QUEL FUTUR POUR LES MÉTAUX ?

Philippe Bihouix
Benoît de Guillebon

Raréfaction des métaux :
un nouveau défi pour la société

EDP SCIENCES

Extrait de la publication

QUEL FUTUR POUR LES MÉTAUX ?

Raréfaction des métaux : un nouveau défi pour la société

Philippe Bihouix et Benoît de Guillebon

Ouvrage publié avec le concours
du Centre national du livre

EDP SCIENCES

17, avenue du Hoggar – P.A. de Courtabœuf
BP 112, 91944 Les Ulis Cedex A, France

Extrait de la publication

Couverture : Anne-Sophie Moulinier et Pascal Ferrari

Cet ouvrage a été imprimé en France sur un papier 100 % recyclé et non blanchi.

ISBN : 978-2-7598-0549-5

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, 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 intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1er de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences 2010

Extrait de la publication

Préface de Michèle Pappalardo

Cet ouvrage, de grande qualité, confirme ma très forte conviction que la gestion durable des ressources naturelles sera, sans nul doute, le grand enjeu de ce 21e siècle. C'est un défi de taille qui, dans un contexte de croissance démographique mondiale et d'extension des modes de consommation occidentaux, exige une rupture avec nos modèles de développement passés et appelle à des modes de gouvernance renouvelés.

Les auteurs de cet ouvrage se sont livrés à une analyse approfondie et très bien documentée des enjeux économiques, environnementaux et sociaux liés à l'utilisation des métaux et à leur raréfaction face à une demande en croissance exponentielle. Le constat est simple : le mode de croissance né en Europe au 18e siècle ne peut être généralisé à l'échelle de la planète. Le 21e siècle pourrait ainsi connaître un retour au monde malthusien tant pour les ressources non renouvelables (pour lesquels cet ouvrage fournit des exemples particulièrement probants) que pour les ressources renouvelables.

Cet ouvrage met à mal trois mythes encore largement répandus dans la société qui, s'ils peuvent paraître séduisants parce que rassurants, nuisent à l'établissement du bon diagnostic et donc à la mise en œuvre des bonnes solutions.

Première croyance : les réserves actuellement exploitées ne représentent qu'une toute petite partie des stocks potentiellement exploitables. La possible raréfaction des ressources naturelles est ainsi renvoyée à un futur lointain, qui semble peu nous concerner. C'est oublier que l'accès à de nouveaux gisements se traduit non seulement par des coûts financiers croissants (investissements plus lourds, besoins croissants en énergie) mais aussi par des coûts environnementaux de plus en plus importants : émissions de gaz à effet de serre, déforestation, production de déchets, perte de biodiversité.

Deuxième croyance : le progrès technique permettra, à lui seul, de résoudre le problème de la raréfaction des ressources, en en permettant notamment une utilisation plus efficace. L'augmentation de la productivité des ressources source d'économies de matière (énergie, eau, sol…) permettrait aux économies de réduire leurs besoins en ressources et les pressions environnementales associées. En France la quantité de matières mobilisées pour produire un euro de valeur ajoutée a baissé de près de 25 % entre 1990 et 2006. Pourtant, la France a mobilisé davantage de matière en 2006 qu'en 1990. Force est de constater, que l'amélioration globale de l'efficacité des ressources a généré une augmentation du niveau des besoins qui dépasse les économies de ressources réalisées (effet rebond). Le cas de la France n'est d'ailleurs pas unique. De nombreux autres pays européens enregistrent un découplage relatif entre consommations de matières et production de richesses. Pourtant, c'est un découplage absolu qui doit être visé. Pour que les effets des innovations technologiques soient pleinement effectifs et pour qu'ils s'accompagnent d'un réel découplage, il est nécessaire de gérer le niveau absolu de l'utilisation des ressources et les impacts

Extrait de la publication

environnementaux associés. Cela suppose qu'ils soient accompagnés par la généralisation de modes de consommation plus durables.

Troisième croyance : l'économie circulaire, en permettant la réintroduction infinie de la matière dans le cycle de production permettra de réduire la demande de matières premières vierges. Il suffit donc d'augmenter de façon conséquente les taux de recyclage pour résoudre le problème de la raréfaction des ressources naturelles. Ce raisonnement se heurte néanmoins à deux écueils. Le premier est d'ordre technique et parfaitement bien décrit dans cet ouvrage : il n'y a pas de circuit sans perte. Le second est d'ordre purement mathématique. Compte tenu de la durée de vie des matières dans les produits utilisés (stocks de matières en cours d'utilisation), un taux de recyclage même élevé n'a d'impact significatif sur l'évolution de la consommation en matières premières vierges que si leur taux de croissance est faible (de l'ordre de 1 %). Or, les taux de croissance de la demande de la plupart des métaux sont très nettement supérieurs à ce taux. Le réel enjeu d'une gestion durable des ressources naturelles se situe donc d'abord dans la maîtrise du taux de croissance de la consommation mondiale de matières.

Quatre éléments me semblent ainsi incontournables dès lors qu'il s'agit de mettre en place une politique de gestion durable des ressources naturelles :

- la nécessité de raisonner sur l'ensemble du cycle de vie des ressources naturelles pour éviter de créer de nouvelles raretés (y compris sur les ressources renouvelables), de déplacer les impacts environnementaux d'une partie du globe vers d'autres zones géographiques, ou encore de créer des transferts entre catégories d'impacts. La politique de lutte contre la pollution de l'air mise en place dans l'Union européenne via la généralisation des voitures catalytiques a certes permis de réduire de façon considérable les émissions de polluants dont certains très toxiques (plomb). Parallèlement cette politique a eu pour corollaire une forte demande de platinoïdes sources d'impacts environnementaux dans d'autres parties du monde. Seule la prise en compte de l'ensemble du cycle de vie des ressources naturelles permet de tenir compte des conséquences de la mondialisation des économies et de l'extrême interdépendance des différentes régions du monde. C'est un élément essentiel à retenir dès lors qu'on veut mettre en place une politique de gestion durable des ressources naturelles ;
- la nécessité de mobiliser de nombreux outils parmi lesquels l'éco-conception, les innovations technologiques et organisationnelles auront un rôle important à jouer. Ils permettront notamment de proposer aux acteurs économiques de réelles alternatives vers des modes de vie moins impactants : ils se déclinent en ville durable, en économies d'énergie, en modes de production et de consommation plus sobres… thématiques dont la déclinaison opérationnelle reste encore, pour partie, à inventer ;
- la nécessité de penser la prospérité autrement qu'à travers le seul critère de la croissance économique. Cela suppose de faire reposer la prospérité sur d'autres fondements que l'accumulation sans fin des biens matériels qui sous-tend cette croissance. Cela demande l'élaboration d'indicateurs complémentaires du produit intérieur brut. Au niveau international un projet d'envergure sur les nouveaux indicateurs est en cours sous l'égide de l'Organisation de coopération et de développement économique, de la Commission européenne et de plusieurs États dont la France, suite aux travaux de la Commission Stiglitz-Sen ;

- la nécessité d'une modification profonde des comportements collectis et individuels qui ne pourra se faire qu'avec la découverte de nouvelles valeurs et une nouvelle définition du bien être.

Le défi est immense mais les enjeux méritent qu'on se donne les moyens de le relever.

Michèle PAPPALARDO
Déléguée Interministérielle et
Commissaire générale au
Développement durable

Extrait de la publication

This page intentionally left blank

Extrait de la publication

Préface de Marc Ventre

Dans le monde complexe dans lequel nous évoluons, l'ingénieur ne peut se contenter de son métier de technicien. Il doit intégrer dans sa réflexion de nombreux aspects qui touchent à l'économique, au social, au sociétal…

L'Association des Centraliens qui rassemble plus de 11 000 ingénieurs en activité dans tous les secteurs de l'économie a clairement inscrit dans sa stratégie le souhait d'être une force de proposition dans tous les domaines qui touchent au sociétal.

C'est pourquoi je me réjouis que les travaux engagés par le groupe QSE – Performance Durable de l'Association des Centraliens sur la raréfaction des matières premières minérales et en particulier des métaux, ait débouché sur l'ouvrage que vous avez entre les mains.

Cet ouvrage illustre en effet parfaitement le type d'approche globale d'une problématique que doit avoir l'ingénieur. De plus il montre comment la communauté centralienne peut se mobiliser pour participer à la réflexion nationale sur le sujet des ressources naturelles.

De cet ouvrage qui est un recueil impressionnant de l'état de nos ressources en matériaux métalliques, je retiendrai quelques enseignements forts :

- la croissance mondiale va créer dans un horizon relativement proche des situations de pénurie,
- malgré la qualité de l'intelligence humaine, il ne sera pas possible de tout résoudre par des solutions technologiques,
- il faut donc se mobiliser et changer de regard sur cette problématique tant au niveau microscopique (l'ingénieur dans son entreprise) qu'au niveau macroscopique (les décideurs politiques).

Je conclurai cette brève introduction en réaffirmant l'importance du rôle de l'ingénieur pour construire le monde demain. Sa connaissance et sa compréhension des phénomènes physiques, chimiques, biologiques… sont indispensables dans un monde où l'on a tendance à oublier les réalités physiques. Son schéma de pensée « analyser / caractériser / synthétiser / proposer des solutions pragmatiques » convient tout à fait aux challenges que notre monde va affronter dans les décennies à venir et en particulier dans le domaine des matières premières. Si l'on y ajoute la capacité d'innovation et une ouverture à l'ensemble des enjeux de la planète, l'ingénieur doit être un des maillons essentiels de la construction d'un monde plus durable.

Marc VENTRE
Président de l'Association des Centraliens

Extrait de la publication

This page intentionally left blank

Extrait de la publication

Préface de Marc Boissonnet

Lorsque, début 2009, le groupe QSE – Performance Durable de l'Association des Centraliens a commencé une réflexion sur le thème de la raréfaction des ressources minérales (principalement les métaux), nous savions que nous nous penchions sur un sujet technique important pour les ingénieurs dans de nombreuses activités industrielles. Ce que nous n'avions pas anticipé, c'est la variété des sujets que nous allions aborder et l'interrelation que ce thème de la raréfaction des métaux a avec de nombreux autres enjeux liés à un développement plus durable.

Cette vision transversale et globale d'un sujet finalement relativement peu abordé, il nous a paru intéressant de la partager avec le plus grand nombre. C'est l'objet de l'ouvrage que vous avez entre les mains.

Pour rendre la lecture la plus accessible possible, cet ouvrage a été conçu en deux parties :

- un texte de synthèse de 40 pages qui développe une réflexion globale sur le futur des métaux ;
- une série d'articles dans lesquels nous avons fait des « zooms » sur certains métaux, sur des domaines d'activité particuliers, ou sur des sujets transversaux (environnement, énergie, économie…). Ces articles ne couvrent pas de manière exhaustive le sujet : ils ont plutôt pour but d'illustrer concrètement la réflexion développée dans le texte de synthèse.

Ce livre résume les travaux que nous avons réalisés dans le cadre d'un *Think Tank* (programme de recherche) commandé par l'Association des Centraliens et qui a été lancé en mars 2009 lors d'une conférence qui présentait l'état des connaissances actuelles et la vision prospective des pouvoirs publics et des experts. Ainsi, Michèle Pappalardo (Commissaire Générale au Développement Durable du MEEDDM – Ministère de l'Environnement, de l'Écologie, du Développement Durable et de la Mer) et Jacques Varet (Directeur de la Prospective du BRGM – Bureau de Recherches Géologiques et Minières) ont confirmé les orientations du *Think Tank*.

Cet ouvrage ne prétend pas répondre à toutes les questions techniques suscitées par la raréfaction des métaux. Basé sur des données scientifiques les plus sérieuses possibles, il s'essaye à développer une réflexion systémique sur un enjeu qui, s'il est moins médiatique que la raréfaction du pétrole, n'en est pas moins un élément important à prendre en compte pour le développement durable de nombreuses activités économiques et humaines.

Il tire aussi un signal d'alarme pour que chaque consommateur, industriel ou homme politique, prenne la mesure du problème et agisse en conséquence de façon responsable. Nous ne pouvons fermer les yeux sur les conséquences inéluctables de la surconsommation des ressources naturelles. Si des solutions existent (recyclage, éco-conception, économie de la fonctionnalité…) il nous appartient de les rechercher et de les mettre en œuvre sans délai.

Nous espérons que vous aurez autant de plaisir à le lire que n'ont eu de plaisir à l'écrire :

- Philippe Bihouix et Benoît de Guillebon, les principaux auteurs,
- et toute l'équipe de l'Association des Centraliens ayant travaillé sur ce document (Jacques Baccardats, Emmanuel Bommier, Didier Constant, Jean Pierre Durand, Jérôme Fady, Valéry Frelin, Eric Freycenon, Frédéric Jousset, Pierre Lecoy, Thierry Marneffe, Christian Plaetevoet), avec la participation active de Laure Poylecot, étudiante à l'EPF.

Marc BOISSONNET
Président de Centrale QSE – Performance durable

Extrait de la publication

« Comment peindre ces trésors métalliques si variés, si nombreux, si abondants, qui se renouvellent pendant tant de siècles, quoique tous les jours détruits par le feu, les dévastations, les naufrages, les guerres, la fraude, et usés par le luxe ou les besoins de tant de mortels. »

***Pline L'Ancien**, Histoire Naturelle, Livre II, 1er siècle ap. J.-C.*

« Les ressources naturelles sont inépuisables, car sans cela nous ne les obtiendrions pas gratuitement. Ne pouvant être ni multipliées, ni épuisées, elles ne sont pas l'objet des sciences économiques. »

***Jean-Baptiste Say**, Cours d'économie politique pratique, 1815.*

« Le temps du monde fini commence. »

***Paul Valéry**, Regards sur le monde actuel, 1931.*

Extrait de la publication

This page intentionally left blank

Sommaire

Préface de Michèle Pappalardo **3**
Préface de Marc Ventre **7**
Préface de Marc Boissonnet **9**

Partie I : Texte de synthèse

Consommer les ressources non renouvelables **19**
Qu'entend-on par non renouvelable ? 19
La limite par les stocks 20
Une (très) brève histoire des métaux 21
Le passé récent… et le futur proche 22

Extraire les métaux **27**
Qu'est-ce qu'une réserve ? 27
La concentration des minerais 29
Énergie et métaux 31
Interdépendance et pureté des métaux 33
De quelles réserves dispose-t-on ? 34
Où sont les réserves ? 37
Quelles sont les ressources critiques ? 39
Quel impact économique ? 40
Quel impact environnemental ? 40

Préserver les ressources **43**
Il s'agit d'un stock 43
Comment économiser le stock 44
Les limites du recyclage 45
La substitution : vers un nouvel âge du fer ? 50
Réduire les besoins : le défi de l'économie durable 51
La complexité des choix dans le cadre d'un développement durable 54

Agir **57**
Changer de perspectives 57
Les raisons d'espérer 59

Extrait de la publication

Les raisons de douter 60
Conclusion : innovation technique et quête de sens 61

Partie II : Technique, environnement et économie

Les métaux : approches transversales 65

1. Mines et environnement 67
2. Résidus miniers 73
3. Empreinte énergétique des métaux 81
4. Avancées des techniques minières 91
5. Prix des métaux 95
6. Aspects géostratégiques 105
7. Les déchets sources de matières premières métalliques 117
8. Pureté des métaux 129
9. Toxicité des métaux 135

Partie III : Études sectorielles

Les métaux dans les secteurs économiques 141

1. Aéronautique et spatial 147
2. Agriculture 155
3. Automobile 167
4. Bâtiment et infrastructure 177
5. Chimie 187
6. Nouvelles technologies 193
7. Industrie nucléaire 201
8. Stockage de l'électricité 209

Partie IV : Présentation détaillée de métaux

Zoom sur quelques métaux 219

1. Antimoine 223
2. Argent 229
3. Cobalt 233
4. Cuivre 239
5. Étain 245
6. Gallium et Indium 249
7. Lithium 255
8. Nickel 261
9. Or 267
10. Platine et platinoïdes 273
11. Tungstène 279

Extrait de la publication

Partie V : Culture générale
Florilège d'usages dispersifs 287
Origine du nom des métaux 293
Références bibliographiques 295

Extrait de la publication

This page intentionally left blank

TEXTE DE SYNTHÈSE

Extrait de la publication

This page intentionally left blank

Extrait de la publication

Consommer les ressources non renouvelables

Qu'entend-on par non renouvelable ?

Une ressource non renouvelable, dans son acception communément admise, est une ressource qui ne se renouvelle pas à l'échelle d'une vie humaine, soit de l'ordre du siècle.

Comme on peut le voir sur la figure 1, beaucoup de ressources naturelles correspondent à cette catégorie. Des ressources considérées habituellement comme renouvelables (eau, nourriture, bois) peuvent être non renouvelables dans certains cas :

- l'eau est généralement considérée comme une ressource renouvelable (échelle de renouvellement de quelques jours pour des eaux de ruissellement à quelques mois ou quelques années pour les nappes phréatiques, à l'exception notable des **eaux souterraines fossiles** qui se sont formées en plusieurs milliers d'années) ;
- l'alimentation humaine est majoritairement basée sur des cultures annuelles (les arbres fruitiers ou les vignes peuvent atteindre quelques dizaines d'années et requérir une logique d'exploitation spécifique). L'élevage et la pêche sont basés sur un rythme annuel ou pluriannuel, sauf la **pêche en eaux profondes** où les rythmes biologiques sont plus lents (ainsi l'hoplostète orange actuellement consommé peut atteindre l'âge de 130 ans et les stocks seront épuisés en quelques années) ;
- les **forêts anciennes** sont également des ressources non renouvelables, tandis que les forêts exploitées de manière durable et les plantations se renouvellent selon un rythme compris entre sept ans et quelques dizaines d'années.

Mais ce sont surtout les ressources naturelles minérales qui sont majoritairement non renouvelables. Le **charbon** s'est ainsi formé surtout pendant une période spécifique de l'ère primaire, le carbonifère (–350 à –300 millions d'années). Le **pétrole et le gaz** se forment en plusieurs millions d'années.

Les autres ressources minérales ont des rythmes de renouvellement très variés : moins d'une année pour certaines ressources basées sur l'exploitation des océans comme **le sel, le magnésium, l'iode**... De quelques centaines à quelques dizaines de milliers d'années pour les produits de l'érosion comme les **sables ou les graviers** ou du volcanisme comme **le soufre…** et de plusieurs millions à quelques milliards d'années pour la plupart des autres ressources minérales, dont les **métaux**.

Cobalt

The Cobalt Development Institute, http://www.thecdi.com

Cuivre

International Copper Study Group, http://www.icsg.org

Étain

ITRI, l'Association des producteurs d'étain, http://www.itri.co.uk

Gallium & Indium

R.R. Moskalyk, Gallium: the backbone of the electronics industry. *Mineral Engineering*, 2003

D. Cohen, Earth's natural wealth: an audit. *New Scientist*, 23 May 2007

A. Reller, Strategic resources for emerging technologies, conférence à l'Université de Mayence, 2009

« L'indium, le gallium, le germanium sont devenus indispensables », interview de Christian Hocquard (BRGM). *La Croix*, 3 août 2009

Lithium

Lithium applications and availability. *Chemetall*, 2009, http://www.chemetalllithium.com

The trouble with lithium. Meridian International Research, 2007-2008, http://www.meridian-int-res.com

Nickel

Nickel Institute, http://www.nickelinstitute.org

Or

World Gold Council, http://www.gold.org

Platine et platinoïdes

Secrétariat de la CNUCED (Info Comm Platine)

http://r0.unctad.org/infocomm/francais/platine/utilisat.htm

Tungstène

International Tungsten Industry Association, http://www.itia.info

Technique, environnement et économie

Mines et environnement

Bulletin du World Rainforest Movement, http://www.wrm.org.uy

Les amis de la Terre, http://www.amisdelaterre.org

Environnement Canada, Gestion de l'eau, industrie minière, http://www.ec.gc.ca

Environnemental Protection Agency, http://www.epa.gov

Montana Department of Environmental Quality, Draft Environmental Impact Statement, Golden Sunlight Mine, November 1997

T. Earle, T. Callaghan, Impacts of mine drainage on aquatic life, water uses, and man-made structure. In *Coal Mine Drainage Prediction and Pollution Prevention in Pennsylvania* (1998)

Safe Drinking Water Foundation, http://www.safewater.org

Goro Nickel ICPE, http://www.goronickel-icpe.nc

Racoon Creek Partnership, http://www.raccooncreek.org

Résidus miniers

Mining Journal, http://www.mining-journal.com

Encyclopédie canadienne, http://www.thecanadianencyclopedia.com

Mining - history of mining, surface mining, underground mining, http://science.jrank.org

Empreinte énergétique des métaux

R.U. Ayres, An application of Energy accounting to five basic metal industries. INSEAD, 2001

International Aluminium Institute, http://www.world-aluminium.org

T.E. Norgate and W.J. Rankin, The role of metals in sustainable development, mai 2002

J.C. Prevot, *Cycle de vie des matériaux, les matières premières métalliques*, 2005

Dossier de l'ADEME, *Les facteurs d'émissions (bilan carbone)*

C. Hocquard, *Changement climatique et industries extractives : Quels impacts ? Quelles mesures pour les mitiger ?*, septembre 2007

Toxicité des métaux

Ineris, http://www.ineris.fr

Association Toxicologie Chimie, http://atctoxicologie.free.fr

Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, http://www.senat.fr

E. Pelletier, P.G.C. Campbell & F. Denizeau, *Écotoxicologie moléculaire, Principes fondamentaux et perspectives de développement.* Presses de l'université du Quebec, 2004

Extrait de la publication