

# IMITONS LA NATURE POUR RECYCLER LES MÉTAUX

Julien Lefebvre, Noël Baffier, Jean-Claude Bernier

D'après l'article Recyclage des métaux : mimer les processus naturels  
de Bruno Goffé publié dans l'ouvrage « *La chimie et la nature* »  
EDP Sciences, 2012, ISBN : 978-2-7598-0754-3

## LES BESOINS DE L'HUMANITÉ EN MÉTAUX ET LES RÉSERVES DE LA TERRE

Dans une trentaine d'années, en 2050, la population de la Terre pourrait être de neuf à dix milliards d'individus et les besoins en métaux égaleraient, dans cet espace de temps, la totalité des besoins de l'humanité depuis les origines. Depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle, la consommation de métaux a été multipliée par un facteur dix [1].

Aujourd'hui, de nouveaux besoins en métaux apparaissent en raison du développement des nouvelles technologies : information et communication, nucléaire, lampes à basse consommation, batteries, éoliennes, solaire photovoltaïque, etc. La **figure 1** montre un besoin croissant de nouveaux métaux, indispensables au mode de vie « high tech » [2].

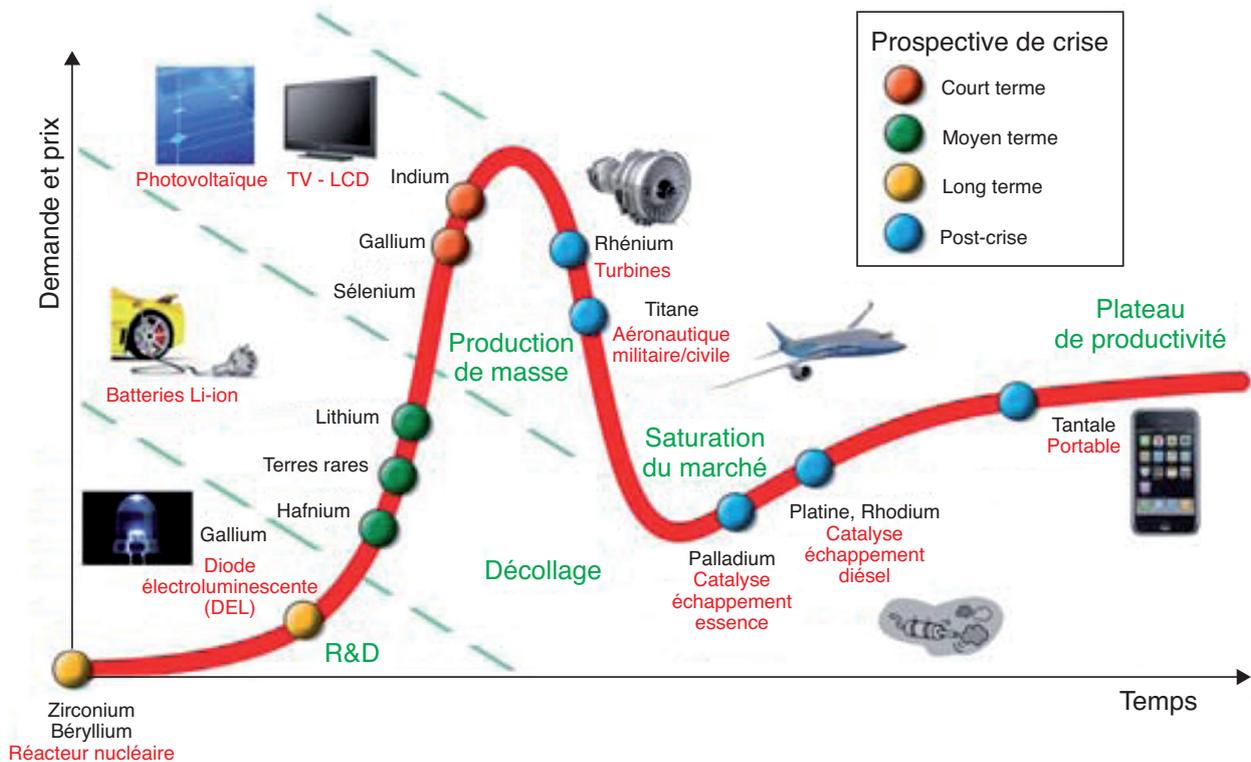


Figure 1. Évolution du prix des métaux en fonction de la demande, montrant un besoin croissant de nouveaux métaux, indispensables au mode de vie « high-tech ». Source : Christian Hocquard (BRGM).

## L'épuisement des ressources naturelles

Depuis au moins une génération, la notion d'« épuisement » des ressources naturelles est une réalité sérieusement envisagée.

L'outil « Peak oil » (pour les hydrocarbures) [3] tente de décrire le moment où la consommation de la matière considérée dépasse sa production. Utilisé pour les métaux, il montre que pour les éléments métalliques clés, nous ne sommes qu'à quelques décennies du pic annonciateur de pénurie (figure 2).

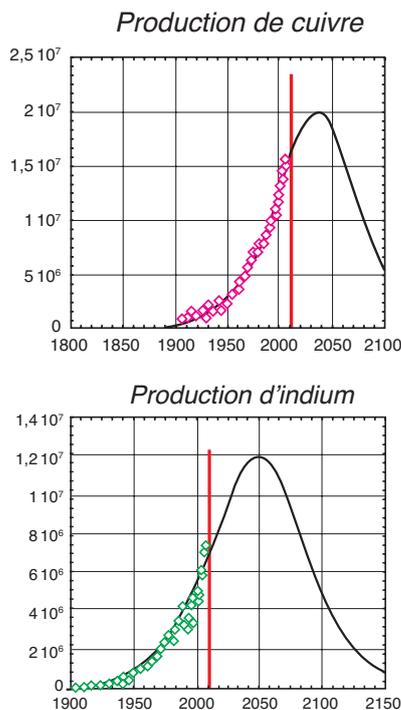


Figure 2. « Peak » de production de cuivre et d'indium. Source : Patrice Christmann (BRGM), issu d'une conférence de H. Sverdrup.

## L'importance du recyclage

Cependant, à la différence des matières combustibles, les métaux ne disparaissent pas ; on peut les recycler. Le tableau 1 donne les estimations de disponibilité prévisible en 2018 pour un certain nombre de métaux : fer, aluminium, nickel, cuivre, zinc (métaux de base) ou manganèse, indium, lithium. Ce tableau, qui a le mérite d'exhiber le problème,

Élément	Années avant pénurie sans recyclage	Selon taux de recyclage			
		50 %	70 %	90 %	95 %
Fer	73	120	310	310	626
Aluminium	126	178	455	455	915
Cuivre	25	25	151	408	622
Zinc	14	31	55	55	127

Tableau 1 : Estimations de disponibilité prévisible en 2018 pour les métaux de la structure.

montre l'importance du recyclage : en l'absence de celui-ci, nous disposons de 73 ans de ressources pour le fer, 126 ans pour l'aluminium, 25 ans pour le cuivre, 14 ans pour le zinc.

Un taux de recyclage de 50 %, 70 %, 90 % ou 95 % multiplie cette disponibilité respectivement par 2, par 3, voire presque 7 ou 8.

Au-delà de ces chiffres, il faut retenir que le recyclage des métaux est de première importance ; il est vital de le mettre en œuvre [4].

## LA TERRE ET SES RESSOURCES EN MÉTAUX

### Une répartition des ressources liée à la dynamique interne de la Terre

Un schéma éclaté de la Terre fait apparaître le noyau, le manteau puis la croûte. C'est une fine pellicule superficielle, formée de plaques animées de mouvements horizontaux provoquant des ruptures (séismes) lors des compressions ou extensions aux limites ou au sein des plaques (Figure 3). Ces mouvements, par le brassage de la matière qu'ils effectuent, expliquent majoritairement la répartition de ressources en métaux à la surface de la planète. Par

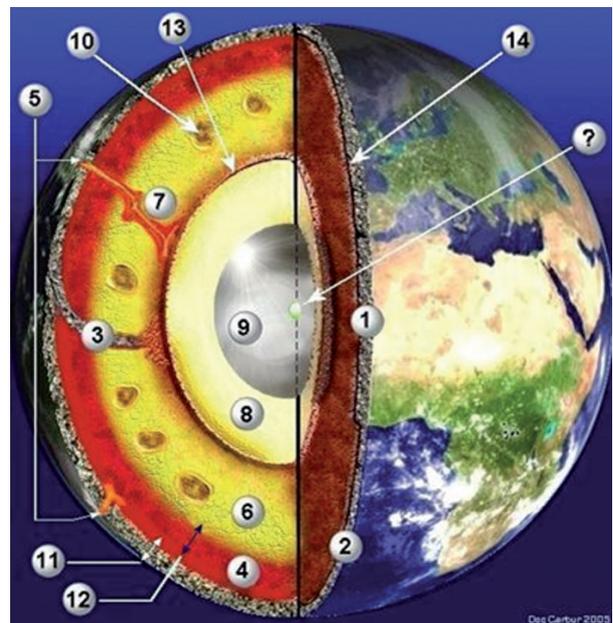


Figure 3. Structure interne de la Terre. Le cycle des métaux est essentiellement contrôlé par la dynamique interne de la Terre au niveau de la croûte.

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

exemple, les grandes mines de cuivre du Chili sont issues du volcanisme de la Cordillère des Andes, les mines de nickel du grand Nord canadien proviennent d'anciens océans incorporés au continent. C'est en effet dans les océans que se trouvent beaucoup des gisements métalliques des continents où ils ont été agrégés par la tectonique des plaques. Enfin, le dernier acteur des concentrations métalliques est le climat qui, à travers l'altération tropicale, concentre l'aluminium et des éléments qui lui sont associés comme le gallium par altération des sols [5].

### 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 le glissement des plaques 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, capable de solubiliser des éléments qui sont à la source des minéralisations constatées sur 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, les pressions pouvant atteindre une dizaine de milliers de bars et les températures près de 1000 °C. L'eau possède alors un très fort pouvoir de dissolution des métaux [6].

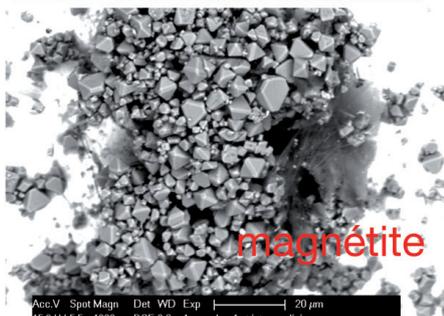
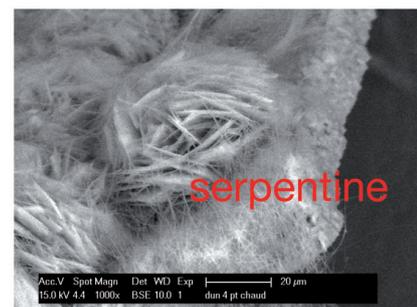
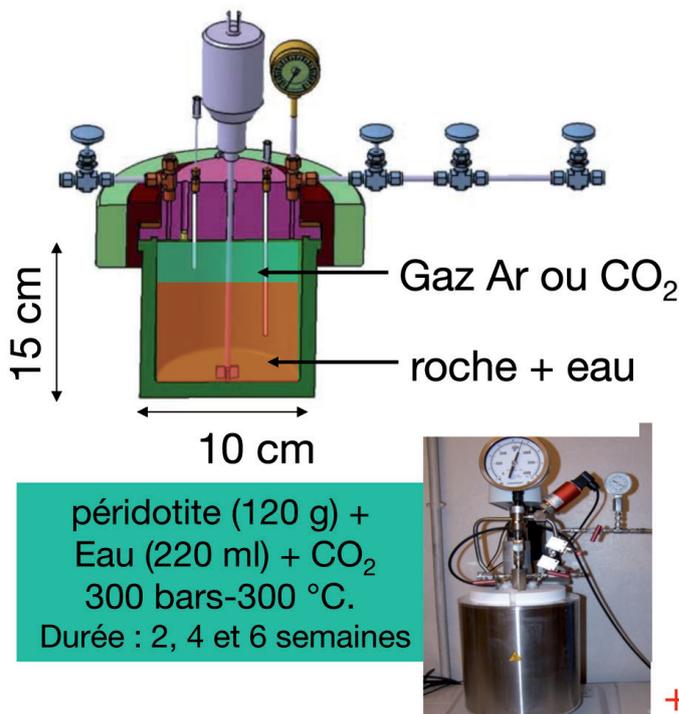
## COMMENT S'INSPIRER DE CES MÉCANISMES NATURELS : LA CHIMIE GÉO-INSPIRÉE

### Un exemple de réaction naturelle reproduite en laboratoire qui transforme un silicate sous action de l'eau et de CO<sub>2</sub>

La transformation naturelle de l'olivine (Mg, Fe)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> en serpentine (Mg, Fe)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub> se produit naturellement sous l'action de H<sub>2</sub>O + CO<sub>2</sub>. Elle correspond à une oxydation du fer de FeII en FeIII et produit en outre de la magnétite [7], du méthane et de l'hydrogène.

Cette réaction naturelle de transformation de l'olivine en serpentine produit d'un côté une source primaire d'énergie : l'hydrogène, lequel par réaction participe à la réduction du CO<sub>2</sub> en produisant du méthane. Pour une société qui s'inquiète à la fois de l'accumulation du dioxyde de carbone responsable du changement climatique [8] et de l'épuisement des ressources en combustibles fossiles, 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 4 schématise une expérience de laboratoire réalisée pour reproduire cette réaction naturelle de transformation d'olivine en serpentine. L'olivine (ici contenue dans la péridotite) a été laissée pendant une quinzaine de jours en contact



+ hydrogène + méthane

Figure 4. Expérience en laboratoire de transformation de l'olivine en serpentine.  
Source : Olivier Vidal (CNRS-Université Joseph Fourier, Grenoble).

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 CO<sub>2</sub>) de départ a donné naissance à de la serpentine, de la magnétite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) et aux deux gaz, le méthane et l'hydrogène. Le phénomène naturel est ainsi reproduit en laboratoire, ébauchant le principe d'un procédé « géo-inspiré » applicable à une gestion douce de notre environnement. Les conditions d'expérience sont toutefois assez contraignantes !

## MISE EN ŒUVRE INDUSTRIELLE DU PROCÉDÉ (9)

Cette réaction observée à l'état naturel et reproduite en laboratoire a pu être transposée en un procédé industriel de valorisation des déchets et coproduits ferreux sous la forme de magnétite Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Produite dans des tailles inférieures au micromètre, la magnétite possède en effet des propriétés de surface, de densité, de magnétisme et d'oxydoréduction particulières qui en font un matériau convoité par un large panel d'applications :

- traitement des eaux usées sous forme d'hydroxyde Fe(OH)<sub>3</sub> ou Fe(OOH) : métaux et micropolluants organiques (pesticides, médicaments),
- dépollution des sols (sous forme d'hydroxyde),
- protection contre les ondes électromagnétiques (les spinelles Fe<sub>3</sub>Ni<sub>x</sub>Zn<sub>1-x</sub>O<sub>4</sub> étant cependant bien meilleurs),
- production de pigments noirs,
- catalyseur de réaction chimique.

Pour rendre accessible la magnétite à des marchés de grand volume il a cependant fallu modifier et industrialiser le procédé de laboratoire car il n'était pas concevable d'avoir un procédé industriel où la température de 300 °C et la pression de 300 bars soient tenus durant 15 jours.

La réussite du projet s'est également appuyée sur l'enjeu majeur que représente la valorisation des déchets et coproduits ferreux. Ils sont produits en

très grand volume par la sidérurgie et l'industrie minérale, essentiellement sous forme de mâche-fers et de laitiers de hauts fourneaux qui ont des propriétés comparables à celles des roches : près de 2 millions de tonnes/an en France et 200 millions de tonnes/an à l'échelle mondiale (10).

Pour conclure, signalons également que l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) a lancé un appel à projet (ERA-MIN « Les matières premières pour le développement durable et l'économie circulaire ») avec financements européens destiné à la récupération des métaux (Cu, Pb, métaux de terres rares, métaux dits précieux) à partir de déchets industriels.

L'enjeu est de coordonner la recherche européenne sur ces questions de recyclage des déchets minéraux, dont la quantité représente un marché considérable.

## POUR EN SAVOIR PLUS

(1) Données industrielles, économiques, géographiques sur les principaux produits chimiques, métaux et matériaux

<http://www.mediachimie.org/node/523>

(2) Vie et recyclage des appareils et supports numériques (Chimie et junior...)

<http://www.mediachimie.org/node/1276>

(3) La biomasse, matière première renouvelable d'avenir

<http://www.mediachimie.org/node/456>

(4) Vos placards nous intéressent

<http://www.mediachimie.org/node/513>

(5) Quand les chercheurs croisent le fer...

<http://www.mediachimie.org/node/993>

(6) Les ressources minérales du futur sont-elles au fond des mers ?

<http://www.mediachimie.org/node/274>

(7) Cristaux, cristallographie et cristallographie

<http://www.mediachimie.org/node/934>

(8) Le changement climatique (Chimie et junior...)

<http://www.mediachimie.org/node/1746>

(9) Recyclage des matériaux et évaluation environnementale

<http://www.mediachimie.org/node/337>

(10) Recyclage des matériaux et évaluation environnementale

<http://www.mediachimie.org/node/337>

**Noël Baffier**, professeur honoraire d'université, ancien directeur des Études de l'École d'Ingénieurs de Chimie Paristech

**Jean-Claude Bernier**, professeur émérite de l'Université de Strasbourg, ancien directeur scientifique des sciences chimiques du CNRS

**Julien Lefebvre**, professeur de physique chimie

**Grégory Syoën**, professeur agrégé, chef de projet Mediachimie-Fondation de la maison de la chimie