

# Des limites de l'économie circulaire : la question des métaux

**Philippe BIHOUIX**

**Séminaire du 16 décembre 2011**





« Au fil du temps, même l'or et les métaux se désagrègent, les plus hautes montagnes s'érodent, toute chose qui a forme se détruit facilement »<sup>1</sup>. La sagesse orientale oubliée, les métaux sont réputés recyclables à l'infini, donc futurs champions de l'économie circulaire à venir.

La réalité est moins rose, car les métaux sont malheureusement, au même titre que les énergies fossiles, des ressources non renouvelables, dont nous faisons un gâchis immense au détriment des générations futures. En faire le constat nous oblige à repenser de manière fondamentale notre société industrielle et son avenir.

### Les réserves métalliques

Les métaux sont partout sur notre planète, dans la terre végétale, les roches, et même l'eau de mer. Il suffit de prendre une poignée de terre pour tenir dans le creux de sa main l'ensemble, ou peu s'en faut, des éléments chimiques stables non gazeux de la classification de Mendeleïev<sup>2</sup>, dont environ 60 métaux différents, certains en quantité infinitésimale bien sûr.

Prenons le cuivre : à la concentration moyenne de 50 ppm (parties par million, soit 0,005%), une poignée de terre d'une masse de 100 grammes en contient ainsi 5 milligrammes. Cela paraît peu, mais la quantité de cuivre totale, contenue sur les 150 millions de km<sup>2</sup> de terres émergées jusqu'à la profondeur de 1 km, est de l'ordre de 20.000 milliards de tonnes (sur la base d'un poids moyen de la croûte terrestre de 2,6 tonnes par m<sup>3</sup>). Un chiffre colossal, représentant plus d'un million d'années de notre consommation actuelle !

Pourtant, la totalité des ressources disponibles de cuivre est 10 000 fois moins élevée (500 millions de tonnes de réserves, peut-être 3 milliards de tonnes de ressources ultimes, selon l'USGS<sup>3</sup>). Pourquoi un tel écart ? Au-delà de la réponse assez intuitive – on imagine bien qu'on ne va pas passer l'intégralité de la croûte continentale, sur 1 km d'épaisseur, au tamis fin – la notion de réserve minière est compliquée, car elle recouvre des facteurs à la fois géologiques, techniques et économiques : une réserve est une

---

<sup>1</sup> Zhang Zai, philosophe chinois (1020 – 1078).

<sup>2</sup> Tableau classifiant les éléments selon leurs propriétés chimiques.

<sup>3</sup> United States Geophysical Survey (équivalent du BRGM français) [www.usgs.gov](http://www.usgs.gov)



ressource identifiée et explorée, que l'on peut effectivement extraire, légalement et techniquement, au prix actuel. Il existe donc trois façons d'augmenter les réserves : trouver de nouvelles ressources par l'exploration ou la recherche géologique, améliorer les techniques de production pour exploiter des concentrations plus faibles, ou tout simplement faire varier le prix. Comme pour le pétrole ou le gaz, un prix plus élevé fait mécaniquement monter les réserves.

Non seulement les questions géologiques, techniques et économiques sont spécifiques à chacun des 60 métaux (tous plus ou moins utilisés par la société industrielle), mais les métaux sont aussi interdépendants : tous ne font pas l'objet d'une exploitation minière propre, ils sont des coproduits d'autres métaux, les processus de minéralisation les ayant liés dans les mêmes minerais. C'est le cas par exemple du cobalt, coproduit du nickel ou du cuivre ; du sélénium et du tellure, souvent coproduits du cuivre ; de l'indium, du cadmium, du germanium, coproduits du zinc ; de l'antimoine et du bismuth, coproduits du plomb. D'autres métaux, comme le molybdène, l'or ou l'argent, peuvent être produits en association ou être exploités spécifiquement. Cette interdépendance est physique, c'est-à-dire que l'énergie mise en œuvre pour la production des différents métaux est en quelque sorte mutualisée, mais aussi économique : la teneur en or ou en argent d'une mine de cuivre va permettre de tirer des revenus plus élevés, donc d'exploiter le métal principal à une concentration inférieure à ce qui aurait été nécessaire dans le cas d'une exploitation monométallique !

Les perspectives sur les réserves sont donc très variables d'un métal à l'autre, mais on peut néanmoins tirer, en particulier pour les grands métaux industriels, quelques conclusions générales. Mesurées en années de production – ou de consommation – actuelle, les réserves varient de quelques décennies (antimoine, zinc, étain...) à quelques siècles (vanadium, cobalt, platine...), la grande majorité se situant entre 30 et 60 ans (nickel, cuivre, plomb...). Cela ne veut pas dire que nos ennuis commenceront après ce délai, car le nombre d'années de production n'est qu'un indicateur, pas forcément fiable.

D'abord car il s'agit d'années de production avec les hypothèses actuelles, ne tenant pas compte du taux de croissance de la consommation d'un côté, des capacités de substitution ou de l'augmentation du recyclage de l'autre. Or justement la demande s'emballe : au niveau mondial, nous avons plus que doublé la production des grands métaux industriels (aluminium, cuivre, nickel, zinc...) au cours des 20 dernières années. Les besoins futurs, notamment en Chine et en Inde, pourraient conduire à un nouveau doublement. La croissance a été encore plus impressionnante sur les « petits » métaux : le développement exponentiel de l'électronique, des nouvelles technologies, de l'aéronautique, a fait exploser la demande en métaux high tech (indium des écrans plats, lithium et cobalt des batteries, germanium des applications WiFi, lanthanides – les fameuses terres rares – dans les



éoliennes et les véhicules électriques...). Compte-tenu des taux de croissance passés et projetés, nous devrions ainsi « produire » en l'espace d'une génération, ou plutôt extraire de la croûte terrestre, une quantité plus grande de métaux que pendant toute l'histoire de l'humanité. Pharaonique.

Ensuite car les problèmes arrivent plus vite que le nombre théorique d'années de réserve : toute ressource finie passe par un pic de production. 40 ans de réserves ne garantissent pas d'une pénurie proche : c'est à peu près la quantité des réserves de pétrole, dont le pic est pourtant passé (ou imminent, selon que l'on comptabilise uniquement le pétrole conventionnel ou non). L'or a également franchi un pic dans les années 2000, mais cela est passé inaperçu du fait de son rôle très spécifique (utilisation monétaire et spéculative plutôt qu'industrielle) et de stocks disponibles bien supérieurs à la production : il y a plus de réserves d'or déjà extrait que dans le sous-sol !

Comment augmenter les réserves disponibles pour faire face à des besoins exponentiels ? On peut compter sur l'exploration minière (mais il faut aller ravager les derniers espaces naturels) et l'évolution technologique (qui peut permettre d'exploiter de nouveaux types de gisements ou à moindre coût). Les investissements en exploration minière ont beaucoup ralenti dans les décennies 1980 et 1990 après l'effondrement du bloc soviétique, puis avec la forte croissance mondiale les investissements ont massivement repris (quintuplés entre 2002 et 2007) jusqu'à la « crise » des matières premières de 2006 à 2008. Cependant, ces efforts n'ont quasiment pas apporté de gisements nouveaux. On a très peu découvert depuis 10 ans et peu de projets miniers sont prêts à entrer en production. Les découvertes majeures et simples ont été faites, les coûts des découvertes augmentent avec leur profondeur tandis que les coûts de production augmentent avec la baisse de la teneur en métal. On tourne donc quasiment « à stock constant ».

La substitution peut apporter quelques pistes : on cite souvent l'exemple du palladium qui a remplacé le platine trop onéreux dans certains pots catalytiques (le palladium est un coproduit minier du... platine). Mais il n'existe aucun substitut raisonnable au cuivre pour les applications électriques, au nickel et au chrome pour les aciers inoxydables, à l'étain pour la soudure (y compris électronique), au tungstène pour les outils de forage, à l'argent dans l'électronique et la chimie... pour ne prendre que les exemples potentiellement les plus critiques.

Ne reste, alors, qu'à faire monter le prix, et c'est d'ailleurs bien ce qui se passe à coup de soubresauts boursiers. Après tout, vu son prix, on peut se permettre d'extraire l'or à une concentration bien inférieure aux autres métaux (quelques grammes par tonne de minerai au lieu de quelques kilos ou dizaines de kilos), à un coût d'exploitation bien plus élevé ! Mais c'est là que nous devrions être rattrapés par la question énergétique.



### Concentrations en baisse et dépense énergétique : le peak everything

Pour des raisons évidentes, on a d'abord exploité les minerais les plus concentrés. A moins de découvertes géologiques majeures, bien improbables, la tendance est donc à une baisse de la concentration moyenne. Pour le cuivre, elle est ainsi passée de 1,8% dans les années 1930 à 0,8% aujourd'hui. Les mines d'or en Australie et en Afrique du Sud produisent à peine 5 grammes par tonne de minerai contre 20 il y a un siècle.

Les minerais peuvent avoir été concentrés par les activités tectoniques ou volcaniques, par érosion différentielle ou réaction avec les gaz atmosphériques, et même par activité biologique. Certaines mines de fer ont été concentrées par des colonies de bactéries il y a des centaines de millions d'années. Dans les minerais silicatés de Nouvelle-Calédonie, le nickel a été concentré jusqu'à 3 à 4% sur quelques mètres d'épaisseur (la roche mère en contient seulement 0,3%), grâce au pH acide dû à la décomposition des végétaux morts à la surface du sol.

C'est la nature « vivante » de la planète (cycle de l'eau, atmosphère oxydante maintenue par les forêts, le phytoplancton et les cyanobactéries, tectonique des plaques, vie unicellulaire, etc.) qui a permis la concentration naturelle des éléments rares. La partie exploitable des ressources métalliques constitue donc un stock très limité de « basse entropie » au milieu d'une quantité énorme de roches indifférenciées.

Or, la dépense énergétique augmente avec la concentration décroissante ou la profondeur. Cela coule de source et c'est pourquoi, bien sûr, les anciens ont commencé par piocher – dans tous les sens du terme – dans les ressources les plus concentrées, n'ayant à leur disposition que l'énergie humaine ou animale pour l'extraction et l'énergie du bois pour le raffinage.

Métaux et ressources énergétiques sont donc étroitement liés. Les métaux, toujours moins concentrés, requièrent de plus en plus d'énergie. Mais inversement, la production d'énergie, toujours moins accessible, requiert de plus en plus de métaux. Les énergies fossiles moins accessibles nécessitent plus de technologie et de ressources métalliques : c'est bien plus compliqué de produire un baril de pétrole deep offshore que sur les champs géants onshore d'Arabie Saoudite. Les énergies renouvelables font aussi massivement appel aux ressources métalliques, et des plus rares : néodyme des aimants permanents pour les génératrices d'éoliennes, gallium, indium, sélénium, cadmium ou tellure pour certains panneaux photovoltaïques, cuivre en quantité plus importante par kWh produit, etc.

Résumons : plus d'énergie pour les métaux, plus de métaux pour l'énergie, loi des rendements décroissants... La conclusion s'impose : le peak oil (pic de pétrole) sera



vraisemblablement accompagné ou suivi d'un peak everything, un pic de tout. A ce stade, ceux qui ont suivi diront que nous n'avons pas pris en compte les possibilités d'augmenter le recyclage pour réduire le taux d'extraction des métaux.

### Désillusions du recyclage

Le recyclage est effectivement un levier particulièrement efficace pour augmenter les réserves (passer d'un taux de 40% à 80% multiplie mathématiquement les réserves par 3, et les taux de recyclage actuels sont en général si bas, à quelques exceptions près, que les marges de progression sont énormes). L'idéal serait de s'approcher au plus près des 100%, même si l'économie parfaitement circulaire est utopique : en vertu du second principe de la thermodynamique, on en dissipe toujours un peu, que ce soit au moment du recyclage lui-même (la perte au feu) ou pendant l'usage (la pièce de monnaie qui s'use imperceptiblement au fil du temps). Plus élégamment, Plutarque nous disait que « le fer et le cuivre se vont usant et consumant par le seul attouchement des mains de l'homme »<sup>4</sup>. On pourrait néanmoins tenir fort longtemps avec ce taux de perte très faible. Mais deux autres effets, majeurs, nous empêchent en réalité d'atteindre des niveaux de recyclage aussi efficaces.

Le premier effet est lié à la complexité des produits, des composants et des matières (milliers d'alliages métalliques différents, mélanges de plastiques et d'additifs, matériaux composites) que nous concevons et utilisons : 30 métaux différents dans un ordinateur portable, 10 types d'aciers alliés dans une voiture, 15 métaux différents (vanadium, tungstène, cobalt, molybdène, titane, niobium...) dans un superalliage aéronautique...

Cette complexité nous empêche de récupérer facilement les ressources : capacité limitée à repérer les métaux dans les alliages, capacité technologique à les séparer. Les faibles quantités de métaux non ferreux contenues dans les aciers spéciaux sont donc ferrillées et finissent souvent, si elles sont recyclées, dans des usages moins nobles, comme les ronds à béton du bâtiment. Ainsi la filière automobile, qui utilise des aciers de haute performance, majoritairement issus de première fonte et non du recyclage, n'est qu'une sorte de gigantesque « machine entropique » à transformer des réserves métalliques exploitables en un tas de ferrailles où se perdent, dans un mélange indifférencié, de précieux métaux non ferreux.

---

<sup>4</sup> Œuvres morales (Comment il faut nourrir les enfants).



Pour éviter ce phénomène ou le limiter, on peut bien sûr mieux organiser les filières de récupération et trier. Mais on comprend qu'avec 3.000 sortes d'alliages au nickel par exemple, la mise en œuvre de solutions plus efficaces sera douloureuse. Le recyclage comporte donc presque toujours une perte fonctionnelle, une dégradation de l'usage du produit : le métal noble finit dans un acier bas de gamme, comme la bouteille plastique finit en chaise de jardin. Rien de très « circulaire » dans tout cela.

Le deuxième effet est lié aux usages dispersifs – pigments dans les encres et les peintures, catalyseurs, fertilisants, additifs dans les verres et les plastiques, pesticides (la bouillie bordelaise au sulfate de cuivre), cosmétiques (le bismuth, un métal lourd associé au plomb, dans les rouges à lèvres nacrés), feux d'artifices (!) – ou rendant le recyclage très compliqué : zinc pour la galvanisation (qui consiste à déposer une fine couche sur de l'acier), étain des soudures... Ces usages dispersifs peuvent représenter une part très importante de l'utilisation du métal : 10, 20, 30% ou plus, le cas extrême étant le titane, dont 98% sont utilisés sous forme d'oxyde comme colorant blanc universel. On touche parfois dans ce domaine à l'absurde, comme dans le cas récent du nano-argent incorporé à des chaussettes comme technologie anti-odeurs !

### Croissance verte ou décroissance

Perte par dispersion (à la source), perte mécanique (la boîte de conserve, l'agrafe et le stylo partis en décharge), perte fonctionnelle (par recyclage inefficace), perte entropique (marginale) : tel est notre destin, le cercle vertueux du recyclage est percé de partout, et à chaque « cycle » de consommation on perd de manière définitive une partie des ressources. On n'ira pas gratter la peinture anticorrosion à l'étain et au cuivre sur les vieux bateaux. Et c'est bien d'abord la manière dont nous concevons et consommons les objets qui crée l'hémorragie.

Pas grand-chose à espérer des « technologies vertes », en tout cas dans leur acception actuelle : elles sont en général basées sur des métaux moins répandus et aggravent la complexité des produits. En basant la lutte contre le changement climatique sur le tout-technologique, on utilise par exemple des aciers alliés toujours plus précis dans les voitures – pour gagner un peu de poids et quelques grammes de CO<sub>2</sub> émis par kilomètre – ou plus d'électronique et des additifs métalliques dans les vitrages des bâtiments basse consommation. Les nouvelles technologies requièrent souvent des performances plus grandes pour des applications plus pointues, qui obligent à utiliser des métaux et des alliages de grande pureté, rendant inutilisables les métaux « mélangés » issus du recyclage, et même parfois une partie des réserves dont les minerais contiennent des traces de métaux indésirables.



Rien à attendre du système actuel donc, même repeint en vert : plus que jamais notre économie favorise le jetable, l'obsolescence, l'évènementiel, l'accélération, la machinisation des services (remplacement des métiers d'accueil et de service par des machines bourrées d'électronique, donc de métaux rares), le high tech à tout prix. Comme on nie le problème de l'énergie, on occulte le sujet des ressources métalliques. Le cas de la voiture électrique ou hydrogène est emblématique. Outre le fait que ces technologies ne résolvent en rien la question énergétique, il n'y a de toute manière pas assez de lithium ou de cobalt sur terre pour équiper un parc de plusieurs centaines de millions de véhicules électriques, ni de platine pour des centaines de millions de véhicules à hydrogène !

Se profilent alors deux scénarios tendanciels. Le premier vers l'effondrement (la question métallique ne venant, ici, que renforcer les autres facteurs : énergie, eau, pollution, biodiversité, etc.), où l'on peut imaginer que l'humanité résoudra alors la question des ressources, puisque la baisse brutale de la population permettra à nos descendants de puiser, tels des ferrailleurs cueilleurs, dans un énorme stock métallique encore en place dans les villes ou les zones industrielles désaffectées. Puis peut-être une sorte de « retour » à l'âge du fer (qui, lui, ne devrait pas manquer, puisqu'il compose la croûte terrestre à 5%).

Le deuxième, qui a notre préférence, vers une baisse drastique de la consommation « nette » de matières premières non renouvelables, la quantité que nous extrayons chaque année du sous-sol, afin de préserver les générations futures d'une trop grande pénurie.

### Quelques pistes

Puisqu'à chaque cycle on perd une partie des ressources, la solution passe par un ralentissement de la vitesse des cycles, c'est-à-dire une augmentation considérable de la durée de vie des produits. Il faut donc repenser en profondeur la conception des objets, les rendre (à nouveau) réparables et réutilisables, faciliter leur recyclage en fin de vie, n'utiliser qu'avec parcimonie les ressources les plus rares et irremplaçables (cuivre, nickel...), bannir les objets jetables s'ils ne sont pas entièrement à base de ressources renouvelables.

Le gâchis actuel, au moins dans nos sociétés occidentales, étant phénoménal, nous devrions pouvoir réduire facilement et fortement nos besoins métalliques, et baser la plupart de nos besoins futurs sur le formidable stock déjà en circulation. Il s'agirait notamment :

- de bannir les usages dispersifs inutiles (certains colorants et additifs) et la plupart des objets jetables (qui devraient se limiter à des usages hygiéniques, comme quelques produits hospitaliers ou emballages alimentaires) ;





- de repenser complètement notre système de gestion des déchets : il est impensable de mélanger des nutriments, qui devraient être compostés et retournés à la terre, avec des matériaux qui devraient être recyclés. Aujourd'hui, une grande part des métaux finit encore en décharge ou dans les cendres des incinérateurs, les « mâchefers » qui sont enfouis en décharge ou étalés en sous-couches routières ;

- de concevoir des produits plus simples, plus standards, de « basse technologie » (Ivan Illich aurait dit plus conviviaux), peut-être moins performants ou moins esthétiques mais plus simples à réparer et à démanteler en fin de vie ;

- d'enclencher, par des évolutions réglementaires, fiscales mais aussi culturelles – revalorisation des métiers manuels notamment – la transition vers une consommation raisonnée, basée sur des circuits économiques ancrés localement, qui créerait de nombreux emplois avec un retour massif à l'artisanat, à la petite industrie et au commerce de proximité.

Les efforts devront porter partout, mais il est évident que certains secteurs sont beaucoup plus consommateurs que d'autres : en particulier l'automobile (y renoncer au profit d'autres modes de transport, c'est résoudre une partie non négligeable des problèmes métalliques), le bâtiment (gros consommateur, mais à durée de vie plus longue), l'électronique (qui ne trouvera son salut que dans un coup de frein au développement exponentiel des innovations et dans la foulée des besoins correspondants) et dans une moindre mesure les secteurs alimentaire (les emballages !) et sports & loisirs (pensons à tous les produits à piles par exemple).

Pour réussir un tel programme, certaines questions ne pourront pas être éludées. Celle d'une nécessaire « désurbanisation », car les grands centres urbains sont extrêmement consommateurs de ressources : il y faut plus de transports, d'infrastructures... L'escalier en pierre y devient un escalator, le stop et le passage piétons un feu tricolore et une passerelle, la boutique un centre commercial, l'atelier une tour de bureaux. Cette désurbanisation ne devra pas se faire par étalement urbain – il ne s'agit pas de fuir la ville pour développer l'habitat pavillonnaire périurbain, dont on connaît la nocivité – mais par une renaissance, une redynamisation des villages et des bourgs, à l'échelle qui permet un ancrage dans le territoire, des besoins de transport réduits mais une vie sociale suffisamment riche. Aux sceptiques, on rappellera que la population française atteignait au XIV<sup>ème</sup> siècle, avant la grande peste, presque la moitié de celle actuelle (certes, avec moins de m<sup>2</sup> par personne).

Celle du ralentissement, dans un monde pourtant voué à l'accélération. Donc du partage du temps de travail, de la remise en cause de la « modernité » (Old is beautiful !), de la question culturelle du renouveau permanent – le slogan « nouveau »



apposé sur les produits comme argument de vente devrait être remplacé par « éprouvé » ! Dans un passé pas si lointain, la vraie qualité d'un objet était sa faculté de durer : l'artisan transmettait ses meilleurs outils à son fils (nota : nous ne prétendons pas qu'il soit nécessaire d'en revenir à un tel niveau de déterminisme social, même si, après tout, dans certaines professions privilégiées, acteurs, médecins ou notaires, les générations se succèdent sans que personne ne s'en offusque...)

Celle de notre système de valeur à renverser, ou du moins à rééquilibrer. Les héros de demain, ce sont les paysans, les chiffonniers, les cordonniers, les mécaniciens, les menuisiers... tandis que banquiers, comptables, juristes, publicitaires ou « experts marché » devront tôt ou tard disparaître, ou au moins fortement réduire en nombre. Les artisans et les ouvriers spécialisés furent pendant des siècles des professions respectées, pour certaines privilégiées, avant les ravages du taylorisme. Un retour massif de l'artisanat et de la petite industrie, donc des métiers manuels, n'empêcherait pas de maintenir parallèlement la possibilité de mener des études poussées et intéressantes. Pourquoi ne pas imaginer une société où l'on n'orienterait pas les élèves sur les métiers manuels sur la base de l'échec scolaire ? On pourrait ainsi être diplômé de langues anciennes, puis devenir potier et continuer à lire, pendant ses heures de loisir – plus nombreuses qu'aujourd'hui – Sophocle et Euripide dans le texte. Ou une société où chacun partagerait son temps entre activités manuelles et intellectuelles : plombiers philosophes, instituteurs paysans... L'hyperspécialisation du travail a eu pour base la recherche permanente de productivité. Or cette productivité est devenue destructrice : nécessitant une consommation accrue d'énergie et de métaux (robotisation, machines, déplacements professionnels de spécialistes...), accélérant les besoins en équipements technologiques (informatisation), écartant une large population du marché de l'emploi, obligeant à une consommation effrénée et vide de sens.

### **Animus ex ipsa desperatione sumatur**

L'ampleur du problème dépasse largement le risque de voir quelques uns de nos joujoux high tech, à base de terres rares chinoises, tripler de prix. C'est une chose de tomber en panne d'indium – après tout, nous avons connu un monde sans écran plat dans les bureaux de poste et les boulangeries – c'en est une autre de tomber en panne de cuivre ou de nickel ! La non disponibilité en métaux ne permettant pas, quoi qu'il arrive et quels que soient les progrès technologiques, de développer les énergies renouvelables à hauteur de notre consommation actuelle, loin s'en faut, c'est l'ensemble de la société industrielle qui doit être repensé.



Nous avons bien conscience du caractère utopique, frontal, incroyable (et inadmissible au premier abord) d'un tel programme dans les conditions sociétales actuelles. Mais c'est aussi probablement le seul qui soit en mesure de susciter un réel espoir, dans un monde blasé, qui ne croit plus que mollement à la promesse de l'abondance pour tous et aux miracles technologiques, et qui, cela ne fait plus aucun doute, s'enfonce dans une crise sans fin. La route sera longue et semée d'embûches, sans garantie de réussite a priori : alors, comme le disait Sénèque, puisons notre courage à la source de notre désespoir.