

Recyclage des métaux : mimer les processus naturels

Bruno Goffé est chercheur au Centre de recherche et d'enseignement des géosciences pour l'environnement (CEREGE), à l'Université d'Aix-Marseille. Après avoir été directeur adjoint de l'Institut national des sciences de l'univers (INSU), il est aujourd'hui en charge de la question du suivi des actions de recherche sur les ressources géologiques au niveau national pour le CNRS et l'INSU. Il est co-coordonateur du réseau de recherche européen ERA-MIN, sur les ressources minérales. Dans ce chapitre, il aborde en particulier la question des métaux, leur raréfaction et leur recyclage éventuel, avec une approche alliant la chimie et la géologie.

1 Les besoins de l'humanité en métaux et les réserves de la Terre

1.1. Des besoins accrus et une montée de la concurrence mondiale

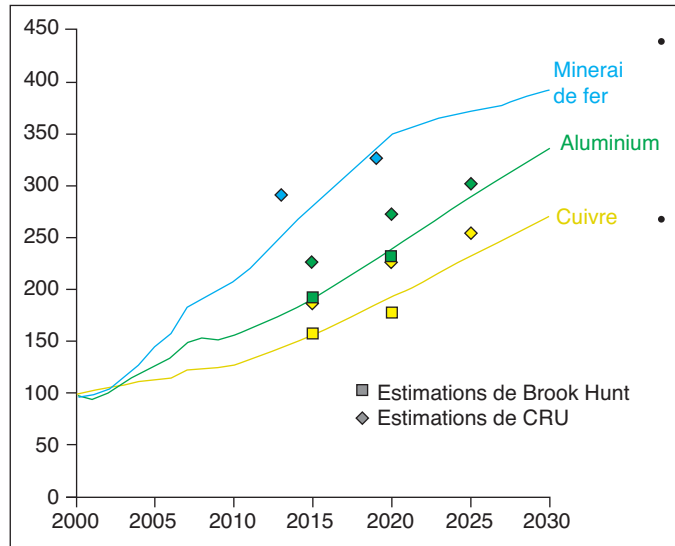
Dans quarante ans, la population de la Terre sera de neuf milliards d'individus et les besoins en métaux égaleront, dans cet espace de temps, la totalité des besoins de l'humanité depuis les origines. Nos besoins se seront multipliés par quatre

entre 2000 et 2030, et ils continueront à croître (**Figure 1**).

Depuis le début du XX^e siècle, on a multiplié notre consommation de métaux par un facteur dix et la concurrence pour les ressources s'exacerbe ainsi logiquement ; à titre d'illustration, la **Figure 2** montre les prises de participation de la Chine en 2004, 2009 et 2010, dans les mines de métaux, des comparaisons qui parlent d'elles-mêmes. Encore d'autres chiffres ?

Figure 1

Estimation sur une base cent en 2000 de l'évolution de la consommation globale en trois métaux de base (les autres métaux croissant de 3,6 % par an) : une demande considérablement accrue, d'après une analyse de Rio Tinto 2010.



Aujourd'hui, de nouveaux besoins en métaux apparaissent du fait du développement des nouvelles technologies : information et communication, nucléaire (zirconium et béryllium), économies d'énergie (lampes à basse consommation), batteries, éoliennes, solaire photovoltaïque, etc., qui demandent du gallium, du lithium ou encore de l'indium. La **Figure 3**, dessinée d'après Christian Hocquard (Bureau de recherches géologiques et minières, BRGM), montre une évolution typique des prix en fonction de la demande : si la demande devient trop forte, les prix montent, de nouveaux producteurs ou de nouvelles technologies plus matures se présentent alors et les prix chutent. Ce genre d'évolution est important à comprendre car il détermine la première dimension de ce qu'on appelle « les réserves » exploitables pour un élément qui sont clairement dépendantes des cours. On voit l'effet de l'ap-

parition de nouveaux besoins : pour le gallium par exemple, la demande de l'industrie des diodes lumineuses a été accrue par celle des écrans plasma.

Les analyses de la disponibilité d'un élément – ce qui revient au même que la mesure des risques de pénurie en cet élément – se font à l'aide de « matrices de criticité », dont la **Figure 4** donne des exemples. Elles sont spécifiques d'une technologie et de la perspective de l'analyse (court, moyen ou long terme).

Les ressources minérales sont aussi très impactées par la géopolitique. La Chine a ainsi mené une politique particulièrement active depuis deux décennies, et la **Figure 5** en traduit les résultats de façon particulièrement frappante : elle montre les éléments dont la Chine est le premier producteur mondial et la proportion qu'elle en contrôle. On compte aujourd'hui vingt huit, alors qu'elle en était à quatre

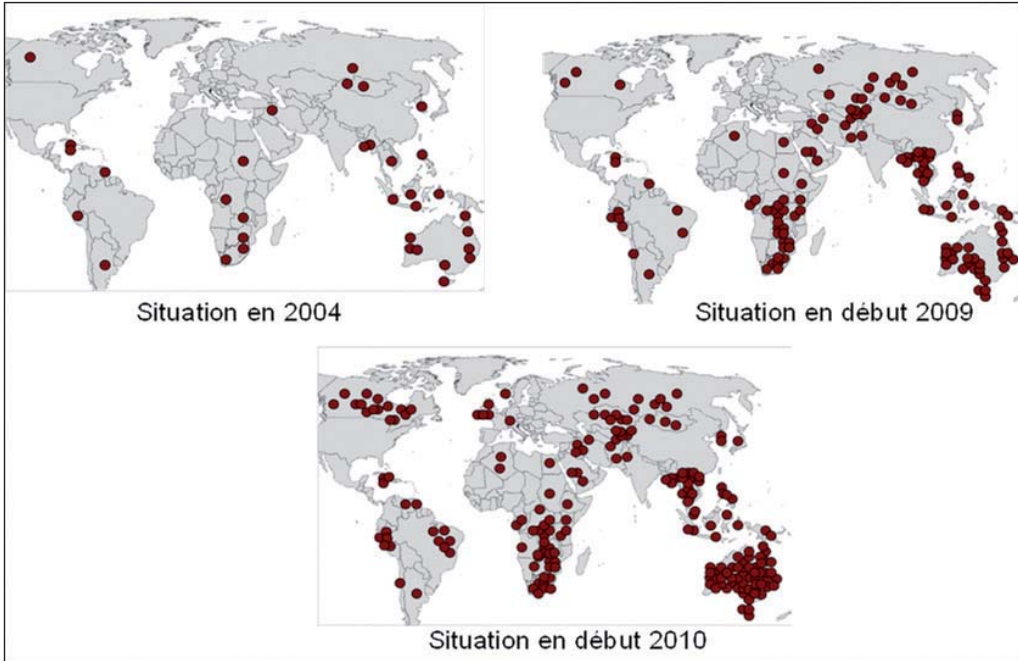


Figure 2

Prises de participations chinoises dans l'industrie minière mondiale.

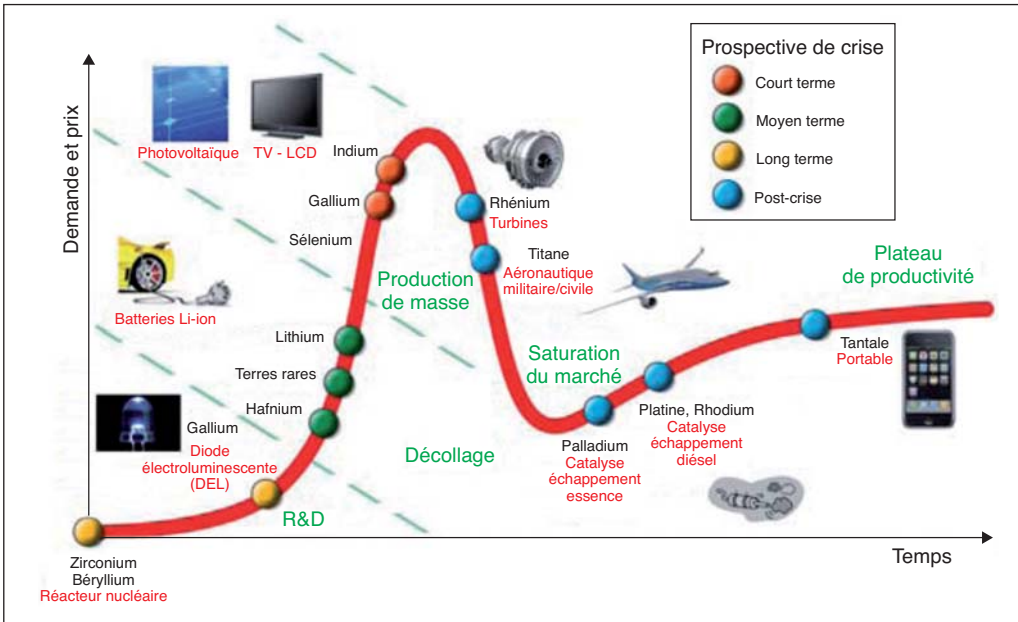


Figure 3

Évolution du prix des métaux en fonction de la demande, montrant un besoin croissant de nouveaux métaux, indispensables au mode de vie « high-tech ».

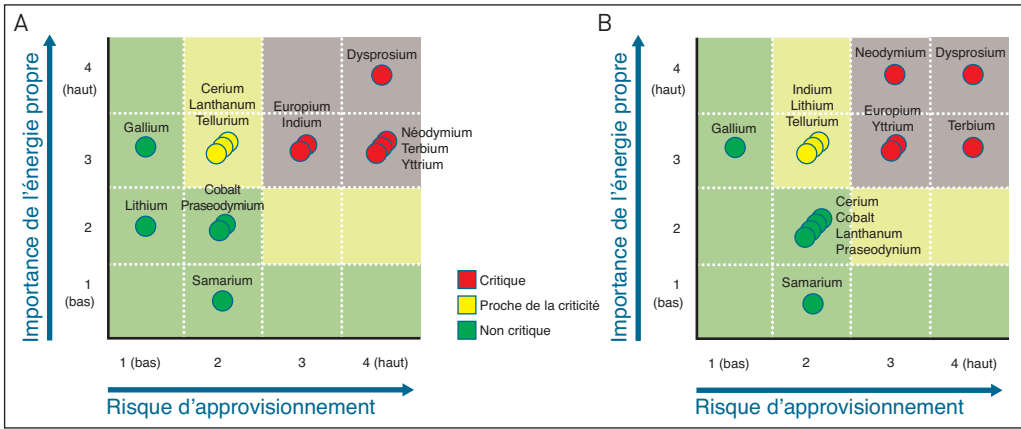


Figure 4

Matrices de criticité à court terme (A : 0 à 5 ans) et à moyen terme (B : 5 à 15 ans) selon le Department of energy (DOE, États-Unis) pour le développement des énergies renouvelables.

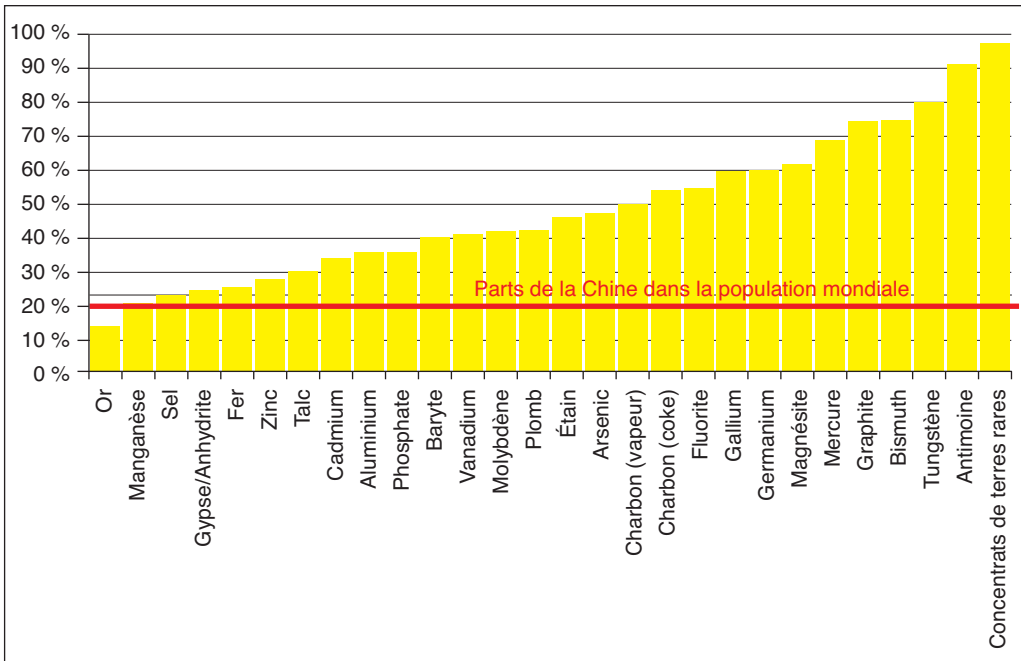


Figure 5

Taux de production minière de la Chine en % de la production mondiale pour les vingt-huit matières premières dont elle est le premier producteur (d'après Patrice Christmann, BRGM 2011, World Mining data). Ces chiffres montrent un impact fort des stratégies géopolitiques de ce pays.

il y a une quinzaine d'années ; c'est ainsi presque la totalité des approvisionnements en terres rares qui sont contrôlés par la Chine, résultat d'une stratégie complètement rai-

sonnée. Cette situation est autant le fruit d'une politique des ressources que de la répartition naturelle ; elle montre ainsi le deuxième contrôle, après celui des coûts de la

relativité, de ce qu'on appelle « les réserves ». Ainsi, pour les terres rares, les estimations les plus récentes de la répartition géographique des ressources mondiales montrent que la Chine n'en possède que 31 % (et en produit 100 %), alors que la CEI en possède 22 %, les États-Unis 15 %, l'Australie 6 %, l'Inde 1 %, tandis que l'Europe n'apparaît pas dans le classement. Il est fort peu probable que l'Europe en soit dépourvue, sa géologie assez diverse n'est pas significativement différente du reste de la planète. Il s'agit plus probablement d'un manque de données, la recherche et la prospection n'ayant pas été faites sur ces éléments, l'Europe préférant se fournir chez des pays à faible PIB, pratique qui était généralisée jusqu'à récemment. Il est ainsi probable que si l'on cherche, on trouvera des terres rares en Europe ; ce qui ne veut pas dire que l'on pourra les extraire tant les coûts environnementaux, pour un traitement propre et acceptable, sont élevés. Mais cela pourrait devenir, en cas d'une hausse des cours, une réserve stratégique.

En fait, les terres rares ne sont pas si rares que cela, comme le montre la **Figure 6** : il y a pratiquement autant de cérium sur Terre que de nickel ou de cuivre ; lanthane et yttrium sont plus abondants que plomb, étain ou molybdène, la terre rare la plus rare étant le lutétium, juste derrière le molybdène.

La dépendance par rapport aux métaux est particulièrement critique pour l'Europe, qui est *a priori* grosse consommatrice du fait de son

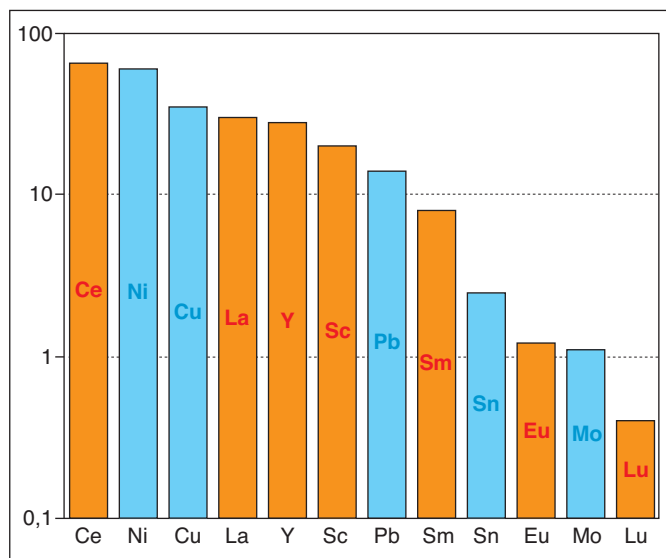


Figure 6

Abondance relative de terres rares dans la croûte terrestre (en %).

activité industrielle dans les domaines de haute technologie, mais très peu productrice soit du fait de sa géologie, soit plus probablement parce que la recherche et les investissements nécessaires n'ont pas été menés depuis les années 1980 (**Tableau 1**). Le cuivre et le chrome sont les matières pour lesquelles nous avons le moins de dépendance, mais elle est tout de même de 74 %.

1.2. L'épuisement des ressources naturelles

Depuis au moins une génération, la notion de « finitude » des ressources naturelles est une hypothèse activement considérée. Pour les hydrocarbures, l'outil « peak oil », a été rendu populaire. Il y a une tendance pour l'appliquer aux autres matières premières. Cet outil tente de décrire le moment où la consommation de la matière considérée dépasse sa production.

Tableau 1

Taux de dépendance de l'Europe aux principales matières premières non énergétiques. L'Europe produit environ 3 % des matières premières qu'elle utilise. En gras apparaissent les matières premières pour lesquelles la Chine est le premier producteur.

Sources (2009) : USGS, BRGM, PGI, WMD.

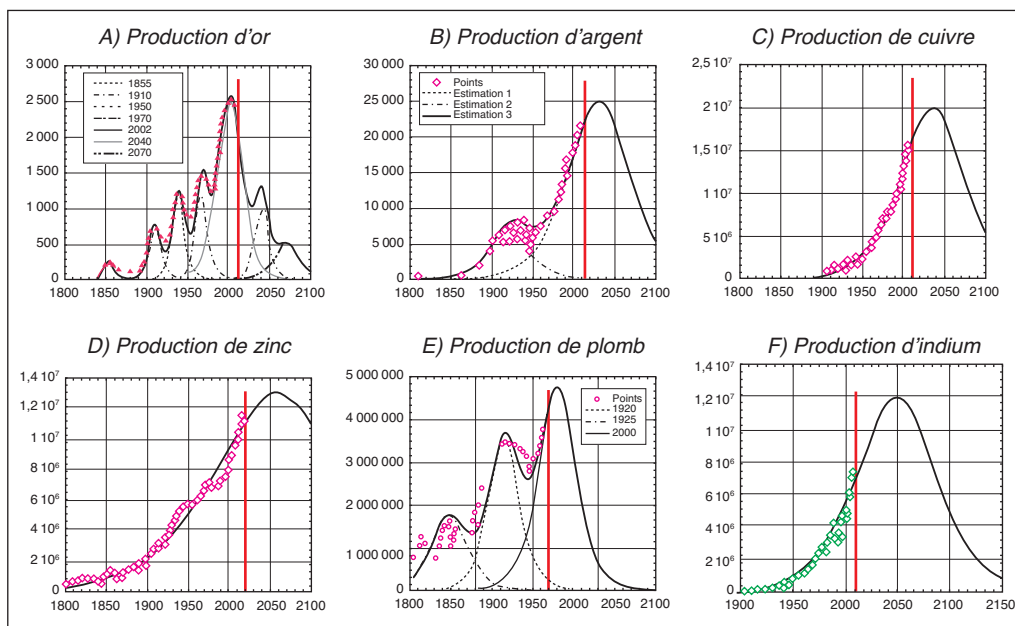
Antimoine	100 %	Vanadium	100 %
Beryllium	100 %	Étain	100 %
Bore	100 %	Phosphates	92 %
Manganèse	100 %	Rhénium	90 %
Cobalt	100 %	Nickel	86 %
Molybdène	100 %	Minerai de fer	83 %
Niobium	100 %	Bauxite	80 %
Platinoïdes	100 %	Zinc	80 %
Terres rares	100 %	Tungstène	76 %
Tantale	100 %	Plomb	76 %
Titane	100 %	Cuivre	74 %
Germanium	100 %	Chromite	53 %

L'arrivée du pic est le signal d'alerte sur la disparition ou l'extrême raréfaction de la matière considérée. La **Figure 7** montre un exemple de cette notion appliquée à des ressources minérales diverses et la comparaison avec la variation de la production – constatée ou extrapolée – en fonction du temps pour ces matières premières. L'existence de pics est manifeste ; en fait, il existe plusieurs pics, car leur détermination dépend à la fois de l'évolution des besoins, des capacités de production en fonction de l'état de la technologie, du succès des campagnes de découvertes de nouvelles ressources ou simplement le changement d'usage. La **Figure 7** montre que pour les éléments métalliques clés, nous ne sommes souvent, à comportement constant, qu'à

un petit nombre de décennies du pic annonciateur de pénurie.

1.3. L'importance du recyclage

Cependant, à la différence des matières combustibles, les métaux ne disparaissent pas ; on peut les recycler. Le **Tableau 2** donne les estimations de durées de disponibilité pour un certain nombre de métaux : fer, aluminium, nickel, cuivre, zinc (métaux de base) ou manganèse, indium, lithium (petits métaux ou métaux stratégiques). Ce tableau, dont on peut certainement discuter la valeur des chiffres mais qui a le mérite de visualiser le problème, montre l'importance du recyclage : si l'on ne fait rien, on a devant nous 79 ans pour le fer, 132 ans pour l'aluminium,


Figure 7

« Peak » de matières premières minérales, sur la base des méthodologies d'évaluation des réserves développées pour le pétrole (Hubberts, 1966). Harald Sverdrup (2012) propose un « peak » matière première. Une nouvelle notion apparaîtrait-elle, la « finitude » des ressources minérales ?

Tableau 2

Estimations de durées de disponibilité pour un certain nombre de métaux, sans ou avec recyclage. D'après Harald Sverdrup (2012).

Élément	Années avant pénurie sans recyclage	Selon taux de recyclage				Autre scénario	
		50 %	70 %	90 %	95 %	95 % + 3bn	95 % + 3bn+1/2
Les métaux de structure							
Fer	79	126	316	316	632	1,263	2,526
Aluminium	132	184	461	461	921	1,842	3,684
Nickel	42	42	209	419	838	1,675	3,350
Cuivre	31	31	157	314	628	1,256	2,512
Zinc	20	37	61	61	123	245	490
Métaux stratégiques et matériaux							
Manganèse	29	46	229	457	914	1,829	3,668
Indium (Zn)	19	38	190	379	759	1,517	3,034
Lithium	25	49	245	490	980	1,960	3,920

42 ans pour le nickel, 31 ans pour le cuivre, 21 ans pour le zinc et 20 ans pour le manganèse, l'indium et le lithium. Un taux de recyclage de 50 %, 70 %, 90 % ou 95 % multiplie cette disponibilité respectivement par 2, par 3, voire presque 7 ou 8. En prenant de surcroît en considération des facteurs d'éducation des populations sur la gestion des déchets et des usages, on peut arriver à des durées de disponibilité extrêmement élevées, qui peuvent se chiffrer en milliers d'années. Au-delà de ces chiffres, à retenir donc : le recyclage des métaux est de première importance ; il est vital que nous parvenions à le mettre en œuvre.

Lorsqu'on intègre ces concepts, on établit des schémas de cycles de vie (*Figure 8*). La matière première entrée dans le cycle sert à la fabrication des objets, dont le recyclage après utilisation est une nouvelle source de matière première, etc. On peut durer ainsi des milliers

d'années, comme indiqué plus haut, mais ceci demande de l'énergie – remarque qui nous renvoie à une autre boucle de cycle de vie qui demanderait encore des développements complémentaires à ce que nous traitons ici.

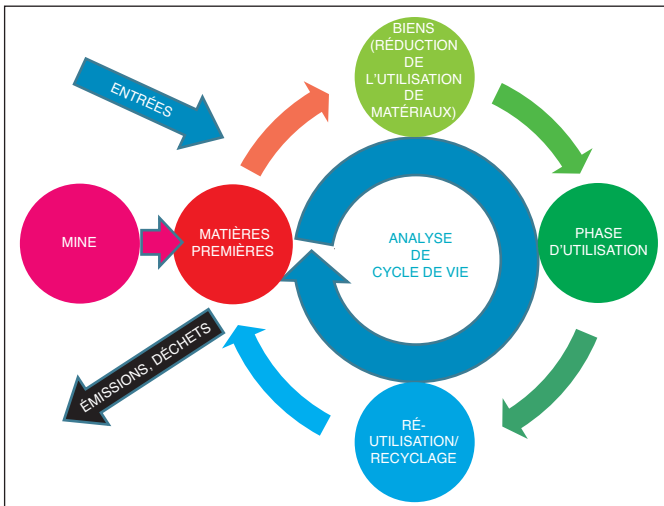
2 Comment la nature gère les matières métalliques

2.1. La Terre et ses ressources en métaux

Un schéma éclaté de la Terre fait apparaître : le noyau, le manteau puis la croûte qui est une fine pellicule superficielle animée de mouvements horizontaux provoquant des ruptures lors des compressions ou les extensions aux limites ou au sein des plaques (*Figure 9*). La carte de la *Figure 10* représente les grandes plaques continentales. On distingue les rides médio-océaniques d'où les continents s'écartent (accrétion océanique) et, par exemple en Indonésie, la subduction où la croûte rentre sous la plaque supérieure. C'est le fonctionnement fondamental de la Terre ; on y voit à l'œuvre le refroidissement continu, évacuation de la chaleur radioactive interne de la Terre sans laquelle la vie n'aurait été possible. Ces mouvements, par le brassage de la matière qu'ils effectuent, expliquent la plupart de la répartition de ressources en métaux à la surface de la planète, des grandes mines du Chili issues du volcanisme des cordillères aux mines de nickel du grand Nord canadien issues

Figure 8

Une vision intégrée du cycle des matières premières pour leur gestion durable.



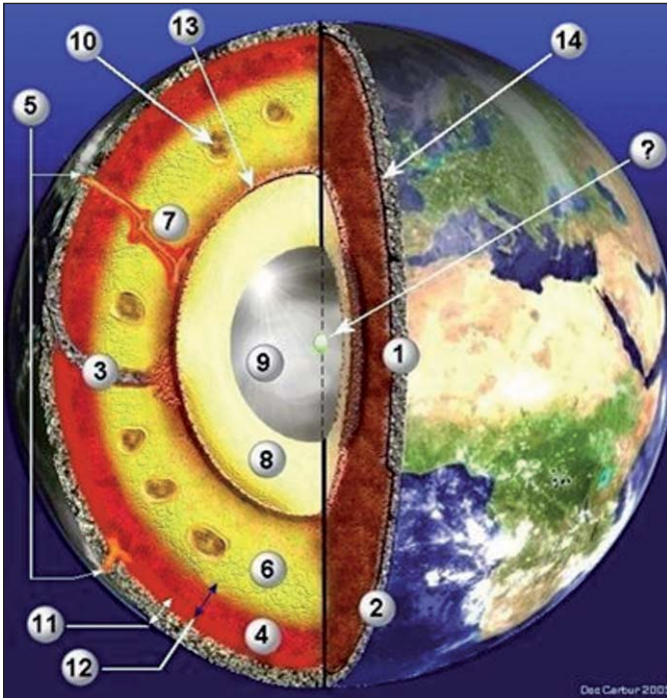


Figure 9

Structure interne de la Terre. Le cycle des métaux est essentiellement contrôlé par la dynamique interne de la Terre au niveau de la croûte.

- 1) Croûte continentale ;
- 2) Croûte océanique ;
- 3) Zone de subduction ;
- 4) Manteau supérieur ;
- 5) Zones de volcanisme actif ;
- 6) Manteau inférieur ;
- 7) Panache de matière chaude ;
- 8) Noyau externe ;
- 9) Noyau interne ;
- 10) Cellules de convection du manteau ;
- 11) Lithosphère ;
- 12) Asthénosphère ;
- 13) Discontinuité de Gutenberg ;
- 14) Discontinuité de Mohorovicic.

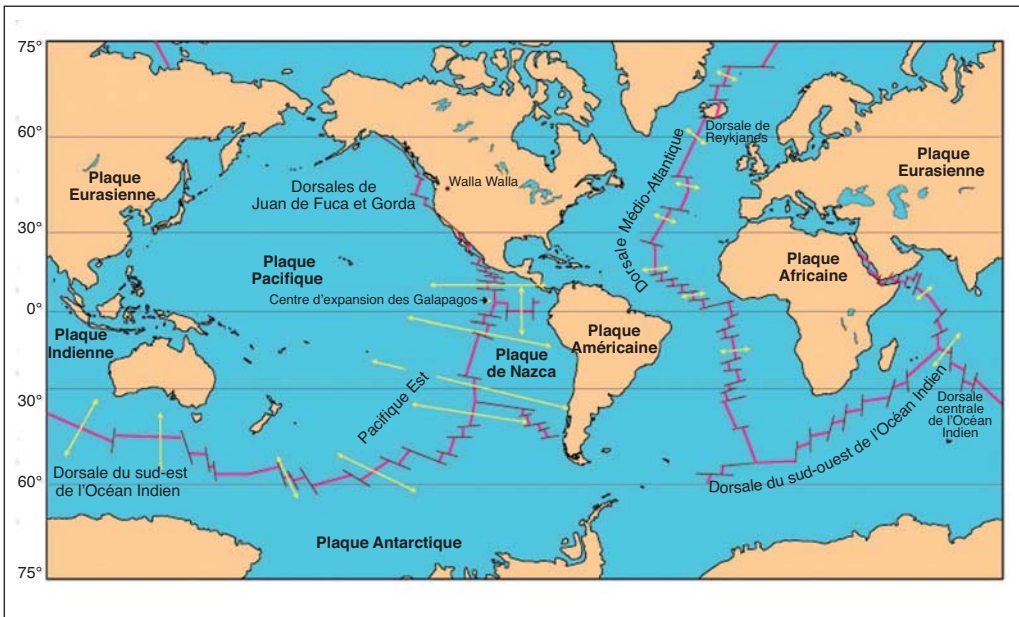


Figure 10

Les grandes plaques continentales et les rides médio-océaniques.

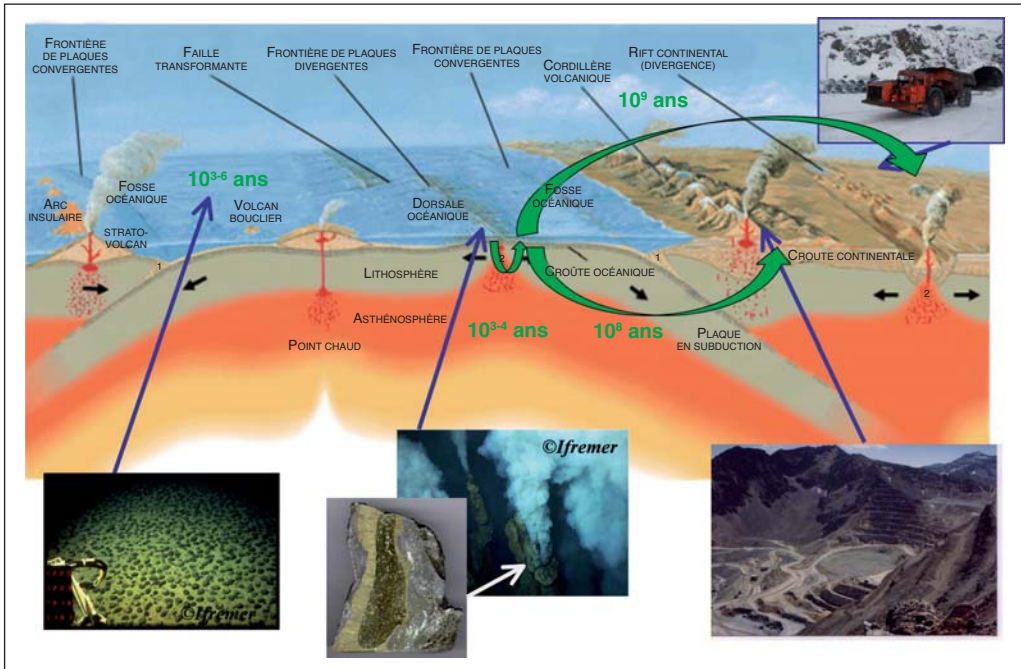


Figure 11

Principaux cycles naturels des métaux replacés sur une coupe schématique de la Terre visualisant les océans, les continents (mine en Arctique), les zones de subduction sous les Cordillères (mine au Chili) et sous les arcs volcaniques, une ride médio-océanique (fumeurs, photo Yves-Fouquet, Ifremer), plateaux sous-marins de type Pacifique (nodules métalliques, photo Ifremer).

d'anciens océans incorporés au continent. C'est en effet dans les océans que se génèrent beaucoup des gisements métalliques des continents où ils ont été agrégés par la tectonique des plaques. Il existe deux grandes sources de métaux en formation au milieu des océans (Figure 11), ce sont 1) les encroûtements métalliques des rides océaniques qui, outre les gaz qu'ils émettent par les fumeurs, précipitent les métaux sur le fond des océans¹ et 2) les nodules polymétalliques qui précipi-

tent sur les grands plateaux sous-marins comme ceux du Pacifique. Enfin, le dernier acteur des concentrations métalliques est le climat qui, à travers l'altération tropicale, concentre l'aluminium et les éléments qui lui sont associés comme le gallium par altération des sols.

Nous voyons donc que la nature contrôle les mécanismes de production de gisements de métaux et leur émergence à la surface ou proche de la surface à travers des cycles dont les constantes de temps vont du milliard d'années, pour les métaux liés aux anciennes ceintures océaniques localisées en milieu continental

1. Voir *La chimie et la mer, ensemble au service de l'homme*, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, EDP Sciences, 2009.

(actuellement les plus exploitées), à quelques milliers d'années pour les métaux précipitant aux rides océaniques actuelles (non encore significativement exploitées) (voir la **Figure 11**). Le cycle de fabrication dans les Cordillères de type Andin, dans lesquelles sont situées les plus grandes mines de cuivre actuelles, est quant à lui d'une à quelques centaines de millions d'années. Cependant, dans certains cas, comme celui du fer dans les gisements très anciens de plus de trois milliards d'années, la minéralisation restera un cas unique, non renouvelable, puisque lié à la particularité de l'atmosphère primitive.

2.2. L'eau, acteur principal de la minéralisation de la Terre

Partout sur les continents et dans les océans, l'eau s'infiltré dans la croûte depuis la surface, entraînée dans la subduction ou expulsée des profondeurs par la déshydratation ou la fusion des roches. Cette eau, dont les propriétés changent avec la profondeur, devient ainsi un fluide particulier que les géologues ont classifié en fonction de la provenance ou de la localisation (**Figure 12**) : d'un côté les fluides météoriques, issus de la surface et descendus dans la croûte ; de l'autre, les fluides des bassins, les mêmes initialement, mais plus âgés et ayant interagi longuement avec les roches ; les fluides magmatiques qui viennent des profondeurs de la Terre et issus des magmas ; les fluides métamorphiques

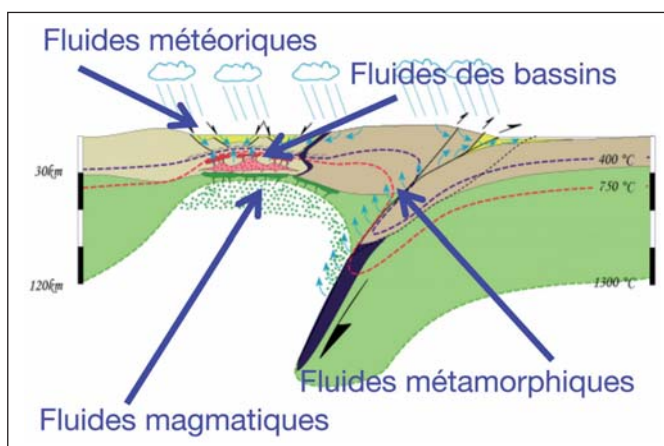


Figure 12

Les différents types de fluides et leur localisation.

qui proviennent des minéraux hydratés descendus dans la croûte, déshydratés par chauffage, dont l'eau est ensuite expulsée.

Tous ces fluides ont des capacités de solubilisation des éléments importantes qui sont à la source des minéralisations constatées sur la Terre. Le **Tableau 3** donne les concentrations moyennes sur Terre en un certain nombre d'éléments métalliques et les concentrations auxquelles on a affaire

Tableau 3

Concentrations moyennes d'éléments métalliques sur Terre et dans les sites miniers.

Source : Gleb Pokrovski GET, CNRS, Université Paul Sabatier, Toulouse.

Métal	Concentration moyenne dans la croûte (ppm)	Teneur typique dans les gisements (ppm)
Or	0,0015	1,0
Cuivre	30	10 000
Zinc	70	20 000
Argent	0,050	50
Platine	0,0005	0,5

dans les sites miniers. On voit qu'un facteur de plusieurs milliers peut les séparer tant a été efficace le pouvoir de redistribution de l'eau.

2.3. Mécanismes physico-chimiques de la concentration des métaux dans la Terre

Selon les situations rencontrées au niveau de la surface ou en profondeur dans la croûte terrestre (volcans, subduction), les conditions de pression et de température peuvent être extrêmement variables (Figure 13), les pressions pouvant atteindre une dizaine de milliers de bars et les températures près de 1000 °C. L'eau est alors supercritique et possède un très fort pouvoir de dissolution, en particulier pour les métaux ; il s'agit de fluides hydrothermaux assez bien

connus jusqu'à 5000 bars et 500 °C, ou beaucoup moins bien au-delà pour les fluides très profonds et très chauds dans des systèmes plus complexes (moins d'eau, présence d'autres éléments minéralisateurs comme le soufre). La trace de ces fluides peut être retrouvée dans les roches, sous forme d'inclusions, et c'est ce qui permet aux géochimistes de la caractériser (**Encart : « Les inclusions fluides dans les roches »**).

Avec l'aide de ces études, on peut reconstituer les phénomènes qui ont conduit à la minéralisation des roches. La Figure 15 en illustre les trois principaux :

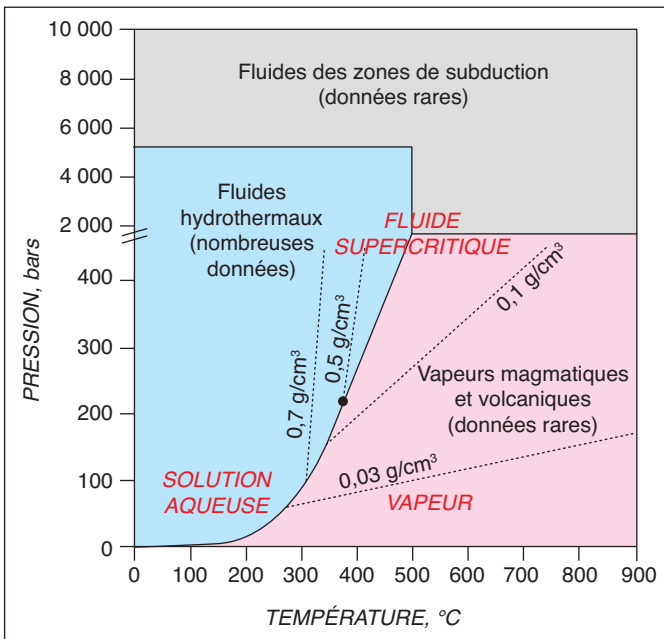
- dissolution de la roche par un fluide aux conditions de pression et température adaptées ;
- transport de ce fluide par les phénomènes géologiques ;
- précipitation dans de nouvelles conditions physico-chimiques qui résulte en minéralisation.

La Figure 15 illustre d'un côté la dissolution d'un hydroxyde d'aluminium (diaspore, bleu et frange verte, photographié au microscope polarisant) et son remplacement par un silicate d'alumine (pyrophyllite, fibres avec des teintes délavées), qui représente ainsi une minéralisation à petite échelle, et de l'autre une ancienne fracture ouverte d'une roche (appelée veine, dans laquelle ont précipité des minéraux), qui représente une minéralisation de plus grande échelle.

Dans beaucoup de cas, les phénomènes naturels sont en fait plus complexes que ces cas d'école et conduisent à une ségrégation des

Figure 13

État de connaissance des fluides géologiques.



LES INCLUSIONS FLUIDES DANS LES ROCHES

La **Figure 14** montre une roche minéralisée (ici du quartz) et une lame mince qui en a été extraite pour l'étude. L'examen au microscope montre des alignements de petites inclusions fluides qui, examinées à plus forts grossissements, font apparaître leur structuration interne. Elles contiennent souvent une partie gazeuse (ici du CO_2) et une partie liquide (ici du CO_2 et un liquide aqueux). On peut également dans certains cas distinguer des précipités solides (sel halogéné, carbonate). L'échelle de ces inclusions est de l'ordre de quelques microns.

La physico-chimie, pour analyser les inclusions fluides

La physico-chimie offre des techniques puissantes pour analyser ces inclusions. Parmi celles-ci on peut citer l'ablation laser couplée à la spectrométrie de masse (au sujet de la spectrométrie de masse, voir le **Chapitre de M. Coquery/S. Martin Ruel**). Le laser perce un trou dans la paroi de l'inclusion et le spectromètre de masse recueille le gaz qui en sort et l'analyse. Le signal du spectromètre de masse montre la grande multiplicité des éléments présents dans l'inclusion : ce sont ces fluides qui portent les minéralisations.

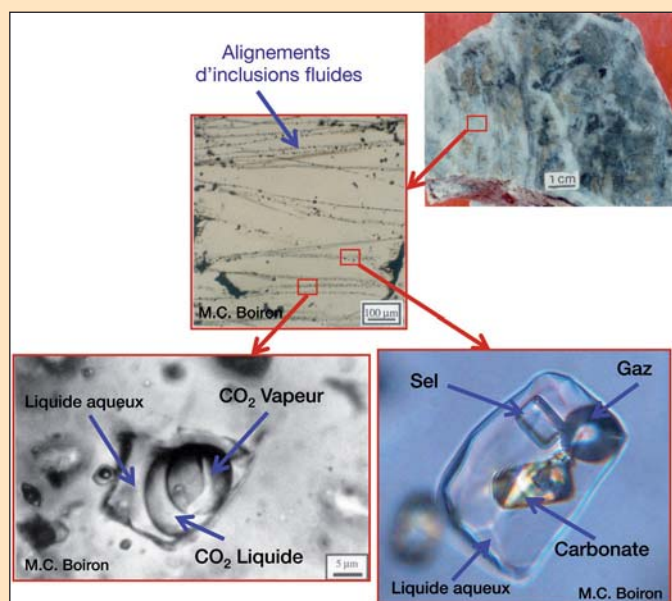


Figure 14

Examen microscopique du quartz montrant des alignements d'inclusions fluides.

éléments qui est réellement à la base de la mine qu'utilise le mineur. La **Figure 16** représente une ancienne bauxite, minerai d'aluminium formé principalement d'aluminium et de fer, de silice, d'oxygène et d'hydrogène, et plus minoritairement de silicium, lithium, sodium et potassium,

qui depuis sa formation en surface il y a deux cents millions d'années a été enfouie il y a une trentaine de millions d'années dans des conditions de pression et température élevées, puis restituée à la surface.

Au cours de ces événements, des processus de dissolution

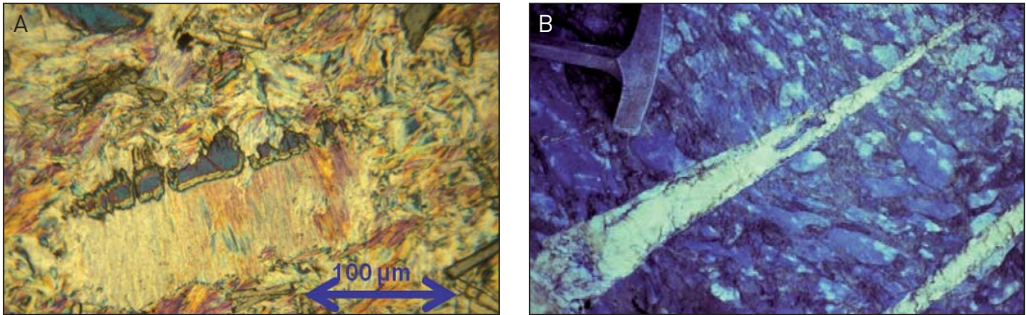
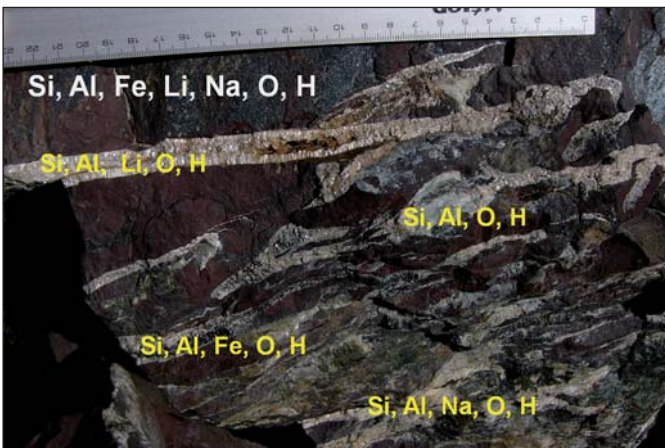


Figure 15

Illustration en microscopie optique. A) Un diaspore (hydroxyde d'aluminium) se dissout et est remplacé par une minéralisation de pyrophyllite (silicate d'hydraté d'aluminium) qui en garde la forme ; B) une veine minéralisée par un carbonate de fer, du quartz et de la cookéite (silicate alumineux de lithium) dans un conglomérat métamorphique.

Figure 16

Processus de tri des éléments par dissolution et précipitation dans la bauxite.



et précipitation du type de ceux décrits précédemment ont pris place et ont conduit à une sélection des éléments par la succession des conditions physico-chimiques au cours du temps. La **Figure 16** montre que dans une veine, seul le lithium a été concentré avec le silicium et l'aluminium sous forme de cookéite, dans telle autre, ce sera, toujours avec le silicium et l'aluminium, le fer sous forme de chloritoïde (ou seul sous forme d'oxyde),

tandis que dans une autre ce sera le sodium sous forme de paragonite, ou encore le potassium sous forme de muscovite. Chaque mécanisme d'ouverture d'une veine a donné naissance à une minéralisation spécifique, formant ainsi des ensembles extractibles qui peuvent être utilisés, s'ils étaient abondants, comme un minerai de l'élément considéré.

2.4. La répartition des métaux à l'échelle de la Terre

Les fluides s'infiltrent dans la Terre : ils se réchauffent et montent en pression, puis remontent – leurs température et pression diminuent alors – pour finalement ressortir. Au cours de ce trajet, les équilibres évoluent, les éléments peuvent se dissoudre ou au contraire précipiter en fonction des équilibres locaux (**Figure 17**). La répartition finale traduit la multiplicité de ces équilibres.

Par ailleurs, la chimie enseigne aussi que les températures

élevées stabilisent les structures silicatées contenant des éléments lourds : dans les roches de haute température du métamorphisme on trouve ainsi les minéraux ayant des concentrations en éléments lourds élevées (par exemple des grenats). Aux basses températures c'est le contraire, ceux-ci restent en solution. Par conséquent, à haute température en profondeur, on trouve des éléments lourds dans les minéraux silicatés, tandis qu'à basse température, ces éléments se trouvent dans la solution (l'eau de mer par exemple), les minéraux silicatés en étant pauvres (argiles). L'étude d'un système simple constitué par un mélange de quartz (SiO_2) et de talc [$\text{Si}_4\text{Mg}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$] dans l'eau illustre bien cette propriété fondamentale. La **Figure 18** donne les courbes de solubilité pour ce système : la concentration en magnésium dissous diminue très fortement quand la température augmente ou la pression diminue ; pour la silice au contraire, la concentration augmente fortement quand

la température augmente. Chauffer une roche dans un fluide aqueux qui contient ce mélange déplace l'équilibre vers des concentrations en magnésium plus faibles dans le fluide – on assiste alors à une précipitation de talc, qui vient pomper le magnésium excédentaire pour maintenir l'équilibre. À l'inverse, vers ces hautes températures, la concentration en silice dans la solution doit augmenter pour maintenir l'équilibre et s'ajuste par la dissolution du quartz dans l'eau. Le système est réversible : si l'on refroidit la solution, le talc se dissout et le quartz précipite toujours pour maintenir l'équilibre.

On peut considérer un deuxième exemple, plus complexe, d'application de ces propriétés fondamentales, en considérant les interactions chimiques entre l'eau de mer et les roches sur les rides médio-océaniques déjà présentées plus haut (**Figure 19** et **Encart : « La ride médio-océanique »**). L'exemple est pris au niveau des Açores, où la plaque est soumise à une extension rapide, s'élargissant

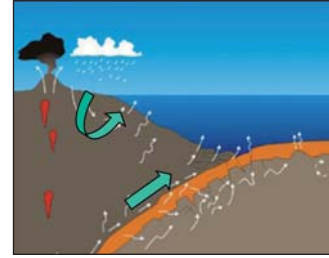
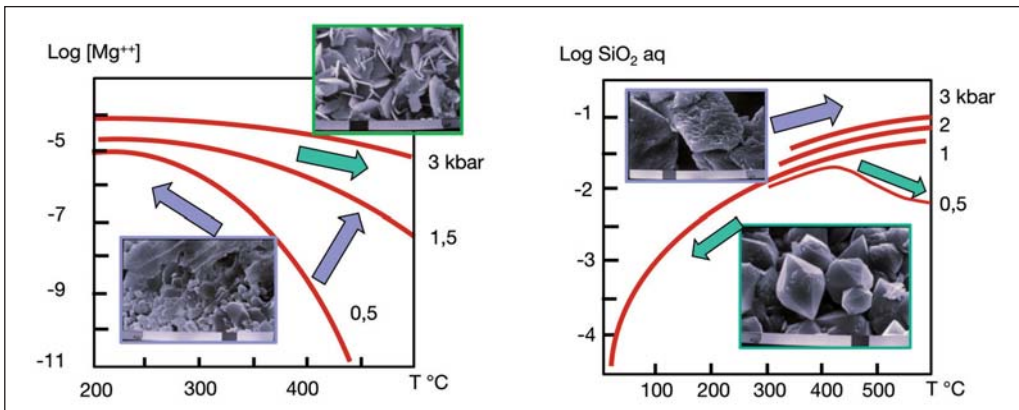


Figure 17

Au cours du parcours du fluide dans la croûte terrestre, la pression et la température varient. Les conditions de l'équilibre entre minéral et solution changent, le système maintient alors l'équilibre local en faisant précipiter la ou les phases minérales qui le permettent.

Figure 18

Courbes de solubilités d'un mélange de quartz et de talc.



jusqu'à la prochaine subduction. Par déshydratation, cette eau formera un fluide magmatique ou métamorphique qui pourra de nouveau contribuer à la concentration minérale comme, par exemple, le cuivre exploité au Chili.

3 La chimie géo-inspirée

La transformation de l'olivine en serpentine : un démonstrateur du développement durable

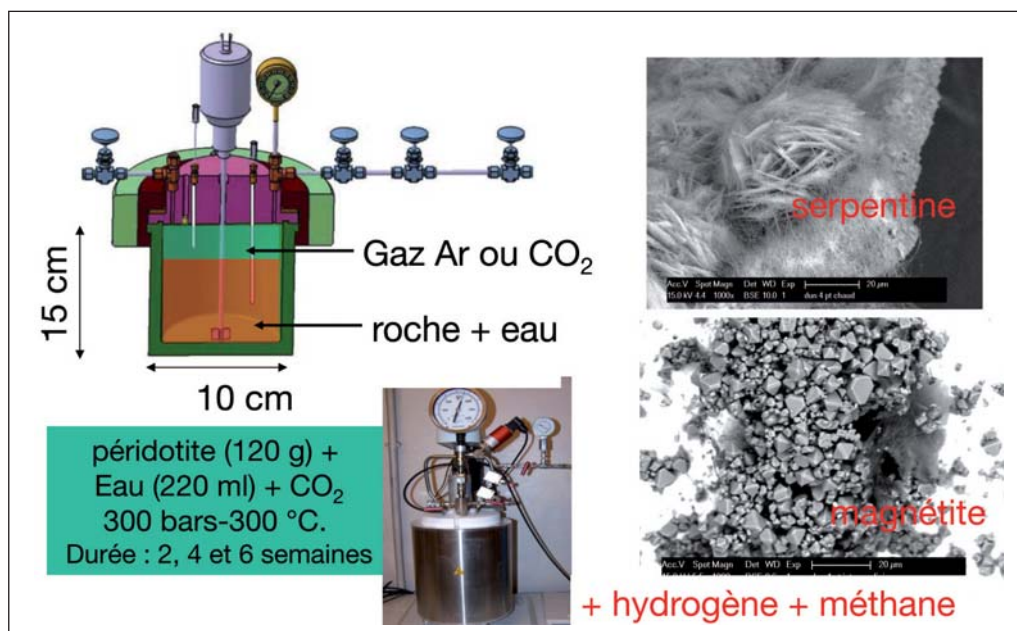
Le fer de l'olivine est sous forme ionique Fe^{2+} . Dans la réaction décrite ci-dessus, il est oxydé en Fe^{3+} par l'eau qui relâche de l'hydrogène. Cet hydrogène réduit ensuite, s'il est présent, le CO_2 en méthane et eau par une réaction de Fischer-Tropsch ($\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$).

Cette réaction naturelle de transformation de l'olivine en serpentine produit d'un côté une source primaire d'énergie : l'hydrogène qui par réaction participe à la réduction du CO_2 en produisant du méthane. Pour une société qui s'inquiète à la fois de l'accumulation du gaz carbonique responsable du changement climatique et de l'épuisement des ressources en combustibles fossiles (voir le [Chapitre de J. Amouroux](#)), ce phénomène est à la fois une nouvelle réserve d'énergie renouvelable non carbonée de volume non négligeable et une source d'inspiration pour la maîtrise du cycle du carbone à l'échelle humaine.

La [Figure 20](#) schématise une expérience de laboratoire réalisée par Olivier Vidal du laboratoire ISTERre (CNRS-Université Joseph Fourier à Grenoble)

Figure 20

Expérience en laboratoire de transformation de l'olivine en serpentine.



pour reproduire la réaction naturelle de transformation d'olivine en serpentine. L'olivine a été laissée pendant une quinzaine de jours en contact avec le gaz carbonique et l'eau à la température de 300 °C et sous une pression de 300 bars. Le résultat est tout à fait conforme aux prévisions : le mélange

(olivine, eau et CO₂) de départ a donné naissance à de la serpentine, de la magnétite et aux deux gaz, le méthane et l'hydrogène. On a ainsi reproduit le phénomène naturel en laboratoire, ébauchant le principe d'un procédé « géo-inspiré » applicable à une gestion douce de notre environnement.

Vers des procédés géo-inspirés pour le recyclage des déchets métalliques

Les phénomènes géochimiques profonds présentés dans ce chapitre ne sont que des exemples très partiels ; il en existe en fait un très grand nombre. Il s'agit d'un milieu très riche en processus qui ont la capacité de mobiliser la matière et la concentrer en utilisant l'eau.

Ces phénomènes peuvent être une source d'inspiration pour le recyclage des métaux, en développant des procédés « géo-inspirés ». C'est une voie qui mérite d'être explorée. Ce sont des procédés relativement économes en énergie, car fonctionnant à relativement basses températures. Ils sont propres car n'utilisent que de l'eau, elle-même recyclable. Ils peuvent permettre de valoriser des déchets qui auraient des propriétés comparables à celles des roches en permettant une récupération sélective des métaux.

Si l'on considère l'ensemble, très important, des déchets issus des procédés de combustion, d'incinération, de fusion, etc., c'est-à-dire des mâchefers, laitiers de hauts fourneaux, fumées, cendres, etc., on réalise qu'il a là un domaine d'application considérable, d'autant que leur composition n'est pas éloignée de celles des roches, et qu'elles contiennent des éléments

intéressants à recycler avec des teneurs qui se comparent à celles des gisements miniers. La **Figure 21** en donne des exemples. Il est tout à fait envisageable que des procédés géo-inspirés puissent être mis en œuvre pour les traiter. Leur quantité totale, estimée à une centaine de millions de tonnes par an en Europe, représente un marché considérable. C'est un des sujets considérés dans les initiatives de l'Union européenne pour maintenir l'accès aux ressources minérales indispensables à notre économie. C'est ainsi le cas du projet ERA-MIN lancé en novembre 2011 piloté par la France par l'intermédiaire du CNRS avec le soutien des autres établissements de recherche publique et des industriels, et dont l'objectif est de coordonner à l'échelle européenne la recherche sur ces questions.

SiO ₂	12-48
CaO	41-18
Al ₂ O ₃	3-8
Fe ₂ O ₃	31-9
MgO	4-5
MnO	6-0
Ti, Cu, Pb, Zn	0,1-1
Terres rares, Cr, Ba, Sn, Sb, Vn, As, Co, Hg, Cd, Se, ...	< 0,1

Figure 21

Variations moyennes des compositions de déchets de combustion, d'incinération, de fusion, etc. (en % massique).

Crédits photographiques

Fig. 1 : d'après un document de Rio Tinto.

Fig. 2 : cité d'après Patrice Christmann (BRGM) et dessiné d'après van der Wath, Bateman Beijing Axis, "China and Africa: A Global Natural Resources Alliance?"

Fig. 3 : Christian Hocquard (BRGM).

Fig. 4 : d'après le document de prospective de l'U.S. Department of energy (DOE), Critical Materials Strategy, déc. 2010.

Fig. 5 : d'après Patrice Christmann (BRGM), construit à partir des données de Weber *et coll.* (2012). World Mining data.

Fig. 6 : d'après un document d'A. Rollat (Rhodia).

Fig. 7 : d'après Patrice Christmann (BRGM), issu d'une conférence de H. Sverdrup.

Fig. 8 : d'après Patrice Christmann (BRGM).

Fig. 9 : Licence : CC-BY-SA-3.0, Doc Carbur.

Fig. 11 : fumeurs : photo Yves-Fouquet, Ifremer ; nodules polymétalliques : Ifremer.

Fig. 12 : d'après Michel Cathelineau, G2R, CNRS Université de Lorraine.

Fig. 13 : schéma d'après Gleb Potrosky (GET, CNRS, Université Paul Sabatier, Toulouse).

Fig. 14 : images de Marie-Christine Boiron (G2R, CNRS, Université de Lorraine).

Figs. 15, 16 et 18 : images de B. Goffé.

Fig. 17 : image de C. Monnin (Géosciences Environnement Toulouse).

Fig. 19 : photo Yves-Fouquet, Ifremer.

Fig. 20 : image d'Olivier Vidal (CNRS-Université Joseph Fourier, Grenoble).