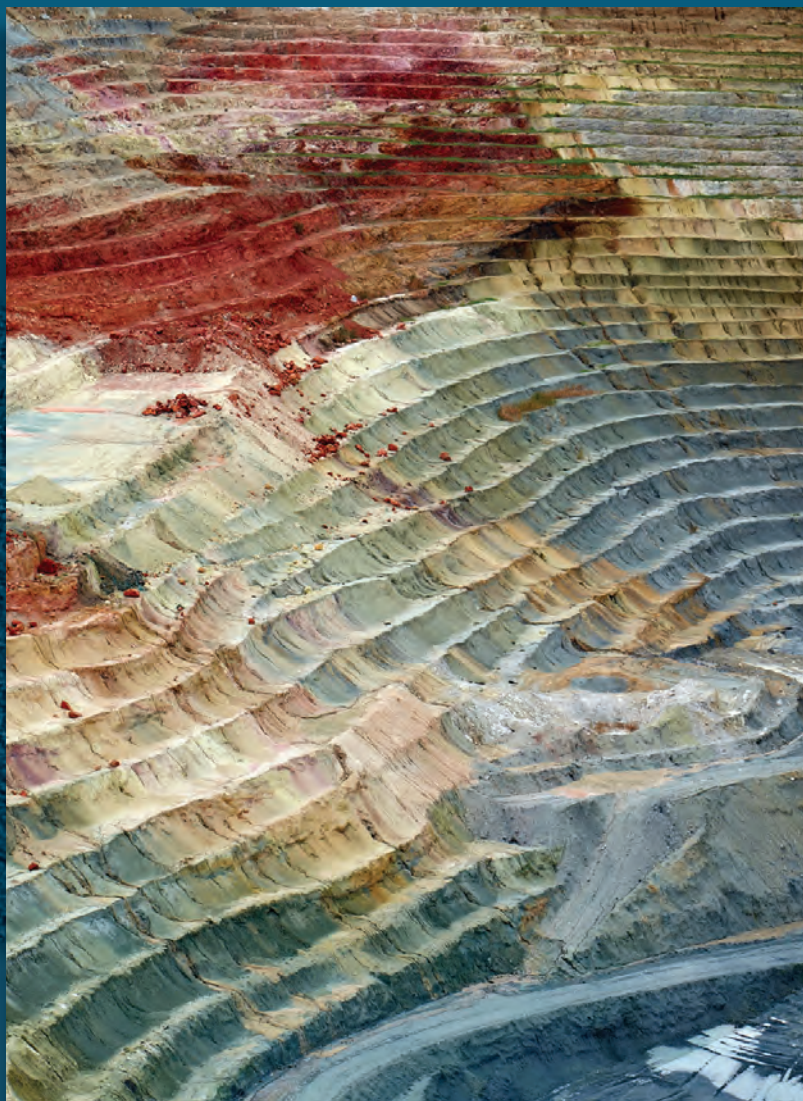


Géologie des ressources minérales

Michel Jébrak
Éric Marcoux



Ressources naturelles
et Forêts

Québec



Géologie des ressources minérales

Michel Jébrak
Éric Marcoux

Illustrations : Michelle Laithier

Ressources naturelles
et Forêts

Québec



Distributeurs

Pour les Amériques :



■ ASSOCIATION GÉOLOGIQUE DU CANADA

Association géologique du Canada
c/o Department of Earth Sciences
Room ER4063, Alexander Murray Building
Memorial University of Newfoundland
St. John's, NL A1B 3X5 CANADA

Téléphone : 709 737-7660
Télécopieur : 709 737-2532
Courriel : gac@esd.mun.ca
Site Internet : www.gac.ca/bookstore

Pour l'Europe de l'Ouest
et l'Afrique francophone :



■ SOCIÉTÉ DE L'INDUSTRIE MINÉRALE

Société de l'industrie minérale
17 rue Saint Séverin
75005 Paris
FRANCE

Téléphone : +33 (0)1 53 10 14 70
Courriel : contact@lasim.org
Site Internet : www.lasim.org

Ouvrage réimprimé par la Société de l'industrie minérale

17 rue Saint-Séverin

75005 Paris

France

Tél. +33 (0)1 53 10 14 70

Email : contact@lasim.org

Site : www.lasim.org

Édition originale publiée par Géologie Québec

Révision

Les Textes impeccables inc.

Édition

Denis L. Lefebvre, ing.

Graphisme

Charlotte Grenier

Illustrations

Michelle Laithier

Photo de la page de couverture

Front d'exploitation sud de la carrière d'Aggeria (Milos, Cyclades, Grèce), une des plus grandes carrières de bentonite au monde, en exploitation depuis les années 50 où Imerys extrait chaque année près d'un million de tonnes de montmorillonite calcique, pour ses propriétés thixotropiques, sa viscosité et sa capacité d'absorption d'eau et de gonflement, après activation au carbonate de sodium.

Site géologique et touristique remarquable, avec d'impressionnantes variations de couleurs en relation avec l'origine, la nature et l'altération des roches exposées :

- le gris bleu/vert (en bas de la photo) correspond à des séries pyroclastiques altérées en bentonite en milieu marin ;
- l'horizon ocre, juste au-dessus, représente la même formation oxydée ;
- la couleur blanc-crème, au centre de la photo indique la présence de kaolin en liaison avec un crypto-dôme recoupant les séries pyroclastiques ;
- la formation rouge vif et marron foncé (en haut de la photo) correspond à un paléo-fond marin constitué de carbonates avec fossiles et figures de dépôt ; ces derniers sont surmontés par une série de tufs altérés (kaolin + alunite) intercalés avec des horizons à diatomées (couleur crème au-dessus de l'horizon rouge) ;
- la série se termine par des dépôts phréato-magmatiques non consolidés visibles en marron tout en haut de la photo.

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS

vii

CHAPITRE 1 - Ressources minérales et civilisations

1

1.1 Histoire des ressources minérales

3

1.1.1 De la Préhistoire au Moyen Âge

3

1.1.2 De la Renaissance à la Révolution industrielle

7

1.1.3 De la Révolution industrielle à aujourd'hui

8

1.2 Historique de production

9

1.3 Recyclage

10

1.4 Consommation par habitant

17

CHAPITRE 2 - Notions de base et définitions

19

2.1 Fondements des ressources minérales

19

2.1.1 De la cueillette des métaux à la métallurgie

19

2.1.2 Vocabulaire des ressources minérales

24

2.1.3 Échelles de la métallurgie

37

2.2 Typologie et genèse des gîtes minéraux

39

2.2.1 Typologie des gîtes minéraux

42

2.2.2 Genèse des gîtes minéraux

44

CHAPITRE 3 - Méthodes d'études des gîtes minéraux

57

3.1 Morphologie des gîtes minéraux

57

3.1.1 Filons

58

3.1.2 Gîtes stratiformes

59

3.1.3 Amas

62

3.1.4 Disséminations et stockwerks

62

3.1.5 Cheminées

63

3.2 Paragenèses et textures

63

3.2.1 Structures et textures

63

3.2.2 Minéralogie

67

3.2.3 Géothermomètres

72

3.3 Géochimie minérale et altérations

74

3.3.1 Géochimie minérale

74

3.3.2 Altérations

76

3.4 Géochimie isotopique et géochronologie	79
3.4.1 Géochronologie et métallogénie	79
3.4.2 Traçage isotopique et métallogénie	82
3.5 Modélisation et simulation	89
CHAPITRE 4 - Éléments d'économie minière et d'exploration	95
4.1 Minerais, teneurs, réserves et gisements	95
4.1.1 Gisement et minerai : deux notions essentiellement économiques	95
4.1.2 Tonnage et teneur	97
4.1.3 Ressources et réserves	100
4.2 Outils et méthodes de l'exploration minière	103
4.2.1 Méthodes géologiques	109
4.2.2 Méthodes géophysiques	110
4.2.3 Méthodes géochimiques	124
4.2.4 Forages	135
CHAPITRE 5 - Ressources minérales du plutonisme	139
5.1 Gîtes du plutonisme mafique et ultramafique	140
5.1.1 Complexes ignés lités et basaltes des plateaux à chrome, cuivre, nickel et platinoïdes	143
5.1.2 Intrusions ultramafiques à platine magmatique-hydrothermal	151
5.1.3 Komatiites à nickel	153
5.1.4 Anorthosites à titane-fer et anorthosites à nickel-cuivre	155
5.1.5 Ophiolites à chrome et platinoïdes	159
5.2 Gîtes du plutonisme intermédiaire à felsique	162
5.2.1 Pegmatites granitiques à métaux rares	167
5.2.2 Porphyres à cuivre-molybdène-or	174
5.2.3 Porphyres à molybdène	187
5.2.4 Porphyres et coupoles à étain et tungstène	191
5.2.5 Fer-oxydes à cuivre, or et uranium (IOGC)	198
5.2.6 Minéraux industriels du plutonisme felsique	204
5.3 Gîtes du métamorphisme de contact	210
5.3.1 Skarns à tungstène, cuivre et or	211
5.3.2 Cornéennes à andalousite	223
5.3.3 Skarns à wollastonite	224
5.3.4 Mantos à métaux de base	225
5.3.5 Remplacements à or dans des carbonates : type Carlin	226

5.4 Gîtes du plutonisme alcalin	231
5.4.1 Kimberlites et lamproïtes à diamants	235
5.4.2 Carbonatites à terres rares, niobium et tantale	242
5.4.3 Magmatisme alcalin différencié	246
PLANCHES PHOTOS 1 À 16	251
CHAPITRE 6 - Ressources minérales du volcanisme	285
6.1 Gîtes du volcanisme aérien	286
6.1.1 Épithermaux à or, argent et uranium	286
6.1.2 Minéraux industriels et autres ressources minérales	306
6.2 Gîtes du volcanisme sous-marin	312
6.2.1 Volcanisme mafique : les amas sulfurés à cuivre-zinc	319
6.2.2 Volcanisme bimodal et felsique : les amas sulfurés à zinc-cuivre-(plomb)	324
6.2.3 Contexte volcanosédimentaire (SEDEX)	333
CHAPITRE 7 - Ressources minérales des bassins sédimentaires	343
7.1 Gîtes sédimentaires marins	344
7.1.1 Formations de fer rubanées (BIF)	346
7.1.2 Fer oolithique	353
7.1.3 Manganèse	355
7.1.4 Phosphates sédimentaires	358
7.1.5 Barytine marine	361
7.1.6 Carbonates et dérivés, silice et charges minérales	361
7.1.7 Argiles	366
7.1.8 Évaporites marines et hydrothermales	369
7.2 Gîtes diagénétiques marins et continentaux	379
7.2.1 Grès à cuivre et uranium	380
7.2.2 Carbonates à plomb-zinc (MVT)	397
7.2.3 Charbon	403
7.2.4 Hydrocarbures	410
CHAPITRE 8 - Ressources minérales de l'hydrothermalisme continental	419
8.1 Gîtes superficiels en contexte cassant	421
8.1.1 Filons à fluorine-barytine en extension	422
8.1.2 Filons et épidymites à uranium	426
8.1.3 Filons à « cinq éléments »	429

8.2 Gîtes profonds en contexte ductile-cassant	431
8.2.1 Filons à plomb-zinc et à fluorine	432
8.2.2 Cisaillements à or : les <i>shear zones</i> aurifères	435
8.2.3 Filons à antimoine	446
8.3 Gîtes du métamorphisme et du métasomatisme orogéniques	447
8.3.1 Silicates d'alumine	447
8.3.2 Graphite	448
8.3.3 Amiante	450
8.3.4 Talc et pyrophyllite	451
8.3.5 Magnésite	453
CHAPITRE 9 - Ressources minérales climatiques	457
9.1 Gîtes pédogénétiques	460
9.1.1 Latérites et bauxites (Al, Ni, Mn)	463
9.1.2 Chapeaux de fer et enrichissements sur gîtes	475
9.1.3 Gisements résiduels	485
9.2 Gîtes d'alluvions : les placers	487
9.2.1 Placers éluviaux	491
9.2.2 Placers fluviaux : alluvions et paléoalluvions	492
9.2.3 Placers marins	497
9.2.4 Gemmes et autres ressources des placers	499
9.2.5 Paléoplacers deltaïques à or et uranium	500
CHAPITRE 10 - Métallogénie de l'Archéen à l'Actuel	505
10.1 Cycle de Wilson et métallogénie globale	505
10.1.1 Stade de rupture	506
10.1.2 Stade océanique immature	509
10.1.3 Stade océanique avancé	509
10.1.4 Convergence	510
10.1.5 Collision et hypercollision	511
10.2 Exemples d'époques métallogéniques	512
10.2.1 Archéen : l'Abitibi du Canada	512
10.2.2 Protérozoïque inférieur : l'Afrique de l'Ouest	518
10.2.3 Protérozoïque moyen et supérieur : le Grenville d'Amérique du Nord	522
10.2.4 Paléozoïque : l'Hercynien d'Europe	525
10.2.5 Mésozoïque : l'Ouest américain	531
10.2.6 Cénozoïque à Actuel : l'Ouest Pacifique	535

CHAPITRE 11 - Conclusion	541
11.1 Quelques grandes questions	541
11.2 Métallogénie du ^{xxi} e siècle	543
PLANCHES PHOTOS 17 À 32	545
RÉFÉRENCES	579
GLOSSAIRE	611
INDEX MINÉRALOGIQUE	637
INDEX DES GISEMENTS, SITES ET LOCALITÉS	653

AVANT-PROPOS

Les ressources minérales constituent l'une des bases de la Civilisation. Depuis la chasse aux métaux précieux du Paléolithique jusqu'aux recherches visant à découvrir de nouvelles substances, elles n'ont cessé d'être l'un des moteurs, non seulement de l'économie mondiale, mais également du progrès de nos sociétés. Les ressources minérales sont omniprésentes, dans nos constructions comme dans nos moyens de transport et nos instruments de travail; elles ont été indispensables aussi bien au sculpteur de la Renaissance qu'elles le seront au biopharmacien de demain. Bien que depuis la Révolution industrielle au ^{xix}^e siècle, la part des ressources minérales ait constamment baissé dans l'économie mondiale, celles-ci demeurent l'un des principaux enjeux économiques et géopolitiques de la planète. La première mondialisation, à la fin du ^{xix}^e siècle, était largement provoquée par l'internationalisation des compagnies minières, drainant des capitaux en Europe pour les investir dans les pays en développement. La seconde mondialisation, à la fin du ^{xx}^e siècle, repose sur la mise en commun de l'expertise mondiale, avec des capitaux qui proviennent aussi bien du Nord que du Sud, dans un contexte de marché ouvert et transparent. Dans tous les secteurs stratégiques, de l'acier à l'uranium ou au pétrole, les pays développés ont su construire des filières qui leur garantissent un approvisionnement pour les années à venir. Les pays en développement concurrencent pour la rente minière, une rente qui, dans certains cas, s'est beaucoup réduite.

Beaucoup de nos contemporains du ^{xxi}^e siècle, bien à l'abri dans leurs villes en béton et leur automobile en acier et matériaux composites, ont fini par oublier d'où viennent les matériaux qu'ils consomment en quantités de plus en plus importantes. Pour certains, les industries extractives paraissent polluantes, dangereuses, voire superflues eu égard aux progrès du recyclage et des bioénergies. Toutefois, les roches sont têtues. Elles se rappellent à notre mémoire : découverte de substances aux propriétés surprenantes, pénurie de pétrole faisant exploser les cours, exploitations de plus en plus sophistiquées des ressources dans tous les recoins de la planète. L'exploration et l'exploitation continueront : la Terre recèle encore un très grand nombre de gisements qui attendent d'être mis en production. La diversification de nos produits entraînera une diversification de notre production de ressources minérales. Les géologues seront de plus en plus efficaces en comprenant mieux comment se forment les gisements. Avec la prise de conscience du caractère non renouvelable de ces ressources, les exploitants intégreront, progressivement, les souhaits de leurs concitoyens dans leur coût de production. Encore faut-il une démarche d'exploration et d'exploitation plus raisonnée !

Le présent livre est destiné aux géologues, débutants ou d'expérience, qui souhaitent disposer de l'information la plus factuelle possible sur les différents types de ressources minérales. Nous avons tenté de regrouper autour d'un objet, le type de gisement minéral, l'ensemble de l'information, économique, structurale, lithologique, minéralogique, géochimique et minière. Face à

l'éclatement des disciplines, la métallogénie constitue une science fondamentale et appliquée dont la finalité est de décrire les gisements et de guider l'exploration des ressources par une meilleure connaissance des processus de genèse et des guides de concentration. Nous utiliserons ici une approche par environnement géologique. Au cours des différentes phases d'exploration, le géologue progresse par des raisonnements à la fois analogiques et génétiques, en se posant certaines questions : suis-je dans un contexte qui peut contenir des gisements ? À l'échelle régionale, les différents éléments qui contribuent à la formation d'une concentration minérale existent-ils ? L'échelle de l'environnement géologique est donc la plus adaptée : elle fait référence à des paysages types où se forment des concentrations.

De plus, nous avons voulu réconcilier dans cet ouvrage l'ensemble des ressources minérales : minerais, minéraux industriels, matériaux de carrière et substances énergétiques qui résultent tous des mêmes processus de nature géologique et qui, dans bien des cas, s'associent ou se côtoient dans de mêmes environnements avant de jouer des rôles complémentaires dans nos industries. Cependant, le développement des diverses thématiques est inégal : nous avons privilégié les minerais métalliques, mais le lecteur trouvera des éléments sur les minéraux industriels ainsi que sur les ressources énergétiques organiques (pétrole, gaz, charbon) et les matériaux de carrière, complétés par des orientations bibliographiques.

Chaque chapitre présente quelques exemples d'environnements actuels, exemples que nous avons choisis, autant que possible, dans la francophonie afin de permettre à nos lecteurs de se reporter à des environnements connus. Nous espérons ainsi que le livre sera accessible à de nombreux géologues et qu'une meilleure connaissance de la géologie des ressources minérales contribuera, tant au Nord qu'au Sud, à une meilleure gestion de nos approvisionnements et de notre environnement.

La réalisation de cet ouvrage a bénéficié de nombreux appuis, conseils et relectures. Nous remercions plus particulièrement Michel Allard, Marie Auclair, Luc Barbanson, Laetitia Barnier, Abdelhay Belkabar, Lise Boivin, Michel Bonnemaïson, Jean-Louis Bourdier, Yannick Branquet, Isabelle Cadieux, Pierre Castex, Michel Champagne, Luc Charbonneau, Alain Cheilletz, Dominique Cluzel, Michel Cuney, Christian Di Giovanni, Jean-Clair Duchesne, Michel Faure, Stéphane Faure, Damien Gaboury, Michel Gauthier, Olivier Gerbeau, Dan Germiquet, Charlotte Grenier, Charles Gumiaux, Luc Jaillard, Fatima Laggoun-Défarge, Valérie Lancrenon, Nicole Le Breton, Denis Lefebvre, Catherine Lerouge, Cédric Lheur, Jean-Marc Lulin, Louis Madore, Michel Malo, Robert Marquis, Jean-Pierre Milési, Jean-Michel Négroni, Jean-Claude Touray, Gilbert Troly, Max Vidal, et Mohamed el Wartiti.

Nous aimerions remercier l'Université du Québec à Montréal (UQAM) et l'Université d'Orléans, de même que le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie (CRSNG). L'édition a bénéficié de l'appui financier d'IMERYS et de SIDEX que nous remercions également.

Les figures et les planches sont dues au talent de Michelle Laithier (UQAM), avec la collaboration de Nathalie Rouchon (ISTO, Université d'Orléans) et Maryse Marcoux.

Cet ouvrage a été rédigé lors de missions communes de recherche sur plusieurs continents. Il a été écrit à quatre mains grâce aux technologies en réseau qui permettent aujourd'hui une écriture transatlantique. Pour toutes ces années de collaboration scientifique et éditoriale, nous souhaitons remercier de tout cœur notre famille, particulièrement Maryse Marcoux et Dominique Jébrak, et nos enfants, pour leurs encouragements, leur patience et leur compréhension.

Quinze ans après...

Le livre que vous avez entre les mains a été écrit il y a une quinzaine d'années. Sa traduction en anglais, mise à jour, date d'il y a 10 ans. La science des gîtes minéraux progresse au rythme des découvertes minières, et celles-ci prennent du temps : il faut plus d'une dizaine d'années entre l'exploration initiale et la mise en production, et les recherches de 2004 correspondent donc souvent aux productions d'aujourd'hui. L'ouvrage a donc conservé sa pertinence et son utilité pour la formation dans le domaine, d'autant que les besoins globaux en métaux continuent de suivre l'augmentation de la population, plus de 1,5 milliard d'habitants en 20 ans !

Cependant, il ne reflète pas deux grandes tendances qui ont bouleversé le monde minier au ^{xxi}e siècle.

La première est l'éclosion économique de la Chine, devenue première productrice et première consommatrice de la plupart des métaux. De très nombreux gisements chinois ont été décrits et présentent des particularités qui ont permis d'élargir notre compréhension des types géologiques : gisements d'or atypiques, porphyres post-subduction, argiles ioniques à terres rares...

La seconde est la mutation vers une économie décarbonée en réponse au changement climatique ; cette mutation s'accompagne d'une augmentation et d'une diversification de la demande minérale, au point qu'un grand nombre de métaux est classé "critique et stratégique", reflétant leur importance dans un monde géopolitique plus tendu.

La connaissance de la géologie des ressources minérales a progressé significativement, d'autant que l'arrivée de nombreuses équipes de recherches chinoises en Sciences de la Terre a fait exploser le nombre de descriptions et a abouti à plusieurs innovations métallogéniques. En voici quelques éléments significatifs, à ajouter aux chapitres de cet ouvrage. Ils concernent essentiellement les gisements associés au plutonisme, à la sédimentation et ceux associés au climat.

Au chapitre des gisements plutoniques, on a assisté à l'intensification des travaux sur les systèmes porphyriques à cuivre, avec de très nombreuses découvertes en Amérique du Sud, en lien avec la subduction des plaques du Pacifique. Mais la mise en production des porphyres associés à la chaîne himalayenne et au système alpin a fait ressortir l'existence de porphyres post-subduction, qui apparaissent dans un contexte tectonique plus extensif, avec une contribution du manteau plus prononcée. On a également découvert des gisements porphyriques à or dans les terrains précambriens, et notamment dans l'Archéen. Plusieurs nouveaux mécanismes ont été proposés pour la formation des gisements magmatiques, plaidant notamment pour la cristallisation d'abondants sulfures précoces dans les porphyres, ou pour une flottation naturelle dans les systèmes à fer de type Kiruna. Les pegmatites ont aussi vu leur intérêt s'accroître grâce à leurs concentrations en éléments rares, lithium, scandium, tantale ou terres rares.

Au chapitre des gisements sédimentaires, l'importance économique des lacs salins, les salars de l'altiplano ou du Tibet, est grandissante. Au-delà des gisements de bore décrits dans le livre, les salars produisent aujourd'hui près de la moitié du lithium dans le monde, un élément essentiel pour l'électromobilité ou le stockage des énergies intermittentes. Des ressources considérables ont aussi été mises en évidence dans les argiles de paléo-salars, dans l'Ouest américain, alors qu'on découvrait en Serbie des concentrations de lithium plus anciennes également associées à des lacs salins. Tous sont de nouveaux environnements favorables à des concentrations minérales, à la limite des métaux et des matériaux industriels.

Au chapitre des gisements climatiques, les progrès de l'hydrométallurgie ont permis d'exploiter les gisements de nickel latéritiques réfractaires. Les artisans du sud de la Chine ont su développer la production de terres rares lourdes en s'attaquant à des argiles d'altération des plutons différenciés. Ce sont les terres rares ioniques, exploitées maintenant aussi au Myanmar et connues à Madagascar. Et on voit se dessiner des exploitations potentielles de saumures enrichies en lithium. De nouvelles lignes de développement donc pour la géologie des gîtes minéraux.

Enfin, nous annonçons en conclusion le développement d'une approche de plus en plus globale sur les gisements minéraux, inspirée par le monde pétrolier ; depuis plus de 10 ans, l'approche 'mineral system', développée par les équipes australiennes, a structuré avec succès les démarches de métallogénie régionale prédictive pour de nombreuses substances minérales. Elle profite beaucoup de l'accroissement des capacités informatiques en 2 et 3 D. Et elle connaîtra un déploiement supplémentaire avec l'arrivée des techniques d'intelligence artificielle générative, intégrant les concepts, les données, et des éléments du raisonnement géologique.

Ainsi, le livre que vous avez entre les mains constitue la base d'une connaissance vivante, et dont la mise à jour sera de plus en plus portée par des supports au-delà du papier ! Bonne lecture !

Michel Jébrak et Éric Marcoux, 2023

Préface de l'édition originale de Dan Germiquet en 2008

Les minéraux industriels sont partout dans notre vie quotidienne. La kaolinite et la calcite donnent naissance au papier et à la peinture. L'andalousite et les chamottes permettent aux hauts-fourneaux de fabriquer nos aciers. Les feldspaths et les argiles fournissent carrelages et sanitaires. La diatomite filtre les huiles et boissons de nos supermarchés. Le talc entre dans la composition de la plupart des cosmétiques ainsi que des plastiques de nos voitures. Et nous avalons des comprimés, constitués pour l'essentiel de calcite, pour ne citer que quelques exemples. Mais curieusement, cette omniprésence va de pair avec une incroyable discrétion qui les rend invisibles aux yeux du grand public.

Imerys, leader mondial des minéraux industriels, fort de 17 500 collaborateurs, est présent dans 47 pays. Le Groupe, qui approvisionne de très nombreuses filières industrielles, occupe une position stratégique internationale. Parce que les ressources minérales constituent le socle de nos métiers, nous attachons une grande importance au recrutement de géologues compétents. Notre avenir dépend en effet en grande partie de notre aptitude à maintenir et développer notre niveau d'expertise en ressources minérales. Un géologue compétent, c'est la garantie d'un accès à une ressource de qualité, adaptée aux besoins d'un marché en perpétuelle évolution. Il doit être capable de chercher les ressources, de les acquérir, de les exploiter de manière raisonnée et optimisée dans un contexte de développement durable et de sécurité.

Cette vision prospective implique l'existence de centres d'enseignement supérieur performants, assurant une formation en adéquation avec nos besoins : géologie de terrain optimisée, géologie et économie des ressources minérales, pratique approfondie des outils géomatiques modernes, connaissance de l'anglais, notamment. L'ouvrage didactique des Professeurs Jébrak et Marcoux est un élément clé qui ne peut que contribuer à une formation de qualité de nos géologues. Il comble un vide de la littérature et je ne doute pas qu'il suscite des vocations dans un domaine où l'offre d'embauche a explosé ces dernières années. C'est à notre avis un des rôles des acteurs de l'industrie minérale que d'encourager et de promouvoir des ouvrages de référence de ce type. Imerys est heureux d'avoir pu apporter sa contribution.

Dan Germiquet †
Imerys Group Chief Geologist