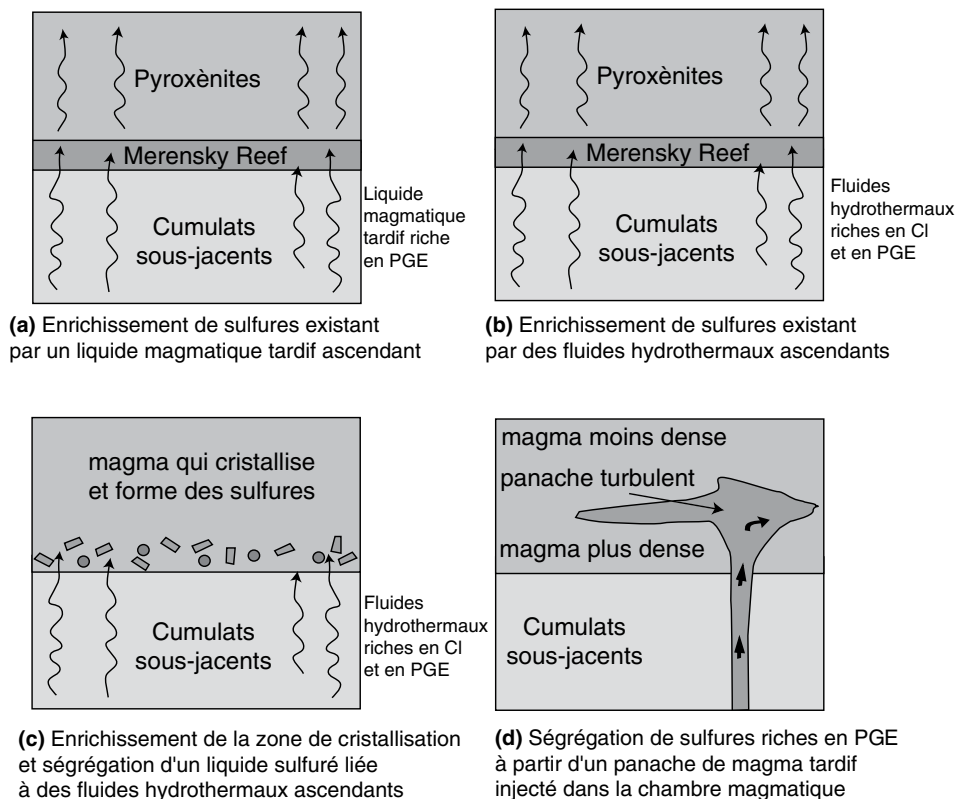


Figure 3.5 – Modèles pour la formation du Merensky Reef, Afrique du Sud.

3.4 LES GISEMENTS DE SULFURES FORMÉS PAR IMMISCIBILITÉ MAGMATIQUE

Lorsqu'un liquide basique refroidit, des minéraux s'y forment. Une suite de phases solides apparaît, typiquement l'olivine, le pyroxène, les feldspaths et les oxydes qui sont les constituants classiques des roches magmatiques basiques. Mais sous certaines circonstances, lors de la cristallisation, un second liquide immiscible se sépare du magma. Dans de rares cas un second liquide silicaté se forme ou, si la teneur en soufre est suffisamment élevée, un second liquide sulfuré est formé. Un exemple important est montré dans la figure 3.6. Les gouttelettes de liquide sulfuré contiennent de fortes concentrations en éléments chalcophiles (à forte affinité pour le soufre) comme le nickel, le cuivre ou les platinoïdes, et comme leur densité ($> 5,0$) est supérieure à celle du liquide silicaté ($\sim 2,8$), elles colonisent la base du corps magmatique. Si une quantité suffisante est ségrégée et si les teneurs en métaux sont élevées, le liquide sulfuré forme un gisement.

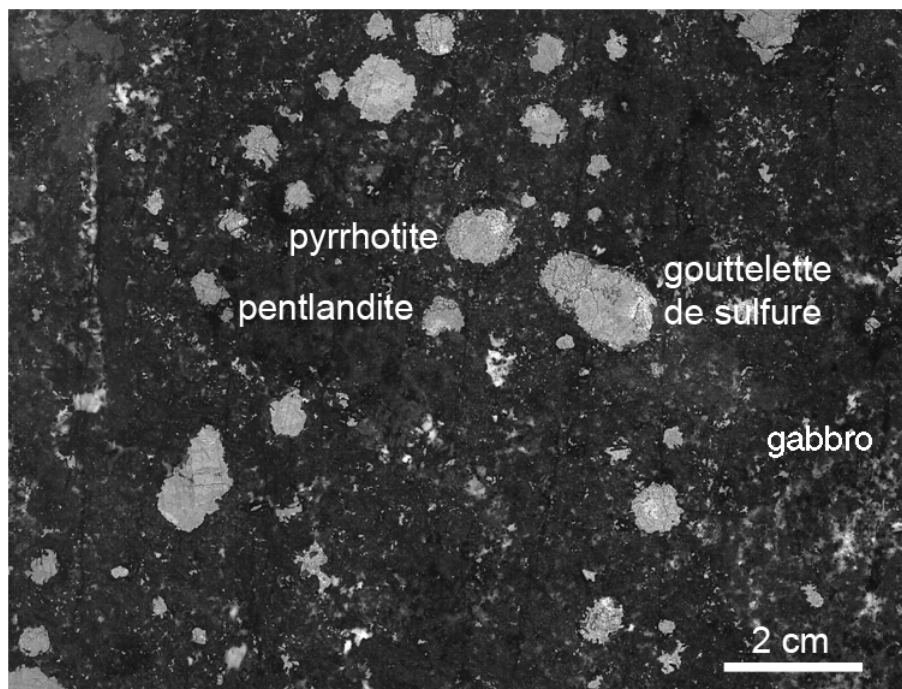


Figure 3.6 – Gouttelettes de sulfures magmatiques au sein d'un gabbro à Noril'sk-Talnakh, Russie.

Une fois encore, nous sommes en face d'un problème : des intrusions basiques et ultrabasiques sont connues sur tous les continents, et d'après leurs compositions pétrologiques et géochimiques, leurs magmas parents contiennent des concentrations assez élevées en Ni, Cu et PGE. L'observation de lames minces de roches montre que si parfois les sulfures ont formé un liquide immiscible qui a été séparé du liquide silicaté, dans la majorité des cas les sulfures ne constituent que des phases rares qui apparaissent très tardivement dans la séquence de cristallisation. Quelle particularité amène certains magmas à ségréger des quantités abondantes de sulfures riches en métaux ? Autrement dit, qu'est ce qui a « perturbé » la séquence de différenciation normale et a permis la formation d'un gisement ?

3.4.1 Le gisement de sulfures de nickel de Kambalda (Australie)

Pour répondre à cette question, nous n'allons pas étudier les gisements les plus importants (les plus grands et les plus concentrés), que l'on trouve dans des roches intrusives très variées et qui ont des origines diverses, mais nous allons commencer par inspecter les caractéristiques du gisement de Kambalda, l'un des rares gisements mis en place dans des roches volcaniques.

Kambalda est situé dans le craton archéen de Yilgarn (2,7 Ga), à l'ouest de l'Australie, dans la savane aride. Le contexte géologique est présenté dans la figure 3.7 : une série de coulées de laves ultrabasiques de komatiites recouvre des basaltes tholéiitiques et est recouverte elle-même par des basaltes magnésiens. La pile complète est visible à l'affleurement dans un petit dôme structural dont la figure 3.8 propose une coupe géologique simplifiée.

Les gisements de sulfures sont restreints aux coulées de komatiites aux positions les plus inférieures et sont localisés à leur base, dans des dépressions dans les basaltes sous-jacents.

Loin du gisement, de fines bandes de roches sédimentaires siliceuses riches en sulfures sont présentes entre les basaltes et les komatiites, mais dans les dépressions qui contiennent les gisements, ces roches sédimentaires sont absentes.

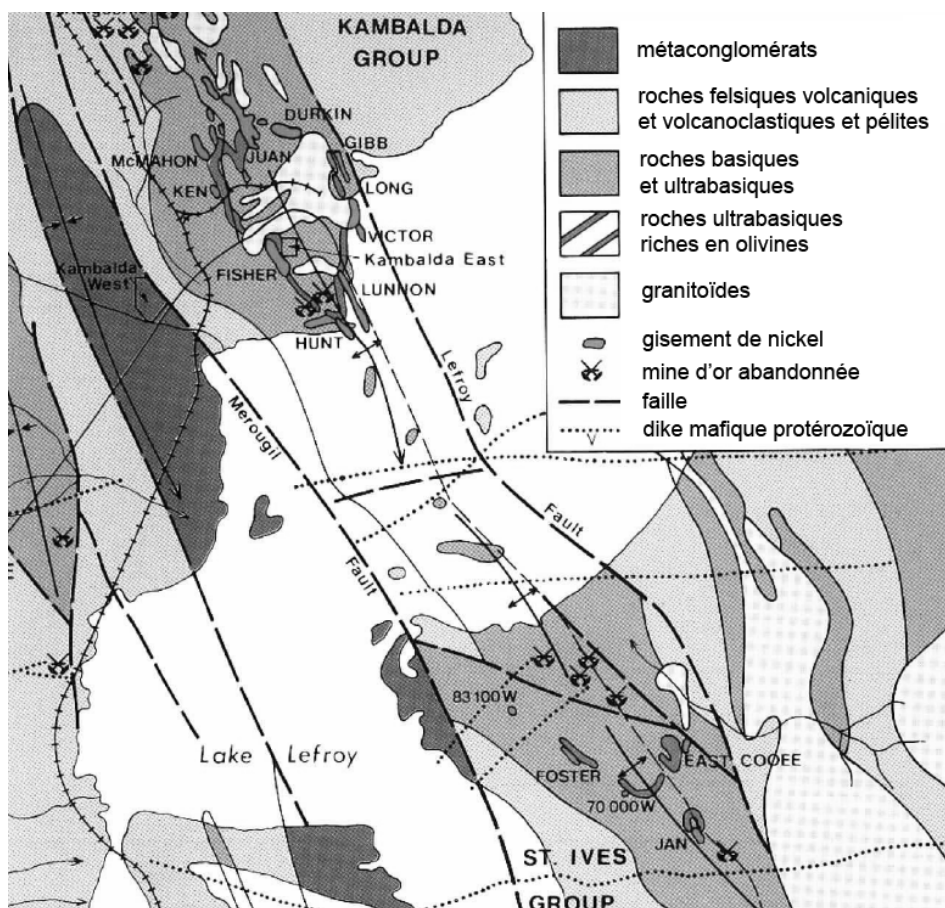


Figure 3.7 - Carte géologique de la région de Kambalda, Australie.

Modifié d'après Gresham et Laftus-Hills (1981).

3.4 • Les gisements de sulfures formés par immiscibilité magmatique

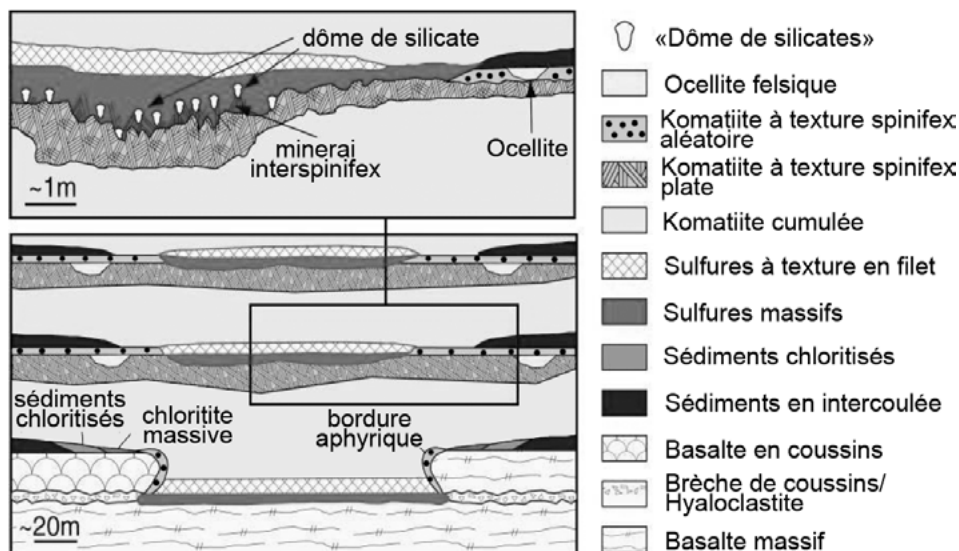


Figure 3.8 - Coupe schématique de gisement typique de Kambalda, montrant les distributions des sédiments entre les coulées, les minéralisations interspinifex, et les ocellites felsiques.

D'après Groves *et al.*, 1986, Frost and Groves, 1989 et Leshner et Klays, 2002.

Les minerais eux-mêmes ont des caractéristiques qui doivent être décrites, parce qu'elles apportent des indices importants sur leur processus de formation. Strictement parlant, les minéraux du minerai devraient être décrits comme des sulfures de fer, nickel, cuivre et platinoïdes, parce qu'ils contiennent tous ces métaux. Les principaux sulfures sont la pentlandite $(\text{Fe,Ni})_9\text{S}_8$ et la chalcopryrite (CuFeS_2) qui coexistent avec les sulfures de fer « stériles » (qui ne contiennent pas d'autre métal que le fer) de type pyrrhotite $(\text{Fe}_{(1-x)}\text{S})$.

Dans de nombreuses parties du gisement, une couche massive de sulfures purs souligne la base de la coulée de komatiite. Elle est recouverte par un minerai à texture en « filets », dans lequel des grains d'olivine serpentinisée sont entourés d'une matrice de sulfures et par des cumulats d'olivine serpentinisée contenant des sulfures disséminés. Des veines et des lentilles de sulfures riches en cuivre pénètrent la roche sous-jacente et sont visibles jusqu'à la partie supérieure de la coulée de komatiite. La composition de ces sulfures correspond à une « solution solide de monosulfures », celle du liquide sulfuré qui a été séparé du liquide silicaté. Les sulfures massifs eux-mêmes ont subi une cristallisation fractionnée qui a abouti à la formation de couches de cumulats de sulfures riches en nickel et fer, après la cristallisation de sulfures riches en cuivre et platinoïdes. Ces sulfures tardifs ont migré dans les roches environnantes.

Chapitre 3 • Les gisements magmatiques

Toutes les coulées de komatiites se trouvent au sein du craton de Yilgarn de 1 500 km de long, mais les gisements ne sont observés que dans certaines d'entre elles. D'autre part, les komatiites sont des roches très courantes dans l'immense ceinture de l'Abitibi au Canada, mais les gisements sont petits et rares. Ces quelques informations soulèvent un certain nombre de questions :

- Pourquoi à Kambalda les gisements de Ni sont formés dans les komatiites et pas dans les coulées de laves basiques ?
- Pourquoi les gisements de sulfures sont plus courants dans le craton de Yilgarn que dans la ceinture de l'Abitibi ?
- Qu'est ce qui distingue les komatiites de Kambalda riches en sulfures des komatiites pauvres en sulfures ?

Le tableau 3.1 compare les propriétés chimiques et physiques des magmas komatiitique et basaltique. Le magma komatiitique ultrabasique a une concentration en MgO supérieure et une concentration en SiO₂ inférieure, ce qui implique l'éruption d'une lave beaucoup plus chaude (jusqu'à 1 600 °C) et avec une viscosité beaucoup plus faible que celle d'un magma basaltique. Le nombre de Reynolds, qui décrit en mécanique des fluides si l'écoulement à l'intérieur d'un liquide est laminaire ou turbulent, est d'environ 10⁵ pour une coulée de 10 m de komatiite. Cette valeur est très supérieure à 3 000, valeur critique en deçà de laquelle l'écoulement d'un fluide est considéré laminaire. Une coulée de komatiite est donc un système turbulent, et par conséquent, la chaleur de cette lave de très haute température est transférée efficacement à la roche de l'encaissant sur laquelle le magma s'écoule. Un effet important est la fusion de la roche de l'encaissant, et son assimilation par le magma komatiitique. À Kambalda, l'encaissant est composé de roches sédimentaires riches en sulfures (pyrite), et comme il a été assimilé, il a entraîné une hausse de la teneur en soufre du magma. C'est ce processus de contamination qui a amené à la ségrégation d'un liquide sulfuré immiscible. Comme le magma komatiitique contient beaucoup de nickel et comme le nickel est un élément chalcophile, le sulfure est également riche en Ni ; parce que les liquides sulfurés sont plus denses que les liquides silicatés, ils colonisent la base des coulées et forment des gisements comme ceux que l'on observe à Kambalda. Le processus est illustré dans la figure 3.9.

Tableau 3.1 - Comparaison des propriétés physiques des komatiites et des basaltes.

	Komatiite	Basalte
MgO (% poids)	30	8
Température (°C)	1600	1200
Viscosité (Poises)	5	100
Nombre de Reynolds (écoulement turbulent lorsque Re > 3000)	10 ⁴ à 10 ⁵	500

3.4 • Les gisements de sulfures formés par immiscibilité magmatique

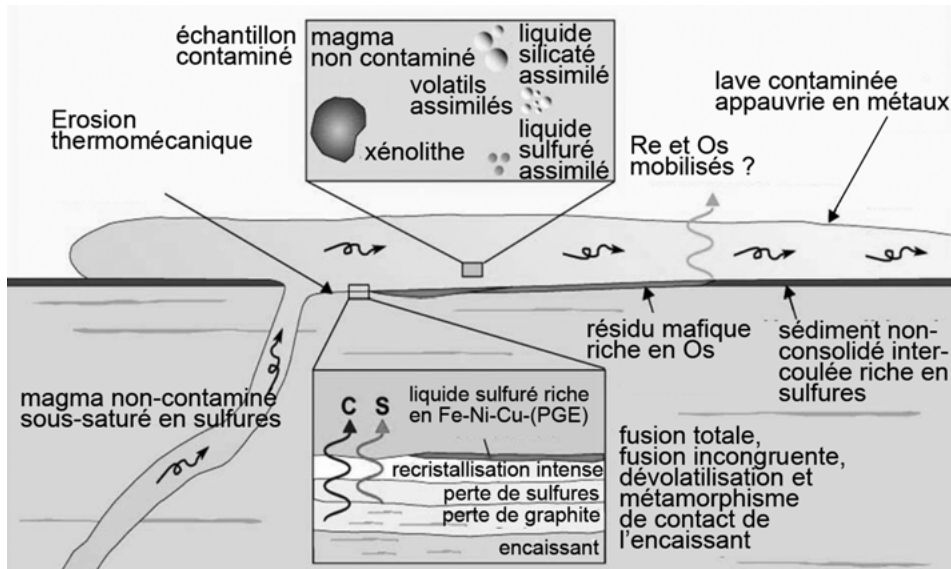


Figure 3.9 – Processus de formation du minerai à Kambalda.

D'après Lesher et collaborateurs (2001).

Les liquides basaltiques sont plus froids et plus visqueux que les liquides komatiitiques, et leur petit nombre de Reynolds (~ 500) signifie que leur écoulement est laminaire. Pour cette raison, ils sont rarement capables d'assimiler l'encaissant sur lequel ils s'écoulent. Aucun soufre complémentaire n'a pu être incorporé à partir de sources externes et un liquide sulfuré immiscible est formé uniquement lors des derniers stades de cristallisation, lorsque les cristaux abondants empêchent sa ségrégation. De plus, parce que les basaltes ont de faibles teneurs en nickel et platinoïdes, les sulfures n'ont que de très faibles concentrations en ces éléments. Ce sont là les principales raisons pour lesquelles les gisements de ce type sont rencontrés dans les coulées komatiitiques et pas dans les coulées basaltiques.

Pourquoi ces gisements sont-ils particulièrement fréquents dans la région de Kambalda ? Il y a deux facteurs principaux : premièrement, la présence de roches sédimentaires riches en sulfures, qui procurent le soufre ; deuxièmement, la nature des komatiites elles-mêmes. Les coulées de lave qui contiennent les gisements sont inhabituellement épaisses (jusqu'à 100 m) et sont formées principalement de cumulats d'olivine riche en forstérite. Ces caractéristiques correspondent à celles de roches ayant cristallisé à partir d'un liquide komatiitique relativement primitif, particulièrement chaud, particulièrement fluide, et apte à assimiler son encaissant. Le magma contient également une grande quantité de nickel et de platinoïdes, métaux qui sont généralement extraits lors de la cristallisation fractionnée qui a affecté les magmas plus évolués comme ceux qui se sont mis en place dans d'autres zones.

3.4.2 Les gisements de sulfures de nickel de Noril'sk-Talnakh (Russie)

Ces gisements riches et concentrés sont situés à l'extrême nord de la Russie dans un contexte géologique est très différent de celui de Kambalda dans la mesure où ces gisements sont situés dans de petites intrusions peu profondes qui appartiennent à l'énorme province magmatique de Sibérie. Le fait que la plus grande province basaltique continentale contienne les plus grands gisements n'est pas totalement une coïncidence, car comme nous allons voir, la formation de ces gisements est liée à des processus complexes.

La figure 3.11, une carte géologique de la région, montre la grande étendue des trapps de Sibérie – ils ont recouvert une surface aussi importante que toute l'Europe occidentale. Les gisements sont situés dans la partie nord de la province, là où plus tard, la déformation a exposé la base de la pile volcanique et l'encaissant sédimentaire dans lequel le magma s'est mis en place. Ces roches sédimentaires sont traversées par une série très complexe de sills (conduits horizontaux) qui hébergent les gisements, comme le présente la figure 3.12.



ENCART 3.3 L'exploitation des gisements de sulfures de Ni-Cu dans la région de Noril'sk-Talnakh (Russie)

La ville de Noril'sk est située à 56° de latitude nord, dans les parties les plus reculées de la Sibérie, très près du cercle polaire. Les gisements qu'on y trouve sont fabuleusement riches, certains ayant des lentilles de sulfures massifs de plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur et présentant de fortes teneurs en Ni, Cu, et PGE. Si l'on additionne tous les métaux qu'il contient, cet ensemble de gisements est sans doute l'un des plus riches du monde.

Les gisements de Noril'sk ont été découverts dans les années 1950 et les mines qui ont ouvert immédiatement après ont été exploitées par les prisonniers des goulags soviétiques. Plusieurs fonderies ont été construites pour purifier le minerai et pendant plusieurs décennies, leurs fumées riches en soufre ont dévasté l'environnement alentour et usé la santé des habitants de la région. La ville de Noril'sk figure à la liste des dix sites les plus pollués de la planète, classement qu'elle doit certainement au passé. Il reste à voir si les efforts récents pour rendre les opérations de traitement du minerai plus propres auront un effet significatif. Les photographies de la figure 3.10 présentent quelques aspects de la ville ; les immeubles d'assez mauvaise qualité sont abîmés à la fois par les diverses fumées soufrées qui sortent des fonderies et par le climat extrêmement hostile du nord de la Sibérie.



Figure 3.10 – La ville de Noril'sk, ses fonderies et les paysages alentours affectés par les fumées.

Modifié d'après Gerald K. Czamanske.

Une coupe schématique à travers un sill (figure 3.13.) montre la complexité de sa géométrie et de ses lithologies. Les gisements sont présents dans les parties les plus épaisses des sills, et ces portions sont différenciées, depuis des portions inférieures de lithologie « picrite enrichie en olivine », à des portions supérieures de lithologie « gabbro ». Le minerai se présente sous la forme de remarquables couches métriques de sulfures massifs à la base de l'intrusion (figure 3.14) et sous la forme de sulfures disséminés ou en tant que veines et lentilles dans l'intrusion ou pénétrant dans l'encaissant.

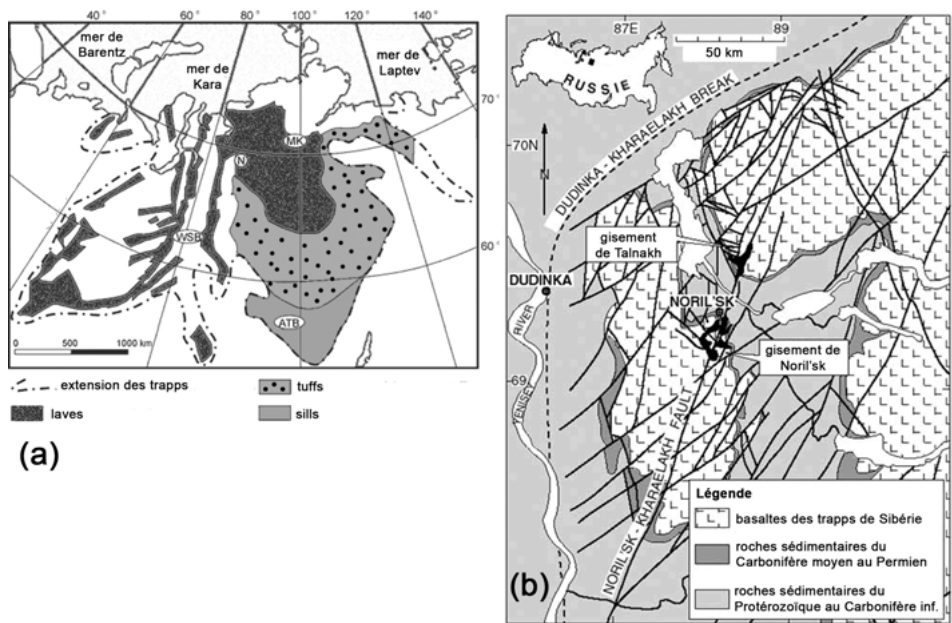


Figure 3.11 - Les trapps de Sibérie et les gisements de sulfures de nickel de Noril'sk Talnakh.

Sources : (a) www.mantleplumes.org

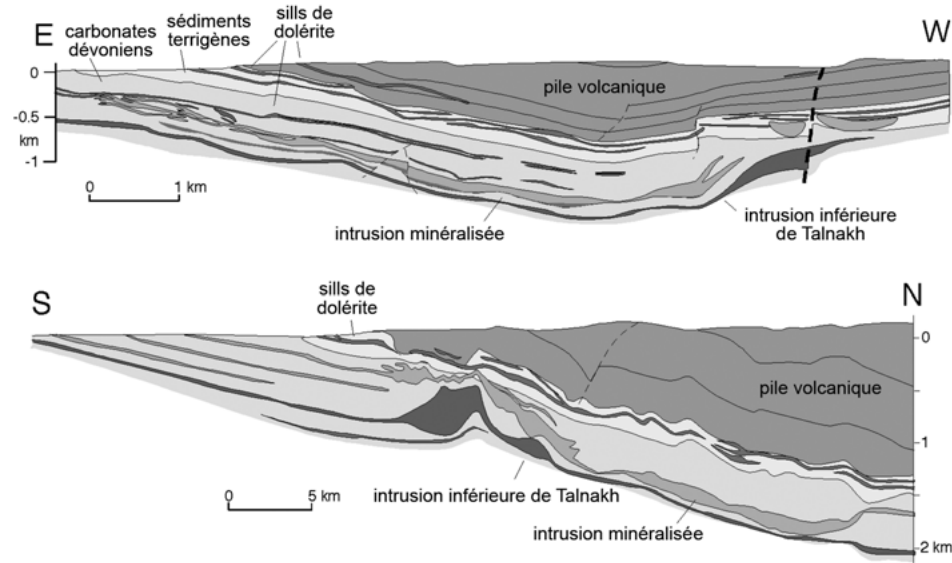


Figure 3.12 - Coupe   travers la pile volcanique et le complexe de sills sous-jacent aux trapps de Sibérie.

3.4 • Les gisements de sulfures formés par immiscibilité magmatique

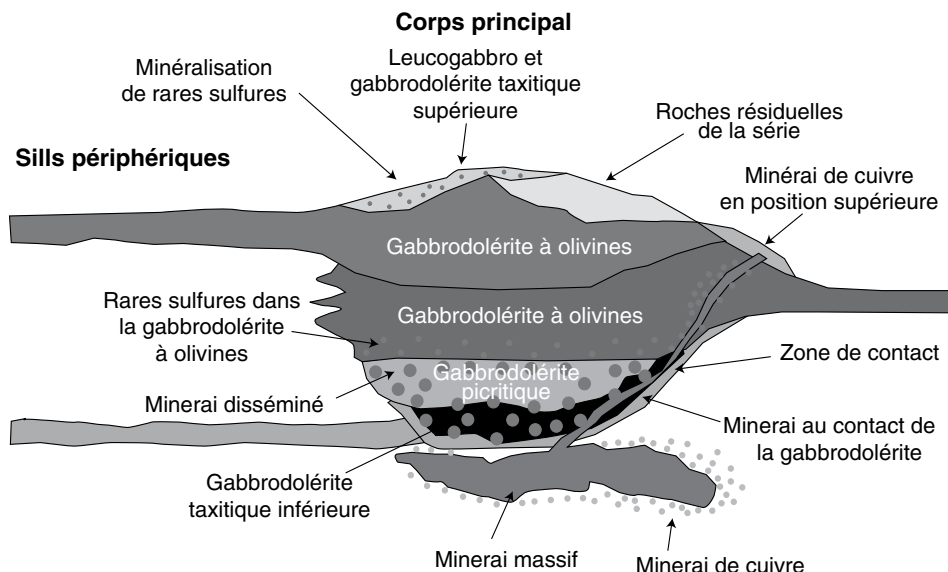


Figure 3.13 - Coupe d'un sillon minéralisé du gisement de Noril'sk Talnakh.

D'après Czamansk *et al.* (2002).

La minéralogie du minerai est similaire à celle du minerai de Kambalda, mais il possède de plus fortes teneurs en cuivre. Ceci est lié à la composition des magmas à partir desquels le minerai a été formé : les magmas ultramafiques riches en nickel et pauvres en cuivre de Kambalda ont produit un minerai avec un rapport Ni/Cu d'environ 10 ; les magmas basaltiques de Noril'sk qui ont moins de nickel et plus de cuivre comportent du minerai avec des rapports Ni/Cu de l'ordre de 2.

Dans un certain sens, l'origine de ce minerai est comparable à celle du minerai de Kambalda. Un liquide sulfuré immiscible a ségrégué depuis un liquide silicaté et les gouttelettes denses ont colonisé la base des intrusions. Mais les trapps de Sibérie ne sont qu'une grande province magmatique parmi d'autres, et malgré les efforts d'exploration des compagnies minières qui ont prospecté activement les autres provinces magmatiques, il s'agit de la seule qui contienne de grands gisements. Comment cela s'explique-t-il ? Une partie de l'explication réside dans sa taille et le fort flux de magma impliqué lors de sa mise en place. Des datations récentes ont montré que la grande majorité de la pile volcanique s'est mise en place dans un intervalle de temps très bref à l'échelle des temps géologiques. La mise en place des trapps de Sibérie a duré très probablement moins d'un million d'années, avec pour conséquence une fusion rapide d'un énorme volume de manteau et l'ascension rapide de grandes quantités de magma chaud à travers la croûte. Dans de telles circonstances, l'interaction du magma avec la croûte est facilitée, et de fait, des données géochimiques diverses apportent les preuves que de nombreux basaltes des trapps de Sibérie ont assimilé de grandes portions de croûte continentale. En fait, une analyse précise des données montre que ce n'est pas l'assimilation de croûte de type granitoïde qui a

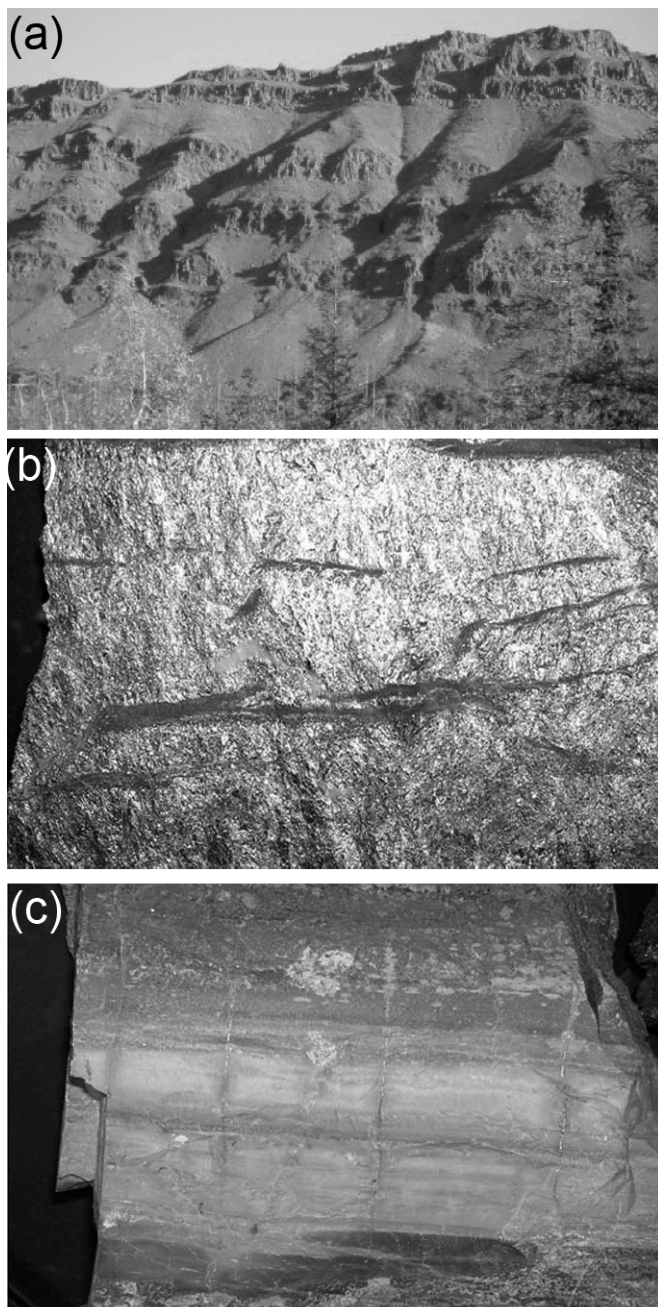


Figure 3.14 – Photographies des trapps de Sibérie, du minéral et des évaporites.

3.4 • Les gisements de sulfures formés par immiscibilité magmatique

entraîné la formation des gisements de sulfures de Ni-Cu, mais plutôt des processus de plus faible profondeur.

L'argument principal est montré dans les figures 3.12 et 3.15. Le premier diagramme est une coupe de la séquence sédimentaire sous les basaltes de Sibérie qui est traversée par les intrusions minéralisées. La formation supérieure est constituée de sédiments terrigènes du Permien, les formations inférieures sont constituées de carbonates, d'argiles, et surtout d'évaporites du Silurien et du Dévonien. Les évaporites sont composées d'anhydrite (CaSO_4), une source potentielle de soufre. Le second diagramme compare la composition isotopique des intrusions minéralisées de Noril'sk-Talnakh à celle des intrusions non minéralisées, celle du manteau terrestre, et celle des évaporites. La composition isotopique du soufre des intrusions minéralisées est intermédiaire, entre celle du manteau et des intrusions non minéralisées, et celle des évaporites. Ceci témoigne d'une origine mixte (mantellique et évaporitique) du soufre dans les gisements de Noril'sk-Talnakh, liée à un processus d'assimilation. Naldrett (2006) et autres géologues pensent que l'assimilation du soufre évaporitique a entraîné la

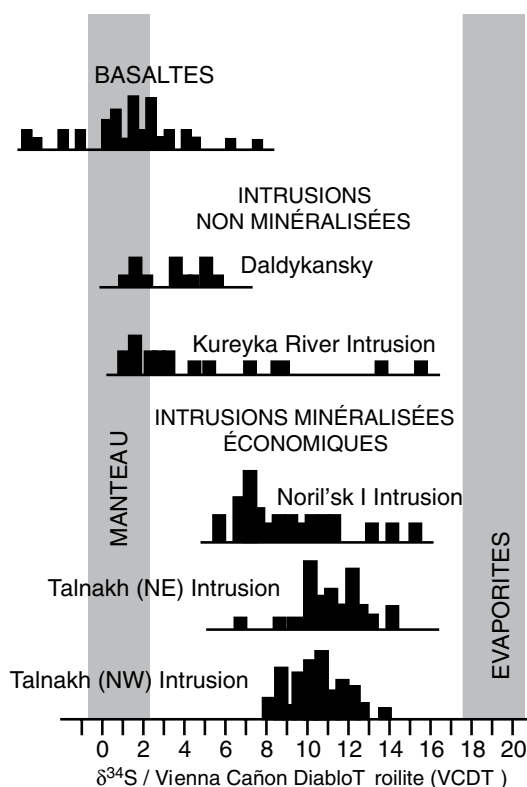


Figure 3.15 – Compositions isotopiques du soufre des roches associées au gisement de Noril'sk-Talnakh.

Modifié d'après Ripley et collaborateurs (2003).

ségrégation du liquide sulfuré immiscible à la base des gisements. L'assimilation de roches sédimentaires de l'encaissant aurait eu lieu lorsque le magma a traversé la pile sédimentaire, comme illustré dans la figure 3.15.

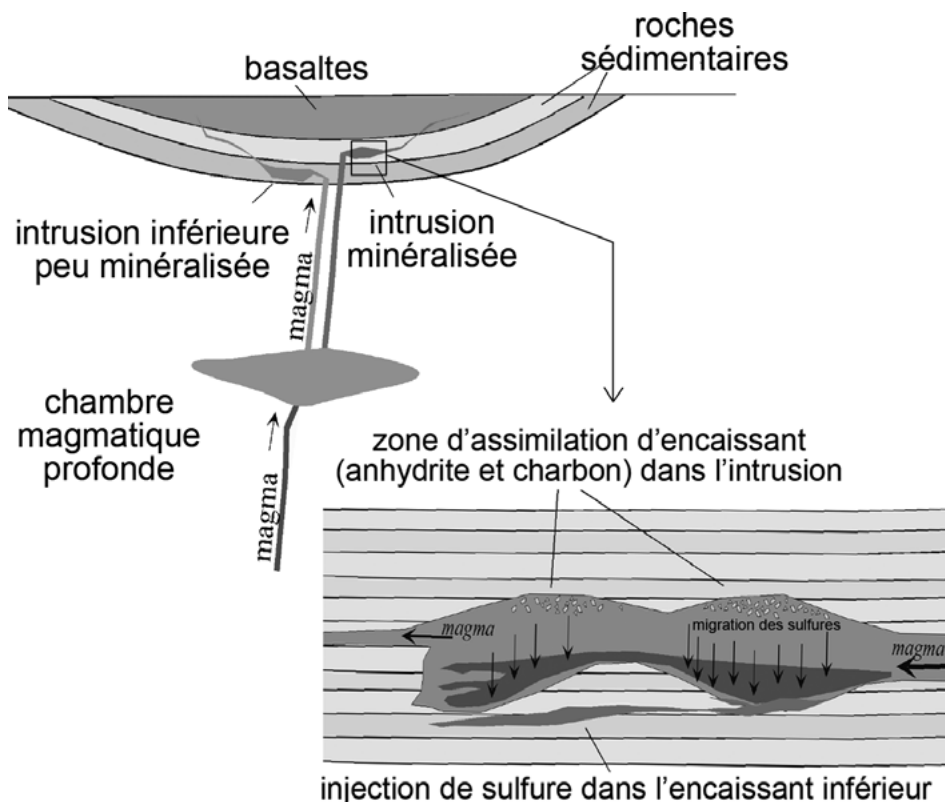


Figure 3.16 – Processus de formation du gisement à Noril'sk-Talnakh.

Exercice 3.1 – Identification des séries magmatiques qui pourraient contenir des gisements.

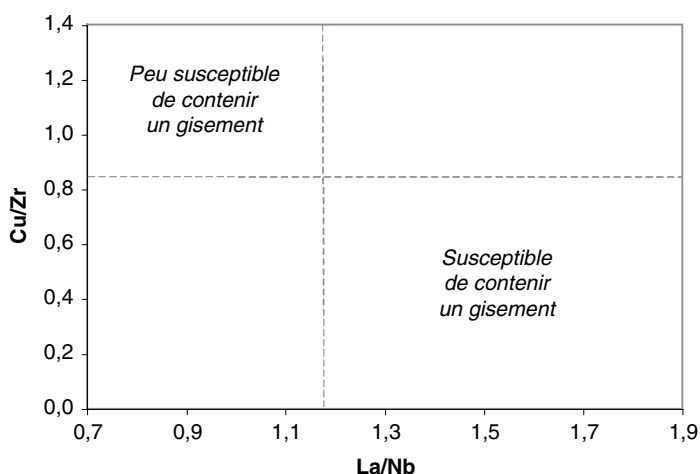
Les gisements magmatiques de Ni-Cu-PGE sont formés lorsqu'un liquide sulfuré subit une ségrégation à partir d'un magma. Les données géochimiques constituent un outil intéressant utilisé par les prospecteurs pour identifier les magmas susceptibles de contenir des gisements, qui ont perdu des sulfures et qui ont été contaminés par des roches crustales (processus qui aboutit souvent à la ségrégation de sulfures). Une donnée géochimique importante pour identifier la ségrégation de sulfure est donc un rapport entre un élément chalcophile (forte affinité pour les sulfures) et un élément trace incompatible normal, comme par exemple le rapport Cu/Zr. Pour identifier la contamination crustale, un rapport

3.4 • Les gisements de sulfures formés par immiscibilité magmatique

entre des éléments incompatibles très différents dans les roches crustales est utilisé, comme par exemple le rapport La/Nb. Une autre donnée essentielle est la teneur en MgO, qui lorsqu'elle est élevée indique la présence de magmas primitifs de faible viscosité. De tels magmas sont en général riches en métaux tels que le nickel, le cuivre et les platinoïdes et sont capables d'interagir avec les roches crustales.

Le tableau qui suit présente la composition de deux séries de magmas. Calculez les rapports appropriés et présentez ces données dans le diagramme proposé. Quelle série choisiriez-vous pour lancer une campagne de prospection ?

	La (ppm)	Nb (ppm)	Zr (ppm)	Cu (ppm)	MgO (% pds)
Série A					
roche 1	18	10	130	34	6,1
roche 2	19	12	138	80	6,3
roche 3	5,6	3,9	89	76	9,0
roche 4	4,9	4,0	55	49	15,7
roche 5	8,4	5,8	109	102	7,1
Série B					
roche 1	13,3	12,5	131	123	6,5
roche 2	6,3	7,2	81	106	16,2
roche 3	3,9	3,5	104	89	7,5
roche 4	8,2	8,7	58	60	8,2



ÉLÉMENTS DE SOLUTION : on trouvera plus probablement des gisements dans une série magmatique dont les compositions se trouvent dans la partie en bas à droite du diagramme.

3.4.3 Les autres gisements de sulfure de nickel

Les gisements de Sudbury (Canada) sont d'une taille équivalente à ceux de Noril'sk – Talnakh. Ces gisements sont vraiment uniques dans la mesure où ils sont associés à un impact de météorite. Le minerai est sous la forme de couches massives et de ramifications (« *pod* ») dans des dépressions au niveau du contact inférieur, et dans des intrusions extérieures au complexe de Sudbury. Le complexe de Sudbury est une intrusion différenciée interprétée comme une portion de matériel crustal fondu sous l'impact d'une météorite. Au site de l'impact, deux grands types de roches étaient présentes : des roches de l'Archéen constituées de granites et de roches vertes, et des roches sédimentaires. Après l'impact, le magma mafique, dense, s'est accumulé dans une partie inférieure du corps fondu tandis que le magma felsique a formé une couche supérieure. Le corps fondu était globalement très chaud, et avait une viscosité très faible. Ainsi des gouttelettes de liquide sulfuré ont pu ségréger à la base de l'intrusion ou ont pu être injectées le long de fractures dans les roches encaissantes.

Une autre intrusion importante est celle de Voisey's Bay à Terre Neuve (Canada). Ce gisement est inhabituel parce qu'il est situé dans des intrusions mafiques qui appartiennent à une suite orogénique, qui inclut des troctolites et des anorthosites, mais le minerai de Voisey's Bay a été formé lors de processus similaires à ceux connus pour Noril'sk Talnakh. Alors que le magma a traversé une série complexe d'intrusions, il a interagi avec l'encaissant, en assimilant peut-être du soufre provenant de roches sédimentaires riches en sulfures, et ceci a conduit à la formation d'un gisement de sulfures de nickel dans les conduits magmatiques en position supérieure.

3.5 LES AUTRES GISEMENTS MAGMATIQUES

Peut-être que les gisements magmatiques les mieux connus sont les gisements de diamants dans les kimberlites. Une kimberlite est une roche provenant d'un magma ultramafique très spécial, qui contient des éléments volatils (eau, CO₂), qui est riche en potassium et en éléments incompatibles et qui dérive probablement d'une fusion partielle avec un faible taux de fusion d'une source mantellique profonde enrichie. Les kimberlites se mettent en place lors d'éruptions très explosives, durant lesquelles elles forment des petits cratères en forme d'entonnoir appelés maars. Elles sont restreintes aux domaines continentaux, et on les rencontre généralement en bordure des cratons archéens. Il y a quelques décennies, toutes les mines de diamants étaient dans le sud de l'Afrique, mais depuis des gisements importants ont été découverts en Russie, en Australie, au Canada et en Finlande.

Strictement parlant, les diamants dans les kimberlites ne sont pas réellement magmatiques. Ils sont interprétés comme des xénocristaux prélevés dans le manteau lithosphérique sous-continental lors de l'ascension du magma kimberlitique depuis sa source profonde vers la surface. Le diamant est la forme stable du carbone aux pressions et températures qui règnent dans la partie inférieure de la lithosphère.

Comme le carbone est relativement abondant dans les roches mantelliques il est probable que cette partie du manteau contienne une grande réserve de diamants. Le magma à l'origine des kimberlites est simplement un véhicule qui transporte les diamants rapidement à la surface sous des conditions qui les empêchent de se transformer en polymorphes du carbone de plus basse pression moins attractifs.

Avant de clore ce chapitre, mentionnons les gisements d'oxydes divers. Les oxydes de fer, comme la magnétite (Fe_3O_4) ou l'ilménite (FeTiO_3) se rencontrent dans les intrusions mafiques et sont exploités dans la majorité des cas comme source de titane, vanadium, et dans de très rares cas comme source de fer (la plupart des gisements de fer sont d'origine sédimentaire comme nous le décrivons dans le chapitre 5). Les exemples les plus importants sont les gisements d'ilménite du Canada situés au sein d'anorthosites du Protérozoïque, ou les gisements de magnétite riche en titane et vanadium comme ceux du complexe du Bushveld en Afrique du Sud ou de la région d'Emeishan en Chine. La forte teneur en oxyde de fer de ces gisements est attribuée dans une certaine mesure à la forte concentration initiale des magmas en fer, à partir desquels les oxydes ont cristallisé et ont pu être concentrés. La forte teneur en fer est caractéristique de magmas mantelliques primaires et peut être accentuée par la cristallisation de plagioclase qui enrichit le liquide résiduel en fer. L'origine des célèbres gisements de Kiruna au Nord de la Suède, qui ont eu un énorme impact sur le développement industriel de ce pays, fait encore l'objet de débats. Pendant longtemps, ils ont été présentés comme des gisements magmatiques classiques, mais plus récemment, ils ont été réinterprétés comme un cas extrême de gisement d'oxyde de fer, cuivre, or comme présenté dans le chapitre 4. Une excellente source d'information sur la mine de Kiruna et sur d'autres gisements majeurs en Europe est disponible sur internet à l'adresse www.gl.rhbc.ac.uk/geode/.

De l'autre côté du spectre des roches magmatiques, on trouve les granites, et dans certaines rares régions du monde, ces roches contiennent de la cassitérite, un oxyde d'étain (SnO_2), ou de la scheelite, un oxyde mixte de tungstène (CaWO_4). Ces minerais sont également interprétés comme des cumulats de minéraux magmatiques qui ont cristallisé en quantité relativement abondante à partir de magmas granitoïdiques exceptionnellement riches en étain ou en tungstène.

Les gisements que l'on nomme « porphyres de cuivre », principale source de cuivre mais également de molybdène sont également situés dans des roches granitiques, mais comme nous l'expliquerons dans le prochain chapitre, ces gisements résultent de processus hydrothermaux.

Enfin, les rares magmas sous-saturés en silice, comme les syénites et carbonatites peuvent contenir des gisements de cuivre, comme c'est le cas du gisement Palabora (ou Phalaborwa) en Afrique du Sud, qui se réclame la plus grande mine à ciel ouvert du monde, mais également des éléments utilisés dans les nouvelles technologies comme le niobium, le tantale et les terres rares.

3.6 CONCLUSION

Les gisements d'origine magmatique constituent une source conséquente en nombreux métaux et en diamants. Ils sont liés à une accumulation exceptionnelle de minéraux magmatiques communs. Généralement, un phénomène ponctuel – magma assimilant de l'encaissant ou contaminé par un second magma, formation d'un liquide sulfuré immiscible lors de la saturation des sulfures, cristallisation massive de feldspath qui dope le liquide résiduel en métaux, etc. – entraîne une évolution singulière du liquide magmatique et la cristallisation massive d'un ou plusieurs minéraux d'intérêt économique. On rencontre souvent ces tris minéralogiques dans les intrusions basiques litées qui présentent une organisation des minéraux magmatiques en de nombreuses couches, et qui contiennent parfois quelques lits riches en minéraux d'intérêts faisant l'objet d'une exploitation.

Bibliographie

- ARNDT N.T., LESHER C.M. et CZAMANSKE G.K. (2005), « Mantle-derived magmas and magmatic Ni-Cu-(PGE) deposits », *Economic Geology, 100th Anniversary volume*, 5-24.
- CAWTHORN R.G. (1996), « Layered Intrusions », *Developments in Petrology*, 15, 531 p.
- CZAMANSKE G.K., ZEN'KO T.E., FEDORENKO V.A., CALK L.C., BUDAHN J.R., BULLOCK J.H., FRIES T., KING B.-S. et SIEMS D. (2002), « Petrographic and geochemical characterization of ore-bearing intrusions of the Noril'sk type. Siberia : With discussion of their origin, including additional datasets and core logs », US Geological Survey Open-File Report : 02-74.
- ECKSTRAND O.R. et HULBERT L.J. (2007), « Mineral Deposits of Canada – Magmatic Nickel-Copper-PGE deposits », http://gsc.nrcan.gc.ca/mindep/synth_dep/ni_cu_pge/index_e.php
- FROST K.M., GROVES D.I. (1989), « Magmatic contacts between immiscible sulfide and komatiite melts ; implications for genesis of Kambalda sulfide ores », *Economic Geology*, 84 : 1697-1704.
- GRESHAM J.J., LOFTUS-HILLS G.D. (1981), « The geology of the Kambalda nickel field, Western Australia ». *Economic Geology*, 76 : 1373-1416.
- GROVES D.I., KORAKKOSKI E.A., MCNAUGHTON N.J., LESHER C.M., COWDEN A. (1986), « Thermal erosion by komatiites at Kambalda, Western Australia and the genesis of nickel ores ». *Nature*, 319, 136-138.
- IRVINE T.N. (1975), « Crystallization sequences in the Muskox intrusion and other layered intrusions-II. Origin of chromitite layers and similar deposits of other magmatic ores », *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 39 : 991-1008.
- IRVINE T.N. (1977), « Origin of chromitite layers in the Muskox Intrusion and other stratiform intrusions ; a new interpretation », *Geology*, 5 : 273-277.
- LESHER C.M., BURNHAM O.M., KEAYS R.R., BARNES S.J. et HULBERT L. (2001), « Geochemical discrimination of barren and mineralized komatiites associated with magmatic Ni-Cu-(PGE) sulfide deposits », *Canadian Mineralogist*, 39 : 673-696.

- LESHER et KEAYS (2002), « Komatiite-associated Ni-Cu-(PGE) deposits : Mineralogy, geochemistry, and genesis. The geology, geochemistry, mineralogy, and mineral beneficiation of the platinum-group elements », *Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum*, Special 54 : 579-617.
- NALDRETT A.J. (2004), *Magmatic sulfide deposits: geology, geochemistry and exploration*, Springer, 727 p.
- RIPLEY E.M., LIGHTFOOT P.C., LI C., ELSWICK E.R. (2003), « Sulfur isotopic studies of continental flood basalts in the Noril'sk region: implications for the association between lavas and ore-bearing intrusions », *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67 : 2805-2817.
- WHITNEY J.A. and NALDRETT A.J. (1989), « Ore Associated with magmas », *Reviews in Economic Geology*, vol. 4, 250 p.

LES GISEMENTS HYDROTHERMAUX

4

PLAN

- 4.1 Introduction
- 4.2 Les facteurs clés pour la formation d'un gisement hydrothermal
- 4.3 Les principaux exemples de gisements hydrothermaux illustrant les processus métallogéniques
- 4.4 Les autres types de gisements hydrothermaux
- 4.5 Conclusion

OBJECTIFS

- Comprendre les facteurs clés permettant les transferts chimiques et leurs conséquences métallogéniques dans les processus hydrothermaux
- Connaître les principales catégories de gisements d'origine hydrothermale et les substances utiles qu'ils procurent.

4.1 INTRODUCTION

Cette catégorie de gisements minéraux constitue la principale source mondiale pour la plupart des métaux. Les gisements hydrothermaux procurent presque 100 % du plomb, zinc, molybdène et argent que nous utilisons, 60 à 90 % du cuivre, or et uranium et également des pierres précieuses ainsi que des matériaux industriels comme des minéraux argileux et le quartz. Les types de gisements sont divers et on les rencontre dans des contextes géologiques et tectoniques variés : certains sont étroitement associés avec des intrusions granitiques, d'autres se forment sur le plancher océanique ou encore dans des bassins sédimentaires. Ces gisements ont en commun leur origine liée à la précipitation de minéraux et de métaux à partir de fluides aqueux de haute température ayant parfois des teneurs significatives en CO₂ et/ou méthane.

4.2 LES FACTEURS CLÉS POUR LA FORMATION D'UN GISEMENT HYDROTHERMAL

La formation d'un gisement hydrothermal requiert une série de circonstances. Quatre facteurs clés, énumérés dans la figure 4.1, sont (1) une source de fluide, (2) un

mécanisme dans lequel le métal ou les minéraux sont dissous dans le fluide, (3) un moteur à la circulation du fluide, (4) un mécanisme responsable de la précipitation des métaux ou des minéraux. Précisons maintenant comment ces facteurs conditionnent la formation de gisement, avant d'illustrer à travers la description de cinq types de gisements la façon dont ils modulent les types de minéralisation.

Facteurs clés pour la formation d'un gisement hydrothermal

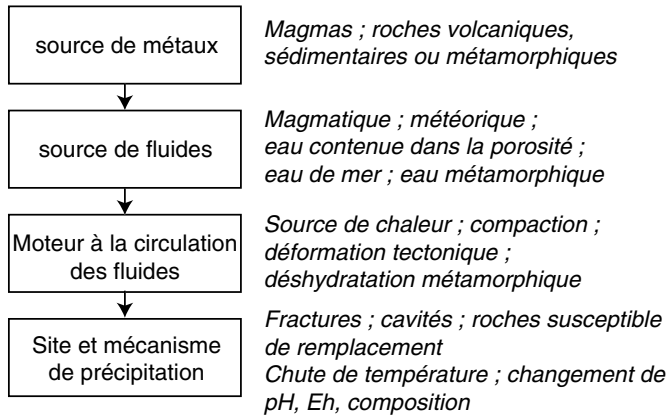


Figure 4.1 - Facteurs clés dans la formation des gisements hydrothermaux.

4.2.1 Source de métaux

Certains gisements hydrothermaux sont directement liés à des roches plutoniques, dans la plupart des cas des granitoïdes, et dans ces gisements il est clair que les métaux proviennent des magmas eux-mêmes. Les meilleurs exemples sont les gisements de porphyres de cuivre, catégorie de gisement qui procure environ 50 % du cuivre mondial. Pour la plupart des autres gisements hydrothermaux, un lien avec le magma ne peut être montré et les métaux proviennent de types de roches variés : souvent ils sont lessivés lors de la percolation de fluides hydrothermaux dans les roches de l'encaissant. Le type de gisements hydrothermaux le mieux connu est peut-être les amas sulfurés ou sulfures massifs volcanogéniques (VMS pour *Volcanogenic Massive Sulfide*, en anglais) qui se sont formés et continuent de se former actuellement sur le plancher océanique. En circulant à travers la croûte océanique, l'eau de mer lessive les métaux qui sont présents en très faibles concentrations (élément traces) dans les roches volcaniques et sédimentaires et les reprécipite sur le plancher océanique formant des gisements. Dans d'autres types de gisements hydrothermaux, des roches métamorphiques ou sédimentaires procurent les métaux.

Les types de métaux que l'on trouve dans les gisements sont directement reliés à leur source. La source granitique des porphyres de cuivre produit des gisements qui ne sont pas uniquement riches en cuivre, mais également en molybdène, tungstène,

et en plus petites quantités en or et argent. Les gisements de sulfures massifs volcano-géniques (VMS) sur la croûte océanique sont également riches en cuivre, qui dans ce cas est associé au zinc ; lorsque des roches volcaniques felsiques (riche en minéraux clairs comme le quartz, les feldspaths ou la muscovite) ou des roches sédimentaires sont présentes dans le substrat, du plomb s'ajoute également au cuivre et au zinc. Dans les gisements dans des contextes exclusivement sédimentaires, le cuivre est moins présent et le plomb et le zinc dominant dans le minerai. Enfin, on rencontre les gisements hydrothermaux d'or et d'uranium dans une grande variété de types de roches et leur origine dépend du type de fluide, de la façon dont il a circulé et du processus par lequel les métaux ont été concentrés.

4.2.2 Source et nature des fluides

Les fluides hydrothermaux qui produisent des gisements sont souvent des saumures (liquides saturés en sels) d'origines diverses. Même si leur composition est souvent modifiée par l'interaction avec les roches traversées, en utilisant des techniques géologiques et géochimiques variées, il a été possible d'identifier les types de fluides suivants :

- Fluides magmatiques libérés lors des diverses phases de refroidissement et de cristallisation des magmas granitiques
- Eau météorique (de pluie)
- Eau de mer
- Eau interstitielle (contenue dans la porosité des roches dans les bassins sédimentaires)
- Fluides métamorphiques (libérés lors de réactions de déshydratation et décarbonatation dans les niveaux plus profonds de la croûte)

Les températures des fluides hydrothermaux, déterminées à partir de l'étude des inclusions fluides dans les minéraux du minerai et de sa gangue, vont de plus de 600 °C dans les fluides magmatiques à 50-70 °C pour les fluides qui forment les gisements de sulfures de Pb-Zn ou les minéraux uranifères dans les piles sédimentaires. Quelques exemples de compositions de fluides sont présentés dans le tableau 4.1.

La solubilité des métaux dans l'eau pure est très faible, même à haute température, et pour qu'un fluide puisse transporter des métaux et les redéposer, il doit avoir une certaine salinité et contenir des anions. Pendant de nombreuses années, le processus de transport des éléments comme le plomb ou l'or par les fluides hydrothermaux est resté très énigmatique. Des expérimentations menées depuis les années 1960 et jusqu'aux années 1980 ont montré que les solubilités étaient bien inférieures à celles nécessaires pour former les gisements mêmes les plus modestes.

Par exemple, la solubilité du zinc dans une solution légèrement acide à 100 °C est environ $1 \times 10^{-5} \text{ g.l}^{-1}$. Si un tel fluide devait former un gisement de taille raisonnable, la quantité nécessaire de fluide qui devrait circuler à travers le gisement serait de l'ordre de 100 000 km³, un volume plus grand que celui de la mer Caspienne ! Des travaux plus récents ont montré que la solubilité des métaux exploités est fortement augmentée dans les solutions salines par la formation de complexes métalliques avec des anions dissous comme le chlore ou le fluor et avec le soufre oxydé ou réduit.

Tableau 4.1 – Composition de quelques fluides des systèmes hydrothermaux (compilation de Chenevoy et Piboule, 2007).

(a) Continentaux	T (°C)	pH	Na + K (ppm)	Ca (ppm)	Cl (ppm)	SO ₄ (ppm)	SiO ₂ (ppm)	CO ₃ (ppm)	H ₂ S (ppm)	Cu (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)
Broadlands-Ohaaki, Nouvelle-Zélande (Simmons et Browne, 2000)	260	6,3	541	7	25	19	170	1144				
	220	5,9	809	10	732	102	353	1074	86			
	250	6										
Rotokawa, Nouvelle-Zélande (Krupp et Seward, 1987)	339	7,1	563	2,5	871	35,8	436	496	27		50	100
	318	5,7	583	1,6	807	5,2	580	3788	228		40	25
	329	6,7	355	1,1	515	11	579	4575	106	25	175	125
Matsao, Taiwan (Ellis, 1979)	245	2,4	6390	1470	13400	350	369	2			1	13
Salton Sea, Californie (Ellis, 1979)	340	5,5	77800	40000	184000	10				8	102	540
(b) Océaniques	T (°C)	pH	Na + K (ppm)	Ca (ppm)	Cl (ppm)	SO ₄ (ppm)	SiO ₂ (ppm)	CO ₃ (ppm)	H ₂ S (ppm)	Cu (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)
Ride Est-Pacifique 21°N, NCS et HG (Von Damm, 1990)	273	3,8	12736	832	20555		975		224	1,3	37,8	2600
	351	3,3	1121	468	17608	37	780		286	2800	74,3	6760
Ride Est-Pacifique 13°N et 11°N (Von Damm, 1990)	354	3,1	13745	2148	25276		966		279		5,6	325
	347	3,1	12104	900	19986		940		292		21,7	6825
Ride média-Atlantique, TAG et MARK-1 (Von Damm, 1990)	321		14095	1040	23394		1100					
	350	3,9	12650	396	19844		910		201	1088	10,3	3250
Ride Juan de Fuca, Axial Volcano Inferno (Von Damm, 1990)	328	3,5	12570	1872	22187		755		238	768	23,4	7435
Ride Juan de Fuca, Vent-1 (Von Damm, 1990)	285	3,2	16658	3388	31808		1140		192	128		39000
Golfe de Californie, Guaymas, 4 et 5 (Von Damm, 1990)	315	5,9	12719	1360	21264		690		163	70	47,6	1235

4.2 • Les facteurs clés pour la formation d'un gisement hydrothermal

La figure 4.2 montre comment la concentration en Zn augmente de cinq ordres de grandeur lorsque la teneur en Cl passe de faibles valeurs comme dans l'eau de pluie ou l'eau de mer à des valeurs plus élevées comme celles mesurées dans les fluides salins. Dans ce cas, la forte solubilité résulte de la formation de complexes chlorés d'ordre élevé ; dans d'autres fluides les complexes avec des espèces variées de soufre sont importants.

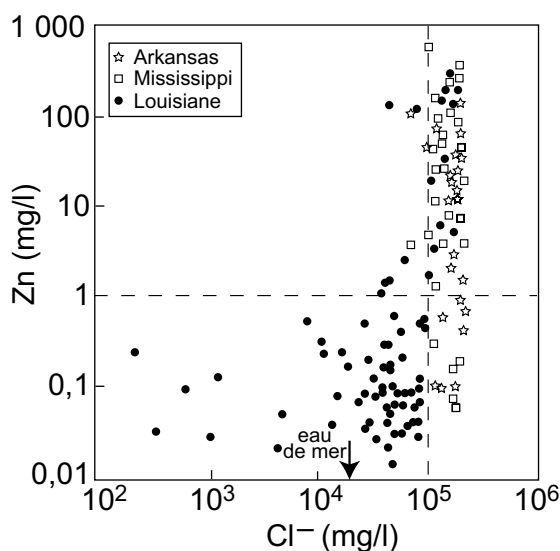


Figure 4.2 – Solubilité du Zn dans les fluides hydrothermaux.

La solubilité du Zn dans les fluides hydrothermaux augmente brusquement lorsque la teneur en Cl^- est supérieure à $10^5 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ grâce à la formation de complexes chlorés. Si la teneur en Cl^- diminue, quand par exemple le fluide est dilué, le Zn précipite et peut former des gisements (modifié d'après Cathles et Adams, 2005).

Les compositions des fluides hydrothermaux sont présentées dans le tableau 4.1. Au départ, les sources de Cl et de S dans ces fluides ont été l'eau de mer, mais pour expliquer leurs fortes concentrations on pense que le chlore et le soufre ont été introduits dans les fluides lors de la dissolution de roches. Le Cl pourrait provenir de la dissolution d'évaporites et le soufre de la dissolution de sulfates sédimentaires ou d'espèces réduites comme la pyrite et les autres sulfures sédimentaires diagénétiques, les matériaux organiques contenant du soufre ou le sulfure d'hydrogène (gazeux).

4.2.3 Le moteur de la circulation des fluides

Dans les dernières décennies, le processus dit de « sécrétion latérale » a été évoqué comme responsable de la formation de gisement. L'idée était que la diffusion des métaux et des autres éléments le long d'un gradient thermique ou chimique pouvait

entraîner la précipitation de métaux dans un domaine limité et former ainsi un corps minéralisé. Cette idée a été abandonnée lorsqu'on a démontré que les éléments ne peuvent diffuser que dans des circonstances très exceptionnelles dans des gradients chimiques comme ceux mis en jeu entre les faibles concentrations d'un élément dans une solution et sa forte concentration dans un corps minéralisé. Il est admis que la plupart des gisements ont été formés suite à la circulation de fluides hydrothermaux et, en effet, une importante circulation de fluides est nécessaire pour former un grand gisement. Une question importante est en fait la nature du processus ou du moteur qui permet la circulation du fluide.

Comme pour les autres paramètres discutés précédemment, il y a de nombreuses possibilités. Pour les gisements liés à une activité magmatique, la libération de fluides par les magmas est la principale force motrice. L'exsolution de fluides aqueux à partir du liquide silicaté implique une forte augmentation de volume qui permet la fracturation des roches situées au-dessus de la chambre magmatique. Les fluides chauds de faible densité remontent alors par les fractures. Parallèlement à ce processus, le réchauffement de l'eau souterraine autour de l'intrusion entraîne sa convection et renforce la circulation primaire.

La convection est le principal moteur de la circulation des fluides qui forment des gisements sur le plancher océanique. Par des fractures, l'eau de mer pénètre dans la croûte où elle reçoit de la chaleur des magmas situés dans les intrusions de faible profondeur. Les fluides réchauffés, moins denses, remontent alors à la surface à travers d'autres fractures. Dans le cas de gisements dans des bassins sédimentaires, le mécanisme moteur est moins évident. L'évacuation des fluides contenus dans les pores pendant la compaction des sédiments joue un rôle sans aucun doute, mais dans de nombreux cas, il s'agit d'un processus trop lent pour produire les flux violents de fluides chauds impliqués dans la formation de certains gisements. La charge tectonique associée à la formation de chaînes de montagnes est parfois proposée comme responsable de la minéralisation de quelques exemples gisements. Une fois encore, le processus paraît trop lent pour produire des flux suffisants pour former les gisements observés. Dans ces deux cas, les gisements sont associés à des failles.

4.2.4 Un site et un mécanisme de précipitation

Le point crucial d'un processus de formation d'un gisement est la précipitation des métaux ou des minéraux. Un mécanisme qui provoque la libération des métaux de la solution et permet de les concentrer dans un volume restreint de roche est nécessaire. La cause la plus courante de précipitation est le refroidissement de la solution, qui abaisse la solubilité des métaux. Le refroidissement se produit lorsque des fluides magmatiques chauds pénètrent un encaissant froid, lorsque des fluides provenant d'une source hydrothermale du plancher océanique se mélangent avec l'eau de mer froide ou lorsque les fluides chauds d'un bassin se mélangent avec des eaux froides de surface. Associée avec ces refroidissements, la dilution des saumures hydrothermales entraîne une baisse de la concentration des anions formant des complexes,

ce qui décroît également la solubilité des métaux et provoque leur précipitation. Un autre processus minéralisateur est la réaction avec l'encassant, qui change la composition du fluide. Les réactions d'oxydoréduction sont particulièrement importantes et se produisent lorsque les eaux oxydées d'un bassin entrent en contact avec des matériaux réduits comme les hydrocarbures ou les argiles riches en matière organique. Ce type d'interaction est crucial dans la formation de la plupart des gisements d'uranium et de nombreux gisements de métaux de base dans les bassins sédimentaires.

Il y a deux types de sites de dépôts ; les fractures ouvertes et les zones de remplacement ou d'imprégnation. De nombreux gisements hydrothermaux sont formés dans les niveaux supérieurs de la croûte, aux endroits où des fractures restent ouvertes et dans ce cas, l'essentiel de la minéralisation consiste en des minéraux d'intérêt qui cristallisent dans ces espaces ouverts. Les corps minéralisés formés par ces processus consistent en une multitude de veines et de zones riches en minéraux économiques, dispersées dans la roche encassante. Les cavités et les cavernes dans les récifs calcaires et les karsts, ainsi que les espaces interstitiels des brèches, sont d'importants sites de cristallisation des sulfures de plomb. Et d'une certaine manière, l'eau de mer dans laquelle les sulfures des gisements VMS se forment peut également être considérée comme un cas extrême et très particulier de précipitation dans un espace ouvert.

Les fluides hydrothermaux sont chimiquement agressifs et capables de réagir avec une grande diversité de lithologies. Des zones altérées dans lesquelles on trouve des minéraux d'intérêt économique entourent la plupart des systèmes hydrothermaux. Dans certains cas, les minerais sont disséminés ou restreints à des veines ; dans d'autres cas le remplacement global de la roche d'origine est évident.

4.3 LES PRINCIPAUX EXEMPLES DE GISEMENTS HYDROTHERMAUX ILLUSTRANT LES PROCESSUS MÉTALLOGÉNIQUES

Nous avons sélectionné cinq types de gisements pour illustrer comment les différents types de fluides dans des contextes géologiques variés peuvent mener à la formation d'un gisement. La liste est en aucun cas exhaustive – dans un texte court comme celui-ci, il est impossible de décrire la diversité des gisements formés par la circulation de fluides hydrothermaux. Cependant, notre sélection suffit, nous l'espérons, à illustrer l'essentiel des aspects de cette catégorie de gisements. Comme pour la description des gisements magmatiques, l'accent n'est pas sur les caractéristiques des gisements eux-mêmes mais plus sur les processus qui les ont engendrés.

4.3.1 Les gisements d'amas sulfurés ou « sulfures massifs volcanogéniques » (ou VMS *Volcanogenic Massive Sulfide*)

Introduction

Nous commençons avec ce type de gisements parce son processus de formation est parmi les mieux compris. Il y a de nombreuses raisons à cela : les gisements sont relativement simples, à la fois dans leur structure, dans leur minéralogie et dans leur composition, et ils ont également fait l'objet de nombreuses études durant les dernières décennies. Mais il s'agit surtout des très rares gisements dont la formation, dans ce cas par précipitation de sulfures sur le plancher océanique, peut être observée directement de nos jours (les autres gisements dont on peut actuellement observer la formation sont les gisements de placers et les gisements de sulfures des bassins sédimentaires, décrits dans les chapitres à venir).

En 1977, la découverte de sources hydrothermales actives sur le plancher océanique, les fameux « fumeurs noirs », par Robert Ballard et Jean Francheteau lors de plongées dans le submersible Alvin est peut-être l'une des plus grandes découvertes en sciences de la Terre des dernières décennies. Si ces observations ont eu de profondes implications sur l'évolution des idées sur l'origine et l'évolution de la croûte océanique, et sur l'existence d'écosystèmes n'ayant pas de dépendance directe pour l'énergie solaire, elles ont également ouvert une fenêtre sur la formation in situ d'un gisement. À chaque source hydrothermale, des sulfures riches en Zn, Cu et Pb précipitent dans des cheminées qui entourent les jets ascendants de fluides hydrothermaux ou sont éjectés des panaches hydrothermaux et retombent sur le plancher océanique (figure 4.3). La plupart des accumulations de sulfures sur le plancher océanique actuel sont relativement restreintes mais on pense que les systèmes ayant eu une longue durée de vie, comme ceux qui ont formé le « *TAG mound* » sur la ride médio-atlantique, contiennent environ 3 millions de tonnes de sulfures ayant environ 2 % de cuivre et en moindres concentrations du zinc, et de l'or. Si de tels gisements étaient présents à l'air libre (et non dans un environnement hostile à toute exploitation), ils seraient économiquement viables et les métaux pourraient en être extraits. Dans un avenir assez proche, il est probable que le partage de ces ressources soit l'objet de débats animés de politique internationale sur les délimitations des eaux territoriales à la propriété des fonds océaniques.

Les gisements VMS ont été parmi les premiers à être exploités : des minerais exploités il y a plus de 2000 ans à Chypre et en Espagne ont par exemple procuré l'essentiel du cuivre dont les Romains ont formé les armes de leurs centurions. Au début du ^{xx}e siècle, alors que les idées des géologues américains comme Lindgren régnaient, ces gisements ont été interprétés comme des corps de remplacement épithermaux, produits par la précipitation de sulfures à partir de fluides d'origine granitique. Cependant, dans les années 1960 et 1970, des géologues canadiens et australiens (ex. R.L. Stanton, D.F. Sangster) développèrent l'hypothèse que ces gisements avaient été formés sur le plancher océanique, une idée confirmée par la découverte ultérieure des fumeurs noirs (figure 4.3). Après une importante contribution

4.3 • Gisements hydrothermaux illustrant les processus métallogéniques

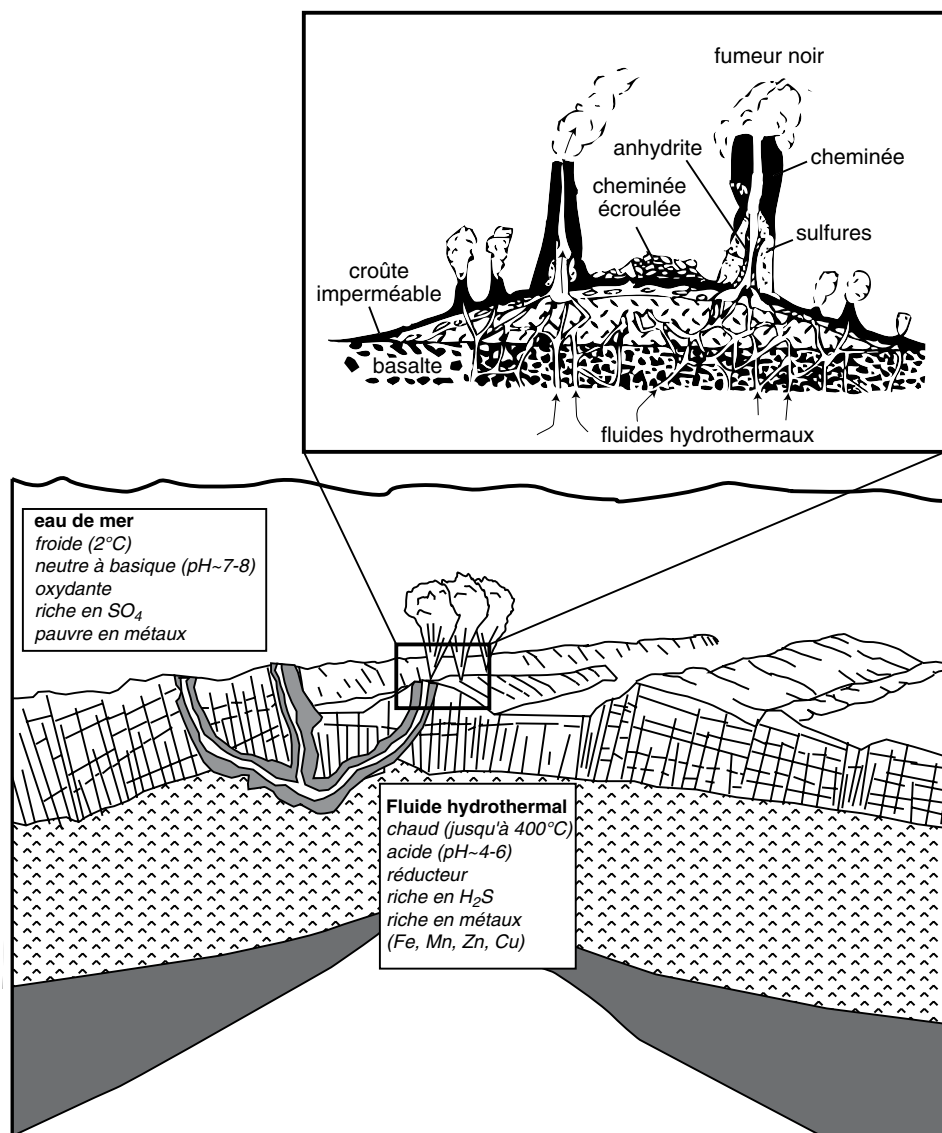


Figure 4.3 - Caractéristiques et schéma général de la circulation de fluides aux rides médio-océaniques.

Ces fluides sont responsables de l'édification des fumeurs noirs, et entraînent l'accumulation de sulfures sur le plancher océanique (modifié d'après Robb, 2007).

des géologues japonais qui étudièrent en détail les gisements de Besshi dans les mêmes années, un modèle « d'exhalation volcanique » (*volcanic exhalative model*), est désormais unanimement accepté pour la formation de cette classe de gisement.

Le trait caractéristique des gisements VMS est son association avec des roches volcaniques. Selon le contexte, elles peuvent être mafiques (basaltiques) ou felsiques,

et dans tous les cas elles ont été mises en place sous l'eau. Des formations d'origine sédimentaire peuvent former une partie importante des roches qui contiennent la minéralisation dans certaines catégories de gisements VMS.

La plupart des gisements VMS sont relativement petits, contenant seulement quelques millions de tonnes de minerais. Les exceptions sont le grand gisement de Kidd Creek, dans l'Ontario au Canada (160 Mt), et des gisements encore plus grands en Espagne et dans l'Oural en Russie (jusqu'à 200 Mt). Cependant, les teneurs des minerais sont élevées ce qui fait de ce type de gisement une cible très attractive d'exploration, particulièrement pour les jeunes et/ou petites compagnies minières. Les teneurs typiques sont de 2 à 5 % de Cu, Zn et/ou Pb et des quantités mineures de Au et Ag.

Description

Leur minéralogie est relativement simple. Comme dans presque tous les gisements de sulfures à l'exception de ceux dans des environnements purement sédimentaires, les sulfures de fer prédominent. Dans les gisements VMS, la pyrite (FeS_2) ou la pyrrhotite (Fe_{1-x}S) forment près de 90 % de l'assemblage de sulfures qui peut également contenir de la chalcopryrite (CuFeS_2), de la sphalérite ($(\text{Zn},\text{Fe})\text{S}$) et de la galène (PbS), et dans quelques cas et en proportions mineures, de la bornite (Cu_5FeS_4), de l'arsénopyrite (FeAsS), de la magnétite (Fe_3O_4) et de la tétraédrite ($(\text{Cu},\text{Fe})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$).

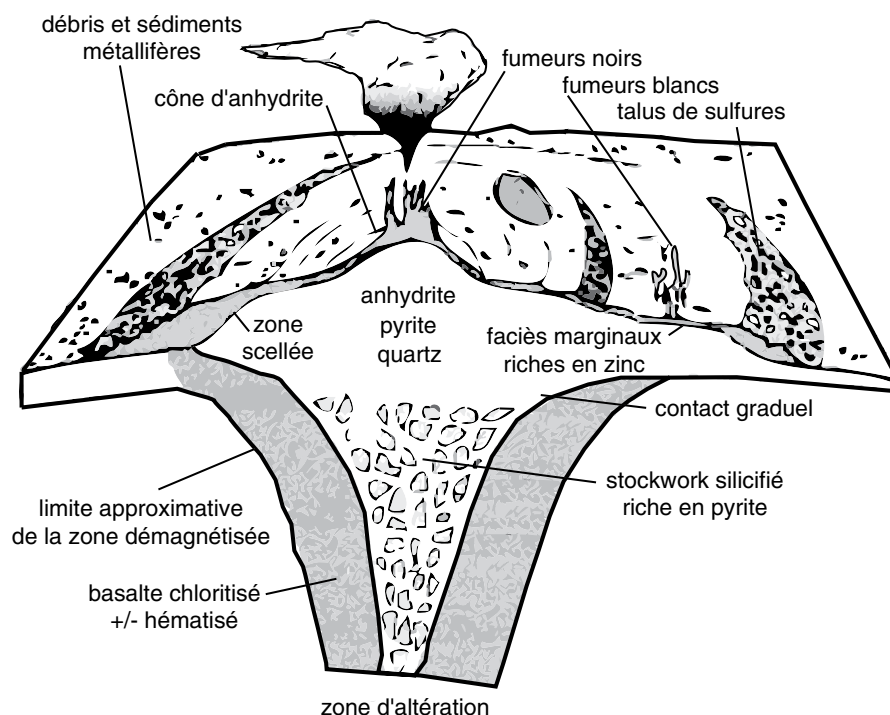


Figure 4.4 – Diagramme d'un gisement VMS typique, à partir de l'exemple du « TAG sulphide mound », sur la ride medio-Atlantique.

Modifié d'après Hannington *et al.* 1998.

4.3 • Gisements hydrothermaux illustrant les processus métallogéniques

La plupart des gisements ont une structure très caractéristique illustrée dans la figure 4.4. Un corps de forme lenticulaire ou stratiforme de sulfures massifs lités repose sur un ensemble appelé « *stockwork* » ayant grossièrement une géométrie conique, et formé d'un ensemble de veines minéralisées qui recoupent la roche encaissante très altérée. La proportion des métaux varie au sein du gisement : les sulfures massifs en position supérieure sont riches en Zn et Pb (dans les gisements qui contiennent ce métal) alors que le stockwork est enrichi en Cu et Au. Dans de nombreux gisements, une déformation tardive et une recristallisation métamorphique a détruit les textures originales du minerai, mais des exemples bien préservés ont conservé les litages et autres structures sédimentaires. Dans les gisements de l'Oural et d'Irlande, les cheminées des fumeurs noirs sont magnifiquement préservées (figure 4.5), à tel point que même les terriers des vers tubulaires, désormais remplacés par des sulfures, peuvent être reconnus.

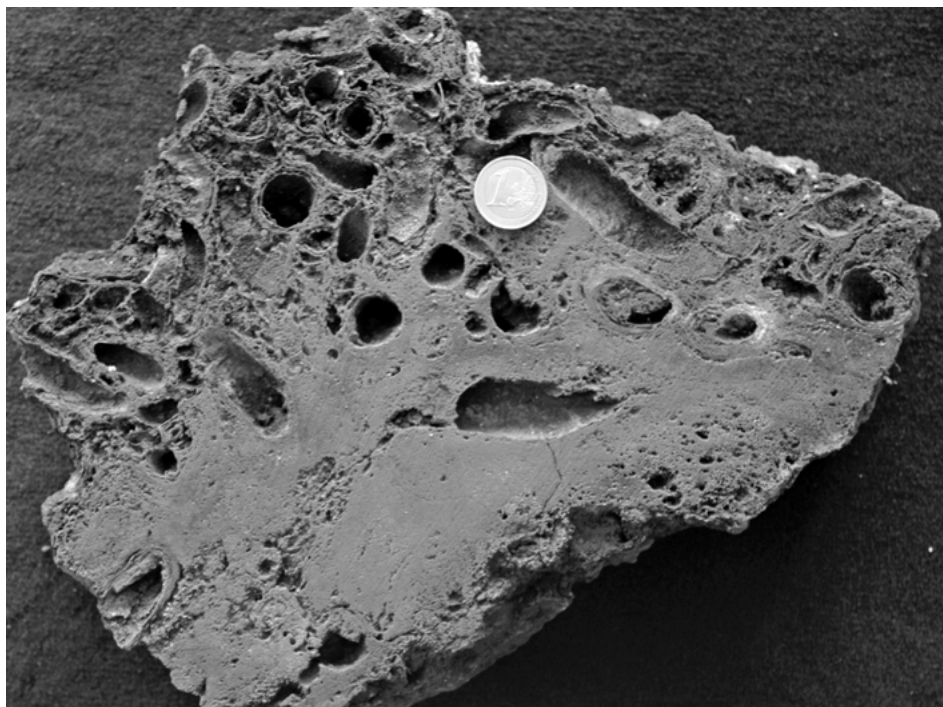


Figure 4.5 – Coupe d'une cheminée de fumeur noir de la ride médio-Atlantique.

Les sulfures de Cu et Zn précipités à partir de fluides hydrothermaux forment les gisements VMS.

Les roches volcaniques associées aux gisements VMS se mettent en place dans une grande diversité d'environnements tectoniques. Même si les fumeurs noirs

modernes qui ont apporté les indices clés pour comprendre l'origine de ces gisements ont surtout été observés le long des rides médio-océaniques, de nombreux exemples découverts plus récemment sont situés dans les marges en convergence. D'après une classification récente basée sur les types de roches associées avec les gisements (tableau 4.2), nous pouvons voir que les environnements varient depuis des arcs et des arrière-arcs intra-océaniques vers des marges continentales et des arrière-arcs matures épicontinentaux. Des gisements de tous les âges sont connus, depuis le gisement « Big Stubby » dans le Pilbara (Australie) âgé de 3,5 Ga, l'un des plus anciens gisements connus, jusqu'aux gisements qui continuent de se former sur le plancher océanique, en passant par un grand nombre de gisements vastes et économiquement importants formés à la fin de l'Archéen, au Protérozoïque, et au Phanérozoïque.

Tableau 4.2 – Contextes tectoniques des gisements VMS.

Type	Association lithologique	Contexte tectonique	Métaux	Exemples
Bimodal-mafique	Roches volcaniques mafiques prépondérantes, mais avec jusqu'à 25% de roches volcaniques felsiques	Arcs volcaniques accrétés dans les zones de subduction	Cu-Zn	Noranda, Canada - Archéen ; Flin-Flon, Canada - Protérozoïque ; Oural, Russie - Phanérozoïque
Mafique	Ophiolites comprenant des roches basaltiques et des proportions mineures de boninites, roches siliceuses et tuffs mafiques	Arrière-arc intra-océanique mature	Cu-(Zn)	Oural, Russie ; Newfoundland, Canada ; Troodos, Chypre
Pelitique-mafique	Basaltes et sills basaltiques en proportion équivalente ou inférieure à des roches sédimentaires pélitiques	Arrières-arcs matures, juvéniles et accrétés	Cu-Zn-Pb	Outokumpu, Finlande - Protérozoïque ; Windy Craggy, Canada - Paléozoïque ; Besshi, Japon - Mésozoïque
Bimodal-felsique	Roches volcaniques et roches sédimentaires terrigènes en proportions équivalentes	Arcs de marge continentale et arrière-arcs associés	Cu-Zn-Pb	Bergslagen, Suède - Protérozoïque ; Orogène tasmanien, Australie - Paléozoïque
Silico-clastique-felsique	Roches volcanoclastiques et intrusions proches de la surface ; roches volcaniques mafiques et roches sédimentaires d'origine chimique en proportion mineure	Arrière-arc mature épicontinental	Cu-Zn-Pb	Golden Grove, Australie ; Ceinture de pyrite ibérique, Espagne et Portugal ; Bathurst, Canada

4.3 • Gisements hydrothermaux illustrant les processus métallogéniques

Les types de métaux dans les gisements sont directement liés au contexte géologique et à la roche encaissante. Les corps minéralisés dans la plupart des roches basaltiques sont riches en Cu et ne contiennent que des teneurs limitées pour les autres métaux, c'est pourquoi une classification parallèle a été mise en place dans laquelle ils sont connus comme « gisements Cu-Zn » ; ceux des contextes mixtes mafiques-felsiques sont plus riches en Zn qu'en Cu et connu comme « gisements Zn-Cu ». Enfin les gisements en contexte sédimentaire contiennent du plomb en addition du cuivre et de zinc et sont parfois appelés « gisements Zn-Pb-Cu ».



ENCART 4.1 Exemples de gisements VMS en formation et formés par le passé

(1) Le gisement TAG. Ce gisement se forme actuellement dans le rift de la ride médio-Atlantique à 26° de latitude nord, où l'on a observé un champ actif de fumeurs noirs et fumeurs blancs (sources hydrothermales). Le gisement est localisé sur le plancher océanique, au-dessus des basaltes en coussins (*pillow*) de la croûte océanique. Il a les caractéristiques d'un gisement VMS typique, à savoir une lentille en position supérieure de sulfures massifs et semi-massifs, sous laquelle se trouve une brèche minéralisée (stockwork) en forme de conduit vertical. De l'anhydrite, de la silice et des argiles rouges précipitent en même temps que les sulfures. Le gisement contient 3,9 Mt de minerai, 2,7 Mt de sulfures massifs et semi-massifs (à ~ 2 % de Cu) et 1,2 Mt de brèche minéralisée (~ 1 % de Cu) dans le stockwork.

(2) Les gisements VMS de Chypre. L'ophiolite de Troodos contient des fragments de gisements VMS dans des basaltes en coussins qui se sont probablement mis en place dans un bassin d'arrière-arc au Crétacé. Tous les gisements sont riches en cuivre (1 à 4 %) avec des teneurs équivalentes en zinc, comme classiquement dans les gisements au sein de roches volcaniques mafiques. Ils sont composés d'un chapeau tabulaire de minerai massif, recouvert par un minerai bréchifié de texture sableuse dans lequel les cœurs massifs riches en pyrite sont cimentés par la chalcopryrite et la sphalérite et par des couches « d'ombres » qui sont des argiles d'origine volcanique exhalative enrichies en Fe, Mn et métaux traces. En dessous de la lentille se trouve un stockwork formé d'un mélange de quartz et pyrite, avec des faibles minéralisations à métaux de base.

(3) Les gisements VMS archéens. Le gisement Delbridge est un gisement VMS typique dans la ceinture d'Abitibi au Canada, âgée de 2,7 Ga. Ce gisement s'est formé au contact de roches pyroclastiques felsiques et de laves volcaniques intermédiaires qui appartenaient à un ancien arc insulaire. Le diagramme ci contre, repris de Boldy (1968), illustre tous les aspects importants des gisements VMS et montre que les géologues canadiens comprenaient comment ses gisements se sont formés bien avant la découverte des fumeurs noirs en 1975. D'après Boldy, ce gisement est d'origine « volcanique exhalative », exemple de minéralisation sur les parois d'une fissure qui fut le siège d'une activité hydrothermale et dans laquelle des métaux ont précipité périodiquement.

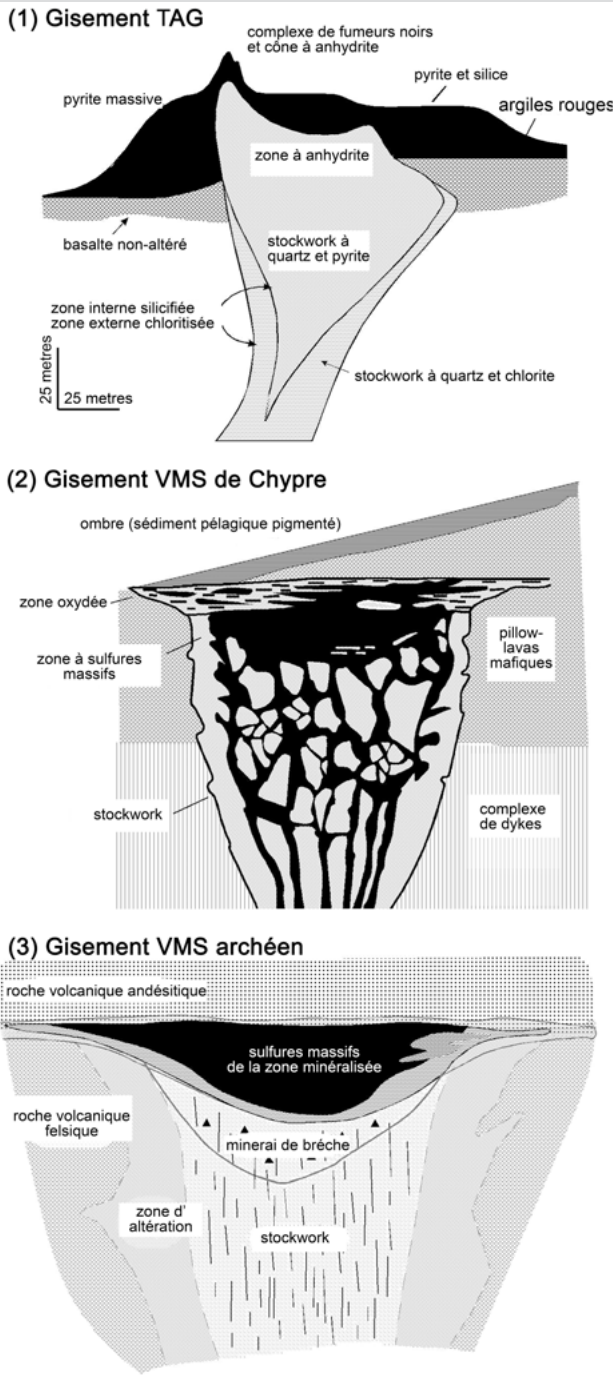


Figure 4.6 – Structure de quelques gisements VMS.

(a) Gisement TAG. Modifié d'après Hannington et coll. (1998).

(b) Gisement VMS de Chypre. Modifié d'après Robb (2008).

(c) Gisement VMS archéen. Modifié d'après Boldy (1968).

Origine

Un modèle génétique de formation des VMS, synthétisé d'après les travaux de Franklin *et al.* (2005), est illustré dans la figure 4.7. Il comprend six éléments principaux : (1) une source de chaleur, moteur du système hydrothermal convectif, et qui peut éventuellement être également une source de métaux. Dans de nombreux gisements la source est une intrusion de magma mafique ou felsique de faible profondeur ; (2) une zone de réaction de haute température dans laquelle les métaux et les autres composants sont lessivés par de l'eau de mer circulant dans des roches volcaniques et/ou sédimentaires ; (3) des failles ou fractures synvolcaniques qui focalisent la décharge des fluides hydrothermaux ; (4) des zones d'altération dans l'encaissant inférieur et moins couramment supérieur produites par l'interaction entre le fluide hydrothermal ascendant et l'eau de mer ; (5) le gisement de sulfures massifs lui-même

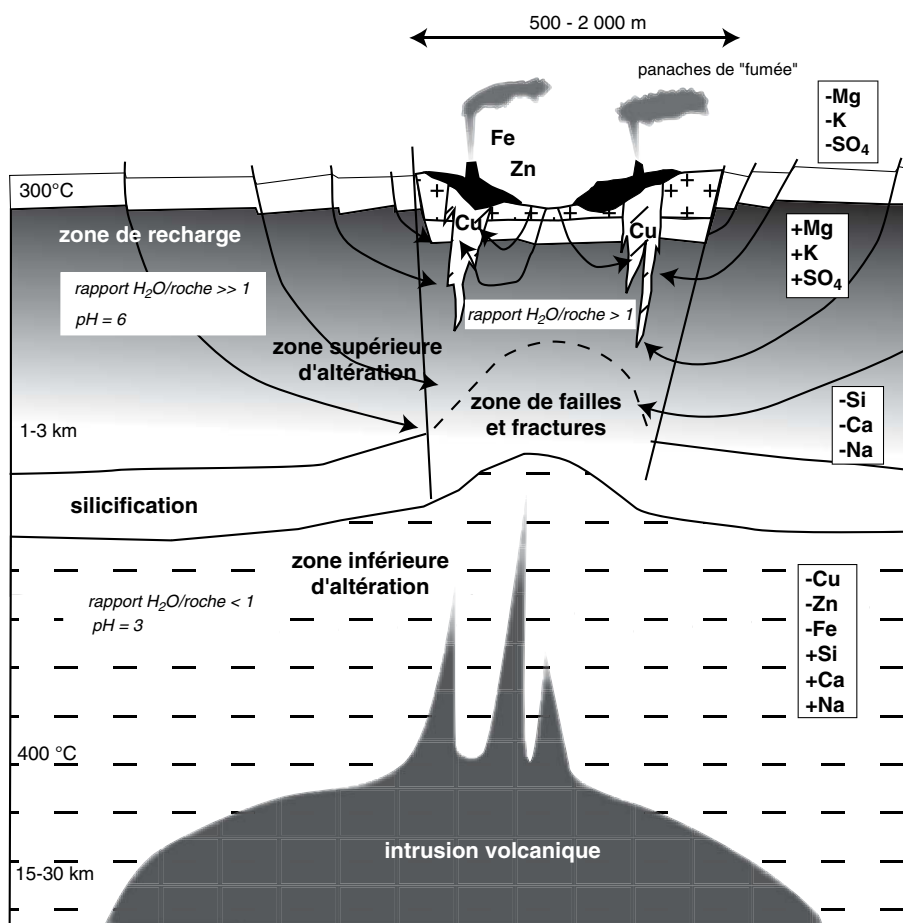


Figure 4.7 - Coupe de la croûte océanique montrant les différentes étapes de formation des gisements VMS

Modifié d'après Franklin *et al.*, 2005.

formé au niveau ou à proximité du plancher océanique ; et (6) des sédiments lités formés par la précipitation de sulfures et d'autres composants du panache hydrothermal.

Un gisement typique est formé de la sorte : un magma pénètre la croûte océanique à faible profondeur. Il réchauffe l'eau de mer présente dans les pores et fractures dans les roches sédimentaires et volcaniques et entraîne l'ascension de l'eau (figure 4.7). Ce mouvement aspire l'eau de mer autour de l'intrusion et met en place un système convectif. L'eau froide percole vers le bas à travers la croûte océanique par d'innombrables fissures et grâce à la porosité et une eau légèrement alcaline précipite sulfates et carbonates alors qu'elle descend. Sa température augmente progressivement alors qu'elle approche de la chambre magmatique à 2-3 km de profondeur, elle est transformée en fluide chaud hydrothermal : sa température est 350-400 °C et elle s'acidifie (figure 4.7). Alors qu'elle approche son point critique, son volume augmente drastiquement, ce qui entraîne son ascension et son retour à la surface. Le liquide chaud, acide et corrosif lessive les métaux des roches volcaniques et dans certains cas des roches sédimentaires qu'il rencontre et ces métaux sont transportés vers la surface, sous la forme de complexes formés avec le chlore, HS et OH. Les fluides remontent initialement à travers les pores plutôt qu'à travers des fractures, jusqu'à ce qu'ils arrivent en surface. À l'expulsion, les fluides sont refroidis rapidement et se mélangent avec l'eau de mer froide ce qui entraîne une diminution drastique de la solubilité des métaux et provoque la précipitation de sulfures de métaux (avec d'autres composants comme la barytine, l'anhydrite, et la silice amorphe). Une partie des sulfures sont accrétés autour des événements hydrothermaux et forment des cheminées qui atteignent des dizaines de mètres avant de s'effondrer et former une couche de débris de sulfures mélangés avec des sédiments précipités chimiquement sur le plancher océanique. Cette couche a une faible perméabilité et freine l'ascension du fluide à la surface ; le fluide piégé s'accumule sous le plancher océanique où il se mélange avec l'eau de mer et précipite davantage de sulfures. De cette manière, le corps tabulaire ou lenticulaire de sulfures massifs est formé. Une fraction de fluide s'échappe par le panache hydrothermal, se répand à plusieurs centaines de mètres autour des fumeurs noirs et précipite des particules de sulfures qui forment les sédiments lités « exhalatifs » autour du site. La portion inférieure du gisement (stockwork) est formée par l'interaction entre les fluides hydrothermaux et l'encaissant ou l'eau de mer dans les conduits qui mène le fluide à la surface.

L'ordre dans lequel les sulfures précipitent dépend de la solubilité et de la température. Le cuivre et l'or réagissent à haute température, dans le système de « tuyauterie » du stockwork sous la cheminée ; le fer précipite à la base du gisement sous forme de pyrite ; la cheminée ainsi que la « fumée » du fumeur noir sont formées de sulfures de zinc et plomb, de barytine et d'anhydrite.

Synthèse

- *Source de métaux* – Roches volcaniques et sédimentaires de la croûte océanique.
- *Source de S* – Sulfates de l'eau de mer.
- *Source de fluide* – Eau de mer.
- *Moteur de la circulation de fluide* – Convection en général liée à la présence de chambres magmatiques peu profondes.
- *Processus de précipitation* – Refroidissement, changement d'état redox et dilution des fluides hydrothermaux au contact de l'eau de mer.

4.3.2 Les gisements de porphyres

Introduction

Les gisements de porphyres sont les sources de Cu et Mo les plus importantes au monde et produisent également une proportion importante d'Au, Ag, W et Sn. Ils procurent entre 50 et 60 % du cuivre mondial et plus de 95 % du molybdène. Contrairement aux gisements VMS, qui sont normalement petits (1-5 Mt), mais à très hautes teneurs (3 à 10 % de métaux dans le minerai), les gisements de porphyres sont énormes et à faible teneur. Les gisements que l'on connaît le mieux sont dans les cordillères d'Amérique du nord et du sud, où se situent les corps minéralisés de Bingham aux États-Unis (2 733 Mt de minerai à 0,7 % de cuivre et 0,05 % de molybdène) et de Chuquibambilla au Chili (10 837 Mt de minerai à 0,56 % de cuivre et 0,06 % de molybdène). Ce dernier gisement a longtemps prétendu être la plus grande mine à ciel ouvert du monde, tandis qu'un gisement voisin, El Teniente, prétendait être la plus grande mine souterraine du monde. Un recensement récent (Galley *et al.*, 2005) fait état de 44 gisements dans le monde ayant des réserves supérieures à 1 Gt de minerai de Cu, Mo et Au.

Un autre grand gisement est celui de Grasberg, en Irian Jaya, province indonésienne dans la portion occidentale de la Nouvelle Guinée, qui contient environ 2 100 Mt de minerai contenant 1,2 % de cuivre et 1,2 gramme/tonne (ppm) d'or, faisant de ce gisement à la fois la plus grande mine d'or, la troisième plus grande mine de cuivre au monde et le site décrit comme la « pire horreur au monde ». La destruction de l'environnement engendrée par cette énorme exploitation minière dans une région de forêt tropicale d'altitude très fragile d'une part, et les bénéfices économiques immenses de cette opération, qui contribuent à 2 % du PIB d'un pays très pauvre d'autre part, illustrent parfaitement les dilemmes auxquels nous expose l'exploitation des ressources naturelles.

Structure et minéralisation

Les gisements porphyriques doivent leur nom aux intrusions de faible profondeur, felsiques à intermédiaires, qui contiennent des phénocristaux et auxquelles les gisements sont associés. Les formes des gisements porphyriques sont très variées depuis des corps très irréguliers à ovales, et des ensembles « pleins » à des cylindres « creux » avec parfois des formes de coupes renversées. Comme le montre la figure 4.8, les corps minéralisés sont recouverts par des plutons granitiques relativement petits, qui représentent des ramifications de batholithes plus grands et plus profonds. Les plutons sont localisés dans les portions inférieures des volcans et font sans aucun

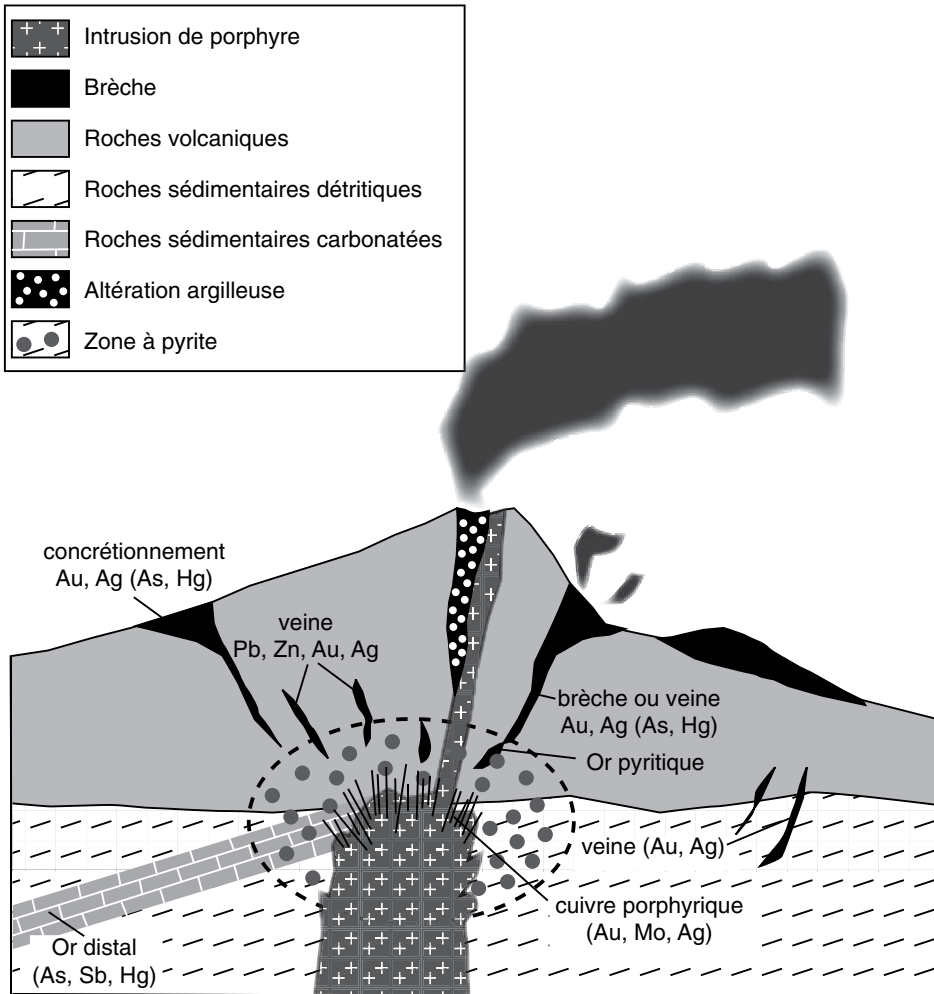


Figure 4.8 – Structure de la partie supérieure d'un pluton granitique dans un édifice volcanique, site de formation des gisements porphyriques de cuivre.

Modifié d'après Sinclair, 2007.

4.3 • Gisements hydrothermaux illustrant les processus métallogéniques

doute partie des conduits qui ont amené le magma aux volcans en surface. Les corps minéralisés et les plutons sont tous les deux des structures composites induites par de nombreuses injections de magma et de fluides hydrothermaux. Les minerais ne sont pas confinés aux plutons mais s'étendent aussi dans l'encaissant. Une altération pouvant être modérée à intense est intimement associée à la minéralisation, et présente une zonation radiale. Cette altération qui s'étend également bien à l'extérieur de la zone de minéralisation, est utilisée comme indice lors des explorations pour trouver ce type de gisements. La zonation de l'altération dans les gisements de l'ouest des États-Unis, considérés comme typiques des gisements de porphyres, est illustrée dans la figure 4.9.

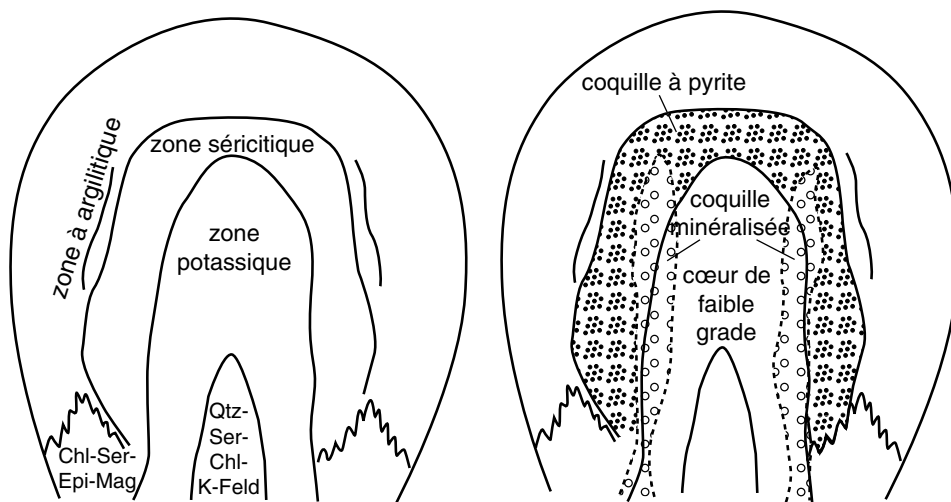


Figure 4.9 – Répartition des zones d'altération (gauche) et des types de minéralisation de sulfures dans les gisements porphyriques.

Modifié d'après Lowell et Guilbert, 1970.

La minéralisation consiste en de petites concentrations de minéraux sulfurés, disséminés ou dispersés dans des petites veines et des placages de remplacement dans les parties supérieures de l'intrusion hautement altérées et dans les roches environnantes. Les minéraux sulfurés originels sont la pyrite, la chalcoppyrite, la bornite, et la molybdénite. L'or est souvent natif, et on le trouve sous forme de gouttes aux bords des cristaux de sulfures. La plupart des sulfures se trouvent dans des veines ou sous forme de placages dans des fractures et la majorité se sont mis en place avec le quartz et la séricite avec lesquels ils sont imbriqués. Dans de nombreux cas, les gisements ont une zone centrale à faible teneur, entourée par des « coquilles » dominées par la bornite, puis la chalcoppyrite, et enfin la pyrite, qui peut constituer à elle seule jusqu'à 15 % de la roche. La distribution de la molybdénite est variable. Des zones avec des fractures radiales, à l'extérieur de la zone à pyrite peuvent contenir des veines riches en plomb et zinc ayant parfois des teneurs significatives en or et argent.

Une zone d'enrichissement supergène s'est développée de façon étendue dans la partie supérieure de quelques gisements. Cette zone est divisée en une zone inférieure oxydée contenant des minéraux peu courant comme le chrysocolle $((\text{Cu}, \text{Al})_2\text{H}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O})$, l'atacamite $(\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3)$, l'antlerite $(\text{Cu}_3(\text{SO}_4)(\text{OH})_4)$, la brochantite $(\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2)$ et la ténorite (CuO) avec en proportion moins élevée la malachite $(\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2)$ et l'azurite $(\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2)$ et une zone inférieure sulfurée composée de chalcocite (Cu_2S) , covellite (CuS) , cuivre natif (Cu) et cuprite (Cu_2O) . Ces minéraux, silicates, carbonates, sulfates et oxydes de cuivres hydratés, ont de magnifiques couleurs et sont prisés des collectionneurs de minéraux.

La composition de l'intrusion paraît exercer un contrôle fondamental sur le contenu en métaux du gisement. Les plutons à faible teneur en silice, mafiques et relativement primitifs, allant des compositions de diorites calcoalcalines et de granodiorites à celles de monzonites alcalines, sont associés avec des gisements de Cu-Au ; les granites et granodiorites calcoalcalins, intermédiaires à felsiques sont associés à des gisements de Cu-Mo ; les granites fortement différenciés, felsiques et riches en silice sont associés à des gisements de Mo, W et Sn. L'état d'oxydation, révélé par des minéraux accessoires comme la magnétite, la pyrite, la pyrrhotite et l'anhydrite, influence également les contenus en métaux : la plupart des gisements sont liés à des plutons oxydés à magnétite, mais quelques gisements de Sn et Mo sont liés à des plutons plus réduits à l'ilménite.

Distribution et âge

Les gisements porphyriques sont associés en majeure partie avec les ceintures orogéniques mésozoïques et cénozoïques à l'ouest de l'Amérique du nord et de l'Amérique du sud, à proximité de la marge occidentale de l'océan Pacifique, dans la ceinture orogénique téthysienne en Europe de l'est et au sud de l'Asie. Des gisements majeurs sont également situés dans les orogènes paléozoïques d'Asie centrale et de l'est de l'Amérique du nord, et en moindres proportions dans les terrains précambriens. Les gisements de porphyres de cuivre sont localisés typiquement dans les racines des stratovolcans andésitiques, en contexte de subduction continentale et d'arc volcanique. Leur distribution peut être mise en relation avec les structures tectoniques régionales comme des rifts et des systèmes de failles à l'échelle lithosphérique. La distribution individuelle des gisements est ensuite contrôlée par des structures tectoniques de plus faible étendue qui recoupent les accidents régionaux.

Les gisements porphyriques sont connus depuis des roches archéennes jusqu'aux temps récents, même si la plupart sont d'âge Jurassique ou plus jeune. Au cours de l'histoire de la Terre, les périodes de pics de formation de porphyre de cuivre sont le Jurassique, le Crétacé, l'Éocène et le Miocène. Les gisements les plus jeunes sont dans les îles du sud ouest de l'océan Pacifique, dans des régions tectoniquement très actives. Le gisement de Grasberg en Irian Jaya qui s'est mis en place dans une zone de volcanisme intense et de soulèvement rapide, sera totalement érodé d'ici quelques millions d'années. Cet exemple montre la nature éphémère de ce type de gisement et explique pourquoi leur localisation est typiquement restreinte aux chaînes de montagnes récentes.



4.2 Description et illustration d'un exemple : le gisement de porphyre de cuivre de Chuquicamata

La mine de porphyres de Cu-Mo de Chuquicamata, dans le désert d'Atacama au nord du Chili a longtemps été présentée comme plus grande mine à ciel ouvert du monde. Avec une production annuelle de près de 600 000 tonnes de cuivre, elle a été pendant des années la plus grande productrice de ce métal et malgré une décennie d'extraction continue, elle constitue toujours l'une des principales ressources en cuivre au monde. Elle figure également parmi les principaux producteurs de molybdène.

La mine à ciel ouvert d'où le minerai est extrait mesure 4 km de long et 3 km de large pour presque 1 km de profondeur (figures 4.10 et 4.11). La minéralisation primaire consiste en des sulfures de Cu et Mo disséminés et des veines de sulfures massifs. Les principaux minéraux sont la chalcopirite (CuFeS_2), la chalcocite (Cu_2S), la covellite (CuS), l'enargite (Cu_3AsS_4) et la pyrite. La minéralisation se situe autour et au sein même de plutons de granodiorites et de monzogranites porphyriques de l'Éocène (~ 32 Ma), qui se sont mis en place dans des amphibolites et des granites du Paléozoïque.

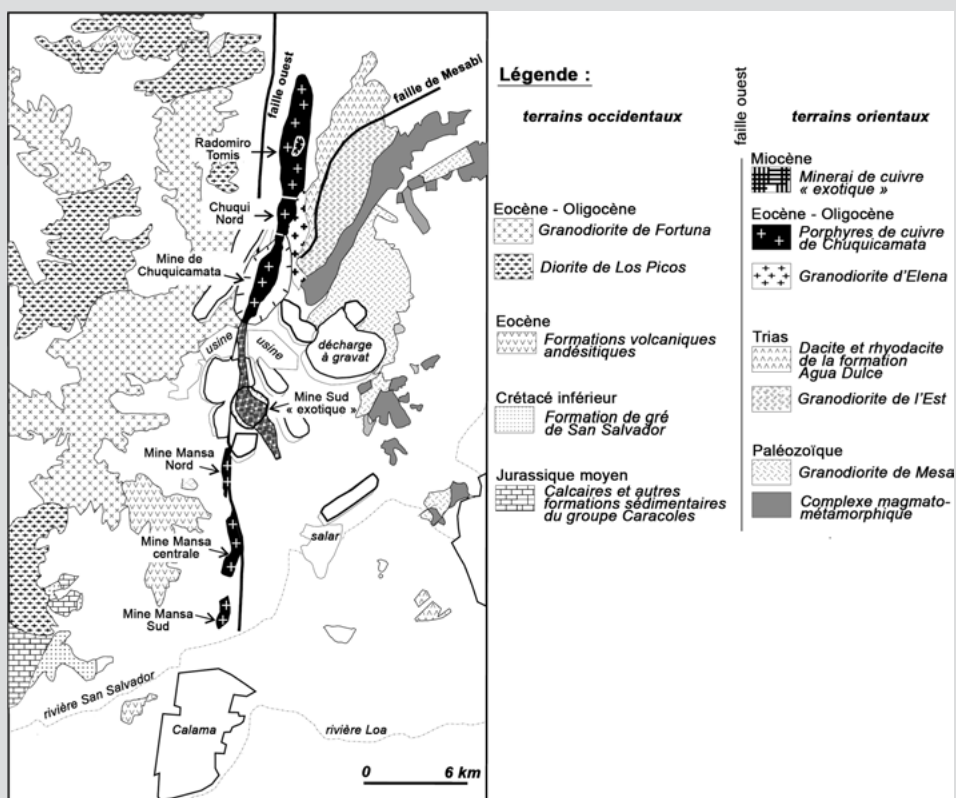


Figure 4.10 – Carte géologique simplifiée de la région de Chuquicamata au Chili.

Modifiée d'après Ossandon *et al.*, 2001.



Figure 4.11 - Photographie de la mine de cuivre à ciel ouvert de Chuquicamata en 1970.

La chaîne Éocène à Oligocène qui s'étend de la Bolivie jusqu'au centre du Chili contient la plus grande concentration en gisements de cuivre au monde. De grandes quantités de cuivre ont également été lessivées du corps minéralisé primaire par la circulation des fluides qui inondent irrégulièrement le très aride désert d'Atacama, et ont été redéposées dans un corps minéralisé secondaire situé 5 km au sud du gisement principal (figure 4.12).



Figure 4.12 - Photographie du gisement Exotica.

4.3 • Gisements hydrothermaux illustrant les processus métallogéniques

Le gisement secondaire, appelé « Exotica », contient près de 300 Mt de minerai sous forme de veines de chrysocolle, un silicate de cuivre hydraté de formule $(\text{Cu,Al})_2\text{H}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, de « copper-pitch » (mélanges d'oxyhydrates de manganèse comprenant du cuivre) situés au sein de graviers plus ou moins altérés cimentés par divers minéraux cuprifères dont l'atacamite $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ et d'autres minéraux secondaires.

Origine

Comme nous l'avons mentionné au début du chapitre, l'intime association spatio-temporelle entre les corps minéralisés et les intrusions granitiques laisse peu de doutes que les magmas sont directement reliés aux processus de formation du gisement. En fait, il y a de nombreux indices qui suggèrent que les métaux du minerai ainsi que les fluides hydrothermaux dérivent tous deux et en grandes proportions des magmas granitiques. En plus des aspects géologiques, la relation entre les rapports de métaux et les types de magma, les indices de très haute température et la composition isotopique des fluides convergent vers cette idée. Cependant, comme en témoigne la figure 4.13, les compositions des fluides comme ceux échantillonnés dans les

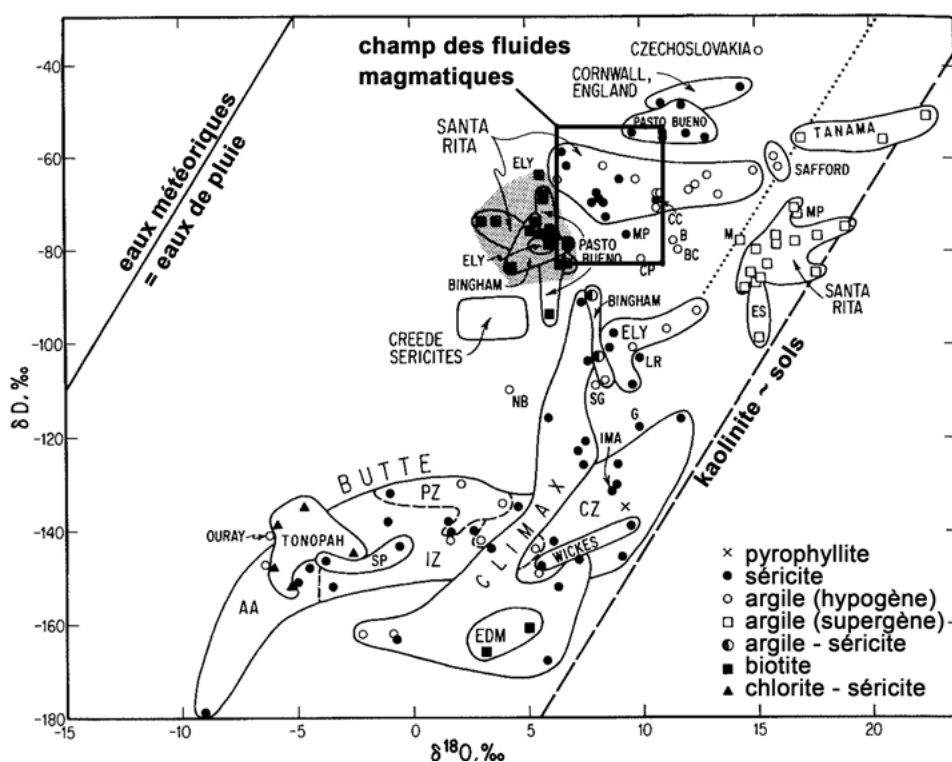


Figure 4.13 – Compositions isotopiques de l'oxygène et de l'hydrogène des fluides associés aux gisements porphyriques.

Modifié d'après Barnes, 1979.

inclusions dans le quartz et les autres minéraux de gangue, vont du champ des fluides magmatiques à ceux des fluides météoriques, indiquant que ces derniers sont impliqués dans la formation du minerai.

Tous ces éléments rassemblés amènent au modèle suivant :

1. Un magma granitique se met en place par une série d'injections dans une chambre magmatique dans la partie supérieure de la croûte terrestre, sous un édifice volcanique. Chaque intrusion se refroidit et cristallise partiellement, pendant qu'une phase fluide aqueuse se sépare du magma silicaté. La séparation de cette phase résulte de l'un ou des deux processus suivant ; (a) la diminution de la pression pendant l'ascension du magma abaisse la solubilité de l'eau dans le magma, et (b) la cristallisation du magma pendant son refroidissement au contact de l'encaissant entraîne une augmentation de la teneur en eau du liquide résiduel jusqu'au franchissement de la limite de solubilité. La libération de fluides augmente la température de solidus du magma granitique, entraînant une cristallisation rapide du liquide résiduel autour des minéraux déjà cristallisés. Ce mécanisme met en place la texture porphyrique caractéristique de ces gisements. La phase fluide peut également migrer à travers le liquide silicaté et se concentrer dans la partie supérieure de l'intrusion.
2. Les fluides s'échappent depuis l'intérieur encore liquide et traversent les fractures dans la carapace externe solidifiée, puis dans l'encaissant. Pendant ce trajet, ils refroidissent et réagissent avec l'encaissant pour former l'altération caractéristique qui entoure les gisements porphyriques. Les métaux sont transportés dans les fluides, le plus probablement sous forme de complexes de chlorure ou sulfate ; comme les fluides se refroidissent et comme leurs compositions changent lors de réaction avec l'encaissant, la stabilité des complexes diminue. Les métaux précipitent alors dans les fractures et dans les zones d'altération qui entourent l'intrusion granitique.
3. Lors de son intrusion, le magma réchauffe l'encaissant et les eaux météoriques contenues dans les nappes phréatiques, mettant ainsi en place des cellules de convection autour de la chambre magmatique. L'eau souterraine chauffée se mélange et réagit avec les fluides magmatiques, et les diluant, les refroidissant et accélérant la précipitation des minéraux métallifères.
4. Le processus peut être répété plusieurs fois alors que de nouvelles injections de magma pénètrent la chambre magmatique de faible profondeur, formant un complexe multiphasé d'intrusions et de corps minéralisés.

Synthèse

- *Source de métaux* – Essentiellement le magma granitique.
- *Source de S* – Essentiellement magmatique.
- *Source des fluides* – Magmatique et eau souterraine météorique.
- *Moteur de la circulation de fluides* – Expulsion de fluide du magma, convection de l'eau souterraine réchauffée.
- *Processus de précipitation* – Refroidissement, changement de la composition du fluide, mélange avec d'autres fluides.

4.3.3 Les gisements sédimentaires exhalatifs (SEDEX)

La précipitation de sulfures dans les fumeurs noirs n'est pas l'unique occasion d'observer « en direct » la formation de gisement *in situ*. Pas loin de 100 millions de tonnes de sédiments qui contiennent 2 % Zn, 0,5 % Cu et des quantités significatives de Au et Ag ont précipité depuis la saumure chaude et dense qui s'est accumulée dans « l'Atlantis II Deep », une dépression de 10 km de diamètre au fond de la mer Rouge.

Si ces gisements étaient sur la terre ferme et dans une région politiquement stable de la planète, ils constitueraient des corps minéralisés très attractifs du type que l'on nomme SEDEX ou gisements sédimentaires exhalatifs.

Un autre exemple est la mer de Salton, un grand lac de faible profondeur au sud de la Californie (États-Unis), formé en 1905 lorsque le canal qui transportait l'eau du Colorado se rompit et entraîna l'inondation d'un désert de sel. L'eau devint saumâtre en dissolvant le sel, et une circulation hydrothermale à grande échelle se mit en place alors que l'eau dans le bassin sédimentaire sous jacent était chauffée par le fort gradient géothermique régional et par les conduits des volcans actifs locaux. En profondeur les fluides circulants, des saumures chaudes (jusqu'à 350 °C) riches en Na-Ca-K et denses, ont dissous le fer, le manganèse, le plomb, le zinc et le cuivre des sédiments lacustres. Lorsque ces fluides se mélangent avec les eaux de surface froides et peu concentrées à environ 100 m sous la surface, des métaux y cristallisent dans des veines de sulfures. Les deux exemples étudiés dans la mer Rouge et dans la mer de Salton – la précipitation chimique de sédiments riches en sulfures et l'interaction de sédiments avec des fluides hydrothermaux circulants – sont des éléments clés pour comprendre les processus de formation des gisements SEDEX.

Donner une définition de ces gisements n'est pas trivial, parce qu'ils forment par bien des aspects un continuum avec les gisements VMS. Ils se trouvent typiquement sous forme de corps tabulaires composés majoritairement de sulfures de Zn et Pb (sphalérite et galène) et ils contiennent souvent des quantités économiquement importantes d'argent. Les sulfures de zinc et plomb sont intercalés avec des sulfures de fer (pyrite et pyrrhotite) et avec des sédiments chimiques ou détritiques généralement à grain fin. On pense que ces gisements ont été formés à partir de fluides hydrothermaux qui furent expulsés de bassins sédimentaires en grande partie réducteurs, dans les rifts continentaux. Deux sous catégories sont les gisements de type « Broken Hill » associés avec à la fois des roches volcaniques et des sédiments d'origine chimique riches en fer ou manganèse, et les gisements de type irlandais, localisés principalement dans des roches carbonatées. Les gisements SEDEX comportent 50 % des réserves et 25 % de la production de zinc et plomb.

Les caractéristiques générales d'une sélection de quelques gisements sont données dans le tableau 4.3. La plupart d'entre eux, dont les trois grands gisements australiens et le gisement Sullivan au Canada, sont protérozoïques, mais d'autres dont des gisements majeurs comme Red Dog en Alaska et Mehdiabad en Iran, ainsi que des exemples géologiquement intéressants comme les gisements irlandais et le gisement de Meggen en Allemagne, sont paléozoïques.

Tableau 4.3 - Caractéristiques des gisements SEDEX.

Nom du gisement	Localisation	Age	Ressources (valeurs maximales)						
			Cu (%)	Zn (%)	Pb (%)	Ag (g/t)	Au (g/t)	Mt de minerai	Zn+Pb Mt
Broken Hill	Australie	Paléo-protérozoïque	0,1	11	10	180	0,1	205	43
McArthur River	Australie	Paléo-protérozoïque	0,2	9,2	4,1	41		237	31
Mt Isa	Australie	Paléo-protérozoïque		6,8	5,9	148		124	15
Red Dog	États-Unis	Carbonifère		16,6	4,6	83		165	35
Mehdiabad	Iran	Crétacé		7,2	2,3	51		218	21
Sullivan	Canada	Méso-protérozoïque		5,9	6,1	67		162	19
Navan	Irlande	Carbonifère		8	2,7			78	8,3
Meggen	Allemagne	Dévonien	0,2	5,8	0,8			60	4

Un trait caractéristique des gisements est la taille de grain initiale des minéraux d'intérêt économique qui est très fine. Comparons, par exemple, les trois gisements australiens mentionnés dans le tableau 4.3 : dans le cas du gisement de Broken Hill, les grains sont gros (jusqu'à un centimètre), dans le gisement du mont Isa, la taille moyenne des grains est 100-500 μm , et dans le gisement de McArthur River, les grains ont une taille inférieure à 10 μm . Ces différences de tailles de grains sont largement dues au degré du métamorphisme qui a affecté les gisements après leur formation initiale. Les gros grains de Broken Hill sont le résultat de la recristallisation lors d'un métamorphisme de haut degré, dans le faciès granulite ; les grains plus fins du Mt Isa ont recristallisé par le métamorphisme régional de degré inférieur au faciès schiste vert ; les grains minuscules du gisement de McArthur River sont probablement ceux d'origine du minerai sédimentaire. (Cette différence de taille de grain influence la viabilité de ces trois gisements. Comme nous l'avons mentionné dans le chapitre 2, les gros grains de Broken Hill sont plus facilement extraits et purifiés, à la différence du minerai ultra-fin de McArthur River, qui pendant longtemps n'a pas été exploitable).

Un autre trait important des gisements SEDEX est le litage observé dans de nombreux minerais. L'échantillon montré dans la figure 4.14 (a) a subi un plissement lors d'une déformation postérieure, mais une alternance de bandes de sulfures brillants et des silicates sombres est clairement visible. La forme et la structure des bandes ressemblent au litage des sédiments fins, comme dans les roches sédimentaires d'origine chimique tels les silex ou les fers rubanés, et cette ressemblance explique que de nombreux auteurs ont interprété ces minerais comme d'origine sédimentaire exhalatif : c'est-à-dire qu'ils sont interprétés comme des sédiments chimiques liés à des panaches hydrothermaux dans lesquels précipitent des sulfures lors du mélange

4.3 • Gisements hydrothermaux illustrant les processus métallogéniques

des fluides hydrothermaux avec l'eau de mer sur le plancher océanique. D'autres auteurs ont proposé que la formation de ces gisements était liée à des remplacements lors de la diagenèse – ils ont alors admis que le litage était d'origine sédimentaire mais ont soutenu que les sédiments d'origine ne contenaient que des sulfures de fer et des silicates stériles. D'après eux, les métaux ont remplacé les minéraux originels lors de la circulation de fluides hydrothermaux à travers les sédiments non consolidés, quelques dizaines ou centaines de mètres sous le plancher océanique. Même si le mécanisme n'est pas entièrement compris, il est très probable que les deux processus ont été mis en jeu, dans des proportions différentes selon les gisements. Le minerai de Zn et Pb de McArthur River par exemple, semble avoir été formé par sédimentation chimique mais de nombreux aspects du minerai de Mt Isa font penser à un processus de remplacement.

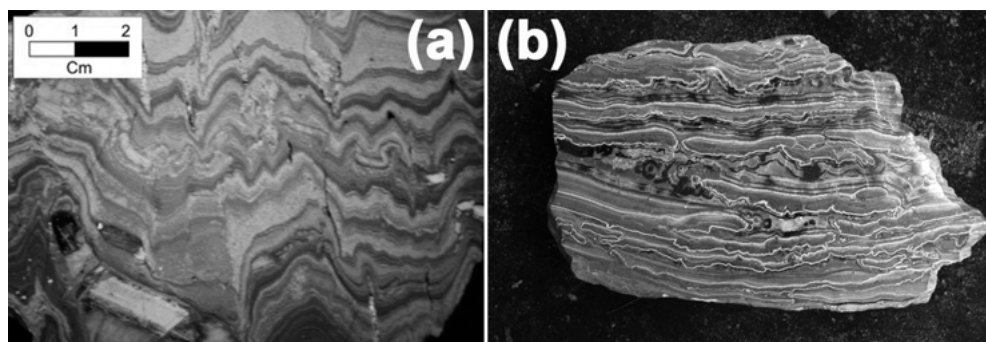


Figure 4.14 - (a) Photographie de minerai de gisement SEDEX.

Faciès lité composé de sphalérite et galène interlaminées de pyrite, de carbonate hydrothermal et de chert carboné. Gisement Howards Pass Yukon et Territoires du Nord-Ouest. D'après Goodfellow et Lydon, 2007.

(b) Photographie de minerai hydrothermal de type MVT.

Sulfures de Zn-Pb dans des carbonates lités de la mine de Zn de Cadjibut (Australie). (Photographie : Chris Arndt.)

Les processus impliqués dans la formation des gisements SEDEX sont illustrés dans la figure 4.15. Le point clé est la circulation profonde de fluides qui s'infiltrent en descendant le long des marges d'un bassin sédimentaire et traversent la pile de sédiments avant d'être expulsés et de remonter sur le plancher océanique. L'épisode de minéralisation est la conséquence d'un événement tectonique qui a activé des failles majeures et entraîné une subsidence rapide dans le bassin sédimentaire. La subsidence, éventuellement aidée par la chaleur apportée par des intrusions magmatiques, a entraîné la mise en mouvement du système de circulation de fluides. Les saumures se sont enrichies en Fe, Zn et Pb, métaux que l'on pense provenir du lessivage des oxydes qui enveloppent les minéraux des sédiments détritiques. Les métaux sont transportés par les fluides hydrothermaux sous la forme de chlorures ou de complexes variés de sulfates (SO_4^{2-}). Lorsque les fluides se déchargent le long

des failles au niveau du plancher du bassin, les sulfures métalliques précipitent au niveau ou au-dessus du plancher océanique lors d'une réaction avec H_2S dans les couches anoxiques réduites à la base de la colonne d'eau. La source la plus probable de soufre est le H_2S biogénique qui est souvent concentré dans les eaux anoxiques.

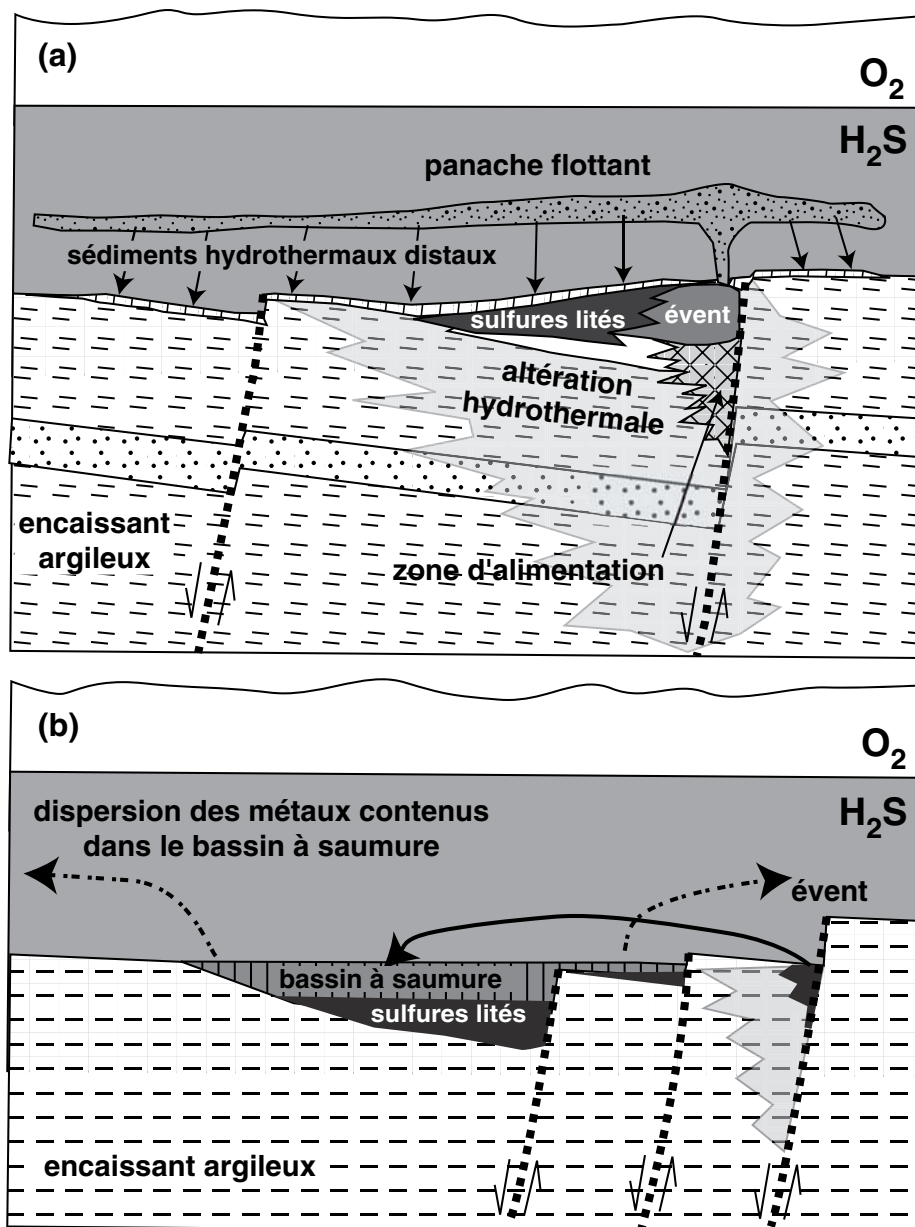


Figure 4.15 - Illustration des origines des gisements SEDEX distaux et proximaux.

Modifié d'après Goodfellow et Lydon, 2007.

Synthèse

- *Source de métaux* – Roches sédimentaires détritiques.
- *Source de S* – H₂S biogénique.
- *Source de fluide* – Eau de mer et eau souterraine contenue dans la porosité.
- *Moteur de la circulation de fluides* – Compaction (?), convection liée à des intrusions magmatiques.
- *Processus de précipitation* – Refroidissement, réaction de fluides oxydés avec le H₂S contenu dans les eaux de mer anoxiques.

4.3.4 Les gisements de type Vallée du Mississippi ou « Mississippi Valley Type » (MVT)

Cette catégorie de gisement est l'opposé des gisements de porphyres : les gisements MVT se forment à basse température, et ils n'ont rien à voir avec des magmas. Leur nom vient de la vallée du Mississippi au centre des États-Unis, où ces gisements furent pour la première fois identifiés. Ils constituent une famille variée de gisements de plomb-zinc (figure 4.14 (b)), qui sont situés essentiellement dans des roches carbonatées du Paléozoïque (cambriennes à triasiques). Des gisements MVT d'âge Crétacé ont été trouvés en Algérie et Tunisie, mais les exemples dans des roches précambriennes sont très rares.



ENCART 4.3 Les isotopes du plomb : traceurs des pollutions anthropiques

Pendant de nombreuses années, les gisements de type Vallée du Mississippi, situés dans des bassins sédimentaires relativement jeunes (Paléozoïque), ont fourni presque tout le plomb consommé aux États-Unis ; en Europe au contraire, le plomb provenait des grands gisements australiens comme Broken Hill et Mt Isa, situés dans des roches d'âge protérozoïque (Ces deux exemples appartiennent aux gisements de type SEDEX décrits dans la partie précédente). La différence d'âge transparait dans la composition isotopique du plomb, qui est considérablement plus radiogénique dans le cas des vieux gisements Australiens. Cette différence a été utilisée comme traceur de la pollution anthropique, particulièrement pendant la période qui a précédé l'interdiction du plomb dans les carburants. Les poussières et autres polluants émis à l'est de l'Atlantique et soufflés vers l'Europe pouvaient facilement être distingués des polluants locaux par la composition isotopique du plomb qu'ils contenaient.

Les gisements MVT sont épigénétiques et stratiformes et se trouvent dans les dolomies ou moins fréquemment dans des calcaires et grès, à faible profondeur sur les flancs des bassins. Un contexte classique de formation est une plateforme carbonatée, par exemple un récif, situé dans un bassin d'avant-fosse relativement peu déformé

ou en bordure d'une chaîne de collision (figure 4.16). La plupart des gisements constituent des parties de grandes régions minéralisées qui recouvrent plusieurs centaines de kilomètres carrés, et contiennent de nombreux sites minéralisés de toutes tailles. Les limites d'une région minéralisée sont définies sur des arguments géologiques, notamment par la présence de brèches, de changements de faciès depuis des argiles vers des carbonates à la marge du bassin, de failles majeures et de remontées du socle.

Les gisements sont minéralogiquement très simples ; les minéraux dominants sont la sphalérite, la galène, la pyrite, la marcassite (FeS_2), la dolomite, la calcite et le quartz. Les textures des minéraux sulfurés sont extrêmement variables, depuis des gros grains à des grains fins, massifs ou disséminés. On trouve également dans certains gisements des structures litées ou des concrétions typiques de la précipitation à partir de fluides. Les altérations associées avec ces corps minéralisés consistent principalement en la dolomitisation, la bréchification, la dissolution de l'encaissant, et la dissolution ou la recristallisation des feldspaths et des argiles. Des indices de dissolution d'encaissant carbonaté dont témoignent des effondrements, des éboulements ou des bréchifications sont assez fréquents.

Les températures de formation du minerai, déterminées à partir des inclusions fluides, sont basses (50 à 200 °C), mais cependant supérieures à celles connues avec un gradient géothermique normal dans un bassin sédimentaire. Les fluides responsables de la minéralisation, des saumures denses provenant du bassin, contiennent typiquement 10 à 30 % de sels dissous. Les analyses isotopiques du plomb et du soufre indiquent que les sources des métaux et du soufre réduit sont les roches sédimentaires du bassin.

Dans toutes les régions minéralisées, les gisements présentent des similarités comme leurs assemblages minéralogiques, leurs compositions isotopiques, et leurs textures. Pour chaque région, la localisation du minerai a un contrôle spécifique et peut dépendre de la présence d'éventails argileux (déposés en marge des unités argileuses), de transitions calcaire-dolomie, de complexes récifaux, de brèches d'effondrement, de failles, ou de la topographie du socle. La plupart des gisements MVT sont le résultat de processus hydrologiques d'échelle régionale ou subcontinentale cependant, on peut s'attendre à une certaine diversité des gisements MVT d'une même région, parce qu'il existe une grande variété de compositions de fluides, de conditions géologiques et géochimiques, de transfert de fluides, et de mécanismes de précipitation.

Origine

Comme pour de nombreux autres types de gisements, le principe de base est bien compris, mais les détails, dont certains ont une importance cruciale, demeurent obscurs. Comme mentionné précédemment, de forts indices géologiques et géochimiques montrent que métaux et soufre trouvés dans les gisements dérivent des roches détritiques du bassin sédimentaire. Il existe également des arguments importants qui montreraient que le fluide hydrothermal est l'eau contenue dans la porosité, c'est-à-dire le fluide, initialement de l'eau de mer, qui a rempli les espaces entre les grains détritiques du sédiment incomplètement consolidé. Le mécanisme de précipitation des sulfures du minerai est bien compris : les fluides contenus dans le bassin sont

4.3 • Gisements hydrothermaux illustrant les processus métallogéniques

relativement oxydés et ont probablement transporté les métaux sous forme de complexes de chlorures ou sulfates. L'environnement géochimique des carbonates qui contiennent le gisement était très différent – il était réduit et contenait des espèces réductrices sous forme d'hydrocarbures (huile ou gaz) et d'autres composés organiques. La réaction du fluide hydrothermal salin transportant les métaux sous forme de complexes chlorurés avec des sédiments riches en soufre entraîne la précipitation des sulfures de Pb et Zn, selon une réaction du type :

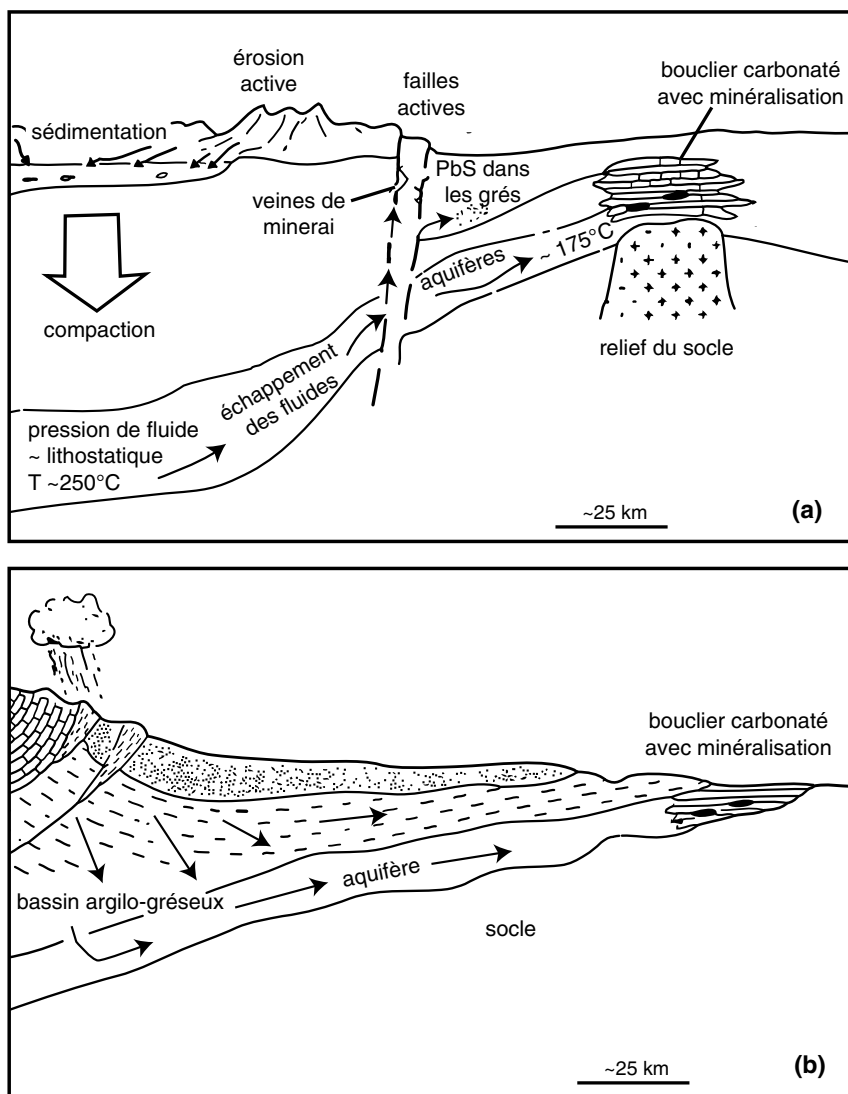
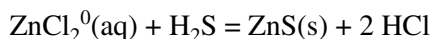


Figure 4.16 - Illustration de l'origine des gisements MVT

D'après Evans, 1993.

Les plateformes carbonatées sont souvent très poreuses à cause de la présence de brèches et de cavités qui se développent pendant la dolomitisation. Les minerais ont précipité dans ces cavités ou dans des zones de réactions entre le fluide et les roches carbonatées.

Le processus responsable de la mise en mouvement du fluide n'est pas encore totalement compris – l'eau interstitielle ne peut pas former de grand gisement si elle reste immobile ; le fluide doit migrer aux marges du bassin où il sera en mesure d'interagir avec les composés réducteurs contenus dans les carbonates. Des processus divers ont été proposés et sont débattus dans la littérature. L'expulsion de l'eau du bassin pendant la compaction liée à la charge des sédiments sus-jacent est souvent évoquée, mais ce processus est certainement trop lent pour expliquer les flux de fluides que l'on a estimés pour de nombreux gisements. Un résultat remarquable sur l'étude géochronologique des gisements et leur contexte géologique à grande échelle a montré que l'âge de formation du minerai dans la vallée du Mississippi, au centre des États-Unis, coïncide avec les épisodes majeurs de déformation dans les Appalaches, chaîne de montagne située en bordure de l'océan Atlantique. Cette association a amené l'idée que des chevauchements à la bordure est du bassin sédimentaire ont pu mettre en mouvement les fluides qui ont formé les minéralisations sur plus d'un millier de kilomètres, jusqu'à ce qu'ils atteignent et réagissent avec les récifs marginaux de l'autre côté du bassin (figure 4.16).

Synthèse

- *Source de métaux* – Roches sédimentaires détritiques du bassin.
- *Source de S* – H₂S biogénique ou sulfures sédimentaires.
- *Source de fluide* – Eau contenue dans la porosité.
- *Origine de la circulation de fluide* – Compaction(?), déformation tectonique (?), hausse du niveau des mers (?).
- *Processus de précipitation* – Réactions d'oxydoréduction lorsque l'eau oxydée du bassin rencontre de la matière organique contenue dans les faciès carbonatés.

4.4 LES AUTRES TYPES DE GISEMENTS HYDROTHERMAUX

Nous avons choisi les gisements décrits précédemment en partie parce qu'ils sont économiquement très importants et procurent la plupart des métaux de base à l'échelle de la planète, mais aussi parce qu'ils illustrent un grand panel de processus impliqués dans la formation des gisements hydrothermaux. Cette liste n'est cependant pas exhaustive, et dans cette partie, nous proposons une brève description des autres types de gisements.

4.4.1 Les gisements stratiformes de cuivre contenus dans les sédiments

Ces gisements sont la deuxième source de cuivre au monde après les gisements porphyriques, et représentent la principale source de cobalt. Quelques exemples sont également riches en Pb, Zn, Ag, U et Au.



ENCART 4.4 « Kupferschiefer » allemande et « Copperbelt » africaine

Deux principaux sites sont les « Kupferschiefer » (argiles à cuivre) permo-triasiques d'Europe centrale et la « Copperbelt » (ceinture de cuivre) d'Afrique centrale. Le premier est bien connu des historiens. Les gisements des Kupferschiefer ont été exploités de façon plus ou moins continue depuis le moyen-âge, et au cours du xvi^e siècle, Georgius Agricola, le premier minéralogiste, a établi la première étude systématique et scientifique de la géologie et de l'exploitation des gisements. Son ouvrage remarquable *De Re Metallica*, paru en 1556, décrit le travail des mineurs et l'exploitation des gisements de Kupferschiefer ; il remarque par exemple, une relation spatiale entre les argiles bitumineuses et la minéralisation de cuivre, anticipant du plus de 500 ans les idées modernes sur la formation du gisement. L'histoire de l'exploitation des gisements de la Copperbelt en Zambie (anciennement nommée Rhodésie du Nord) et au Congo, a procuré des leçons intéressantes et étonnantes. Pendant la plus grande partie du xx^e siècle, les gisements ont été un pilier des économies des colonies britanniques et belges. Jusqu'aux années 1970, les mines ont été exploitées très efficacement (même si l'essentiel des richesses fut partagé entre les colons) et leur présence a nourri de grands espoirs économiques pour la période postcoloniale. Leur importance a cependant été sévèrement amoindrie par le crash des prix du cuivre en 1973 et par la nationalisation des mines de cuivre par les gouvernements des nations indépendantes nouvellement fondées. Pendant les 30 années qui ont suivi, la production de ces gisements riches et gigantesques a chuté presque jusqu'à zéro, résultat de la corruption, de la négligence et de la mauvaise gestion. C'est seulement à la fin du xx^e siècle et au début du xxi^e siècle que la production a été ravivée. La période 2007-2009 a vu arriver de nouveaux investissements d'organisations gouvernementales chinoises, débutant peut-être une nouvelle période de colonisation économique.

Les gisements de cuivre stratiformes sont contenus dans les séquences sédimentaires liées aux rifts intracontinentaux souvent au contact entre des grès éoliens oxydés et des niveaux plus réduits d'argiles, de carbonates et d'évaporites. Les métaux ont été transportés dans des fluides provenant des bassins et qui ont été mis en mouvement par le *rifting* rapide et une subsidence. Les métaux ont été lessivés de minéraux détritiques comme la magnétite, la biotite et la hornblende et ont été transportés sous forme de complexes de chlorures. La précipitation du minerai s'est produite à l'interface redox entre les roches sédimentaires oxydées et celles réduites. Comme pour les gisements SEDEX, il y a un grand débat à propos du processus précis, et

particulièrement pour savoir si les métaux du gisement sont des précipités primaires ou s'ils sont liés au remplacement épigénétique des sulfures de fer sédimentaires.

4.4.2 Les gisements d'uranium

L'uranium est très différent des autres éléments que nous avons décrits dans ce chapitre : c'est une source d'énergie et non pas un métal utilisé dans l'industrie ou la finance comme le sont le cuivre, le zinc, ou l'or ; et comme il est radioactif et entre dans la fabrication de l'armement, il est la cible de la colère des écologistes (un homme politique moustachu devenu célèbre après le démontage d'un McDonald a tout d'abord été un militant anti-nucléaire actif). Bien qu'étant un élément trace, l'uranium est présent dans une grande diversité de roches crustales et forme une grande variété de gisements. Une brève description des types de gisements les plus importants est donnée dans le tableau 4.4. Ceux dans les roches magmatiques et dans les environnements purement sédimentaires sont mentionnés dans les autres chapitres ; ici nous discutons simplement de deux types, les gisements associés à des discordances et les gisements dans des grès, qui se forment tous deux depuis des fluides hydrothermaux, et continuent la liste des minerais dont la précipitation est liée à des réactions d'oxydoréduction.

Le minéral d'uranium principal dans ces gisements mais également dans les autres gisements d'uranium est l'uraninite ou la pechblende (UO_2 , UO_3 , U_2O_5). D'autres minéraux uranifères sont la carnotite ($\text{K}_2(\text{UO}_2)_2(\text{VO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) et les oxydes et titanates complexes, riches en éléments traces comme les groupes des davidite-brannerite-absite et des euxinite-fergusonite-samarskite. Les minéraux d'uranium secondaires comme la torbernite et l'autunite ont des couleurs brillantes jaunes ou vertes et sont fluorescents en lumière ultraviolette.

La clé de la formation des gisements d'uranium est la très grande différence de solubilité de cet élément selon l'état d'oxydation des fluides. L'uranium se rencontre sous deux états de valence, la forme réduite U^{4+} et la forme oxydée U^{6+} . Cette dernière est extrêmement soluble dans les fluides oxydés dans lesquels elle forme des complexes avec des ligands fluorures, phosphates et carbonates ; dans ces conditions, l'uranium est facilement transporté dans les fluides qui circulent dans les bassins sédimentaires. La forme réduite, au contraire, est extrêmement insoluble, de sorte que lorsqu'un fluide oxydé arrive au contact d'un composé réducteur, l'uranium précipite.

Les corps minéralisés les plus concentrés en uranium sont les gisements reliés à des discordances dans le bassin d'Athabasca, dans le Saskatchewan au Canada. Ces gisements ne sont pas très grands, ils comportent moins d'un million de tonnes de minerai, mais leur taille relativement restreinte est compensée par leur forte teneur en uranium ; Cigar Lake contient environ 875 000 tonnes de minerai avec une teneur moyenne de 19 % d'oxyde d'uranium, et McArthur River une quantité légèrement inférieure à une teneur moyenne de 24 %. Des gisements similaires dans les territoires du Nord en Australie sont plus grands mais ont des teneurs en uranium bien inférieures avoisinant une moyenne de 0,4 %.

Tableau 4.4 – Principaux types de gisements d'uranium.

Âge	Teneur	Proportion*	Contexte géologique	Exemples
Gisements reliés à des discordances	0,4-24%	30%	A proximité de discordances majeures entre des grès à la base de bassins sédimentaires et le socle métamorphique	Athabasca Basin, Canada; McArthur Basin, Australie
Gisements de grès	0,05-0,4%	15%	Grès dans des environnements sédimentaires de type continental – fluvial ou marin – de marge, interstratifiés avec des argiles et des boues	Wyoming Basin et plateau du Colorado, États-Unis ; Europe centrale, Kazakhstan
Gisements de conglomérats à galets de quartz	0,01-0,15%	10%	Gisements de paléoplacers stratiformes	Witwatersrand, Afrique du Sud; Elliot Lake, Canada
Gisements d'oxyde de fer, cuivre, or	0,04-0,08	40%	Brèche de granite riche en hématite	Olympic Dam, Australie
Gisements associés à des intrusions	0,03	5%	Veines dans des leucogranites	Rossing, Namibie
Gisements volcaniques	0,02-0,2%	<1%	Veines and brèches dans des roches volcaniques intermédiaires à felsiques	Strel'tsovskoye, Russie; Dornod, Mongolie; McDermitt, États-Unis,
Gisements de surface (calcretes)	0,15	5%	Concentrations d'uranium à proximité de la surface dans des sédiments et des sols	Yeelirrie, Australie

* Pourcentage approximatif des ressources mondiales connues d'uranium.

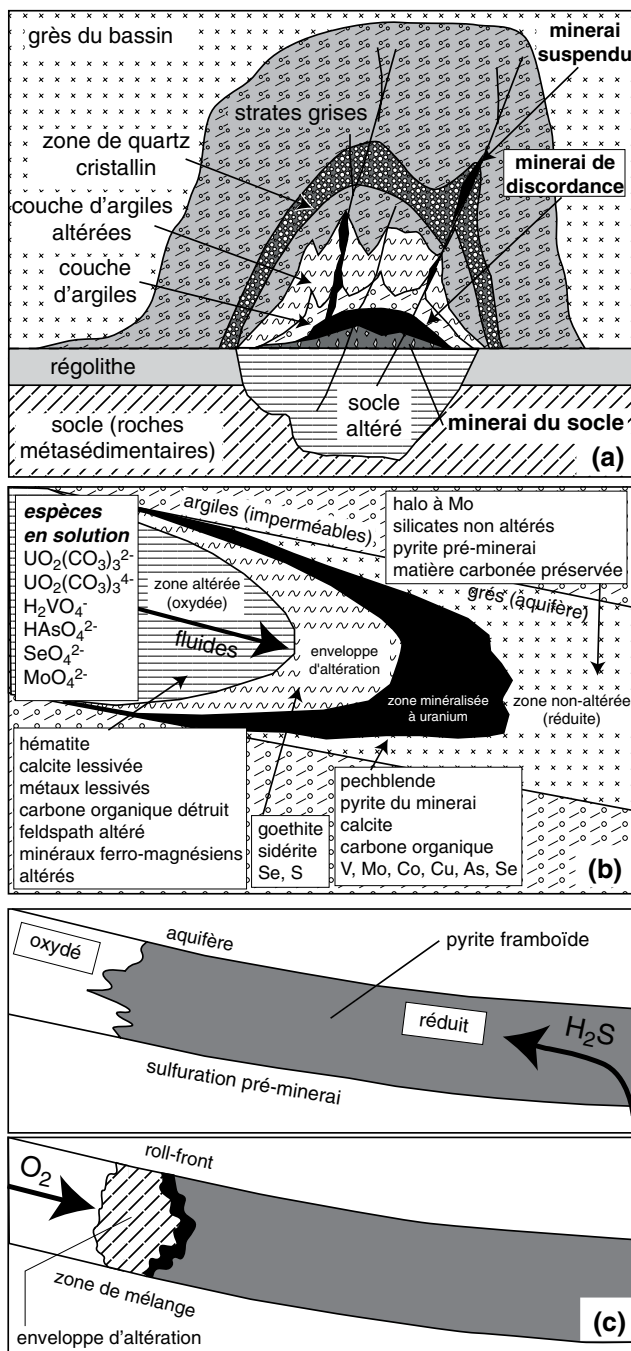


Figure 4.17 - Illustration des caractéristiques géologiques (a) et de l'origine des gisements d'uranium (b) roll-front, (c) reliés à des discordances

Modifié d'après Jefferson *et al.*, 2008 et Robb, 2005.

Dans les gisements reliés à des discordances, des *pods*, des veines et des remplacements d'uraninite semi-massifs sont situés à proximité de discordances, entre des grès conglomératiques du Protérozoïque dans la portion inférieure de bassins intracratoniques et les roches métamorphiques du socle (figure 4.17). Les fluides contenus dans le grès sont oxydés, et lors de leur circulation, ils dissolvent l'uranium de minéraux détritiques comme la monazite, l'alanite ou l'apatite, qui proviennent initialement des granites du socle. Lorsque ces fluides arrivent au contact des poches de schistes pélitiques du socle riches en matière organique, l'uranium précipite et forme le corps minéralisé qui est aujourd'hui exploité. Sa localisation exacte est fortement influencée par les variations de perméabilité des grès, et par la présence de failles qui contrôlent la circulation de fluides.

Les gisements de grès sont les principales sources de minerai d'uranium aux États-Unis, principalement dans le bassin du Wyoming et sur le plateau du Colorado. Ces gisements sont contenus dans les grès à grains intermédiaires à gros, déposés dans un domaine fluvial continental ou dans un environnement sédimentaire marin de faible profondeur. Il y a deux types principaux de gisements nommés « *tabular* » et « *roll-front* ». Dans le premier, des unités argileuses ou pélitiques imperméables sont contenues dans les séquences sédimentaires et se trouvent immédiatement au dessus et en dessous de l'horizon minéralisé. Le fluide contenu à l'intérieur du gré, de l'eau météorique oxydée de faible température et de faible salinité traversant efficacement le grès perméable, transporte avec lui l'uranium dissous ; le fluide dans les argiles et pélites est quant à lui une saumure provenant du bassin riche en sel et relativement stagnante. Le mélange entre ces deux fluides à l'interface entre les unités sédimentaires provoque la précipitation des minéraux uranifères.

Les gisements *roll-front* se forment dans un contexte géologique similaire, mais par un mécanisme différent. La roche hôte est un grès perméable qui contient en profondeur un assemblage de pyrite, calcite et matière organique réduit. Un fluide oxydant s'écoulant depuis des niveaux en surface vers des horizons perméables plus profonds réagit avec le matériel réduit, créant ainsi un front redox — zone en forme de coupe où les deux types de fluides se mélangent et réagissent (figure 4.17). Les minéraux uranifères précipitent initialement au front, qui continue à descendre et migrer le long de la couche de grès. Alors que le fluide s'écoule, l'uranium dispersé dans le matériel réduit est dissous, remobilisé et concentré au front redox, créant ainsi un gisement de plus en plus concentré.

4.4.3 Les gisements d'oxyde de fer, cuivre, or (en anglais *Iron-Oxide copper gold (IOCG) deposits*)

En 1975, des géologues de la Western Mining Corporation, une compagnie australienne de taille moyenne, conduisirent un programme d'exploration afin de trouver des gisements sédimentaires de cuivre dans le Gawler Block au sud de l'Australie. La première carotte échantillonnée fut stérile, mais la seconde amena à la découverte de l'un des gisements les plus riches du monde, et d'un genre entièrement nouveau. Le gisement d'Olympic Dam contient près de 8 milliards de tonnes de minerai de cuivre-

uranium-or : il s'agit de la plus grande ressource mondiale en uranium, le cinquième plus grand gisement d'or et l'un des plus grands gisements de cuivre. Les gisements polymétalliques sont particulièrement attractifs pour les compagnies minières parce que les prix des métaux ne varient pas à l'unisson – le prix de l'or par exemple a tendance à augmenter pendant les périodes de récession protégeant ainsi les compagnies des fluctuations du marché. La découverte d'Olympic Dam a entraîné la mise en place de nouveaux programmes d'exploration pour chercher ce type de gisement et a apporté un nouveau regard sur de nombreux gisements connus qui ont été reclassés dans la catégorie des gisements d'oxyde de fer, cuivre, or (IOGC).

Un gisement IOGC est défini comme polymétallique, au sein d'une brèche, et son minerai est associé spatialement et temporellement avec un granite et avec l'altération d'oxydes de fer. Le gisement d'Olympic Dam est situé dans une brèche hydrothermale en forme d'entonnoir riche en hématite, formée proche de la surface par des fracturations et des altérations progressives et polyphasées au-dessus d'une intrusion granitique. La minéralogie du gisement est variée et complexe, comprenant quelque 30 variétés de minéraux de cuivre, d'uranium, d'or, d'argent, de nickel, de cobalt, sous forme de sulfures, de sulfosels (sulfures complexes comportant plusieurs métaux), d'oxydes, de carbonates et de métaux natifs. On observe ces minéraux dans des veines, sous forme disséminée, ou dans des placages et des remplissages de brèche qui se sont produits conjointement aux altérations calci-sodique, ainsi qu'aux altérations du fer et du potassium.

Comme ils ont été découverts récemment, leur modèle de formation est le sujet d'une révision permanente ; la plupart des géologues pensent qu'un processus magmatique de grande échelle a mis en mouvement un flux de fluides hydrothermaux oxydés d'origine probablement magmatique dans les niveaux crustaux intermédiaires et de surface, le long de zones de failles et sur de longues distances. Le mélange de ces fluides avec les fluides météoriques ou les saumures à proximité de la surface est communément évoqué comme processus de formation du gisement.

4.4.4 Les gisements d'or

« Et alors, avez-vous trouvé de l'or ? » Cette question arrive inévitablement lorsqu'un géologue ou même un étudiant en géologie est sur le terrain et discute avec un paysan local. Même en Europe, un continent avec très peu de gisements d'or (du moins découverts jusqu'à présent), la population s'attend à ce qu'un géologue soit à la recherche d'or. Cette idée provient sans doute des ruées vers l'or qui ont vu des millions d'Européens s'en aller vers le nouveau monde, d'abord vers la Californie, puis vers l'Australie et finalement vers le Yukon et l'Alaska, entre les années 1850 et 1900.

L'or qui a été initialement extrait par les prospecteurs chanceux des ruées vers l'or provient de gisements de placers dans les courants des rivières ou les sables des déserts. Ce type de gisement est décrit dans le chapitre suivant. L'or que l'on y trouve est libéré par l'altération, l'érosion et le transport de ces métaux depuis leurs

sites de gisement primaire, dont la plupart sont des sites d'origine hydrothermale. Comme pour les gisements d'uranium, les types de fluides responsables de la formation des gisements sont variés, mais ils sont en général plus chauds, et ils sont plus souvent intimement liés à des magmas que les fluides responsables de la plupart des gisements d'uranium ou de métaux de base.

Les gisements associés aux fluides magmatiques

Une classe de gisement d'or est appelée épithermale, en référence à la classification de Lindgren, grand métallogéniste américain, qui employait ce terme pour les gisements formés à partir de fluides hydrothermaux dans des niveaux crustaux peu profonds. Les découvertes de gisements de ce type ont été en nombres croissants dans la région circum-Pacifique magmatiquement active. Les études de sources thermales actives montrent que les fluides dans de telles régions sont chauds, 160 à 270 °C, avec des pH et des états d'oxydoréduction contrastés. Les variations de ces paramètres conduisent à deux types de dépôts, appelés de « haute sulfatation », lorsqu'ils dérivent de fluides contenant des espèces soufrées oxydées (SO_2 , SO_4^{2-} et HSO_4^-) et « basse sulfatation » lorsqu'ils dérivent de fluides contenant des espèces soufrées réduites (H_2S , HS^-). Le premier type est formé communément à proximité des événements volcaniques, à partir de fluides qui dérivent directement du magma ; le deuxième type est formé dans les parties plus distales des édifices volcaniques, à partir de mélanges des fluides magmatiques et météoriques (figures 4.18 et 4.19).

L'or est transporté sous forme de complexes de chlorures (Cl^-) ou sulfures (HS^-) dont la stabilité dépend fortement de la composition, du pH, et du potentiel redox (Eh) du fluide. Lorsque ces paramètres changent, les complexes se rompent et les métaux sortent de la solution. Pour les fluides de basse sulfatation, l'or précipite lorsque l'ébullition du fluide entraîne une perte de H_2S dans la phase gazeuse, ou lorsque le fluide se mélange avec l'eau météorique froide et oxydée. Pour les fluides de haute sulfatation, les causes de la précipitation de l'or sont moins comprises.

Les gisements d'or orogéniques

La seconde catégorie la plus importante de gisements d'or consiste en des veines de quartz seul ou associé avec des carbonates dans les failles des zones de cisaillement des terrains déformés et métamorphisés dans les marges en convergences de tous les âges. Un groupe de gisements bien étudié comprend Kalgoorlie en Australie et Timmins-Kirkland Lake-Val d'Or dans les ceintures de roches vertes archéennes du Canada, où près de 15 % de l'or mondial est produit. Un autre groupe comprend les gisements de Californie (États-Unis), Victoria (Australie) et le Klondike (Canada et Alaska) qui ont conduit aux ruées vers l'or.

Ces gisements n'ont pas d'association directe avec les magmas. On pense que les fluides à l'origine des minéralisations sont d'origine métamorphique et sont émis par la déshydratation qui accompagne la dissociation des minéraux hydratés lorsque la température ou la pression augmente. Alors qu'ils pénètrent des roches métavolcaniques et métasédimentaires en traversant la croûte, les fluides métamorphiques lessivent

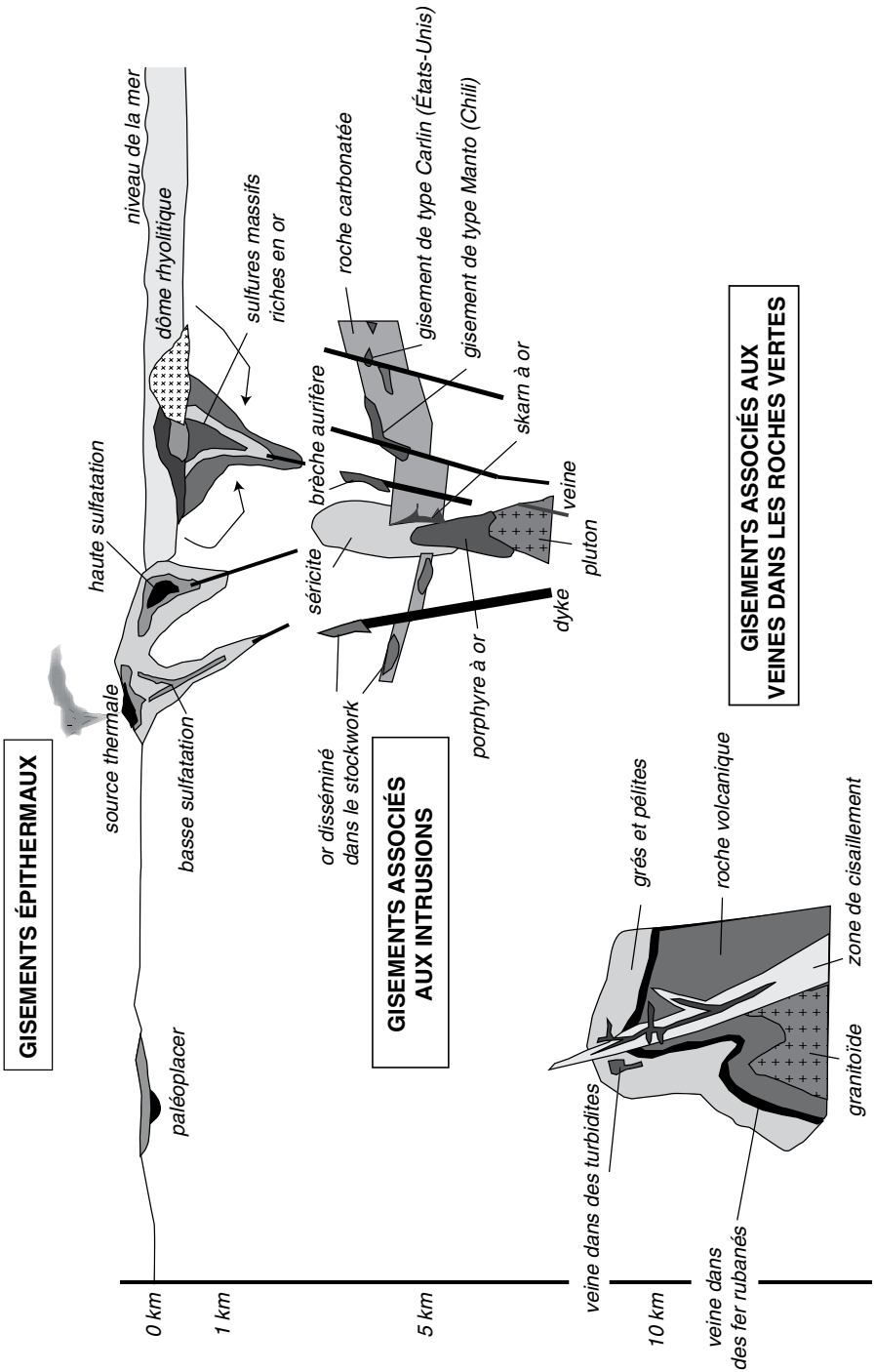


Figure 4.18 – Contextes géologiques des divers types de gisements d'or.

Modifié d'après Dubé et Gosselin, 2008 et Poulsen *et al.*, 2008.

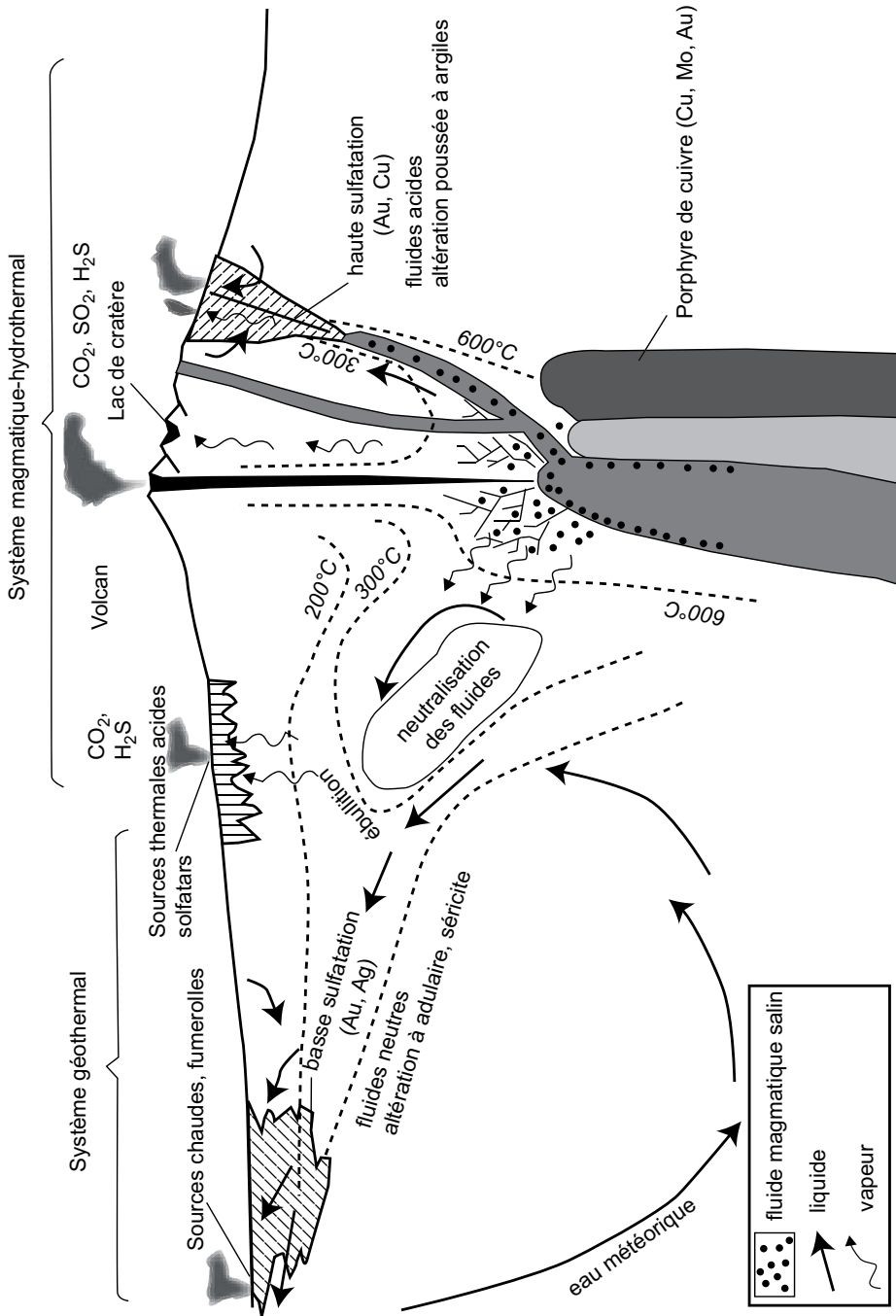


Figure 4.19 - Caractéristiques et contextes géologiques des gisements de basse sulfatation et de haute sulfatation.

Modifié d'après Hedenquist *et al.*, 2000.

l'or, transporté une fois encore sous forme de complexes de chlorures ou de sulfures. Les fluides sont canalisés le long de discontinuités majeures et réagissent avec l'encaissant à de plus faibles profondeurs dans la croûte ; les réactions produisent des zones d'altération caractéristiques au sein de l'encaissant, changent la composition des fluides, et amènent à la précipitation de l'or et des autres minéraux.

Les structures tectoniques exercent un contrôle majeur sur les sites de formation de gisements en guidant le passage des fluides. Les zones en extension au niveau des failles ou au sein même des charnières des plis sont des zones de prédilection, tout comme les zones où les roches sont bréchifiées ou déformées et comportent une porosité importante remplie par des minéraux secondaires.

4.4.5 Les gisements de skarn

Lors de la mise en place d'un liquide silicaté dans un encaissant carbonaté, les fluides émis en fin de séquence de cristallisation peuvent être libérés et contaminer l'encaissant en modifiant sa minéralogie. Ce processus qui forme des roches appelées « skarns » est surtout observé lors de la mise en place de magmas acides dans des carbonates. Les magmas acides ont en été des teneurs en fluides plus élevées que les magmas basiques. Les roches formées ont une minéralogie beaucoup plus exotique que les carbonates originels et sont souvent enrichies en métaux. De nombreux gisements de skarns sont exploités pour leurs teneurs exceptionnelles en W, Sn, Mo, Cu, Fe, Pb-Zn et même Au. De façon générale, les skarns riches en Fe et Au sont plutôt associés à des roches mafiques à intermédiaires, tandis que les skarns à Mo et Sn sont associés à des intrusions granitiques différenciées. L'essentiel du tungstène mondial provient de gisements de skarns comme celui de MacTung dans le Yukon au Canada. Ces gisements associés à des processus périmagmatiques ont donc également une importance économique considérable. Leur processus de formation est à la fois magmatique et hydrothermal.

4.5 CONCLUSION

Les processus hydrothermaux sont impliqués dans la formation d'un grand nombre de gisements d'importance mondiale. Les concentrations résultent du transport de métaux depuis un grand volume de roche à faible teneur, vers un volume limité où les changements de conditions physico-chimiques du milieu entraînent la précipitation des métaux. En recherchant la source de métal et celle du fluide, ainsi que le moteur de la circulation du fluide et le mécanisme de précipitation, il nous a été possible de classer les gisements hydrothermaux en différentes sous-catégories. Les limites entre ces sous-catégories sont parfois étroites, comme nous l'avons signalé dans le cas des gisements VMS et SEDEX. Dans tous les cas, l'eau, agent essentiel de la géodynamique externe, véhicule les métaux et permet un véritable tri chimique. Dans le chapitre qui suit, nous verrons que l'eau a de nouveau un rôle central, dans la formation d'autres types de gisements, à la fois comme agent des processus sédimentaires et comme agent d'altération et de la latéritisation.

Bibliographie

- BOLDY J. (1968), « Geological observations on the Delbridge massive sulphide deposit », *Canadian Inst. Mining Metall. Bull.*, 61 : 1045-1054.
- CATHLES L.M. et ADAMS J.J. (2005), « Fluid flow and petroleum and mineral resources in the upper (< 20 km) continental crust », *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, p. 77-110.
- CHENOVVOY M. et PIBOULE M. (2007), *Hydrothermalisme. Spéciation métallique hydrique et systèmes hydrothermaux*, collection « Grenoble Sciences », 624 p.
- GALLEY A., HANNINGTON M. et JONASSON I., *Mineral Deposits of Canada-Volcanogenic-associated massive sulfide deposits (VMS)*.
http://gsc.nrcan.gc.ca/mindep/synth_dep/vms/index_e.php
- GOODFELLOW W. et LYDON J., *Mineral Deposits of Canada – Sedimentary exhalative (SEDEX) deposits*. http://gsc.nrcan.gc.ca/mindep/synth_dep/sedex/index_e.php
- HANNINGTON M.D., GALLEY A.G., HERZIG P.M., PETERSEN S. (1998), « Comparison of the TAG mound and stockwork complex with Cyprus-type, massive sulfide deposits », *Initial Reports and Scientific Results IODP, Leg 158* : 389-416.
- JEFFERSON C.W., THOMAS D.J., GANDHI S.S., RAMAEEKERS P., DELANEY G., BRISBIN D., CUTTS C., QUIRTS D., PORTELLA P. et OLSON R.A., *Mineral Deposits of Canada – Unconformity Associated Uranium Deposits*. http://gsc.nrcan.gc.ca/mindep/synth_dep/uranium/index_e.php
- LEACH D., SANGSTER D., KELLEY K., LARGE R.R., GARVEN G., ALLEN C., GUTZMER J. et WALTERS S. (2005) « Sediment-hosted lead-zinc deposits : A global perspective », *Economic Geology, 100th Anniversary Volume*, p. 561-607.
- OSSANDÓN G.C., FRÉRAUT R.C., GUSTAVSON L.B., LINDSAY D.D., ZENTILLI M. (2001), « Geology of the Chuquicamata mine : A progress report », *Economic Geology*, 96 : 249-270.
- PARADIS S., HANNIGAN P. et DEWING K., *Mineral Deposits of Canada – Mississippi Valley-type Lead-Zinc deposits (MVT)*. http://gsc.nrcan.gc.ca/mindep/synth_dep/mvt/index_e.php
- SINCLAIR W.D., *Mineral Deposits of Canada – Porphyry deposits*.
http://gsc.nrcan.gc.ca/mindep/synth_dep/porph/index_e.php
- TAYLOR B.E., DUBÉ B., GOSSELIN P., HANNINGTON M., GALLEY A., HART C.J.R., *Mineral Deposits of Canada – Lode Gold Deposits*.
http://gsc.nrcan.gc.ca/mindep/synth_dep/gold/index_e.php

LES GISEMENTS FORMÉS PAR DES PROCESSUS SÉDIMENTAIRES ET DE SURFACE

PLAN	5.1 Introduction
	5.2 Les gisements de placers
	5.3 Les gisements de fer sédimentaires
	5.4 Les autres gisements sédimentaires : Mn, phosphates, nitrates, sels, soufre
	5.5 Les latérites
	5.6 L'altération supergène
	Conclusion
OBJECTIFS	➤ Connaître les principales catégories de gisements d'origine sédimentaire
	➤ Comprendre les processus sédimentaires et de surface qui ont permis les accumulations

5.1 INTRODUCTION

Nous avons choisi de regrouper dans ce chapitre plusieurs types de gisements qui se sont formés en surface ou à proximité de la surface terrestre. La première catégorie comprend les gisements formés par sédimentation, c'est-à-dire par l'accumulation de grains détritiques ou par précipitation bio et/ou chimique dans les rivières, les lacs, les littoraux ou les milieux océaniques de faibles à fortes profondeurs. La seconde catégorie comprend les gisements formés dans les zones d'altération, juste sous la surface, essentiellement dans les environnements tropicaux. Le tableau 5.1 résume ces processus et donne des exemples pour chaque type de gisement.

Tableau 5.1 – Gisements dans les environnements de surface.

Catégorie	Sous-catégorie	Substance extraite	Processus de formation	Exemples
Gisements de Placer	Or	Au	Accumulation de particules d'or dans les rivières ou sur les plages de graviers	Californie (États-Unis), Victoria (Australie), Klondike (Canada), Witwatersrand (Afrique du Sud)
	Minéraux à Zr-Ti	Zr-Ti	Accumulation de minéraux lourds sur les plages de sables	Est et Ouest-australien, Afrique du Sud, Floride (États-Unis)
	Diamants	Diamants	Accumulation de diamants dans des graviers près des côtes	Afrique du Sud, Namibie
Gisements sédimentaires	« Minette » ou Ironstones (de type Algoman)	Fe	Remaniement et dépôt d'oolithes latéritiques	Lorraine (France), Minnesota (États-Unis)
	Formations de fer (de type Supérieur)	Fe	Dépôts de sédiments chimiques riches en Fe et Si	Hammersley (Australie), Brésil
	Sédiments manganifères	Mn	Dépôts de sédiments chimiques manganifères	Groote Island (Australie)
	Évaporite	sel (NaCl), potasse (KCl)	Évaporation, concentration et précipitation de sédiments chimiques	Nombreux exemples, Saskatchewan (Canada)
	Évaporite	Nitrates	Évaporation, concentration et précipitation de sédiments chimiques	Atacama (Chilie)
« Calcrete »	Uranium	U	Précipitation d'uranium dans les environnements de surface	Yeelerie (Australie)
Gisements latéritiques	Bauxite	Al	Sol latéritique produit par l'altération de granites ou de sédiments argileux	Jamaïque, Cuba, Australie, Les Baux de Provence (France) Salindres (France)
	Latérites à Ni	Ni	Sol latéritique produit par l'altération de roches ultramafiques	Nouvelle-Calédonie
Enrichissement supergène	Divers	Divers	Augmentation des concentrations en métaux dans la partie supérieure des gisements	Divers

Dans tous les cas, les minéraux qui sont extraits de ces gisements sont stables à faible température dans les conditions humides et généralement oxydantes que l'on trouve à la surface de la planète. Trois grands types de processus métallogéniques peuvent être distingués :

1. Les gisements de placer sont des concentrations de particules érodées de minéraux de valeur dans des dépôts alluviaux ou éluviaux de sables ou graviers. Les minéraux dans ces gisements sont formés initialement dans la croûte, par la cristallisation de magmas, dans des roches métamorphiques ou par des fluides hydrothermaux ; dans certains cas, leur concentration dans ces roches est supérieure à la moyenne, comme dans les veines à or ou dans les kimberlites à diamants, mais dans d'autres cas, les minéraux sont accessoires et présents en concentrations normales. Ces minéraux sont libérés de leur roche hôte mise à l'affleurement par l'altération chimique et l'érosion mécanique. Ils sont ensuite concentrés dans des corps minéralisés par les processus sédimentaires. Les gisements de placers à or – dans les graviers des rivières ou dans les sables éoliens – et les gisements de minéraux lourds à Zr et Ti – dans les plages de sable – sont des exemples typiques de cette catégorie de gisements.
2. Dans une deuxième catégorie de gisements, des minéraux cristallisent depuis l'eau des lacs ou des mers pour former des roches sédimentaires précipitées d'origine chimique. Les métaux et autres minéraux de valeur dans de tels gisements sont solubles dans l'eau mais précipitent lorsque des niveaux de saturations sont atteints ou lorsque l'eau change de conditions physico-chimiques. Des exemples de gisements de cette catégorie sont les gisements de sels qui résultent de l'évaporation des eaux dans les lacs et les mers peu profondes, et les sédiments riches en Fe ou Mn qui se forment lors du mélange d'eaux ayant des compositions chimiques ou des états d'oxydoréductions contrastés.
3. La troisième catégorie de gisements est liée à la formation de minéraux qui sont stables dans les zones d'altération intense à la surface de la Terre. De nombreux minéraux constitutifs des roches se transforment en phases secondaires solubles dans les eaux de surface, particulièrement dans des environnements chauds et humides. Ces composés migrent dans les eaux souterraines, laissant uniquement sur place les minéraux insolubles qui deviennent de plus en plus concentrés lorsque les autres minéraux, qui formaient la majorité de la roche, sont lessivés. Les bauxites (minerai d'aluminium) et les gisements latéritiques de Ni sont formés ainsi. Un processus du même type a lieu lorsque d'autres catégories de gisements affleurent à la surface : les composants solubles sont lessivés, enrichissant la couche résiduelle en métaux. Ce processus est appelé altération supergène.

5.2 LES GISEMENTS DE PLACERS

Un gisement de placer est un dépôt de sable ou de graviers ou bien un sol contenant des particules érodées de minéraux de valeur. Ces minéraux sont capables de persister dans les environnements de surface grâce à leurs propriétés physiques et chimiques,

Tableau 5.2 – Caractéristiques physiques et chimiques des minéraux des placers
(d'après Garnett et Basset, 2005)

Minéral	Substance convoitée	Densité (g cm ⁻³)	Dureté (échelle de Mohs)	Comportement	Résistance à l'abrasion ²	Remarques
Diamant ¹	Diamant	3,5	10	Cassant	1	Très dur, mais de densité modérée ; cassant
Or	Au	15-19	2,5-3,0	Malléable	11	Très dense, mou et malléable
Platine	PGE	14-19	4,0-4,5	Malléable	10	Dense, assez mou et malléable
Cassiterite	Sn		6,0-7,0	Cassant	6	
Rutile	Ti	4,2-4,3	6-6,5	Cassant	3	Minéral lourd des plages de sables
Zircon	Zr	4,7	7,5	Cassant	2	Minéral lourd des plages de sables
Monazite	Th, REE	5-5,3	5-5,5	Cassant	9	Minéral lourd des plages de sables
Ilménite	Ti	4,7	5,5-6,0	Cassant	8	Minéral lourd des plages de sables
Grenat	Abrasifs	3,5-4,3	6,5 – 7,5	Cassant	4	Minéral industriel

1. Minéraux arranges par ordre de durée de vie dans un environnement fluvial.

2. Résistance à l'abrasion par test « ball-mill » en laboratoire.

comme l'illustre le tableau 5.2. Ils ne sont pas forcément thermodynamiquement stables, mais leur cinétique de réaction est très lente. Prenons l'exemple du diamant qui, même s'il est thermodynamiquement instable à basse pression (James Bond avait tort, les diamants ne sont pas éternels), perdure suffisamment longtemps pour être transporté depuis sa source kimberlitique jusqu'à son site de dépôt parfois dans des graviers au large. Les autres minéraux exploités dans les placers sont l'or, que l'on trouve sous forme native ou métallique, des oxydes et silicates comme le rutile, l'ilménite, le zircon et la monazite, qui sont sources de Ti, Zr, Nb et d'autres métaux dit « de haute technologie ». L'uraninite est stable uniquement sous des conditions réductrices comme celles qui existèrent dans l'atmosphère, les océans et les rivières pendant la première partie de l'histoire de la Terre et les placers de ces minéraux se sont formés exclusivement pendant l'Archéen et le Protérozoïque inférieur.

Le diamant, l'uraninite et les oxydes de Zr-Ti ont une dureté intermédiaire à extrêmement forte, qui leur permet de résister à l'abrasion lorsque les grains sont arrachés de leur roche mère et transportés le long des rivières ou par les courants littoraux. L'or est bien sûr très mou, mais il est également très malléable et ductile, ce qui lui permet de perdurer au cours du transport sédimentaire.

En plus d'être résistants dans les environnements de surface, les minéraux d'intérêt dans les gisements de placers sont significativement plus denses que la plupart des autres minéraux transportés dans les processus sédimentaires. C'est cette caractéristique qui permet à ces minéraux d'être triés et extraits des matériaux détritiques ou des fragments de roches et de se concentrer dans les gisements. Le tableau 5.2 présente un certain nombre d'exemples. Ainsi, le diamant n'est pas beaucoup plus dense que les minéraux détritiques comme le quartz ou le feldspath, et c'est seulement son extrême dureté qui lui permet d'être accumulé. À l'opposé, l'or a une densité six fois plus grande que celle des minéraux communs et avec de tels contrastes de densité, le courant des rivières trie même des particules d'or très fines et produit des gisements de placer qui contiennent des concentrations plusieurs milliers de fois supérieures aux concentrations normales de la croûte. Le tri des minéraux modérément denses comme le zircon ou le rutile est moins efficace et les gisements de ces minéraux sont beaucoup moins concentrés, normalement 10 à 100 fois plus concentrés que les roches de la croûte pour le Zr et le Ti.

5.2.1 Les placers à or

L'or libre, terme utilisé pour décrire les particules d'or natif (élémentaire) dans les lits des rivières, est facilement extrait par les mineurs en utilisant des méthodes simples comme la battée, ou les « boîtes à canaux » (un simple châssis de bois sur lequel circulent des boues de graviers et sables comportant de l'or, des réglettes ou des tapis sur le fond de la boîte collectant les particules d'or). Cette facilité d'extraction a fait que les gisements d'or alluviaux ou de placer ont été exploités par de nombreuses sociétés primitives, parmi lesquelles les romains, qui en 25 av. J.-C. ont commencé une extraction d'or qui a duré près de deux siècles après avoir conquis la région de

Las Medulas en Espagne. La découverte de gisements de cette catégorie a entraîné les « ruées vers l'or » aux États-Unis, en Australie et au Canada. Les légendes de mineurs ayant fait fortune en trouvant d'énormes pépites ont attiré des centaines de milliers de prospecteurs dans les champs d'or alluvial de Californie, de Victoria et de Klondike dans le Yukon. Les exploitations de ce type continuent actuellement dans de nombreuses parties du monde, notamment en Amérique du Sud, où l'utilisation de cyanure et mercure pour extraire l'or provoque une pollution considérable des rivières.

Dans ces zones, qui sont localisées à proximité ou dans des chaînes de montagnes récentes, les particules d'or ont été initialement formées dans des filons (voir chapitre 4), et ont ensuite été concentrées dans les lits des rivières qui parcourent ces régions escarpées et montagneuses. Une autre sous-catégorie de gisement de placer comprend ceux formés par l'action du vent et des rivières temporaires dans les déserts de sable des plaines plates et arides autour de Kalgoorlie et Collgardie en Australie, entraînant une ruée vers l'or dans cette région au début du ^{xx}^e siècle. Dans ce cas, l'or provient d'énormes gisements des ceintures de roches vertes archéennes de la région (voir chapitre 4), qui depuis ont été continuellement exploitées. À l'inverse, de grands et riches gisements situés dans les ceintures de roches vertes du Canada comme celles autour de Timmins ou Kirkland Lake, ne sont pas associés à de nombreux gisements de placers d'or et n'ont entraîné des ruées vers l'or que très mineures. Cette différence peut en partie être expliquée par l'hostilité du climat l'hiver qui a dissuadé les prospecteurs, mais il faut surtout considérer la topographie douce par laquelle les rivières descendent très calmement et qui ne permet peu ou pas la formation de placers qui pourraient concentrer l'or. La douceur de ces reliefs est liée à la présence de glaciers continentaux qui ont abrasé la région et les anciens placers lors des dernières périodes glaciaires, récemment à l'échelle des temps géologiques.

Les gisements de placers à or ont produit les deux tiers de tout l'or extrait jusqu'à présent. L'or facilement obtenu dans les placers de Californie, d'Australie ou d'autres sites a été exploité très rapidement lors des ruées vers l'or, habituellement sur des périodes de seulement quelques années, et les exploitations dans ces régions se sont ensuite focalisées sur les veines à or ; c'est-à-dire les fractures minéralisées riches en or contenues dans un encaissant solide, formées à partir de fluides hydrothermaux, comme nous l'avons décrit dans le chapitre 4. Désormais, l'extraction de l'or de placers est uniquement artisanale, et ne représente plus qu'une proportion mineure de la production globale d'or. Par contre, la production continue dans le gisement de Witwatersrand en Afrique du Sud, un gisement de « paléoplacer » conglomératique qui est le plus grand gisement d'or connu (en compétition avec les grands porphyres IOCG décrits dans le chapitre 4). Les gisements de Witwatersrand ont produit environ la moitié de tout l'or jamais extrait. En 1970, ils assuraient encore la moitié de la production, mais en 2007, cette statistique est tombée à 11 % suite à l'épuisement des corps minéralisés riches et de faible profondeur à Witwatersrand et suite au développement d'autres mines d'or dans de nombreuses parties du monde. La Chine est aujourd'hui le premier producteur mondial.

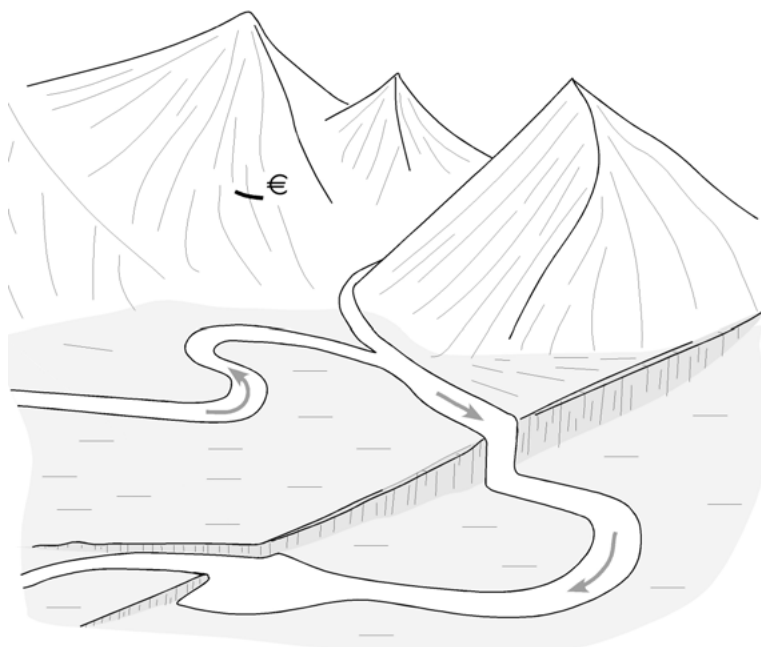
Les placers à or récents

Les placers à or récents consistent en des accumulations de particules d'or dans des graviers, des sables ou des sols quaternaires et tertiaires, et dans leurs équivalents consolidés. Deux grands types de gisements peuvent être distingués : (1) les gisements alluviaux, dans lesquels l'or est transporté par les rivières ou les courants littoraux puis séparé des autres minéraux par l'action de ces courants ; et (2) les gisements éluviaux, dans lesquels l'or reste plus ou moins en place sur le site d'affleurement du gisement primaire tandis que les autres minéraux sont lessivés. Un type de gisement de type éluvial se forme sur la pente des reliefs immédiatement en dessous des veines à or à l'affleurement : les glissements par gravité, et/ou l'action du vent ou de l'eau libèrent les composants les plus légers et ne laissent sur place que les denses particules d'or. Un autre type de processus forme des placers dans les plaines désertiques, où les vents et les inondations occasionnelles chassent les minéraux solubles ou peu denses.

Dans le cas des placers alluviaux formés dans les lits des rivières, les processus hydrauliques concentrent l'or là où la vitesse du courant diminue notablement ou bien là où des courants de vitesses contrastées ou de styles différents (laminaire ou turbulent) sont juxtaposés. Par exemple des placers se forment dans les bancs de sables et de graviers à l'intérieur des méandres, sous les chutes d'eau et les rapides descendant des grands rochers, dans les lits des rivières, sous les couverts végétaux, le long des lignes de rivages sur les plages, et au niveau d'autres sites de piégeage comme des fractures ou de rides dans le lit des rivières. Dans tous ces contextes, les particules les moins denses et les plus fines sont transportées loin du site de gisement par le fluide à forte vitesse laissant les grains les plus denses et les plus gros dans les zones de faible courant. Dans l'exercice 5.1, vous devrez identifier les sites de gisements d'or dans un système fluvial adjacent à une chaîne de montagnes.

L'or dans les gisements de placers est presque entièrement sous forme métallique et se trouve en grains de tailles très variées, depuis de minuscules particules jusqu'à des grands pétales ou de grandes pépites. « Welcome Stranger » la plus grosse pépîte jamais trouvée, mesure 61 cm par 31 cm et pèse environ 70 kg. Cette pépîte a été découverte accidentellement sur une piste à charrette dans le Victoria, en Australie en 1869. L'or dans les placers est très pur : il s'agit habituellement d'un alliage comprenant 80 à 85 % d'Au, le reste étant principalement de l'Ag. Là où les veines à l'origine des placers peuvent être localisées, on remarque que l'or des placers est généralement plus pur que l'or des veines. La purification a lieu en partie par oxydation lorsque l'or est exposé à la surface car l'argent est plus soluble que l'or dans ces conditions. Cependant, de fines couches d'or très pur (98-99 %) entourent fréquemment les particules et les pépites d'or dans les gisements de placers, ce qui a fait émettre l'hypothèse que les pépites continuent de croître au sein même des placers par un processus du type dissolution-précipitation.

Exercice 5.1 – Prospection de gisements de placer



Une veine d'or située à mi-pente sur une montagne, identifiée par le symbole €, alimente en or tout un système fluvial. Indiquez sur la figure ci-dessus (1) les localisations probables de quatre gisements de placers à or où vous souhaiteriez acheter des concessions et (2) la localisation d'un gisement éluvial.

ÉLÉMENTS DE SOLUTION. Relisez le paragraphe précédent sur les placers à or récents.

Les conglomérats à galets de quartz et les paléoplacers pyritiques

Les conglomérats à galets de quartz et les paléoplacers pyritiques, dont les gisements de Witwatersrand Basin en Afrique du Sud sont des exemples, se sont formés dans des réseaux anastomosés et des éventails alluviaux pendant le Paléoprotérozoïque. Les conglomérats (figure 5.2) consistent en des galets bien arrondis de quartz, silex, et localement pyrite, dans une matrice de quartz, mica, chlorite, pyrite, et fuchsite (variété de muscovite verte contenant du chrome). Ils contiennent de l'or natif, de la pyrite et d'autres sulfures, arséniates, sulfosels, de l'uraninite (UO_2), de la brannérite ($\text{U}^{4+}, \text{Ca})(\text{Ti}, \text{Fe}^{3+})_2\text{O}_6$, des concentrations traces d'alliages d'éléments du groupe du

platine et du pyrobitume en proportion non négligeable. L'or natif est principalement contenu dans la matrice du conglomérat, mais des concentrations mineures en or se trouvent également dans la pyrite et dans les autres minéraux sulfurés. Deux types morphologiques d'or peuvent être distingués : des grains bien arrondis qui ressemblent aux petites pépites que l'on trouve dans les placers récents, et des agrégats irréguliers de cristaux automorphes, qui ressemblent à de l'or d'origine hydrothermale.

La figure 5.1, une carte simplifiée de Witwatersrand Basin, présente la disposition (1) des sables et conglomérats des groupes de Central Rand et West Rand qui contiennent les chenaux de conglomérats aurifères ; (2) des basaltes effusifs sus-jacents de Venterdorp Supergroup qui ont protégé les chenaux de l'érosion ; et (3) des granites

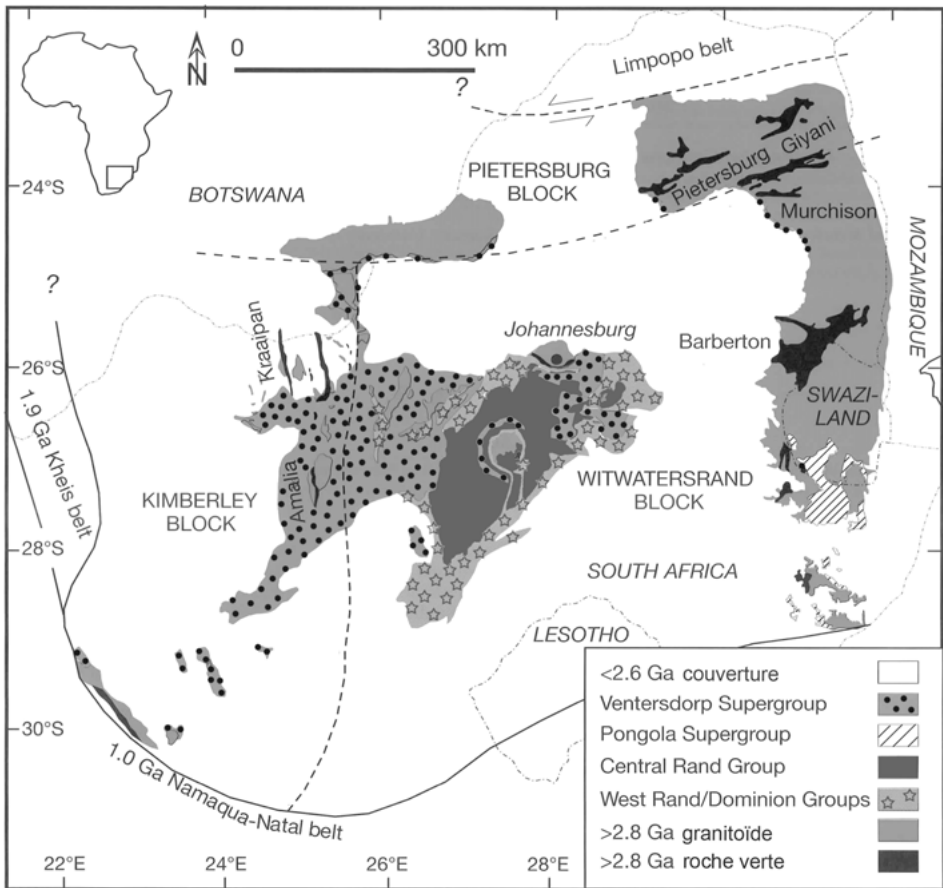


Figure 5.1 – Carte simplifiée du Witwatersrand basin.

On voit la disposition centrale des conglomérats et des sables des groupes de Central Rand et de West Rand, les basaltes effusifs du Venterdorp Supergroup qui ont protégé les sables et conglomérats, et les granites alentours qui ont été les sources probables d'or.

Carte modifiée d'après Schmitz *et al.*, 2004 et Frimmel *et al.*, 2005.

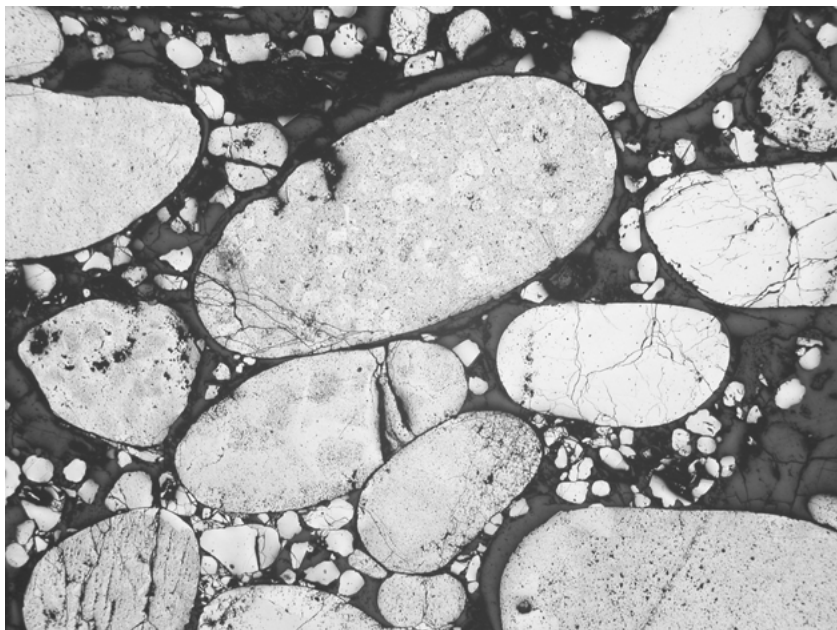


Figure 5.2 – Pyrite détritique des conglomérats de Witwatersrand.

La largeur réelle de la zone photographiée est de 8 mm (photographie de A. Hofmann).

et ceintures de roches vertes alentours, qui ont probablement été les sources d'or. Les sédiments des séries Central Rand et West Rand se sont déposés entre 2,8 et 3,0 Ga en marge d'une mer épicontinentale dans le système fluvial anastomosé qui a érodé les matériaux des reliefs alentours. Les fluctuations répétées du niveau de la mer ont changé la position de la ligne de rivage, et ont construit une séquence de ~ 5 km d'épaisseur de sables, argiles, et conglomérats. Les corps minéralisés (ici des chenaux) sont situés dans des lentilles d'arénites à galets appartenant à une douzaine de niveaux stratigraphiques différents du Witwatersrand Supergroup. D'autres gisements de ce type mais beaucoup plus petits sont connus dans le système de Tarkwaian (2,1 Ga) au Ghana, et à Jacobina, à Bahia, au Brésil.



ENCART 5.1 Aspects géologiques, économiques et éthiques de l'extraction d'or

Le minerai d'or extrait des mines de Witwatersrand contient en moyenne 10 ppm Au, 30 ppm Ag et 280 ppm U. Dans les échantillons normaux de minerai de ce gisement, comme dans ceux de la plupart des gisements d'or modernes, l'or est invisible à l'œil nu. 10 ppm sont équivalents à 10 grammes par tonne – trois tonnes de roche doit être extraite et traitée, pour recueillir un morceau d'or de la taille d'un morceau de sucre ! Exploiter un gisement d'or produit des mines à ciel ouvert ou souterraines énormes, et d'imposants terrils à la surface. S'ils ne sont pas

maintenus traités, et protégés, les terrils relâchent des métaux toxiques dans les rivières environnantes, et même s'ils sont reboisés et transformés en collines recouvertes d'arbres, le processus de restauration du site est long et pas toujours efficace. Par contre, la surface totale des sites d'exploitation d'or n'est pas très étendue, environ celle d'une douzaine d'exploitations de céréales dans le bassin parisien (qui ont également des « inconvénients écologiques » dans la mesure où elles ont remplacé la forêt d'origine et où elles sont écologiquement stériles car elles ne produisent qu'une espèce – de plus, elles entraînent pour la plupart une pollution sous forme de nitrates et pesticides). La quantité de richesses produites par une mine d'or est plusieurs ordres de grandeur supérieure à celle produite par une exploitation céréalière. De son côté, l'extraction artisanale d'or pollue les rivières en Amérique du Sud. D'un point de vue social, environ 200 mineurs meurent chaque année dans les mines d'or d'Afrique du Sud, et la santé de milliers d'autres est rongée par la silicose et d'autres maladies contractées en vivant au fond des mines. Une partie de l'or produit dans les mines est réellement utilisée dans l'industrie (les ordinateurs que nous utilisons pour écrire ce livre en contiennent près d'un demi-gramme), mais l'essentiel de l'or que nous extrayons reste enfermé dans les coffres des banques centrales ou bien est utilisé en joaillerie, particulièrement en Inde où ce métal est très prisé. L'or est un « métal de crise », un refuge que les investisseurs convoitent en temps de turbulences économiques. En 2008-2009, les prix du fer et des métaux de base ont plongé tandis que celui de l'or a approché des records historiques.

Même si nous avons choisi de décrire les gisements du Witwatersrand basin dans ce chapitre sur les gisements d'origine sédimentaires, la formation de ces gisements est encore controversée. Deux hypothèses sont en concurrence pour expliquer l'origine de l'or, le modèle placer et le modèle hydrothermal. Les arguments pour et contre chacun des modèles sont résumés dans le tableau 5.3.

D'après le modèle placer, des grains détritiques d'or ont été transportés dans le bassin et se sont déposés dans la matrice des conglomérats. Le modèle hydrothermal propose que des fluides chauds de H_2O-CO_2 dérivés de la déshydratation lors du métamorphisme de roches volcaniques sous-jacentes au bassin aient circulé le long des horizons conglomératiques perméables et déposé l'or et d'autres minéraux dans la porosité des sédiments. Les défenseurs de chaque école sont d'accord pour affirmer que des fluides hydrothermaux ont traversé le conglomérat à une ou plusieurs reprises : « l'école hydrothermale » pense que la majorité ou la totalité de l'or a été introduit par ces fluides, alors que « l'école placer » pense que ces fluides ont seulement entraîné une recristallisation relativement mineure, et la redistribution de l'or d'origine détritique. Cette remobilisation a fait que ce dernier modèle est souvent appelé « modèle de placer modifié », comme nous l'appelons dans le tableau 5.3. Chacune des écoles a développé de nombreux arguments et aujourd'hui, malgré plusieurs décennies de recherches et d'argumentations, ce problème n'est toujours pas résolu. Tout comme pour un autre gisement majeur d'Afrique du Sud – le gisement de chromite et PGE du Bushveld (voir chapitre 3) – ni la renommée, ni l'importance économique de ce gisement n'ont eu raison des interrogations concernant l'origine du minerai que l'on y trouve !

Tableau 5.3 – Arguments pour les modèles hydrothermaux et le modèle placer pour la formation des gisements d'or de Witwatersrand.

Modèle hydrothermal	Modèle de placer modifié
L'or apparaît tardivement dans la paragenèse et est associé aux zones d'altération hydrothermales	Coexistence de pépites d'or arrondies et d'or hydrothermal
Les grains de pyrite arrondis et l'uraninite sont d'origine hydrothermale et postérieurs au dépôt	La morphologie, la cristallographie et la zonation des pyrites indiquent leur origine détritique
L'or et l'uranium sont étroitement associés avec du pyrobitume qui a été remobilisé pendant un épisode métamorphique	L'association avec le pyrobitume ne concerne que l'or et l'uranium remobilisé par l'hydrothermalisme
Les couches perméables du conglomérat ont canalisé les flux de fluides hydrothermaux	Important contrôle sédimentaire de la distribution de l'or
L'or s'est déposé après le dépôt des sédiments	Les âges Re-Os de l'or sont plus grands que l'âge de la sédimentation
L'or s'est déposé lors du pic de métamorphisme	Le métamorphisme a remobilisé de l'or détritique préexistant
Il n'y pas de source convenable pour le placer à or	Les granites alentours et les roches méta-volcaniques vertes ont été les sources d'or

Modifié d'après Frimmel *et al.* (2005).

5.2.2 Les minéraux lourds dans les plages de sable

La plupart des ressources de titane et de zirconium au monde proviennent de concentrations en minéraux lourds dans des plages de sables. Ces éléments, sont dits métaux de « haute technologie » ou de « l'ère spatiale », du fait de leur grande résistance par rapport à leur poids qui les rend adaptés à la construction d'avions, ou de navettes spatiales, mais également de boîtiers de certains ordinateurs ou des mats des voiliers de la Coupe de l'America. La principale utilisation du titane n'est cependant pas en tant que métal, mais sous forme d'oxyde : TiO_2 est le pigment responsable de la couleur blanche brillante d'une grande diversité de peintures, papiers, plastiques, etc. Les terres-rares, que l'on trouve dans un nombre croissant de superconducteurs, céramiques, batteries, aimants, dans les phosphores des télévisions, et dans les catalyseurs des raffineries de pétrole, se trouvent dans les monazites, un composant mineur des plages de sable.

Les gisements de minéraux lourds dans les plages de sable relativement jeunes sont une source limitée en zirconium mais une source majeure de titane. Ce dernier élément est également extrait dans les gisements magmatiques d'ilménite ($\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$) dans des anorthosites au Canada, et sous forme d'anatase (TiO_2) dans les gisements résiduels au dessus d'intrusions alcalines au Brésil.

Les principaux minéraux utiles dans les plages de sable sont l'ilménite (FeO.TiO_2), le leucoxène (de composition $\sim \text{SiO}_4\text{TiCaO}$, produit de l'altération de l'ilménite), le rutile (TiO_2), le zircon (ZrSiO_4) et la monazite (un phosphate de Th de terres rares). Les concentrations en minéraux utiles sont très variables. Les gisements les plus riches contiennent jusqu'à 50 % d'ilménite et de 5 à 20 % de rutile et zircon et 1 à 3 % de monazite ; les minerais plus classiques contiennent seulement quelques pourcents d'un mélange de minéraux lourds. Cependant, comme ces gisements sont près de la surface et sous forme de sables non-consolidés, leur coût d'exploitation est bien inférieur à celui d'autres gisements dont on extrait le minerai de mines profondes, et dont on doit broyer les roches solides pour la purification.

Tous les minéraux lourds des gisements de plages de sables sont des phases accessoires présentes en faibles quantités (< 1 %) dans les roches magmatiques et métamorphiques normales. Les grains de ces minéraux sont relâchés lorsque la roche est dégradée par l'altération et comme ils sont stables dans les conditions de basse température des environnements fluviaux, ils sont transportés par le courant des rivières jusqu'aux lignes de côtes des lacs et des océans où l'action des vagues, des vents, des marées ou des courants côtiers expulsent les quartz et feldspaths plus légers, laissant les sables enrichis en minéraux denses de Ti et Zr (voir exercice 5.2). Pour que ce processus soit efficace, un grand réservoir de roche source doit subir de longues périodes d'érosion chimique. C'est le cas des vieux cratons précambriens, riches en granites et en gneiss qui contiennent des concentrations assez élevées en minéraux de Zr et Ti, et qui sont érodés jusqu'à une pénéplaine sujette à une intense altération, particulièrement sous les régions tropicales. Lorsque de telles roches affleurent dans des chaînes de montagnes plus récentes dans des climats tempérés ou froid, l'érosion mécanique domine, et les minéraux lourds ne sont pas séparés aussi efficacement des autres composants.

Pour ces raisons, les plus grands gisements se trouvent autour des vieux continents stables dans les régions équatoriales, à savoir le long des côtes australiennes, sud-africaines et indiennes. Ces pays sont ainsi les principaux producteurs de Zr et Ti. Des gisements plus petits et moins riches existent aux États-Unis, en Afrique occidentale, en Malaisie et en Chine.

Exercice 5.2 – Estimation de la taille potentielle d'un gisement de plage

Les quantités de minéraux mises en jeu dans les gisements de plages peuvent être gigantesques. Estimons qu'une roche banale, un granite par exemple, constitue la lithologie dominante d'un bassin versant d'environ 100 000 km² (à titre de comparaison, celui de la Loire, qui est d'environ 117 000 km²). Cette roche contient 0,2 % de volume de titano-magnétite, un oxyde de fer et titane dense et peu altérable. (1) Si l'on considère que le fleuve draine les produits de l'érosion mécanique de l'équivalent d'un mètre de roche sur tout le bassin versant, et qu'il les libère dans un estuaire de 20 km², quelle est l'épaisseur de sables et d'argiles déposée ? (2) Quel est le volume de titano-magnétite ? (3) Si le sable et les argiles

sont évacués par les courants qui ne laissent sur place que la titano-magnétite, c'est-à-dire si l'on considère la purification/concentration totale de la titano-magnétite, estimez l'épaisseur de la couche de titano-magnétite pure sur toute la superficie de l'estuaire. (4) Un tel gisement vous paraît-il exploitable ?

ÉLÉMENTS DE SOLUTION. Calculons tout d'abord le volume V de roche érodé (en km^3) : $V = 100\,000 \times 0,001 = 100 \text{ km}^3$. (1) Si ce volume sédimente dans un bassin de surface $S = 20 \text{ km}^2$, cela représente une couche d'épaisseur $E = V/S = 100/20 = 5 \text{ km}$. (2) Il n'y a pas eu de tri et la titano-magnétite se retrouve, dans les sédiments, en proportion équivalente à sa proportion dans le granite. Il y a donc 0,2 % de volume titano-magnétite, soit $V_{\text{magnétite}} = 0,002 \times V = 0,2 \text{ km}^3$. (3) Si le sable et les argiles sont évacués, la couche de magnétite qui reste à une épaisseur $E_{\text{magnétite}}$ telle que $E_{\text{magnétite}} = V_{\text{magnétite}} / S = 0,2/20 = 0,01 \text{ km} = 10 \text{ m}$. (4) Une telle couche n'est pas très épaisse, mais le fait qu'on puisse la suivre sur un domaine de 20 km^2 et qu'elle soit constituée de titano-magnétite triée et meuble rend ce gisement très attractif.

5.2.3 Les diamants alluviaux

Les premiers diamants découverts en Afrique du Sud se trouvaient dans des graviers de l'Orange River et de ses affluents. Remonter à la source de ces rivières, a permis de trouver d'abord la première source primaire de diamants dans les kimberlites autour desquelles la ville de Kimberley a été construite au centre de l'Afrique du Sud, puis les énormes plages de placers de la côte ouest du continent en Afrique du Sud et en Namibie (figure 5.3).

Les gisements de placers sont la source d'environ 34 % de la production globale de diamants. Les plus grands gisements sont, de loin, ceux le long des côtes occidentales d'Afrique du Sud, du Cap jusqu'au Congo, mais au cours de l'histoire des placers à diamants ont également été exploités en Inde, et de nombreux gisements sont également exploités en Russie et au Brésil. Les gisements de placers contiennent normalement une grande proportion de diamants de haute qualité (jusqu'à 97 % de cristaux de qualité) parce que les gros cristaux sans défaut résistent mieux au transport sédimentaire que les cristaux plus petits avec des défauts (figure 5.4).

L'exploitation des gisements alluviaux de diamants de l'Orange River et de ses affluents (figure 5.3) se fait à plusieurs échelles, depuis l'échelle artisanale, jusqu'à des exploitations commerciales de taille moyenne. La récupération des diamants qui sont présents sous plusieurs centaines de mètres d'eau dans les graviers au large, nécessite un équipement lourd présenté dans la figure 5.5.

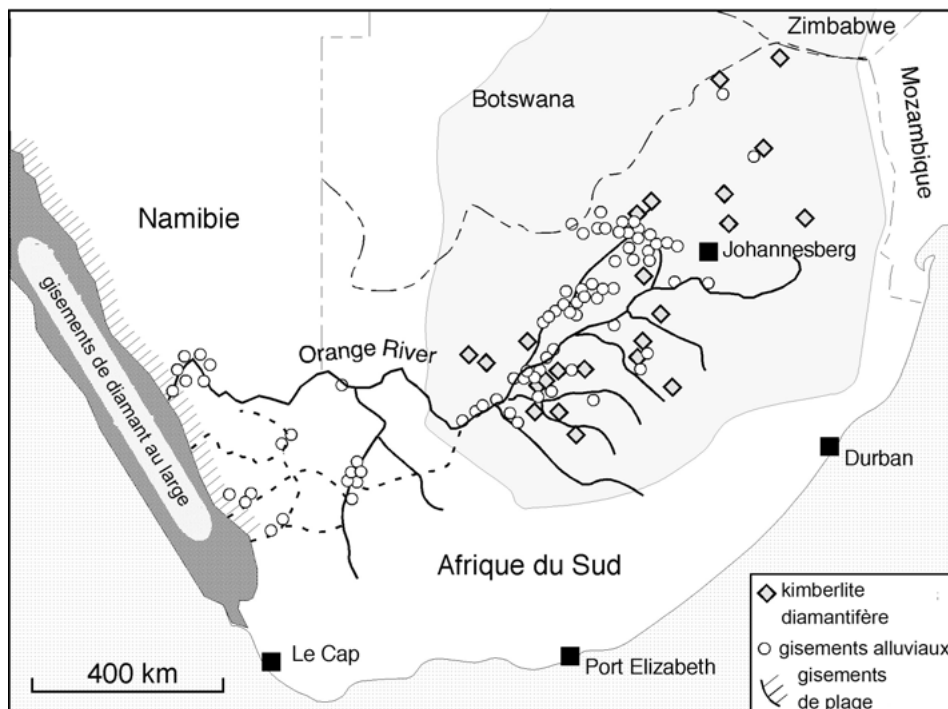


Figure 5.3 – Localisation des trois catégories différentes de gisements de diamants en Afrique du Sud.

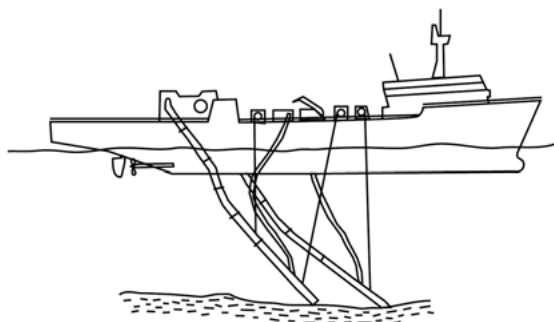
Les diamants primaires kimberlitiques, les gisements alluviaux dans les lits des rivières actuelles et anciennes, et les gisements alluviaux dans des graviers au large.

D'après Lynn *et al.*, 1998.



Figure 5.4 – Photographies de diamants alluviaux.

Source : <http://www.diamondfields.com>.



Système de remontée par air comprimé. De l'air comprimé est pompé dans des tuyaux sur le plancher du navire et est utilisé pour produire une dépression qui aspire les sédiments à bord, où l'on peut en extraire les diamants.

Figure 5.5 – Techniques d'extraction des diamants dans les gisements au large.

5.2.4 Les autres placers : étain, platine, thorium-uranium

La principale source d'étain est la cassitérite (SnO_2) un minéral magmatique, qui cristallise dans un type particulier de granite. Ces granites, appelés « granites à étain » ont une répartition spatio-temporelle très limitée ; ils sont très rares au Précambrien et deviennent beaucoup plus abondants dans les périodes plus récentes. Les meilleurs exemples sont dans la péninsule Malaisienne, et permettent à la Malaisie d'occuper la place de premier producteur de cassitérite. Environ la moitié de ces gisements sont dans des granites eux-mêmes, et l'autre moitié est dans des placers dans des rivières, des plages de sable et des dépôts au large. Les éléments du groupe du platine connaissent à peu près la même histoire. Les sources primaires sont les roches ultramafiques comme celles du complexe du Bushveld (chapitre 3) mais dans certaines régions, des pépites d'alliages de PGE libérées par l'altération et l'érosion des roches ultramafiques ont produit des placers économiquement viables. Dans quelques cas les sources sont des gisements eux-mêmes comme dans les complexes ultramafiques de Sibérie ; dans d'autres cas, des ophiolites sans concentration en minéral de valeur ont abouti à la formation de minéraux d'intérêt, comme en Nouvelle-Calédonie.

On trouve du thorium et de l'uranium dans les gisements du Witwatersrand qui, comme nous l'avons évoqué précédemment, pourraient être d'origine alluviale, et dans les monazites des plages de sables.

5.3 LES GISEMENTS DE FER SÉDIMENTAIRES

5.3.1 Introduction

Bien que la production globale de quelques substances utiles pourrait avoir passé un maximum et connaître un déclin dès à présent ou dans un futur proche – le pétrole et son « peak-oil » étant un exemple – ce n'est pas le cas pour le fer. En 2006, la consommation de minéral de fer était d'environ 1 400 Mt et même si l'on prend en compte la hausse majeure de la demande entraînée par la croissance de la Chine et

des autres pays émergents, il est peu probable que la consommation annuelle dépasse à moyen terme les 2 000 Mt/an (la proportion de fer recyclé, actuellement de 8 à 10 %, est amenée à augmenter). Les réserves globales de minerai de fer (gisements dont l'existence a été prouvée par forage) sont estimées à 800 000 Mt et les ressources globales (dont l'existence est supposée) vaudraient plus du double de cette immense valeur. En divisant les réserves ou les ressources par le taux global de consommation annuelle, on trouve le temps nécessaire pour épuiser les réserves, c'est-à-dire entre 400 et 1 000 ans, selon les chiffres utilisés. Combien de fer sera nécessaire à l'humanité et quels seront les procédés d'extraction et de purification inventés au début du prochain millénaire ?

Par contre, comme pour les autres substances utiles, les gisements de fer ne sont pas distribués équitablement sur la surface du globe. La Chine, plus gros producteur mondial, a extrait plus de 260 Mt de minerai de fer à partir de ses vastes ressources en 2007, mais c'est également le plus grand consommateur, notamment avec sa demande croissante d'acier pour construire les infrastructures nécessaires à cette société en plein essor d'industrialisation. Actuellement, la Chine importe 500 Mt de minerai chaque année, principalement d'Australie et du Brésil. L'Inde arrive dans une phase de ré-industrialisation, comme la Chine, mais de nombreux géologues et politiciens pensent que les réserves en minerai de fer sont relativement limitées dans ce pays. La question qui se pose est donc celle de la gestion des ressources minières et c'est l'objet de l'exercice suivant.



5.2 Exportation contre conservation des ressources minières. Politiques et conséquences en Australie et en Inde

Au cours de l'été 2009, (alors que nous écrivons ce livre), le gouvernement indien a pensé sérieusement à arrêter l'exportation de minerai de fer. L'argument était que les gisements connus dans le pays sont assez rares et modestes et doivent être conservés pour la consommation domestique des générations futures.

En Australie dans les années 1950, on pensait que les réserves de minerai de fer du pays étaient très limitées et insuffisantes à elles seules pour l'usage domestique du pays. L'exportation a été interdite ; les compagnies minières n'ont plus eu d'intérêt à lancer des programmes d'exploration pour trouver de nouveaux gisements et aucune nouvelle réserve n'a été mise à jour. La situation a persisté pendant une décennie. Le 15 novembre 1952, Lang Hancock, un prospecteur et éleveur de bétail, survola les Hamersley Ranges dans la brousse du Pilbara. Les mauvaises conditions météorologiques l'obligèrent à voler à basse altitude et ce faisant, il se demanda si les grandes bandes de roches rouges qu'il observait pouvaient être du minerai de fer. Un an plus tard, il retourna sur place et confirma qu'il s'agissait d'affleurements en surface d'un immense gisement de fer, une découverte qui entraîna la fondation des mines de fer de Pilbara. L'Australie est maintenant connue pour avoir d'énormes réserves de fer et pour être le principal exportateur mondial de ce minerai. D'où la question qui paraît légitime : comment un gouvernement doit-il gérer les ressources minières de son pays ? Doit-il garder les ressources connues pour les générations futures en limitant les explorations et en interdisant les exportations, ou doit-il laisser libres les lois du marché et encourager l'exploration dans l'espoir de trouver de nouveaux gisements ?

5.3.2 Catégories et caractéristiques des gisements de fer

La combinaison de deux processus produit les minerais de fer les plus riches. Des minéraux riches en fer précipitent à partir de l'eau de mer et forment un sédiment chimique dont la teneur augmente dans un second temps par altération chimique lors de l'affleurement du gisement en surface. (Ce dernier processus, appelé enrichissement supergène, sera décrit dans la suite du chapitre.)

Il existe plusieurs catégories de gisements de fer, comme le présente le tableau 5.4. La catégorie connue comme « ironstone », « minette » ou « minerai de type Lorraine », a été exploitée à travers l'Europe depuis le début de l'âge de fer environ 800 ans avant Jésus-Christ. L'extraction du minerai de fer dans le bassin de Lorraine et des gisements de charbon environnants (nécessaires pour fondre le minerai de fer) dans le nord de la France, en Belgique, et en Grande-Bretagne a nourri la révolution industrielle. N'oublions pas que l'intérêt allemand pour les ressources de Lorraine fut l'une des causes de la première guerre mondiale.

Tableau 5.4 – Types de gisements de fer sédimentaire.

(1) Les formations de fer rubané		
C'est la principale source de fer. Le minerai est une roche sédimentaire composée de sédiments lités contenant de fines lamines et un rubanement de bandes de silice ou d'argile en alternance avec des bandes de minéraux ferrugineux		
<i>Types</i>		
	Algoman	Gisements d'âge archéen, dans les roches métavolcaniques et méta-sédimentaires ; l'origine du fer est probablement volcanique exhalative.
	Supérieur	Âge Protérozoïque inférieur, sur les plateformes continentales stables ; dépôt de Fe dans les eaux océaniques au moment où la concentration en oxygène augmente dans l'atmosphère et dans les océans.
	Rapitan	Gisements néoproterozoïques associés à des sédiments d'origine glaciaire.
<i>Faciès</i>		
	Oxydes	Le type le plus important – le minéral ferrugineux est l'hématite ou la magnétite. Les roches sédimentaires non-modifiées contiennent jusqu'à 30-35% Fe.
	Carbonates	Alternance de bandes de silice et de sidérite (FeCO_3).
	Silicates	Les minéraux ferrugineux sont des silicates comme la greenalite, la chamosite, ou la glauconite.
	Sulfures	Alternance de bandes de pyrite et d'argiles riches en matière organique.
(2) Ironstones (« Minette » ou minerai de type Lorraine)		
(3) Encroutements ferrugineux impurs d'origine biochimique		

Les *ironstones*, ou « minette », ou « petit minerai »

Les *ironstones* de Lorraine, sont connues comme « minette » ou « petit minerai », à cause de leur faible teneur en fer. La concentration est typiquement autour de 30 %, environ 20 à 35 % inférieure à celle du « fer fort », le minerai le plus riche que l'on extrait dans d'autres pays. De plus, le fer est présent dans des minéraux silicatés – il est donc difficile à purifier – et accompagnés par du phosphore, qui complique les processus de purification. Après la découverte des grands gisements au Brésil et en Australie, l'exploitation des minerais européens n'a plus été compétitive et les mines de Lorraine ont fermé les unes après les autres, jusqu'aux dernières dans les années 1990.

Les *ironstones* disposées en lits lenticulaires sont souvent associées à des argiles noires riches en matière organique. Elles contiennent peu ou pas de silex et le fer y est présent dans des minéraux comme l'hématite (Fe_2O_3), la goethite (FeOOH), associés avec des carbonates (sidérite de composition FeCO_3) et des silicates comme la greenalite (une serpentine ou argile de composition $(\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+})_{2-3}\text{Si}_2\text{O}_5\text{OH}_4$), la chamosite (un phyllosilicate de composition $(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg}, \text{Fe}^{3+})\text{Al}(\text{Si Al})\text{O}(\text{OH}, \text{O})$), ou la glauconie $((\text{K}, \text{Na})(\text{Fe}, \text{Al}, \text{Mg})(\text{Si}, \text{Al})(\text{O}, \text{OH}))$). Les oxydes et la chamosite sont souvent oolithiques. Ailleurs qu'en Europe, les *ironstones* sont connues et exploitées au centre des États-Unis où elles sont appelées minerai de type Clinton. Elles se sont déposées à deux périodes bien définies : à l'Ordovicien-Silurien et au Jurassique.

On pense que les *ironstones* se forment lorsque le fer des continents est soumis à une altération profonde dans un climat chaud et humide, conditions permettant le développement de latérites. L'enrichissement en fer initial et la croissance de petites structures circulaires, les pisolites, ont lieu dans une couche de surface fortement oxydée, par des processus chimiques et biologiques de basse température. Les sols latéritiques sont transportés dans des eaux peu profondes des deltas ou estuaires là où les courants et l'action des vagues ont trié et concentré les minéraux ferrugineux.

Les fers rubanés

Les fers rubanés, ou *Banded Iron Formations* (BIF) représentent les types de gisements de fer dominants. Ce terme regroupe les roches sédimentaires chimiques comprenant une alternance de couches de minéraux ferrugineux, habituellement des oxydes ou hydroxydes de fer, et des couches de quartz à grains fins ou de silex (figure 5.6). Le rubanement se manifeste à différentes échelles : des lits centimétriques de minéraux ferrugineux et de silex sont eux-mêmes divisés en lamines millimétriques ou sub-millimétriques de ces mêmes minéraux. Les composants détritiques comme les argiles ou les grains de quartz et feldspaths, sont rares. Dans les formations majeures de fer rubané du Hamersley Basin, la continuité du litage est considérable : une simple couche de 2,5 cm a été suivie sur une superficie de 50 000 km² et les varves d'échelle microscopique sont continues sur 300 km.

Les fers rubanés se sont déposés à trois différentes périodes de l'histoire de la Terre, toutes pendant le Précambrien. La période la plus ancienne est comprise entre

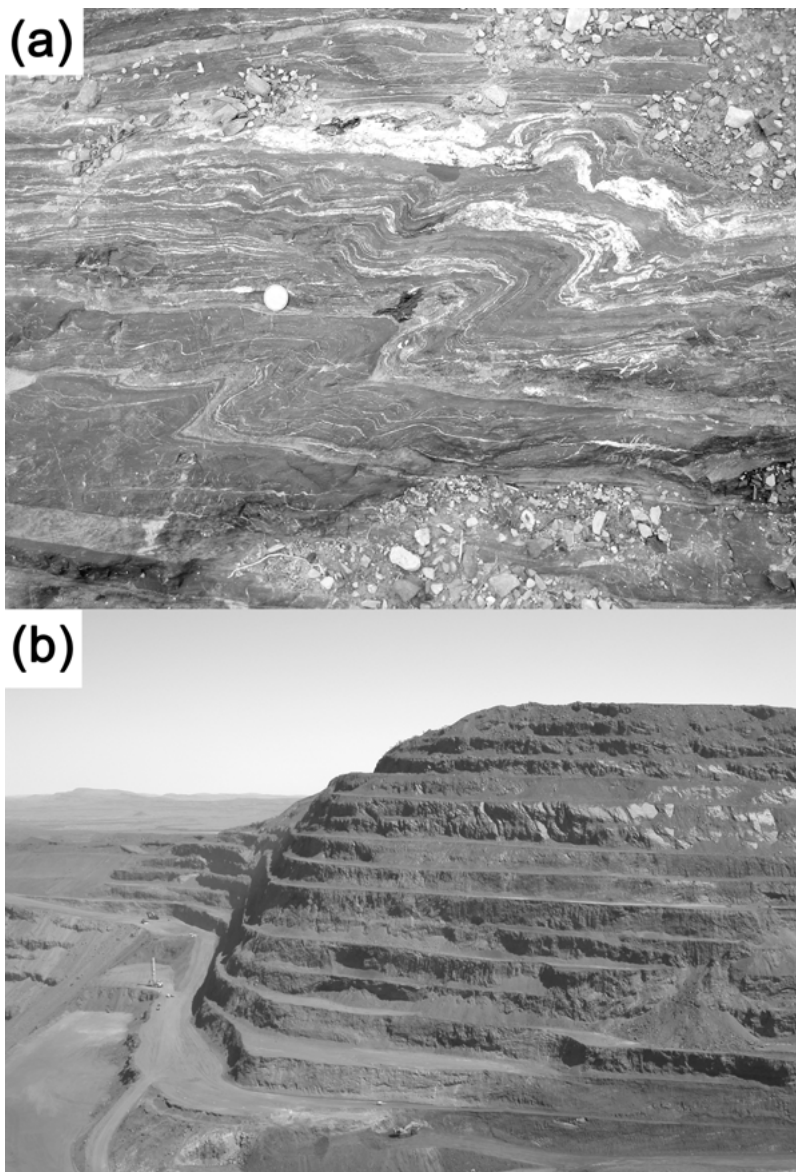


Figure 5.6 – Photographies de fers rubanés.

- a)** Détail d'une formation dans la mine de fer Tom Price dans le Pilbara (Australie).
b) Vue générale de la mine.

D'après K. Konhauser.

3,5 et 2,7 Ga, la seconde, beaucoup plus importante entre 2,5 et 2,0 Ga et la troisième, moins significative, entre 1,0 et 0,5 Ga. Les contextes tectoniques de dépôt et les types de roches associées sont différents dans chaque cas. Les gisements furent appelés respectivement Algoman, Supérieur et Rapitan.

Les gisements de type Algoman sont relativement petits et localisés dans les ceintures de roches vertes archéennes, où ils sont associés à des roches volcaniques. Les gisements de type supérieur doivent leur nom au lac Supérieur, entre les États-Unis et le Canada, où ils ont été pour la première fois exploités et étudiés. Les gisements nord américains ont par la suite rapidement été éclipsés par les gisements beaucoup plus importants du Hamersley Basin dans l'ouest australien, du bassin de Transvaal en Afrique du Sud, du « Quadrilatero Ferrifero » au Brésil, de Krivoy Rog en Ukraine et de la région Singhbhum en Inde. Enfin, les gisements de type Rapitan, qui doivent leur nom à une localité des McKenzie Mountains au nord-ouest du Canada, sont une catégorie assez mineure de gisements associés avec des dépôts glaciaires néo-protérozoïques.

Une classification parallèle des fers rubanés repose sur la minéralogie des phases contenant le fer. Les oxydes (hématite ou magnétite) sont les phases dominantes dans la plupart des formations de fers rubanés, mais dans certaines formations les carbonates, les silicates ou les sulfates prédominent. Les différents types de minéraux contenant du fer, dont les compositions sont données dans le tableau 5.4, sont stables sous des conditions différentes de pH et Eh, depuis des environnements relativement oxydants à des environnements hautement réducteurs. Cette différence permet de penser qu'ils se sont déposés dans des paléo-environnements très différents. Comme le montre la figure 5.7, les oxydes sont stables dans les solutions acides, l'hématite à

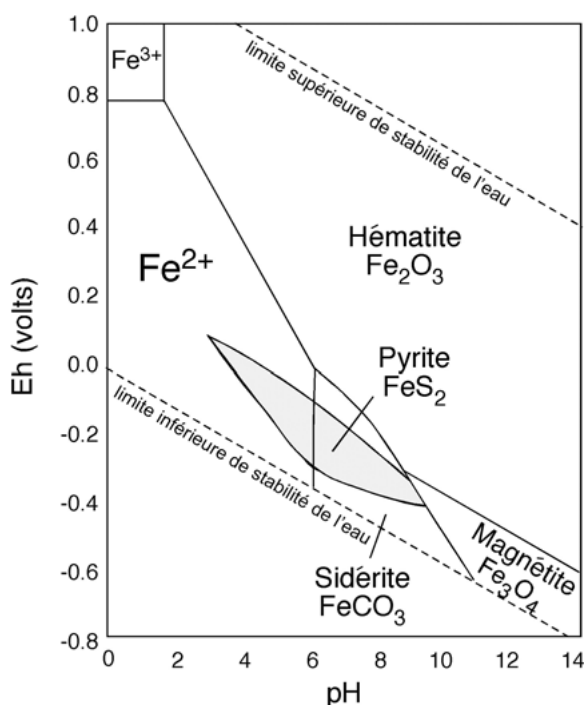


Figure 5.7 – Diagramme Eh-pH montrant les champs de stabilité des minéraux de fer.

D'après Garrels et Christ, 1965.

haut Eh et la magnétite à bas Eh ; et la pyrite et la sidérite sont stables dans des solutions presque neutres de bas Eh (mais ces champs de stabilité peuvent être étendus lorsque les activités des carbonates et des sulfures augmentent). Dans les solutions basiques, le fer ferreux est soluble dans une grande gamme d'Eh, mais ce champ est plus grand sous des conditions réductrices. On observe qu'une augmentation de l'Eh (oxydation), favorise l'hématite vis-à-vis du Fe^{2+} , et ce processus est la clé de la formation des fers rubanés.

L'étroite restriction de ce type de gisement à la période 2,5-2,0 Ga et l'énorme quantité de Fe contenue dans ces gisements, sont souvent présentées comme preuves d'un changement marqué de la composition de l'atmosphère et de l'océan à cette époque. L'atmosphère archéenne avant 2,7 Ga était composée d'un mélange d'azote, de dioxyde de carbone et de méthane et elle était dépourvue d'oxygène et réductrice, semblable à l'atmosphère actuelle de Jupiter. Les océans archéens étaient plus chauds, plus acides, et contenaient beaucoup de Si et Fe dissous. Pendant le Protérozoïque inférieur, la teneur en oxygène de l'atmosphère et des océans a augmenté parallèlement à – ou à cause de – l'apparition d'abondantes cyanobactéries. Ce changement a conduit à la précipitation des oxydes de Fe et Si. La figure 5.8 montre en détail comment le processus a dû fonctionner lors de la précipitation chimique ou biochimique en eau peu profonde sur les plateaux continentaux ou dans les bassins intra-océaniques souvent évaporitiques. Dans ce modèle le fer est supposé provenir d'une source hydrothermale, impliquant une source volcanique exhalative, mais dans d'autres modèles, le fer provient de l'altération de croûte continentale ou océanique. Quel que soit le modèle choisi, on estime que les minéraux riches en fer et la silice précipitent lorsque les eaux de mer profondes riches en fer réduit se mélangent avec les eaux de mer de surface oxydantes. Les différents types de minéraux riches en fer seraient liés aux différences de profondeurs et de conditions de dépôt. Des arrivées fluctuantes de fluides oxydants expliqueraient le rubanement à échelle centimétrique. Certains géologues ont cependant proposé un processus alternatif : les laminations submillimétriques refléteraient un cycle journalier de réchauffement, évaporation et oxygénation des eaux pendant le jour et d'activité plus limitée pendant la nuit. En d'autres termes, l'épaisseur des lamines pourrait refléter la durée du jour il y a plus de deux milliards d'années !

Les gisements de fer de type Algoman tirent probablement leur origine d'un mélange plus local de fluides oxydés et réduits dans des petits bassins aux bordures des continents archéens. Une association avec des faciès carbonatés et sulfatés suggère que les sources de fer étaient des fluides hydrothermaux exhalatifs émanant de la croûte océanique. Les gisements de type Rapitan pourraient être liés aux processus ultérieurs aux périodes de Terre boule-de-neige (« *Snowball Earth* » en anglais). Ce terme est employé pour les événements du Protérozoïque durant lesquels la planète entière était recouverte de glace, à la fois sur les océans et les continents. Isolée de l'atmosphère par une banquise épaisse, l'eau de mer devenait réductrice, comme pendant l'archéen, et était capable de dissoudre le fer ferreux. Pendant les périodes interglaciaires, l'eau de mer réduite se mélangeait avec les eaux de surface oxydées, entraînant le dépôt de formations riches en fer ferreux moins soluble.

5.4 • Les autres gisements sédimentaires : Mn, phosphates, nitrates, sels, soufre

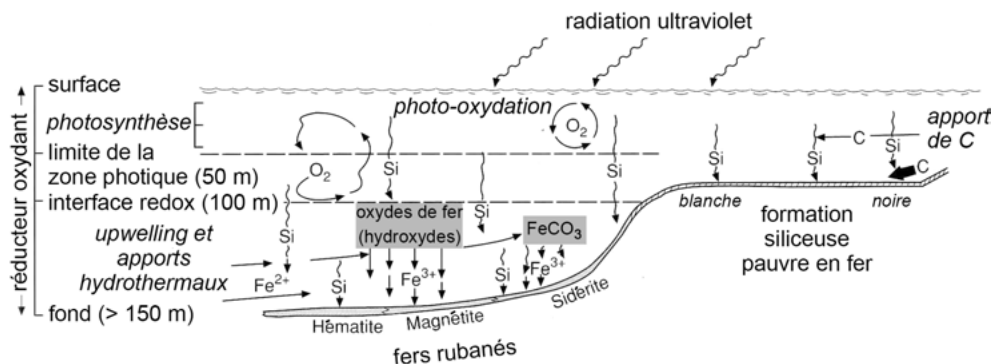


Figure 5.8 – Modèle génétique des formations de fer.

D'après Klein et Beukes, 1993.

Les formations de fer primaires contiennent 20 à 30 % de Fe alors que les minerais exploités dans la plupart des pays en contiennent 55 à 65 % de Fe. Cette différence est liée à un processus d'enrichissement qui agit sur les formations de fer après qu'elles aient été accrétées aux continents et exposées à la surface. Pendant ce processus, la silice est lessivée ou remplacée par de la goethite et la magnétite est oxydée en hématite, probablement lors de l'exposition de la formation de fer à un climat chaud et humide. Dans la province Hamersley dans le Pilbara (dans l'Australie occidentale) par exemple, trois types principaux de processus ont été identifiés : (1) l'enrichissement supergène, ou l'augmentation *in situ* du contenu en fer dans les couches de fer rubané à proximité de la surface ; (2) la dissolution du fer des BIF et sa re-précipitation sous forme d'oxydes de fer dans des chenaux de rivières essentiellement tertiaire ; (3) l'érosion, transport et re-sédimentation dans des gisements secondaires de matériaux détritiques.

5.4 LES AUTRES GISEMENTS SÉDIMENTAIRES : Mn, PHOSPHATES, NITRATES, SELS, SOUFRE

Les gisements lités de Mn sont formés par un processus très similaire aux formations de fer. Les minéraux d'intérêt, la pyrolusite, un oxyde (MnO_2) ou la rhodochrosite, un carbonate (MnCO_3) précipitent depuis l'eau de mer et forment des roches sédimentaires stratifiées. Les paramètres qui contrôlent la solubilité du manganèse sont comparables à ceux qui contrôlent la solubilité du fer : le métal est soluble dans les fluides acides et réducteurs, et sa précipitation est provoquée par une augmentation de l'alcalinité ou par oxydation. Les gisements de manganèse sont souvent associés aux gisements de fer et dans de nombreux cas, on pense que la précipitation initiale de fer a laissé une eau enrichie en Mn qui a précipité par la suite alors que le degré d'oxydation augmentait. Ce processus est observé dans la mer Noire, où des boues

riches en pyrite précipitent dans les eaux profondes fortement réductrices (euxiniques) tandis que des oxydes de Mn précipitent dans les eaux de surface plus oxydantes.

Les gisements de Mn se sont formés à toutes les périodes. Les plus grands gisements sont les corps minéralisés Protérozoïques du Kalahari en Afrique du Sud, les gisements du Crétacé de Groote Eylandt en Australie et les gisements de rhodochrosite de la région de Molango au Mexique.

Les phosphates sédimentaires, qui sont extraits pour servir d'engrais (source de P), se forment sur les plateaux continentaux à faible profondeur par précipitation directe depuis l'eau de mer ou par remplacement de calcaire. Les processus biologiques sont des paramètres importants qui contrôlent la concentration du phosphore dissous dans l'eau de mer et sa précipitation.

L'évaporation de saumures dans les lagunes ou dans les lacs produit des précipités chimiques de halite (NaCl) utilisée comme sel de cuisine ou pour déneiger les routes, de sylbite (KCl) source de potassium dans les engrais, de gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) utilisé pour la formation de matériaux de construction dont le plâtre et d'anhydrite (CaSO_4) utilisé dans les ciments.

Les nitrates de Na et K ont une quantité considérable d'utilisations : comme engrais (source de K essentiellement), comme carburant solide des fusées, comme anti-rouille mais ils sont également utilisés dans les poudres à canon, dans la conservation des aliments, dans les émaux des poteries et dans les verres, dans les manufactures à tabac pour maintenir la combustion du tabac, ou encore dans les dentifrices pour les dents sensibles. Les plus grands gisements naturels de nitrate de sodium sont dans le désert d'Atacama au Chili, l'une des régions les plus arides de la planète dont le ciel de nébulosité extrêmement faible, lui permet d'accueillir des observatoires astronomiques parmi les plus performants. Pendant plus d'un siècle, l'exploitation du nitrate de sodium a procuré des revenus importants au Chili, jusqu'aux années 1940 lorsque le chimiste allemand Fritz Haber a développé un procédé permettant de produire l'ammoniac à partir de l'azote atmosphérique.

Contrairement à ce que peuvent faire penser les images célèbres des ouvriers des mines de soufre natif du volcan Kawa Ijen en Indonésie, l'essentiel du soufre que nous utilisons ne provient pas de gisements magmatiques mais de gisements sédimentaires et biologiques. Du soufre natif se forme dans les environnements sédimentaires suivant plusieurs processus : dans les milieux lagunaires, dans les vases anoxiques, des bactéries développent une photosynthèse anaérobie selon une réaction du type : $6\text{CO}_2 + 12\text{H}_2\text{S} = \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{H}_2\text{O} + 12\text{S}$. Dans un autre contexte, les sulfates sédimentaires (par exemple de l'anhydrite) peuvent réagir avec la matière organique contenue dans les sédiments, et produire du soufre natif selon une réaction du type : $2\text{CaSO}_4 + 3\text{C} = 2\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + 2\text{S}$. Si les gisements de soufre natif ont eu une importance économique historique, actuellement les principaux producteurs de soufre sont les sociétés exploitant le gaz naturel et de pétrole qui récupèrent le soufre des hydrocarbures lors de leur purification.

5.5 LES LATÉRITES

Les latérites sont les sols qui se développent lors de l'altération prolongée et intense des roches sous des climats chauds et humides. La plupart des latérites n'ont pas de valeur économique, mais lorsqu'elles sont formées à partir de granites ou de marnes riches en argiles, elles contiennent de la bauxite, minerai d'aluminium, et lorsqu'elles sont formées à partir de roches ultramafiques, elles peuvent produire des gisements latéritiques de nickel.

5.5.1 La bauxite

Le tableau 5.5 présente une liste des plus grands producteurs d'aluminium métal au monde. Cette liste comprend les grands pays industrialisés comme la Chine ou les États-Unis, et quelques pays avec de grandes réserves de bauxite comme l'Australie ou le Brésil. Curieusement, cette liste comprend également des petits pays sans bauxite du tout. L'Islande par exemple, est une île volcanique de petite superficie, faiblement peuplée, au milieu du très froid océan Atlantique Nord. Que fait ce pays dans cette liste ?

Tableau 5.5 – Liste des pays producteurs d'aluminium.

	Pays	Production (tonnes)
1	République populaire de Chine	5 896 000
2	Russie	4 102 000
3	États-Unis	3 493 000
4	Canada	3 117 000
5	Australie	1 945 000
6	Brésil	1 674 000
7	Norvège	1 384 000
8	Inde	1 183 000
9	Bahreïn	872 000
10	Émirats arabes unis	861 000
11	Afrique du Sud	855 000
12	Islande	721 000

La raison est simple : extraire l'aluminium métal des oxydes et hydroxydes qui composent le minerai nécessite beaucoup d'électricité, une ressource que l'Islande produit en excès. Donc la bauxite, ou son produit traité, l'alumine (Al_2O_3), sont transportées à travers la moitié du globe depuis l'Australie vers l'Islande pour y être transformées en aluminium métal qui sera de nouveau transporté à travers le monde pour être vendu aux marchés européens et américains. Est-ce que ces transferts ont un sens économique et qu'en est-il de l'impact sur l'environnement ?

En Islande, le prix de l'électricité est environ 1,4 cents/kWh (à titre de comparaison, les tarifs pour les particuliers en France sont environ de 6 à 14 cents/kWh selon les heures et les abonnements choisis). En Australie, l'électricité est également assez bon marché, de 2,1 à 2,8 cents/kWh, guère plus chère qu'en Islande, mais les coûts d'expédition de l'alumine depuis l'Australie vers l'Islande ne sont pas énormes, et dans l'ensemble produire l'aluminium en Islande est plus rentable malgré le long trajet. Un second avantage réel concerne l'impact environnemental : en Islande, l'électricité est produite par des centrales hydrauliques ou géothermiques, qui ne relâchent presque pas de CO₂ dans l'atmosphère alors qu'en Australie, 76 % de l'électricité est produite à partir de charbon, le pire producteur de gaz à effet de serre. Comme lorsque l'on se demande s'il est plus judicieux de consommer des tomates ayant poussé sous des serres chauffées en Bretagne ou importées depuis l'autre côté de la Méditerranée où le soleil a suffi à leur croissance, les véritables conséquences écologiques ne sont pas forcément évidentes.

Exercice 5.3 – Bilan carbone approximatif de la production d'aluminium en Islande à partir de minerai de bauxite australien

On estime que les transports de marchandises produisent 25 grammes de CO₂ par tonne et par kilomètre parcouru. Ceci n'est qu'une estimation et ne prend pas en compte le bilan carbone de la construction, de l'entretien et du démantèlement des navires, mais ces chiffres donnent une idée approximative du bilan carbone d'un navire en fonctionnement. La production d'électricité à partir du charbon produit quant à elle environ 1 tonne de CO₂ par kWh alors que la production d'électricité à partir de centrales hydrauliques ou thermiques ne produit quasiment pas de CO₂. Pour produire une tonne d'aluminium 300 kWh et 4 tonnes de bauxite sont nécessaires. Si l'on estime qu'il y a 40 000 km à parcourir pour un aller-retour Australie-Islande par la mer, du point de vue du bilan carbone est-il plus intéressant de produire l'aluminium sur place (en utilisant de l'électricité produite à partir de charbon), ou d'exporter la bauxite et d'importer l'aluminium produit en Islande (grâce à de l'énergie électrique produite sans émission de CO₂). Vous jugerez le bien fondé de la production l'aluminium en Islande en fonction de son bilan carbone (attention aux unités dans vos calculs !), et en vous rappelant de son avantage économique (faible coût de l'électricité et ouverture facilitée sur les marchés européen et américain).

ÉLÉMENTS DE SOLUTION. Produire une tonne d'aluminium en Australie ne nécessite pas de transport de matière première, mais nécessite 300 kWh produits à partir de charbon. Le bilan carbone de cette production est donc : Bilan carbone total = Bilan carbone du transport + Bilan carbone de la purification d'aluminium = 0 + 300 × 1000 = 300 tonnes de CO₂. Produire une tonne d'aluminium en Islande nécessite le transport de matière première, mais la transformation du minerai en métal ne produit quasiment pas de CO₂. Le bilan carbone de cette production est donc : Bilan carbone total = Bilan carbone du transport + Bilan

carbone de la purification d'aluminium = $40\,000 \times 25 \times 4 + 0 = 4,0 \times 10^6$ grammes = 4 tonnes de CO_2 . Dans ce calcul d'ordre de grandeur, il apparaît qu'il est préférable, du point de vue de l'émission de CO_2 – gaz à effet de serre – que l'Australie expédie son minerai brut à travers la planète entière puis qu'elle importe l'aluminium purifié grâce à des énergies propres, plutôt qu'elle purifie elle-même son minerai grâce à de l'énergie produite par combustion de charbon.

Comme pour le fer, il y a peu de chance que nous n'épuisions jamais nos réserves d'aluminium. Les réserves de bauxite sont énormes, environ 25 milliards de tonnes, suffisamment pour au moins 300 ans, même en prenant en compte une demande en forte croissance. Et même si les réserves de bauxite étaient totalement épuisées, des quantités encore supérieures d'aluminium sont présentes dans les argiles et les feldspaths dont l'abondance est tellement importante qu'on peut la considérer inestimable. De nos jours, de l'aluminium est déjà produit en Russie à partir de feldspaths d'intrusions alcalines.

Les gisements mondiaux de bauxite se situent principalement dans les régions équatoriales sous des climats équatoriaux et tropicaux ; en Guinée, en Australie, au Brésil et en Jamaïque. Les gisements les plus grands et les plus riches se forment sur les pénéplaines continentales, sujettes à de longues périodes humides et sèches en alternance (conditions qui entraînent une oscillation de la profondeur des nappes phréatiques). Lorsque le niveau des eaux souterraines augmente et diminue, les composants les plus solubles sont lessivés et un sol latéritique qui retient les composants insolubles se forme. Dans certaines régions d'Afrique, d'Amérique centrale et du Sud, et de l'Australie, la latérisation sur des surfaces pénéplainées a perduré pendant plus de 100 millions d'années, formant une couverture latéritique dont l'épaisseur atteint 150 mètres.

La majorité des éléments majeurs qui composent les roches – Si, Fe, Mg, Ca, Na et K – sont modérément à très solubles dans les eaux presque neutres (pH 5 à 9) des horizons d'altération latéritiques. Les oxydes de ses éléments composent environ 80 % des roches feldspathiques comme le granite, le gneiss ou les argiles et s'ils étaient totalement lessivés, la concentration d' Al_2O_3 serait multipliée par 4 et passerait d'environ 15 % (teneur dans les roches sources) à près de 60 %, teneur dans le minerai d'aluminium. Les meilleures bauxites sont des mélanges d'hydroxyde d'aluminium – la gibbsite ($\text{Al}(\text{OH})_3$) – et de deux polymorphes de composition $\text{AlO}(\text{OH})$ – la boehmite et le diaspre. En pratique, le lessivage des composants solubles n'est pas complet ; la plupart sont retenus dans les roches partiellement altérées et les autres cumulats, souvent dans des minéraux secondaires, à différents niveaux du sol latéritique.

La figure 5.9 présente les profils de deux gisements dans des latérites, l'un de bauxite et l'autre de Ni. La zone saprolite, à la base du profil consiste en des roches altérées qui préservent l'essentiel des textures et structures originelles. Les feldspaths et les minéraux ferromagnésiens sont altérés et les composants solubles sont en partie évacués alors que du silicium et de l'aluminium sont retenus dans les argiles et que du fer est retenu dans la goethite et l'hématite. Dans la partie supérieure du saprolite

et dans la latérite à l'exception des minéraux les plus résistants, l'essentiel des minéraux a été détruit et la roche consiste essentiellement en des argiles, des oxydes et hydroxydes de Fe et Al, même si elle contient une abondance mineure de quartz résiduel. La texture originelle a totalement disparu et la roche a une structure pisolitique ou nodulaire qui résulte des épisodes répétés de dissolution et accrétion. La partie supérieure de la latérite consiste en des graviers riches en oxydes de fer et en une cuirasse indurée, qui peuvent être non consolidés ou cimentés.

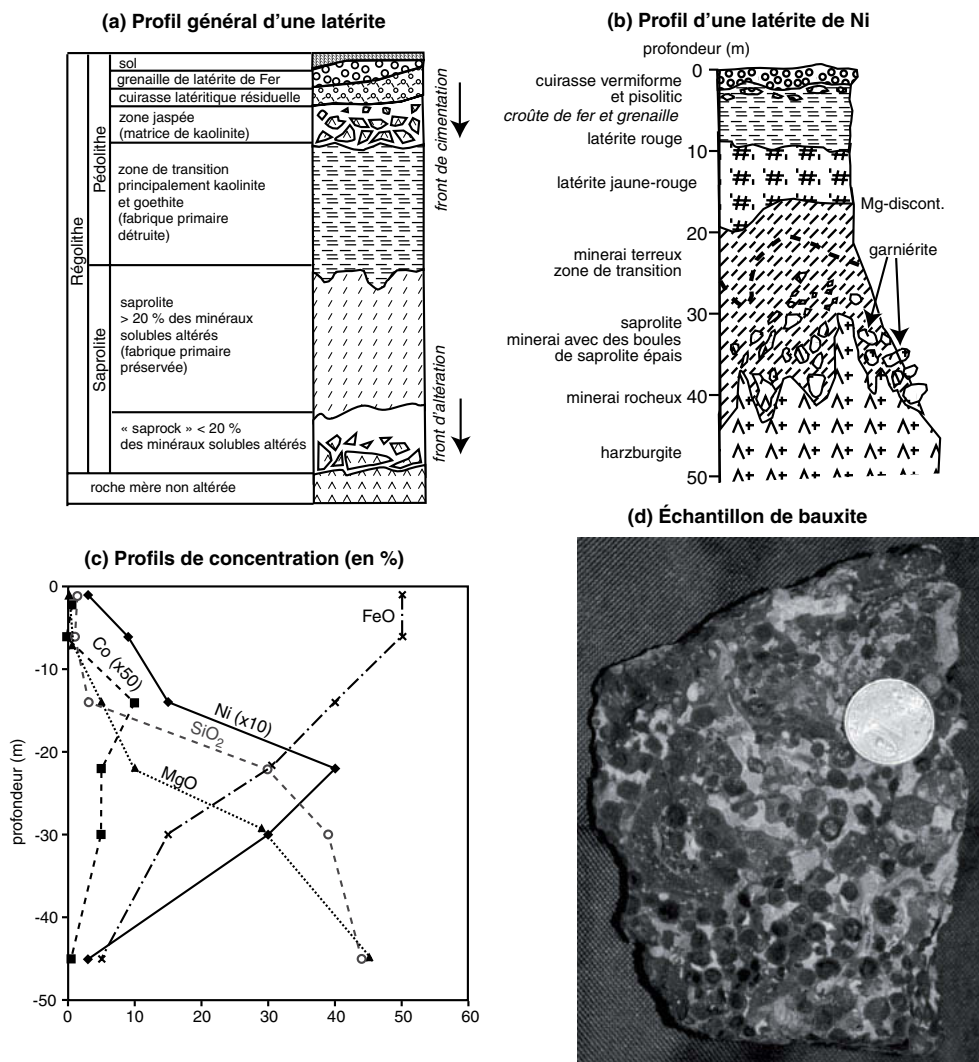


Figure 5.9

(a) Profils de latérites à bauxite (D'après Butt *et al.*, 2000). (b) Nickel (D'après Freyssinet *et al.*, 2005). (c) Profil de composition chimique dans une latérite (D'après les données de Freyssinet *et al.*, 2005). (d) Bauxite pisolitique.

La plupart des latérites des régions équatoriales sont riches en fer ce qui les rend difficile à traiter pour extraire l'aluminium. Les bauxites les plus pures sont formées par une série de processus ; (1) la présence de roches mères riches en Al (et pauvres en Fe) comme des syénites, des granites alcalins ou des tuffs avec des compositions identiques, des sédiments riches en argiles ou des équivalents métamorphiques ; (2) des précipitations et une température appropriées (des températures trop hautes favorisent la formation de latérites riches en fer) ; et (3) un contraste prononcé entre la saison sèche et la saison des pluies.



ENCART 5.3 L'aluminium en France

La France a une très forte tradition dans le développement de l'industrie de l'aluminium et au milieu du siècle dernier, elle était l'un des plus gros producteurs à la fois de bauxite et d'aluminium. Cet encart présente quelques dates importantes dans l'histoire de l'exploitation de l'aluminium :

1831 Pierre Berthier (1782-1861), minéralogiste français et ingénieur des mines découvre aux environs des Baux-de-Provence des échantillons de minerai d'aluminium, auquel il donnera le nom de bauxite.

1860 Henri Sainte-Claire Deville (1818-1881), chimiste, a mis au point en 1854 un procédé de réduction du chlorure d'aluminium par le sodium, il commence à produire de l'aluminium.

1886 François Paul Heroult (1863-1914) et l'Américain Charles Hall (1863-1914) mettent au point simultanément et indépendamment le procédé d'électrolyse de l'alumine, toujours utilisé aujourd'hui.

Au ^{xix}^e siècle, l'aluminium était plus cher et plus précieux que l'or, l'argent ou le platine. Lors d'une réception, Napoléon III a servi ses invités prestigieux dans des assiettes en aluminium, beaucoup plus impressionnantes à l'époque que l'or.

Entre 1860 et 1940, la France a été le plus grand producteur de bauxite et d'aluminium, principalement dans les mines du basin Varois. En 1890, Pechiney ouvrit l'une des toutes premières usines d'aluminium près de Salindres (Gard) ; elle produisait alors trois tonnes d'aluminium métal par an. Parmi les premières usines qui utilisaient le procédé d'électrolyse, on compte celles construites en Maurienne (Savoie) et dans le Grésivaudan (Isère) au pied des Alpes, sources d'eau et d'électricité. La dernière mine de bauxite sur le territoire français ferma en 1990.

Les gisements français sont du type bauxite de karst. Ils se trouvent principalement sur les surfaces de karstification des calcaires Jurassique à Crétacé, qui se sont formées au Crétacé supérieur. L'origine de la bauxite est double, elle résulte de l'altération des silicates contenus dans les bancs argileux des calcaires ou de la dissolution des argiles de décalcification, mais peut également avoir été transportée et résulter de l'érosion de terrain de composition granitique.

Source : Association française de l'aluminium.

5.5.2 Les latérites à Ni

La Nouvelle-Calédonie, pays d'outre-mer qui fait partie du territoire français, possède l'un des plus grands gisements de Ni latéritique au monde (~ 33 % des réserves de Ni connues). Ce gisement a été découvert en 1864 par Jules Garnier qui donna son nom au principal minéral du minerai (la garniérite), mélange de phyllosilicates vert pâle à vert pomme de composition approximative $(\text{Ni, Mg})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$. Les gisements ont été exploités de façon continue depuis 1875 et ont vu le développement de procédures novatrices d'extraction du Ni des latérites. Pendant les premières années, le minerai très riche de garniérite contenant jusqu'à 15 % Ni avec en moyenne 2,5 % de Ni a été extrait, mais depuis cette ressource est largement épuisée et l'exploitation se concentre autour des minerais moins riches de goethite contenant 1,3 à 1,6 % Ni. L'histoire longue et complexe du projet d'exploitation d'un nouveau gisement dans la mine de Goro, depuis sa conception en 1993, jusqu'à la production attendue en 2013 est racontée sur le site web : <http://www.valeinco.nc/pages-eng/propos/history.htm>. On pense qu'aujourd'hui les gisements calédoniens contiennent le tiers des ressources mondiales de Ni ; lorsque l'on ajoute les gisements latéritiques d'Indonésie, Cuba, et l'Australie, 50 à 60 % des ressources mondiales de Ni sont latéritiques.

Comme pour la bauxite, l'extraction de Ni métal des silicates et des hydroxydes qui constituent le minerai latéritique nécessite beaucoup d'énergie. Le minerai latéritique comporte beaucoup d'eau absorbée qui doit être extraite, et contient beaucoup de magnésium qui impose aux fonderies conventionnelles de monter à de très hautes températures. De nombreux procédés d'extractions ont été développés en Nouvelle-Calédonie et à Cuba et ont été importés par d'autres pays avec plus ou moins de succès pour traiter leur propre minerai. Comme beaucoup d'énergie est nécessaire pour l'extraction, la viabilité d'une exploitation de Ni latéritique dépend beaucoup du prix de l'énergie, qui dépend lui-même du prix du pétrole ; lorsque le prix du pétrole est bas, les gisements de Ni latéritique deviennent plus compétitifs que les gisements magmatiques. Le tableau 5.6 énumère les avantages et désavantages des deux types de gisements.

Les latérites de Ni se forment lorsque des roches ultramafiques sont exposées à une altération prononcée sous un climat chaud et humide. Dans les plupart des régions où des gisements sont connus – Nouvelle-Calédonie, Cuba, Indonésie, etc. – les roches ultrabasiques appartiennent à la portion inférieure, mantellique, d'ophiolites. Les gisements de l'ouest australien sont une exception : les gisements latéritiques se développent à partir d'intrusions de lignée komatiitique, appartenant aux mêmes séries que les gisements magmatiques.

Le processus de latéritisation est parfaitement comparable au processus de formation des bauxites et les similarités sont visibles dans la comparaison des deux profils d'altération de la figure 5.9. Les latérites de Ni se forment lorsque les minéraux primaires des roches ultramafiques, l'olivine et le pyroxène, ou la serpentine qui remplace ces minéraux, sont soumis à l'altération. Les éléments comme Si, Mg, Ca qui composent 90 % de la roche, sont lessivés et les éléments moins mobiles comme Ni (et Fe) sont retenus. Avec ce processus, la teneur en Ni passe de 0,2-0,3 % dans la

péridotite à 1,3-2,5 % dans le minerai latéritique. Le cobalt est également concentré par l'altération et constitue un sous-produit valorisable. Le riche minerai à garniérine de Nouvelle-Calédonie se forme dans la partie inférieure du saprolite ; le minerai d'oxyde de fer exploité actuellement est dans la partie inférieure de la latérite.

Tableau 5.6 – Avantages et inconvénients des gisements de Ni latéritiques et magmatiques.

	Magmatique	Latéritique
Origine	Ségrégation of sulfures de Ni depuis des magmas mafiques ou ultramafiques	Concentration du Ni dans le sol lors d'une altération longue sous un climat chaud et humide
Minéraux contenant le Ni	Sulfures de Ni-Cu-Fe	Phyllosilicates contenant du Ni
Teneur en Ni du minerai	0,5 à 5%	1 à 7%
Localisation des gisements les plus importants	Canada, Russie, Australie, Chine	Nouvelle-Calédonie, Indonésie, Cuba, Australie
Aspects économiques		
– conditions d'exploitation	Exploitations souterraines (rares mines à ciel ouvert) de gisements discontinus dans des roches dures	Exploitation en carrières et en surface de couches continues de sols peu consolidés
– coût de la purification	Relativement bas	Élevé (dépend du prix du pétrole)
– métaux bonus associés	Cu, PGE	Co
– produits toxique émis lors de la purification	Soufre	Solutions acides et basiques concentrées*

* L'extraction de latérite répand également de l'amiante. L'asbestose est très fréquente parmi les populations canaques vivant à proximité des exploitations de Ni et des routes.

Exercice 5.4 – Exploration des gisements de nickel.

Imaginez que vous êtes géologue dans une compagnie d'exploration minière et que votre directeur vous demande de planifier le futur programme d'exploration. Les économistes de la société estiment que les prix des métaux de base sont amenés à doubler au cours des 10 prochaines années, et votre compagnie souhaiterait trouver des gisements de nickel. Vous êtes consulté pour : (1) décider quel type de gisement cibler (magmatique ou latéritique) ; (2) choisir un territoire à l'échelle de la planète pour conduire l'exploration.

Dans le cadre de votre travail, vous aurez également à choisir entre une exploration « greenfields » (c'est-à-dire dans des territoires où aucun gisement n'est encore

connu), ou « brownfields » (c'est-à-dire dans des territoires connus pour leurs gisements où vous pourriez en trouver de nouveaux ou découvrir des extensions de gisements connus). Afin de décider du territoire à explorer, vous devrez prendre en compte la géologie des régions ciblées, leur âge et les structures tectoniques qui les ont affectées, le type de roches ultrabasiques qu'elles contiennent et leur climat au cours de 100 derniers millions d'années. Pour choisir le type de gisement à rechercher, vous devrez peser les arguments pour et contre, sachant que l'extraction du Ni des latérites requiert beaucoup d'énergie dont le cours évolue parallèlement à celui du pétrole.

Rédigez un rapport avec vos arguments en une page (c'est sans doute le maximum que votre directeur souhaitera lire !).

5.5.3 Les autres gisements latéritiques

L'accumulation d'or dans les gisements résiduels (éluviaux) a été décrite au § 5.2. Lorsque l'altération se produit dans les climats chauds et humides, des latérites épaisses sont formées et lorsqu'elles se développent à partir de roches ayant une teneur significative en or, l'altération peut transformer la roche ayant un potentiel de minerai en véritable minerai. On trouve en Afrique de l'ouest de bons exemples de gisements de ce type. Dans la région du Carajas, au Brésil, on observe de mêmes types de processus pour les éléments du groupe du platine qui sont concentrés dans les sols latéritiques au-dessus de roches ultrabasiques.

Des gisements de surface d'un autre type sont les « calcrètes », nom donné aux sols calcifiés riches en calcite qui se forment dans les environnements arides. D'importants gisements d'uranium (Langer Heinrich en Namibie et Yeelirrie à l'ouest de l'Australie) se sont formés par la concentration de carbonates dans les eaux de surface, qui entraîne la précipitation et la concentration de carnotite un minéral riche en uranium jaune vif de formule $K_2(UO_2)_2(VO_4)_2 \cdot 3H_2O$.

5.6 L'ALTÉRATION SUPERGÈNE

Lorsque des gisements de sulfures affleurent en surface, les minéraux sulfurés s'oxydent et les métaux qu'ils contiennent sont lessivés et migrent pour s'accumuler dans une couche plus basse, au niveau de la nappe phréatique. Dans cette couche, dite d'« enrichissement supergène », les métaux sont 2 à 5 fois plus concentrés que dans le minerai primaire. De plus, la localisation proche de la surface de cette couche rend l'exploitation pratique et quasi immédiate. L'ouverture d'une exploitation est en général une grande opération qui nécessite d'énormes investissements dépassant souvent plusieurs millions d'euros. Entre le début du financement de l'opération et la vente après extraction des premières tonnes de métaux, il peut se passer 5 à 10 ans. La possibilité d'exploiter immédiatement une couche peu profonde et exceptionnellement riche peut procurer des revenus bienvenus pour la compagnie minière ce qui fait souvent la différence entre une opération viable ou pas.

La figure 5.10 présente une coupe dans une zone d'enrichissement supergène au-dessus d'un corps minéralisé de sulfures de cuivre. La couche supérieure appelée « chapeau de fer » ou « *gossan* » est composée d'oxydes de fer hydratés. Cette couche est pauvre en autres métaux, mais a des textures alvéolaires qui témoignent de la présence de sulfures en profondeur, elle est utilisée dans la prospection. La zone lessivée repose sur deux niveaux enrichis. La zone supérieure de minerai « oxydé » contient une grande diversité de minéraux secondaires – carbonates, silicates, sulfates, phosphates – qui sont souvent bien cristallisés et comme leurs couleurs sont éclatantes ils sont très prisés des collectionneurs de minéraux. En dessous se trouve une zone d'enrichissement en sulfures, dans laquelle les sulfures contenant du fer, comme la chalcoppyrite (CuFeS_2), sont remplacés par des sulfures secondaires dépourvus de fer ou très pauvres en fer, et contenant de fortes teneurs en Cu, comme par exemple la chalcocite (Cu_2S), la covellite (CuS) ou la bornite (Cu_5FeS_4).

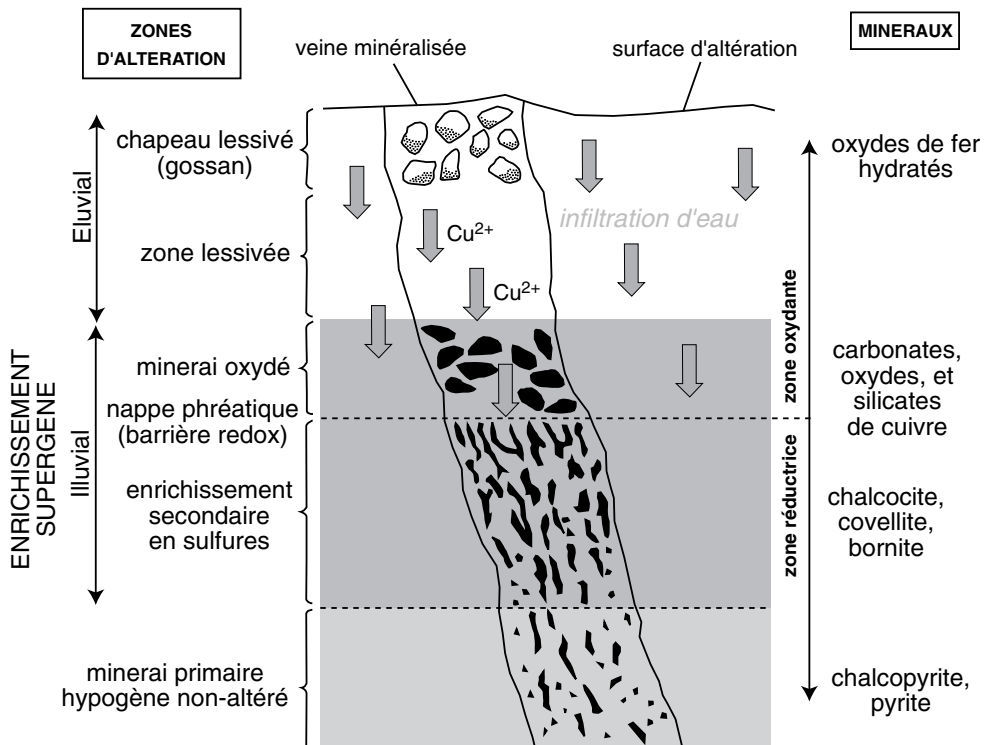


Figure 5.10 - Profil dans une zone d'enrichissement supergène.

D'après Webb et Rowston, 1995.

Le meilleur exemple de zone d'enrichissement supergène est peut-être celle qui se trouve au-dessus des gisements de porphyres de cuivre. Le minerai primaire du gisement de Chuquicamata au Chili (décrit dans le chapitre 4), contient seulement

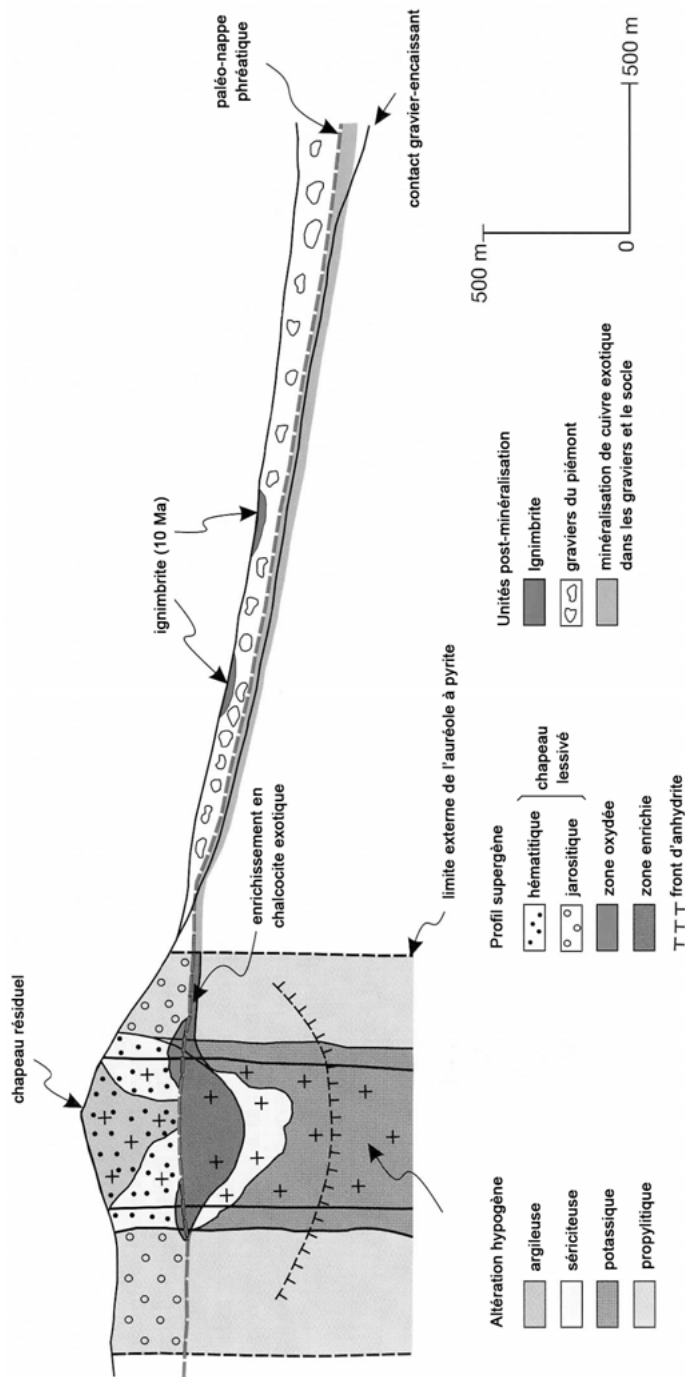


Figure 5.1 - Coupe géologique simplifiée dans le gisement porphyrique de Chuquicamata.

0,8 % de Cu, mais il est recouvert par une couche épaisse d'enrichissement supergène dans laquelle le minerai contient 2 à 3 % de Cu (figure 5.11). De plus, un flux de solution acide provenant du corps minéralisé principal a transporté le cuivre dissous et l'a redéposé en aval dans des graviers où il forme un corps minéralisé secondaire appelé Exotica. Ce gisement contient 300 Mt de minerai de plus ayant environ 2 % de Cu.

CONCLUSION

On trouve des rivières un peu partout, mais seul un petit nombre d'entre elles contiennent des gisements d'or. Pour que de tels gisements soient formés, il faut que le bassin versant contienne une source primaire d'or et il faut que les conditions hydrologiques permettent la concentration de minéraux lourds.

Très peu de sols contiennent des concentrations exploitables en métaux de valeur. Même sous des climats chauds et humides, la plupart des latérites sont enrichies en fer mais pas en aluminium ou en nickel. Pour que les latérites contiennent de fortes concentrations en ces métaux, il faut qu'elles soient formées à partir d'une roche mère appropriée.

Les roches sédimentaires précipitées chimiquement dans les océans modernes sont majoritairement des carbonates biogènes ou des vases siliceuses sans valeur marchande. La plupart des gisements de fer se sont formés en réaction à des conditions très particulières qui régnaient au cours du Précambrien, particulièrement pendant l'épisode d'oxygénation du Protérozoïque inférieur. Cependant, les teneurs en fer de la majorité des formations de fer rubanés ne sont pas suffisantes pour constituer des gisements et un enrichissement supergène est généralement nécessaire à l'obtention de concentrations suffisantes.

Ces exemples illustrent l'idée que nous avons développée dans le chapitre 2 : un minerai est formé lorsqu'un processus géologique normal est perturbé. Dans la plupart des cas, la roche formée est une curiosité dont la composition est simplement différente de l'ordinaire mais dans quelques circonstances, les conditions entraînent la concentration de métaux ayant une utilité et une valeur pour l'humanité. Dans les chapitres précédents, nous avons décrit de nombreux exemples de minerais produits pour les principaux processus géologiques – le magmatisme, les circulations hydrothermales et la sédimentation (mais pas le métamorphisme qui n'est pas un processus minéralisateur important) – et dans le chapitre suivant nous allons décrire deux derniers exemples qui sont des ressources minérales stratégiques et des enjeux économiques majeurs au XXI^e siècle.

Bibliographie

- CLOUT J.M.F. et SIMONSON B.M. (2005), « Precambrian iron formations and iron formation-hosted iron ore deposits », *Economic Geology, 100th Anniversary Volume*, pp. 643-679.
- Diamond Mines and Mining. http://www.khulsey.com/jewelry/kh_jewelry_diamond_mining.html

- FREYSSINET Ph., BUTT C.R.M., MORRIS R.C. et PIAZONE P. (2005), « Ore-Forming Processes Related to Lateritic Weathering », *Economic Geology, 100th Anniversary Volume*, p. 681-722.
- FRIMMEL, GROVES D.I., KIRK J., RUIZ J., CHESLEY J. et MINTER W.E.L. (2005), « The formation and preservation of the Witwatersrand goldfields, the world's largest gold province » *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, p. 769-797.
- LAW J.D.M. et PHILLIPS G.M. (2005), « Hydrothermal replacement model for Witwatersrand gold », *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, p. 799-811.

AVENIR DE LA GÉOLOGIE ÉCONOMIQUE

6

PLAN	6.1 Introduction
	6.2 L'exploitation des terres-rares, éléments peu courants mais nécessaires en petites quantités pour des produits de haute technologie
	6.3 L'exploitation du lithium, un exemple d'interaction entre géographie, économie, politique, environnement et prospection
	6.4 Conclusion : l'exploitation et l'exploration minière dans le futur
OBJECTIFS	➤ Comprendre les défis de l'exploitation minière du ^{xxi} e siècle en termes de quantité de substance minérale extraite, de développement de nouvelles méthodes d'exploration, d'extraction et de purification.
	➤ Souligner l'effort de minimisation de l'impact environnemental que l'industrie minière devra faire du ^{xxi} e siècle.

6.1 INTRODUCTION

Dans ce livre, nous avons décrit un avenir relativement positif de la géologie économique et de l'étude des gisements miniers. Nous avons expliqué que les hommes auront toujours besoin de métaux et d'autres ressources minérales, et même si le recyclage est amené à fournir une proportion de plus en plus importante des substances nécessaires, la production minière sera indispensable pour satisfaire pleinement la demande. Nous avons discuté de l'éventualité d'un épuisement des ressources en métaux ; notre conclusion a été que pour la plupart des métaux de base, il est très peu probable que les réserves soient un jour épuisées. Actuellement, la planète est préoccupée par des problèmes complexes liés à l'augmentation constante des besoins en pétrole et à la nécessité de trouver des solutions pour perpétuer l'approvisionnement ; pour cette ressource il est possible que la production commence bientôt à décliner, si ce n'est pas déjà le cas. La vitesse de décroissance de la production de pétrole et les facteurs qui pourraient influencer sont encore très spéculatifs. La découverte de gisements gigantesques et jusqu'alors inconnus, le long des côtes brésiliennes, ainsi que la possibilité de trouver de nouveaux gisements en Arctique suggèrent que le problème de l'épuisement des hydrocarbures pourrait être reporté de quelques

années. Il est possible que le déclin de la production et de la consommation du pétrole soit entraîné par le besoin de diminuer les émissions de gaz à effet de serre plutôt que par un véritable épuisement des ressources. Les efforts qui se multiplient ces derniers temps afin de diminuer la consommation d'énergie seront accompagnés de la substitution du pétrole par d'autres énergies. L'énergie nucléaire jouera sans aucun doute un rôle important, mais un réseau d'éoliennes, de centrales hydro-électriques et de panneaux solaires sera certainement déployé afin d'exploiter les ressources renouvelables. N'oublions pas que les centrales nucléaires nécessitent de l'uranium ; la construction de turbines ou de panneaux solaires et l'amélioration des performances des voitures, des appareils électriques et des systèmes de chauffages des maisons nécessitent tout un spectre de métaux, certains exploités traditionnellement, d'autres nouvellement utilisés. Dans les paragraphes qui suivent, nous discutons de deux types de ressources minérales qui illustrent les défis de l'exploitation minière du XXI^e siècle : les terres rares et le lithium.

6.2 L'EXPLOITATION DES TERRES-RARES, ÉLÉMENTS PEU COURANTS MAIS NÉCESSAIRES EN PETITES QUANTITÉS POUR DES PRODUITS DE HAUTE TECHNOLOGIE

On trouve de plus en plus d'utilisations dans l'industrie moderne à ce groupe d'éléments, bien connu des géochimistes qui les utilisent pour tracer les processus géologiques dans le manteau, la croûte et les océans. Ils sont utilisés dans une grande variété d'applications, principalement dans l'électronique mais également dans des processus industriels. Quelques exemples sont énumérés dans le tableau 6.1.

Tableau 6.1 – Utilisations des terres rares.

Lanthane (La)	Traitement de l'eau, batteries rechargeables
Cérium (Ce)	Polissage des verres, boue dense des forages pétroliers, catalyseur
Néodyme (Nd)	Petits moteurs électriques, aimants
Europium (Eu)	Phosphore rouge des écrans plats

D'un point de vue géochimique, les terres-rares font partie des éléments incompatibles, ce qui signifie qu'elles sont concentrées dans les liquides silicatés évolués résiduels après cristallisation fractionnée d'un magma. Elles sont présentes en abondance dans des pegmatites et dans les carbonatites (roches magmatiques composées de minéraux carbonatés et de peu de silicates), roches dont elles sont extraites. Les carbonatites qui proviennent de la cristallisation d'un magma riche en carbonates sont des roches assez rares. Les gisements de terres-rares dans des carbonatites sont

donc également assez exceptionnels. Actuellement, le gisement potentiellement le plus important est celui de Mount Weld en Australie, qui contient près de 2 Mt de minerai comportant jusqu'à 20 % de terres-rares ainsi que d'autres éléments peu courants comme Nb, Ta, Zr et Sc. Ce gisement procurera dans un avenir proche environ 30 % des terres-rares que nous utilisons, ce qui représente environ 90 000 tonnes par an. Il est assez surprenant qu'un seul petit gisement puisse répondre à une proportion aussi élevée de la demande mondiale, mais lorsqu'on compare la demande mondiale à celles d'autres métaux, comme l'aluminium ou le fer, mesurées en gigatonnes, l'explication tient essentiellement à l'utilisation qui est faite de ces ressources. Contrairement au fer ou à l'aluminium qui sont utilisés en grandes quantités pour construire des immeubles, des ponts, des véhicules, etc., les terres-rares ne sont utilisées qu'en petites quantités dans quelques applications spécialisées. Si le lanthane était un élément majeur, sa disponibilité serait plus grande et son prix inférieur ; il serait peut-être utilisé comme matériaux de construction. Comme l'indique sont appartenance au groupe des « terres-rares », c'est un métal peu courant dont les utilisations sont spécialisées et spécifiques. Les besoins mondiaux peuvent ainsi être satisfaits par l'exploitation des complexes de carbonatites pourtant assez rares.

6.3 L'EXPLOITATION DU LITHIUM, UN EXEMPLE D'INTERACTION ENTRE GÉOGRAPHIE, ÉCONOMIE, POLITIQUE, ENVIRONNEMENT ET PROSPECTION

La disponibilité et l'exploitation de cet élément illustrent parfaitement les complications – géologiques, géographiques, économiques et politiques – qui influencent l'industrie minière au début du XXI^e siècle. Depuis quelques années, cet élément a déjà de nombreuses applications ; mais en quantités relativement faibles. Des exemples sont apportés dans le tableau 6.2.

Tableau 6.2 – Utilisations du lithium

– Dans de nombreux types de batteries (pour sont potentiel électrochimique élevé)
– En tant que fluidifiant dans les fonderies d'aluminium (diminue la température de fusion).
– En tant que milieu conducteur de chaleur dans les réacteurs nucléaires (pour sa chaleur spécifique très élevée)
– Dans des médicaments, comme stabilisateur d'humeur
– En tant que lubrifiant spécialisé
– Dans des alliages avec Al et Mg pour produire des pièces aéronautiques solides et légères
– Dans des céramiques et des verres spécialisés (notamment ceux de certains télescopes)
– Sous forme de LiOH qui absorbe le CO ₂ dans les sous-marins et les navettes spatiales

La production globale, d'environ 20 000 tonnes par an a été capable de répondre à la demande pendant les dernières décennies, mais dans un futur proche, la situation va changer. La pression pour réduire la consommation de pétrole et les émissions de CO₂ liées à la croissance du nombre d'automobiles en circulation a entraîné le développement de modèles hybrides et de véhicules entièrement électriques. Ces véhicules sont promis à un bel avenir commercial, et la plupart seront sans doute équipés de batteries Li-ion qui présentent des avantages considérables : une puissance plus importante pour un poids et une taille plus limités que les autres types de batteries. La batterie des véhicules hybrides contient 2 kg de Li, et celle des véhicules entièrement électriques 3 kg. La conversion de l'ensemble des voitures à moteur thermique en voitures à moteur électrique entraînera une augmentation gigantesque de la demande en Li, qui sera, selon certaines estimations, multipliée par un facteur supérieur à dix. Où trouverons-nous tout ce lithium ?

Actuellement, le Li est extrait de deux types de gisements : (1) des pegmatites, où le Li est contenu dans le spodumène, silicate dont la composition – LiAlSi₂O₆ – ressemble à celle d'un pyroxène et (2) des sédiments évaporitiques et de l'eau de certains lacs d'altitude, où le Li est contenu dans des carbonates. Par le passé, la production s'est consacrée essentiellement aux gisements de spodumène, mais depuis elle a été largement dépassée par l'exploitation de la seconde source qui nécessite moins d'énergie pour extraire le métal. Comme nous l'avons discuté dans le cas pour les gisements de Ni (encart 2.2), extraire un métal d'un silicate est toujours très coûteux en énergie. Actuellement, environ 75 % des réserves mondiales de Li sont en Amérique du Sud, sur « l'altiplano » des Andes, vaste plateau d'altitude qui s'étend essentiellement en Bolivie, en Argentine et au Chili. Plusieurs facteurs entraînent l'évaporation rapide des eaux de pluie sur l'altiplano : l'altitude élevée (et donc la pression atmosphérique basse), les vents violents et le climat aride. Le climat très sec de l'altiplano qui lui permet d'avoir un ciel parmi les moins nébuleux du monde et c'est ce critère qui a entraîné le choix de cette région pour l'installation de plusieurs télescopes parmi les plus performants. L'aridité est en grande partie liée à l'existence du courant océanique froid de Humboldt en provenance de l'Antarctique qui crée un gradient thermique inverse dans les masses d'air sur l'océan Pacifique à proximité des côtes chiliennes ; ce gradient est défavorable à la formation de masses nuageuses et quand bien même des nuages sont formés, l'altiplano en est protégé par les cordillères qui l'entourent. Ce climat aride permet l'évaporation rapide de l'eau des rares pluies dans la région ; l'eau et les sédiments riches en Li sont concentrés dans des bassins endoréiques. Pour répondre à la demande croissante en Li il nous sera indispensable d'exploiter ces ressources.

La concentration en cette partie de la planète d'un métal qui va devenir essentiel pour l'industrie entraîne quelques interrogations. Plus de la moitié des ressources sont situées en Bolivie, un pays dont l'histoire minière est chargée : entre le XVI^e et le XIX^e siècle, les colons espagnols ont exploité sans remords le gisement incroyablement riche de « Cerro Rico », et ont exporté l'essentiel de la production vers Espagne, faisant de la ville andine de Potosi l'une des plus riches au monde. Depuis la révolution Bolivienne et jusqu'à présent, les gisements miniers ont été exploités

avec plus ou moins de rentabilité et de stratégie commerciale par une succession d'exploitants. Pendant longtemps, elles ont été dirigées par des compagnies étrangères, et lors de ces périodes, les richesses quittaient le pays. Lorsqu'en alternance les mines étaient nationalisées, la production était beaucoup moins efficace, la corruption régnait et la population locale ne bénéficiait pas plus des richesses générées par cette industrie. Potosi est maintenant une ville extrêmement pauvre et triste ; elle est dilapidée tandis que les résidences coloniales tombent en ruines les unes après les autres. En 2005, Evo Morales a été le premier président indigène élu dans ce pays, il a immédiatement agi pour la nationalisation des puits de pétrole et de gaz ainsi que des compagnies minières. Il a renégocié activement les contrats avec les pays importateurs afin de s'assurer qu'une proportion bien plus importante des richesses profiterait au peuple bolivien.

L'exploitation du plus grand gisement de lithium, dans le *salar* d'Uyuni au cœur de la Bolivie, a été tentée à plusieurs reprises par le passé, mais a échoué pour des raisons politiques ou économiques. Au moment où nous écrivons ce livre, des négociations sont en cours pour trouver les fonds nécessaires au développement de l'exploitation de ce gisement et anticiper la demande croissante en batteries Li-ion, mais le projet avance très lentement : la Bolivie est un pays très pauvre et ne dispose pas des millions de dollars nécessaires à la mise en route de l'exploitation. Les capitaux étrangers ne se bousculent pas dans ce pays où le climat politique est parfois jugé incertain. D'un côté, le gouvernement bolivien a exprimé son rejet à tout programme qui exploiterait les ressources minérales boliviennes de faible coût pour construire des voitures chères dans les « pays riches » ; d'un autre côté, les gouvernements des « pays riches » ne souhaitent pas que trois pays du continent sud américain (le Chili, la Bolivie et l'Argentine) aient la mainmise sur des produits liés à l'énergie. D'une certainement manière, ces pays auraient un poids comparable à celui qu'ont aujourd'hui les pays producteurs de pétrole au Moyen-Orient.

Parallèlement à cet aspect politique, la composition du matériel extrait est également considérée : même si le *salar* d'Uyuni contient une immense quantité de Li, le minerai a un rapport Mg/Li assez élevé. Dans le processus d'extraction du lithium, le magnésium n'est pas récupéré et doit être débarrassé comme déchet. D'un autre côté, les *salars* contiennent également de grandes quantités de sels de potassium, utilisés comme engrais, et de sels de sodium qui pourraient être utilisés par l'industrie s'ils pouvaient être transportés sur les sites de consommation. Dans cette région des Andes où la population est très clairsemée, le gisement d'Uyuni est loin de consommateurs potentiels.

Des problèmes écologiques et environnementaux corsent le problème : les lacs de l'altiplano bolivien constituent des écosystèmes uniques qui possèdent une faune exceptionnelle à laquelle appartiennent les emblématiques flamants roses. Le développement d'exploitations minières pourrait entraîner des bouleversements dont l'ampleur est difficile à estimer mais qui seraient très certainement substantiels. C'est une raison de plus pour le gouvernement bolivien de s'opposer à une industrialisation à grande échelle dans la région. L'activité touristique en essor dans le *salar* d'Uyuni ajoute une nouvelle résistance à l'exploitation des ressources minérales.

L'ensemble de ces facteurs a amené à rechercher d'autres gisements plus près des marchés et/ou dans des régions où l'environnement serait moins sensible et où le minerai aurait un rapport Mg/Li plus intéressant. Une source facilement accessible et inépuisable est l'eau de mer, qui contient environ 0,17 ppm de Li. Actuellement, le métal ne peut pas être extrait de façon économiquement viable à partir cette source, mais il est possible que dans le futur, les développements technologiques rendent le processus rentable. En attendant, les entreprises d'exploration minière et les organisations gouvernementales recherchent activement d'autres gisements.

6.4 CONCLUSION : L'EXPLOITATION ET L'EXPLORATION MINIÈRE DANS LE FUTUR

Les courbes reproduites dans le chapitre 1 illustrent parfaitement le défi des compagnies minières. Comme la population mondiale augmente et comme les pays en voie de développement aspirent à vivre comme les pays développés, la demande en métaux est amenée à croître. Nous avons montré que cette demande pourra être satisfaite par l'exploitation des gisements existants ainsi que de nouveaux gisements qu'il nous faudra découvrir. Si les tendances qui ont persisté au cours du siècle dernier se confirment, les améliorations des techniques d'extraction et de purification permettront l'extraction des métaux dans des gisements dont les minerais auront de plus faibles teneurs qu'actuellement, ou bien dans des gisements situés dans des régions plus hostiles ou plus reculées. Le drainage des gisements sous-marins, comme les nodules polymétalliques du plancher océanique pourra constituer une immense source supplémentaire en Ni, Co, Zn, Mo, et Mn et l'exploitation des gisements également sous-marins de sulfures exhalatifs récents pourra procurer du Cu, Zn, Pb, Au et d'autres métaux.

Mais avant que ces gisements soient exploités, ils doivent être trouvés. Comme nous l'avons expliqué dans le chapitre 1, les réserves connues sont suffisantes pour satisfaire la consommation mondiale en la plupart des métaux lors des quelques décennies à venir. Aujourd'hui, et très probablement pendant la première moitié du XXI^e siècle, les entreprises d'exploration nationales et internationales vont continuer à mener des explorations pour trouver de nouveaux gisements ; elles seront très souvent assistées par les instituts géologiques nationaux. L'objectif de la plupart des compagnies est de trouver de « meilleurs » gisements ; c'est-à-dire des gisements avec des teneurs assez élevées et un contexte géologique qui permet d'extraire facilement et efficacement le minerai. La course au profit est le moteur de la prospection – la raison d'être d'une compagnie privée – mais d'autres facteurs entrent en jeu. L'exploitation d'un grand gisement de faible teneur implique l'évacuation d'immenses volumes de roche, qui nécessite d'immenses quantités d'énergie, d'eau et d'autres ressources. Extraire et purifier le cuivre à partir d'un minerai contenant 0,4 % Cu produit plus de deux fois plus de déchets qu'extraire et purifier du cuivre à partir d'un minerai à 0,8 % Cu (la purification d'un métal n'est pas un processus efficace à

100 %). Les déchets doivent être traités ou conservés : l'exploitation d'un minerai « riche » a moins d'impact sur l'environnement que l'exploitation d'un minerai « pauvre ». Les conséquences environnementales de l'activité minière ont désormais un rôle important dans les projets de développement d'exploitations. Un exemple intéressant est le développement de processus dans lesquels les déchets produits par les mines dans les roches mafiques et ultramafiques sont mis en contact avec un flux de CO₂ provenant d'un four ou directement de l'air, afin de fixer ce gaz à effet de serre sous forme de carbonates et diminuer ainsi le bilan carbone de l'opération minière.

Les techniques utilisées dans la recherche de nouveaux gisements évoluent elles aussi très rapidement, avec une dépendance accrue pour la télédétection et les méthodes de prospection géophysique. Ces dernières permettent de trouver des gisements invisibles en surface car cachés par des couches de sédiments, des alluvions, ou un sol tropical profond. Le mode de fonctionnement des compagnies les plus importantes change, mais lors des dernières années, elles ont eu la fâcheuse tendance d'abandonner l'exploration et la recherche de gisements, sous-traitant cette activité à de petites entreprises spécialisées et à des universitaires. Cependant, quel que soit le niveau où ils interviennent, les géologues seront toujours nécessaires au développement industriel.

Au moment où nous écrivons ce livre, l'activité industrielle est en berne et l'intensité de l'exploration minière a diminué. Mais cette situation ne durera sans doute pas et si le cycle économique actuel suit son cours normal, une demande croissante en métaux va entraîner une augmentation du prix des métaux qui encouragera les compagnies à reprendre leurs programmes d'exploration. Les compagnies auront de nouveau besoin de géologues et emploieront des personnels compétents où elles en trouveront. L'un de nos objectifs en écrivant ce livre était d'aider à procurer au moins une connaissance de base sur ce sujet aux étudiants des universités françaises. Cette connaissance devrait être utile non seulement aux quelques étudiants qui trouveront un emploi dans l'industrie, mais également aux autres qui, quel que soit le métier qu'ils auront, auront quelques notions sur le rôle des métaux dans notre société et sur les processus de formation et d'exploitation des minerais.

RÉFÉRENCES

- ARNDT N.T., LESHER C.M. et CZAMANSKE G.K. (2005), « Mantle-derived magmas and magmatic Ni-Cu-(PGE) deposits », *Economic Geology, 100th Anniversary volume*, 5-24.
- BARNES H.L. (1979), *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, John Wiley and Sons, 997 p.
- BOLDY J. (1968), « Geological observations on the Delbridge massive sulphide deposit », *Canadian Inst. Mining Metall. Bull.*, 61 : 1045-1054.
- BUTT C.R.M., LINTERN M.J. et ANAND R.R. (2000), « Evolution of regoliths and landscapes in deeplyweathered terrain – implications for geochemical exploration », *Ore Geology Reviews*, 16, 167-183.
- CATHLES L.M., et ADAMS J.J. (2005), « Fluid flow and petroleum and mineral resources in the upper (< 20 km) continental crust », *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, p 77-110.
- CAWTHORN R.G. (1996), « Layered Intrusions », *Developments in Petrology*, 15, 531 p.
- CHENOVVOY M. et PIBOULE M. (2007), *Hydrothermalisme. Spéciation métallique hydrique et systèmes hydrothermaux*, Collection Grenoble Sciences, 624 p.
- CZAMANSKE G.K., ZEN'KO T.E., FEDORENKO V.A., CALK L.C., BUDAHN J.R., BULLOCK J.H., FRIES T., KING B.-S. et SIEMS D. (2002), « Petrographic and geochemical characterization of ore-bearing intrusions of the Noril'sk type. Siberia : With discussion of their origin, including additional datasets and core logs », US Geological Survey Open-File Report : 02-74.
- DUBÉ B. et GOSSELIN P. (2008), « Mineral Deposits of Canada – greenstone-hosted quartz-carbonate vein deposits ». http://gsc.nrcan.gc.ca/mindep/synth_dep/gold/greenstone/index_e.php.
- DUBÉ B., BALMER W., SANBORN-BARRIE M., SKULSKI T. et PARKER J. (2000), « A Preliminary Report on Amphibolite-Facies, Disseminated- Replacement-Style Mineralization at the Madsen Gold Mine, Red Lake, Ontario », *Geological Survey of Canada, Current Research*, 2000- C17, 12 p.
- ECKSTRAND O.R. et HULBERT L.J. (2007), « Mineral Deposits of Canada – Magmatic Nickel-Copper-PGE deposits », http://gsc.nrcan.gc.ca/mindep/synth_dep/ni_cu_pge/index_e.php
- ELLIS A.J. (1979), « Explored geothermal systems », in BARNES H.L. (Ed.), *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*, 2^e éd., 632-683, Wiley & Sons.
- EVANS A.N. (1993), *Ore geology and industrial minerals : an introduction*, Blackwell Publishing Company, 390 p.
- FRANKLIN J.M., GIBSON H.L., JONASSON I.R. et GALLEY A.G. (2005), « Volcanogenic massive sulfide deposits », *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, p 523-560.

Références

- FREYSSINET P., BUTT C.R.M., MORRIS R.C. et PIAANTONE P. (2005), « Ore-Forming Processes Related to Lateritic Weathering », *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, p. 681-722.
- FRIMMEL E. (2005), « Archaean atmospheric evolution : evidence from the Witwatersrand gold fields, South Africa », *Earth-Science Reviews*, 70, p. 1-46.
- FROST K.M., GROVES D.I. (1989), « Magmatic contacts between immiscible sulfide and komatiite melts ; implications for genesis of Kambalda sulfide ores », *Economic Geology*, 84 :1697-1704.
- GARNET R.T.H. et BASSET N.C. (2005), « Placer deposits », *Economic Geology 100th Anniversary Volume* : 813-843.
- GARRELS R.M. et CHRIST C.L. (1965), *Solutions, minerals, and equilibria*, New York : Harper & Row, 450 p.
- GOLDHABER M.B., REYNOLDS R.L. et RYE R.O. (1978), « Origin of a south Texas roll-type uranium deposit : II, Sulfide petrology and sulfur isotope studies », *Economic Geology*, 73, 1690-3705.
- GOODFELLOW W. et LYDON J. (2008), « Mineral Deposits of Canada – Sedimentary exhalative (SEDEX) deposits », http://gsc.nrcan.gc.ca/mindep/synth_dep/sedex/index_e.php.
- GRESHAM J.J., LOFTUS-HILLS G.D. (1981), « The geology of the Kambalda nickel field, Western Australia ». *Economic Geology*, 76 : 1373-1416.
- GROVES D.I., KORKIAKKOSKI E.A., MCNAUGHTON N.J., LESHER C.M., COWDEN A. (1986), « Thermal erosion by komatiites at Kambalda, Western Australia and the genesis of nickel ores ». *Nature*, 319, 136-138.
- HANNINGTON M.D., GALLEY A.G., HERZIG P.M., PETERSEN S. (1998), « Comparison of the TAG mound and stockwork complex with Cyprus-type, massive sulfide deposits », *Initial Reports and Scientific Results IODP, Leg 158* : 389-416.
- HEDENQUIST J.W., HENLEY R.W. (1985), « Hydrothermal eruptions in the Waiotapu geothermal system, New Zealand: origin, breccia deposits and effect of precious metal mineralization ». *Economic Geology* (80) : 1640-1666.
- IRVINE T.N. (1980), « Magmatic infiltration metasomatism, double-diffusive fractional crystallization, and adcumulus growth in the Muskox intrusion and other layered intrusions », in HARGREAVES R.B. (Ed.), *Physics of magmatic processes*, Princeton University Press, p. 325-383.
- IRVINE T.N. (1977), « Origin of chromitite layers in the Muskox Intrusion and other stratiform intrusions ; a new interpretation », *Geology*, 5 : 273-277.
- IRVINE T.N. (1975), « Crystallization sequences in the Muskox intrusion and other layered intrusions-II. Origin of chromitite layers and similar deposits of other magmatic ores », *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 39 : 991-1008.
- JEFFERSON C.W., THOMAS D.J., GANDHI S.S., RAMAEKERS P., DELANEY G., BRISBIN D., CUTTS C., QUIRTS D., PORTELLA P. et OLSON R.A. (2008), « Mineral Deposits of Canada - Unconformity associated uranium deposits », http://gsc.nrcan.gc.ca/mindep/synth_dep/uranium/index_e.php.
- KIRKHAM R.V. et SINCLAIR W.D. (1988), « Comb quartz layers in felsic intrusions and their relationship to the origin of porphyry deposits » in TAYLOR R.P. et STRONG D.F. (ed.), *Recent Advances in the Geology of Granite-Related Mineral Deposits : The Canadian Institute of Mining and Metallurgy, Special Volume*, 39, p. 50-71.

- KLEIN C. et BEUKES N.K. (1993), « Sedimentology and Geochemistry of Glaciogenic Late Proterozoic Iron-Formation in Canada », *Economic Geology*, 88, p. 545-565.
- KRUPP R.E., SEWARD T.M. (1987), « The Rotokawa geothermal system, New Zealand : an active epithermal gold-depositing environment », *Economic Geology*, 82, 1109-1129.
- LESHER C.M., BURNHAM O.M., KEAYS R.R., BARNES S.J. et HULBERT L. (2001), « Geochemical discrimination of barren and mineralized komatiites associated with magmatic Ni-Cu-(PGE) sulfide deposits », *Canadian Mineralogist*, 39 : 673-696.
- LESHER et KEAYS (2002), « Komatiite-associated Ni-Cu-(PGE) deposits : Mineralogy, geochemistry, and genesis. The geology, geochemistry, mineralogy, and mineral beneficiation of the platinum-group elements », *Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Special 54* : 579-617.
- LOWELL J.D. et GILBERT J.M. (1970), « Lateral and Vertical Alteration-Mineralization Zoning in Porphyry Ore Deposits », *Economic Geology*, 65, p. 373-408.
- LYNN M.D., WIPPLINGER P.E. et WILSON M.G.C. (1998), « Diamonds », in WILSON M.G.C. et ANHAEUSSER C.R. (ed.), « The Mineral Resources of South Africa ». *Handbook, Council for Geosciences*, 16, 232-258.
- NALDRETT A.J. (2004), *Magmatic sulfide deposits: geology, geochemistry and exploration*, Springer, 727 p.
- OSSANDÓN G.C, FRÉRAUT R.C., GUSTAVSON L.B., LINDSAY D.D., ZENTILLI M. (2001), « Geology of the Chuquicamata mine : A progress report », *Economic Geology*, 96 : 249-270.
- POULSEN K.H., AMES D.E., LAU M.H.S. et BRISBIN D.I. (1986), « Preliminary report on the structural setting of gold in the Rice Lake area, Uch subprovince, southeastern Manitoba », *Geological Survey of Canada, Current Research*, 1986, p. 213-221.
- RIPLEY E.M., LIGHTFOOT P.C., LI C., ELSWICK E.R. (2003), « Sulfur isotopic studies of continental flood basalts in the Noril'sk region: implications for the association between lavas and ore-bearing intrusions », *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67 : 2805-2817.
- ROBB L.J. (2005), *Introduction to ore-forming processes*, Blackwell Publishing, 373 p.
- SCHMITZ M.D., BOWRING S.A., DE WIT M.J. et GARTZ V. (2004), « Subduction and terrane collision stabilized the western Kaapvaal craton tectosphere 2,9 billion years ago », *Earth and Planetary Science Letters*, 222 : 363-376.
- SIMMONS S.F., BROWNE P.R. (2000), « Hydrothermal minerals and precious metals in the Broadlands-Ohaaki geothermal system: implications for understanding low-sulfidation epithermal environments », *Economic Geology*, (95) 971-999.
- SINCLAIR W.D. (2007), « Porphyry deposits », in GOODFELLOW W.D. (ed.), « Mineral Deposits of Canada : A Synthesis of Major Deposit-Types, district Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods », *Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication*, 5, p. 223-243.
- VON DAMM K.L. (1990), « Seafloor hydrothermal activity : black smoker chemistry and chimney », *Annual Reviews of Earth and Planetary sciences*, 18, 173-204.
- WEBB M. et ROWSTON P. (1995), « The Geophysics of the Ernest Henry Cu-Au Deposit (NW) Qld », *Exploration Geophysics*, 26, 2/3 : 51-59.
- WHITNEY J.A. and NALDRETT A.J. (1989), « Ore Associated with magmas », *Reviews in Economic Geology*, vol. 4, 250 p.

INDEX

A

absite 110
Al 145
alluvial 126
altération supergène 152
altiplano 160
aluminium 149
antlerite 96
après-mine 50
argent 77
arsénopyrite 86
assimilation magmatique 55, 69
atacamite 96
Athabasca 110
Atlantis II Deep 101
atmosphère archéenne 142
autunite 110
azurite 96

B

Banded-Iron Formations 139
basse sulfatation 115
Baux de Provence 47
bauxite 47, 145
Besshi 85
BIF 139
Big Stubby 88
bilan carbone 146
boëhmite 147
bornite 86, 153
brannerite 110
brannérite 128
Brignoles 47
brochantite 96
Broken Hill 19, 102
bronze 28
Bushveld 20, 51

C

calcrètes 152
carbonatite 73, 158
carnotite 152
cassitérite 136
ceinture de cuivre 34, 109
Cérilly 49
Cerro Rico 160
chalcocite 96, 153
chalcophile 57
chalcopyrite 61, 86, 153
chambre magmatique 56
chamosite 139
chapeau de fer 153
charge tectonique 82
chevauchements 108
chlore 81
chlorures 115
chrome 53
chromite 51
Chuquicamata 93, 97, 153
Chypre 84, 89
chysocolle 96
Cigar Lake 110
coffinite 49
compaction des sédiments 82
composés organiques 107
conduits magmatiques 95
conglomérats à galets de quartz 128
convection 82
Coolgardie-Kalgoorlie 20
copperbelt 34, 109
Coutras 49
covellite 96, 153
Cu 84, 93, 114
cuivre 27, 109
 natif 96
cuprite 96

Index

D

davidite 110
Delbridge 89
densité 125
diamant 35, 72, 125, 134
diaspore 147
diffusion 81
dilution 82
dureté 125

E

eau
 de mer 79
 interstitielle 79
 météorique 79
échanges internationaux 43
écologie 161
El Teniente 93
éléments
 de haute-technologie 132
 de l'ère spatiale 132
Emeishan 73
enargite 97
enrichissement supergène 152
environnement 161
euxiniques 144
euxinite 110
exsolution 82

F

Fe 136
fer 35
 de Lorraine 48
fergusonite 110
fers rubanés 139
fluides
 de haute température 77
 magmatiques 79, 118
 métamorphiques 79
fractures ouvertes 83
fuchsite 128
fumeur noir 84, 92

G

galène 86, 101
garniérine 150

gibbsite 147
gisements 14
 alluviaux 127
 Cu-Zn 89
 d'oxyde de fer, cuivre, or 113
 d'uranium 110
 de fer sédimentaires 136
 de placers 123
 de porphyre 93
 de sulfures magmatiques 60
 de sulfures massifs volcanogènes 84
 de type Algoman 141
 de type Rapitan 141
 de type supérieur 141
 éluviaux 127
 exotiques 99, 155
 hydrothermaux 77
 irlandais 101
 lités de Mn 143
 polymétalliques 114
 sédimentaires 121
 exhalatifs 101
 stratiformes de cuivre 109
 Zn-Pb-Cu 89

gîtologie 32
glauconie 139
goethite 139
gossan 153
granites à étain 136
Grasberg 93
Great Dyke 20
greenalite 139
gypse 144

H

halite 144
Hamersley 139
haute sulfatation 115
hématite 139
hydrocarbure 107

I

ilménite 35, 125, 133
imprégnation 83
intrusion basique litée 57
IOCG 113

Iron-Oxide Copper Gold 113
ironstone 138

K

K 161
Kaapvaal 34
Kalgoorlie 115
Kambalda 59
Kidd Creek 86
Kimberley 134
kimberlite 35, 72
Kirkland Lake 115, 126
Kiruna 73
komatiites 34, 60
Kupferschiefer 109

L

La 159
laiton 28
Langer Heinrich 152
latérites 145
 à Ni 150
Le Bernardan 49
leucoxène 133
lithium (Li) 159
Lodève 49

M

MacTung 118
magnétite 86
malachite 96
marcassite 106
Margnac 49
matériaux détritiques 125
McArthur River 19, 102, 110
Meggen 101
Mehdiabad 101
mer
 de Salton 101
 Noire 143
 Rouge 101
Merensky Reef 57
métal de crise 131
métamorphisme 102

métaux
 bonus 19
 de base 27
 toxiques 19
minerais 10
 brut 40
 de type Lorraine 138
 magmatique 51
minette 47, 138
Mississippi Valley Type 105
Mn 143
Mo 93
modèle de placer modifié 131
molybdène 77
monazite 125, 133
mont Isa 19, 102
moteurs de la circulation hydrothermale 82
Mount Weld 159
MVT 105

N

Na 161
Nb 159
nitrates 144
nodules polymétalliques 162
Noril'sk-Talnakh 64
Nouvelle-Calédonie 150

O

Olympic Dam 113
or 49, 114, 125, 130
Orange River 134
orogénèse
 hercynienne 49
 varisque 49

P

P 144
Palabora ou Phalaborwa 73
paléoplacers 126
 pyritiques 128
Pb 84, 101, 105
peak-oil 6
pechblende 49, 110
pegmatite 158
pentlandite 61
pépites 127

Index

petit minéral 139
Phalaborwa ou Palabora 73
phosphates sédimentaires 144
Pic de cuivre 5
placers à or 125
plages de sable 132
plancher océanique 84
platinoïdes 43, 57, 136
plomb 77
potasse 49
Potosi 160
précipitation 82
processus périmagmatiques 118
produits transformés 42
prospection géophysique 163
pyrite 86
pyrolusite 143
pyrrhotite 61, 86

R

Red Dog 101
répartition 33
rhodochrosite 143
ride médio-atlantique 84
roll-front 113
ruées vers l'or 126
rutile 125, 133

S

Saint-Pierre 49
salar
 d'Atacama 144
 d'Uyuni 161
Salsigne 49
samarskite 110
Sc 159
sécrétion latérale 81
SEDEX 101
ségrégation par densité 56
sidérite 139
skarn 118
Sn 136
Snowball Earth 142
solubilité des métaux 79
soufre 81
source hydrothermale 84

sphalérite 86, 101
spodumène 160
stockwork 87
Sudbury 72
sulfures 115
Sullivan 101
sylvite 144

T

Ta 159
tabular 113
TAG 89
TAG mound 84
tectonique des plaques 33
télédétection 163
teneur 16
teneur-limite 16
ténorite 96
Terre boule de neige 142
terres-rares 132, 158
tétraédrite 86
Th 136
Ti 132
Timmins 115, 126
titane 35
tonnage 16
torbernite 110
Troodos 89
tungstène 118

U

U 49
uraninite 125
uranium 110, 114, 136, 152

V

Val d'Or 115
Vallée du Mississipi 105
VMS 84
Voisey's Bay 72
Volcanogenic Massive Sulfide 84

W

Welcome Stranger 127
Witwatersrand 126, 129, 136

Y

Yeelirie 152

Z

zinc 77

zircon 125, 133

Zn 84, 101

zonation 95

zones de remplacement 83

Zr 132, 159

