

Adrien Fabre

9 mai 2015

1 Introduction

Je vais résumer un livre à mettre entre toutes les mains : écrit par des ingénieurs, il présente l'enjeu des métaux dans notre société actuelle. Il s'agit d'en décrire la production, la consommation, les réserves, mais également de comprendre comment différents paramètres influent sur la disponibilité des métaux. Il ressort de ce livre qu'on devra faire face à une pénurie pour la plupart des métaux dans les prochains siècles, voire les prochaines décennies pour certains d'entre eux. Après avoir montré le défi écologique et sociétal que l'exploitation des métaux représente, nous verrons quelles solutions économiques, techniques et sociétales s'imposent.

2 L'usage anthropique des métaux

2.1 Histoire

Une des caractéristiques principales des métaux est leur tendance à s'associer chimiquement à d'autres éléments, souvent l'oxygène, parfois le soufre (la plupart des minéraux métalliques sont des oxydes ou des sulfures), ou d'autres éléments. Dans des cas assez rares, le métal se trouve dans la nature à l'état *natif*, c'est-à-dire non lié chimiquement.

L'utilisation des métaux par l'humain a naturellement commencé par le martelage de métal à l'état natif, puis s'est développé par la fusion. La progression des techniques de réduction des oxydes métalliques par des procédés thermiques a permis d'exploiter des filons de moins en moins concentrés et d'inventer de nouveaux alliages, mais c'est seulement au début du XIX^e grâce à l'électrolyse, qui sert à séparer les éléments chimiques, que l'ensemble des métaux a été découvert. Ainsi, l'aluminium fut identifié en 1827, mais attendra jusqu'en 1887 le procédé Bayer pour passer à l'échelle d'une production industrielle. Le tableau ci-dessous résume les dates de maîtrise des métaux par l'humain.

TABLE 1 – Découverte des métaux

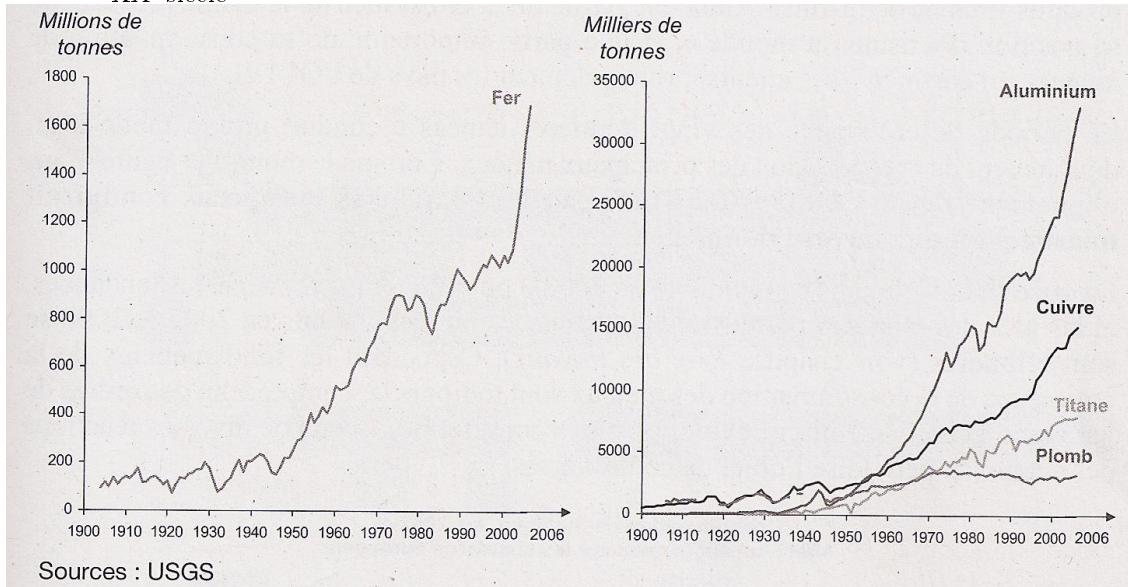
Découverte	-8000	-4000	-2500	-1000	Antiquité	XVI ^e siècle	1730-1750	Fin XVIII ^e siècle	XIX ^e siècle
Métaux	cuivre (martelé)	or, argent, cuivre fondu	bronze (étain et cuivre)	acier (fer et charbon)	plomb, antimoine, mercure	platine	zinc, cobalt, nickel	manganèse, molybdène, tungstène, titane, chrome	aluminium et autres éléments chimiques

2.2 Production et consommation

La consommation de ressources est directement liée au stade de développement des économies : le développement d'infrastructures, l'urbanisation et la construction d'usines tirent la demande en métaux ferreux, en ferro-alliages (chrome, manganèse...), en cuivre; les produits blancs (électroménager) demandent des métaux de base (aluminium, cuivre, zinc, étain...); tandis que les produits bruns (électronique), l'aéronautique et les nouvelles technologies nécessitent des métaux *high tech* comme le lithium, le cobalt, l'indium, le gallium, le germanium, le tantalum, le titane et les terres rares.

L'évolution de la consommation des principaux métaux est présentée ci-dessous, notons que les petits métaux suivent les mêmes tendances haussières.

FIGURE 1 – Évolution de la consommation mondiale des principaux métaux au XX^e siècle

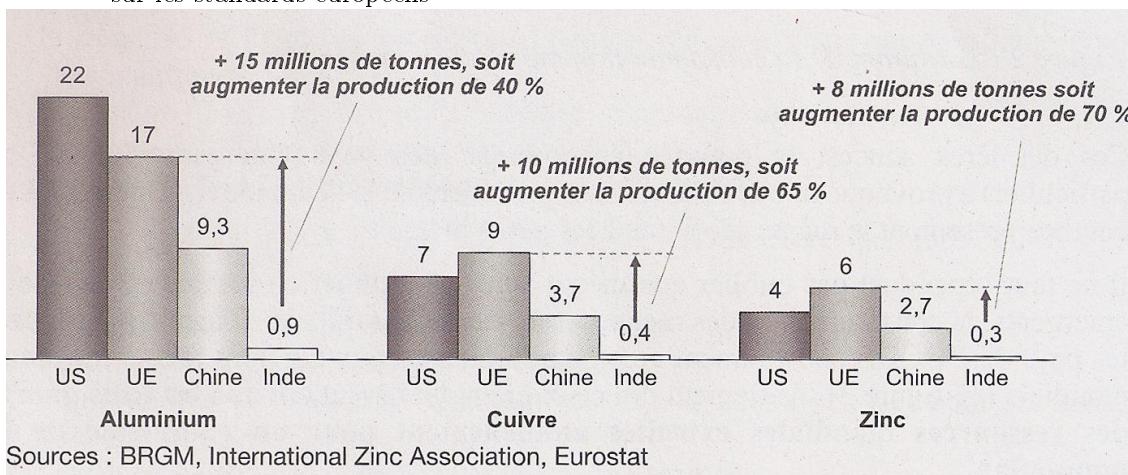


Sources : USGS

La consommation de métaux est en pleine expansion : elle a en gros doublé

en 20 ans, tirée par la croissance de la Chine mais pas seulement. En effet, la consommation directe de la Chine en métaux s'explique en grande partie par ses exportations de produits finis aux pays riches. Excepté pour le fer, les pays de l'OCDE consomment ainsi, par habitant, deux à quatre fois la moyenne mondiale (solde des imports/exports, *i.e.* hors consommation indirecte travers les produits semi-finis et finis). Autrement dit, ceux-ci engloutissent environ les trois quarts des ressources mondiales extraites annuellement pour un cinquième de la population.

FIGURE 2 – Consommation par habitant (en kg, en 2007) et effet d'un alignement sur les standards européens



Le profil de consommation des métaux a également évolué rapidement ces dernières années. En l'espace de 20 à 30 ans, nous avons plus que triplé le nombre de métaux différents que nous utilisons pour nos applications industrielles.

Le développement exponentiel des produits électroniques, des technologies de l'information et de la communication (TIC), de l'aéronautique, allié à l'innovation technologique dans la recherche de performances et de rendements, a fait exploser la demande en nouveaux métaux *high tech*. On peut ainsi citer par exemple :

- l'indium et les terres rares dans les écrans plats LCD,
- le gallium dans les LED blanches (éclairage en substitution des ampoules à incandescence),
- le germanium dans les transistors SiGe ou portables (WiFi),
- le gallium, l'indium, le sélénium, le germanium dans certaines cellules solaires photovoltaïques,
- les terres rares (néodyme, samarium, dysprosium...) dans les aimants permanents pour les éoliennes et les moteurs automobiles hybrides-électriques,
- le lithium et le cobalt dans les batteries,
- le tantalum, le niobium, le rhénium dans des superalliages

FIGURE 3 – Consommation des principaux métaux par personne par an

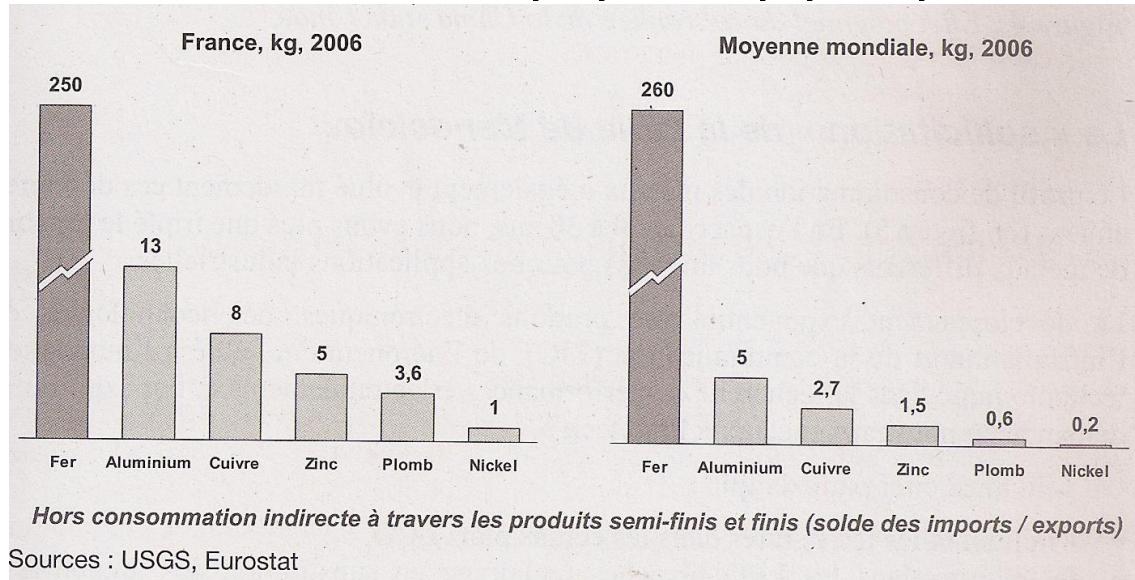


FIGURE 4 – Production des petits métaux, par pays

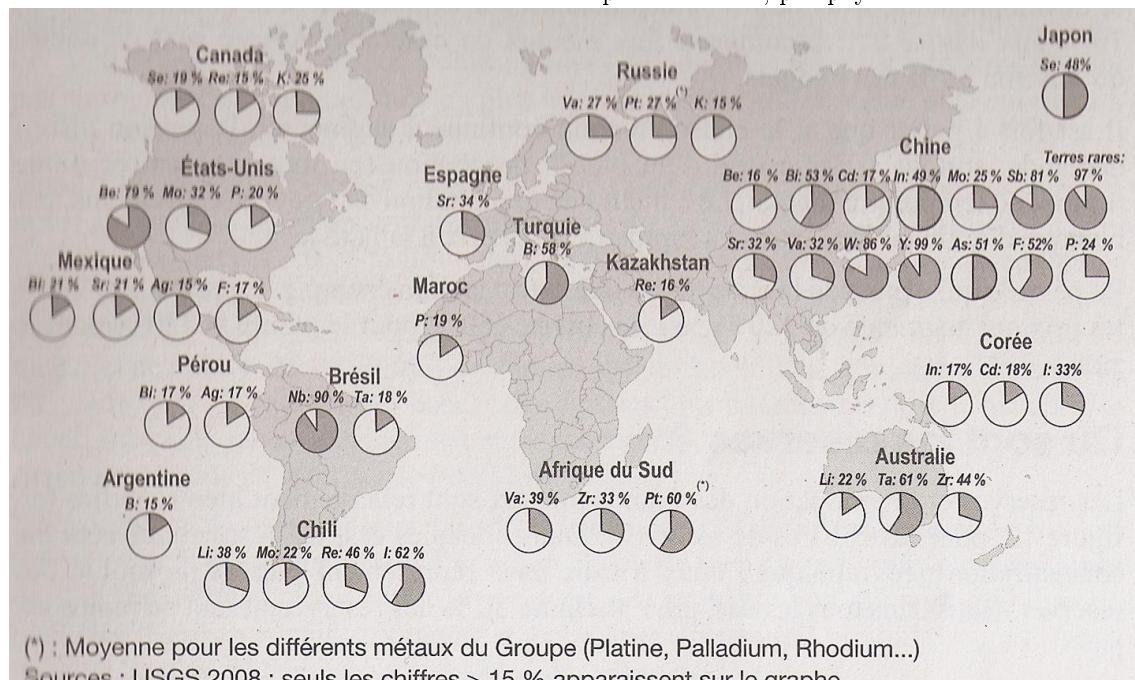


TABLE 2 – Production par pays

3 L'état des réserves

3.1 Définitions

Une ressource non renouvelable est une ressource qui ne se renouvelle pas à l'échelle d'une vie humaine, soit de l'ordre du siècle. Ainsi, les eaux de ruissellements, les cultures agricoles, l'aquaculture et le sel de mer sont-ils renouvelables, tandis que les eaux fossiles, les forêts anciennes, les ressources halieutiques en eaux profondes, les sables et graviers se renouvellent en plusieurs centaines voire milliers d'années. Enfin, les hydrocarbures mettent des centaines de millions d'années à se former, et le stock de métaux et autres minéraux est quasiment fixe sur Terre.

Certaines ressources minérales, bien que théoriquement non renouvelables, sont disponibles en telles quantités qu'elles ne sont pas épuisables à l'échelle mondiale : c'est le cas du fer, des argiles, des calcaires, de la gypse ou des sables. Les autres, en particulier la plupart des minéraux de métaux, les ressources énergétiques (pétrole, gaz, charbon), et certains minéraux très spécifiques (le kaolin, la potasse, les phosphates, la fluorine...) sont effectivement disponibles en quantité limitée à l'échelle mondiale et l'on puise chaque année dans un stock que l'on sait fini – sans toutefois connaître précisément son importance et la quantité que l'on peut en exploiter, les données disponibles faisant l'objet de révisions permanentes avec des degrés de fiabilité et de précision divers.

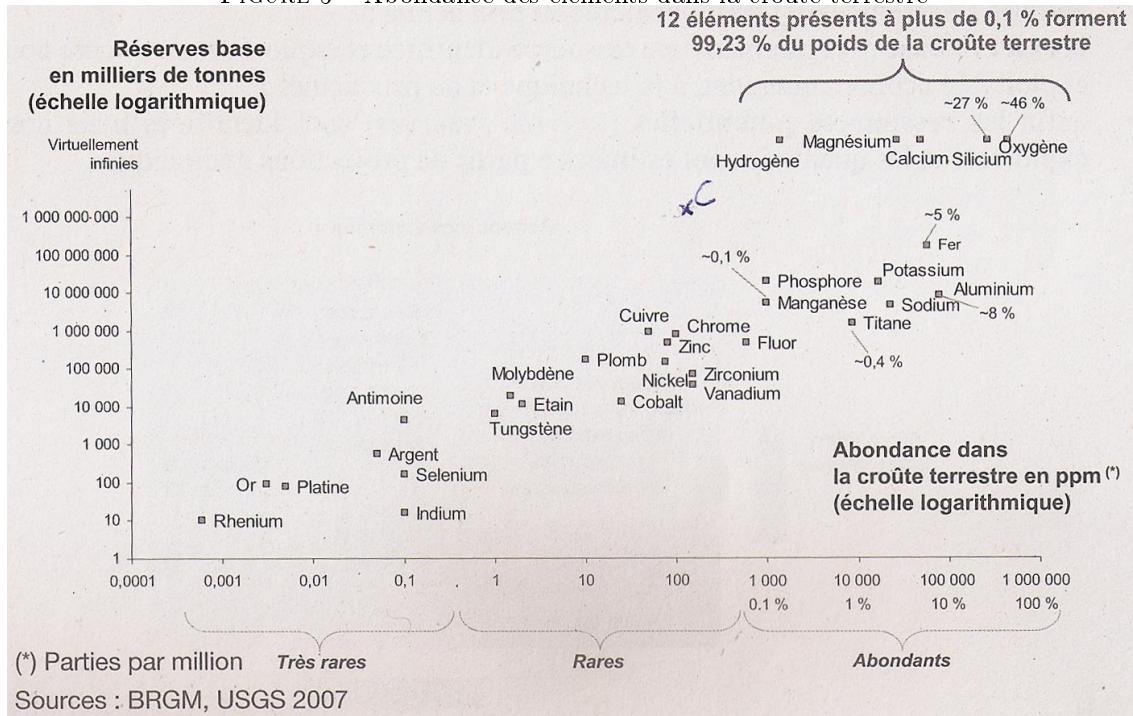
Pour parler l'état des stocks, plusieurs définitions sont à connaître :

- une réserve est une ressource identifiée et explorée, que l'on peut effectivement extraire (légalement et techniquement) au prix actuel ;
- la réserve base est également une ressource identifiée et explorée, mais non encore exploitable économiquement, à la technique et au prix actuel ;
- les ressources potentielles (*inferred reserves*) sont identifiées mais non explorées, et les quantités sont estimées à partir de projections géologiques ;
- enfin, les ressources ultimes incluent le potentiel non encore découvert.

3.2 État des lieux global

La croûte terrestre contient 88 éléments différents qui s'allient à environ 1700 types de roches. Six métaux sont parmi les éléments les plus abondants sur terre (constituant plus de 0,1% du poids de la croûte) et ne poseront pas de problème à moyen terme : le fer, l'aluminium, le silicium, le magnésium, le manganèse et le titane. On parle quand même de réserves pour ces métaux, car la concentration et la qualité des minéraux sont des éléments déterminants pour l'exploitation. Ainsi, le fer est présent à 5% en moyenne dans la croûte terrestre, mais on n'exploite que des minéraux de fer concentrés à plus de 30%. La partie exploitables des ressources métalliques constitue un stock infime (moins d'un millième) de basse entropie au milieu d'une quantité énorme de roches indifférenciées, inexploitables.

FIGURE 5 – Abondance des éléments dans la croûte terrestre



Pour tous les autres métaux, en revanche, se pose le problème de leur disponibilité à moyen terme, les réserves base n'assurant une production au rythme actuel que pour un siècle ou deux.

Mesurées en années de production actuelle, les réserves disponibles varient entre 10-20 ans (plomb, étain, antimoine) et quelques centaines d'années (vanadium, terres rares, iodé). Pour la grande majorité des éléments (cuivre, zinc, nickel, or, argent...), les réserves se situent entre 30 et 60 ans. Les réserves base sont en moyenne un peu plus du double des réserves. Cela dit, ces estimations ne constituent pas le bon indicateur pour savoir quand les ressources viendront à manquer, en effet :

- il s'agit d'années de production avec les hypothèses *actuelles*, cela ne tient pas compte de la croissance de la consommation d'un côté, des capacités de substitution et de l'augmentation du recyclage de l'autre ;
- les problèmes arrivent plus vite que le nombre théorique d'années de réserve, car toute ressource limitée passe par un pic de production : l'or a déjà franchi le sien par exemple ;
- les prix étant amenés à augmenter, des nouvelles contraintes seront admises pour produire des métaux, des nouveaux gisements seront découverts.

Cela dit, on n'a découvert que peu de gisements au début de ce siècle, malgré le quintuplement des efforts d'investissements entre 2002 et 2007 (de 2 à 10 mil-

TABLE 3 – Production et réserves de ressources non renouvelables

Matière première (tonnes)	Réserves	Réserves base	Production	Nombres d'années de réserves au rythme actuel	Nombres d'années de réserves base au rythme actuel
Pétrole (barils)	1,7E+12		3,1E+10	54	
Gaz naturel (m ³)	2,2E+14		3,3E+12	67	
CO ₂ (à titre indicatif)			3,4E+10		
Charbon	8,6E+11		7,7E+09	112	
Ciment			3,4E+09		
Fer	7,2E+10	1,6E+11	1,7E+09	42	96
Aluminium	2,5E+10		3,9E+07	641	
Manganèse			1,4E+07		
Chrome			2,1E+07		
Cuivre	5,5E+08	1,0E+09	1,6E+07	35	64
Zinc	2,0E+08	4,2E+08	1,1E+07	18	38
Magnésium			8,0E+05		
Silicium			5,0E+06		
Plomb	6,1E+07	1,3E+08	4,0E+06	15	33
Nickel	7,0E+07	1,5E+08	1,6E+06	44	94
Étain	5,6E+06	1,1E+08	3,3E+05	17	330
Molybdène	7,8E+06	1,7E+07	2,1E+05	37	81
Antimoine	2,1E+06	4,3E+06	1,7E+05	13	26
Cobalt	7,1E+06	1,3E+07	7,2E+04	99	181
Vanadium			6,0E+04		
Tungstène	3,0E+06	6,3E+06	5,5E+04	55	115
Lithium	4,1E+06	1,1E+07	2,7E+04	150	401
Argent	2,7E+05	5,7E+05	2,1E+04	13	27
Cadmium			2,1E+04		
Titane			5,0E+06		
Or	4,7E+04	1,0E+05	2,3E+03	20	43
Indium	1E+04	?	5,6E+02	20 ?	
Platine et Palladium	7,1E+05	8,0E+05	4,1E+02	1749	1970
Gallium		1,0E+06	9,5E+01		10526

liards de dollars par an), lors d'une période de hausse importante des prix des ressources naturelles. D'autres perspectives pourraient s'ouvrir, comme l'Antarctique ou les nodules polymétalliques des fonds océaniques, mais d'une part ces gisements imposent des conditions d'exploitations très difficiles, d'autre part ils ne seraient pas si importants que ça : les nodules ne permettraient d'augmenter les réserves de base pour le cuivre que de 15% ; certes ils doubleraient celles de nickel et tripleraient celles de cobalt, mais cela n'a pas de quoi tirer l'humanité d'affaire sur le très long terme. Notons qu'il est illusoire de penser trouver des métaux sur la Lune ou sur d'autres planètes, car c'est essentiellement la nature « vivante » de la Terre (cycle de l'eau, atmosphère oxydante maintenue par les forêts, phytoplancton et cyanobactéries, tectonique des plaques, vie unicellulaire, etc.) qui a permis de contrecarrer la hausse de l'entropie en concentrant naturellement les éléments rares.

Autre élément à avoir en tête : l'humain exploite d'abord les minéraux les plus concentrés, la tendance est donc à une baisse de la concentration moyenne des minéraux, à moins de découvertes géologiques majeures. Ainsi, les concentrations moyennes des minéraux de cuivre et d'or exploités ont été divisées par deux en un siècle. Cette concentration accrue s'accompagne d'une hausse des coûts d'extraction, qu'ils soient énergétiques ou environnemental (dus quantités de résidus miniers à traiter notamment).

TABLE 4 – Concentration mondiale des minéraux extraits (source : R.U. Ayres, Norbert & Rankine)

Métal	Fer	Aluminium	Zinc	Plomb	Nickel	Cuivre	Or
Concentration	30 à 60%	20 à 30%	3 à 9%	2 à 7%	1,5 à 3%	0,5 à 2%	0,0002 à 0,0006%

3.3 Réserves par pays

Pour cette partie, les tableaux parlent d'eux-mêmes. Notons que les réserves des métaux sont un enjeu stratégique extrême, comme en témoignent les réserves stratégiques mises en place par certains pays (États-Unis, Russie, Japon...) devant la concentration des réserves de certains petits métaux, comme le niobium au Brésil ou les platinoïdes en Afrique du Sud. La Chine, lors du cinquième plan, a elle constitué un stock de sécurité allant jusqu'à 10% de la consommation annuelle mondiale pour certains métaux.

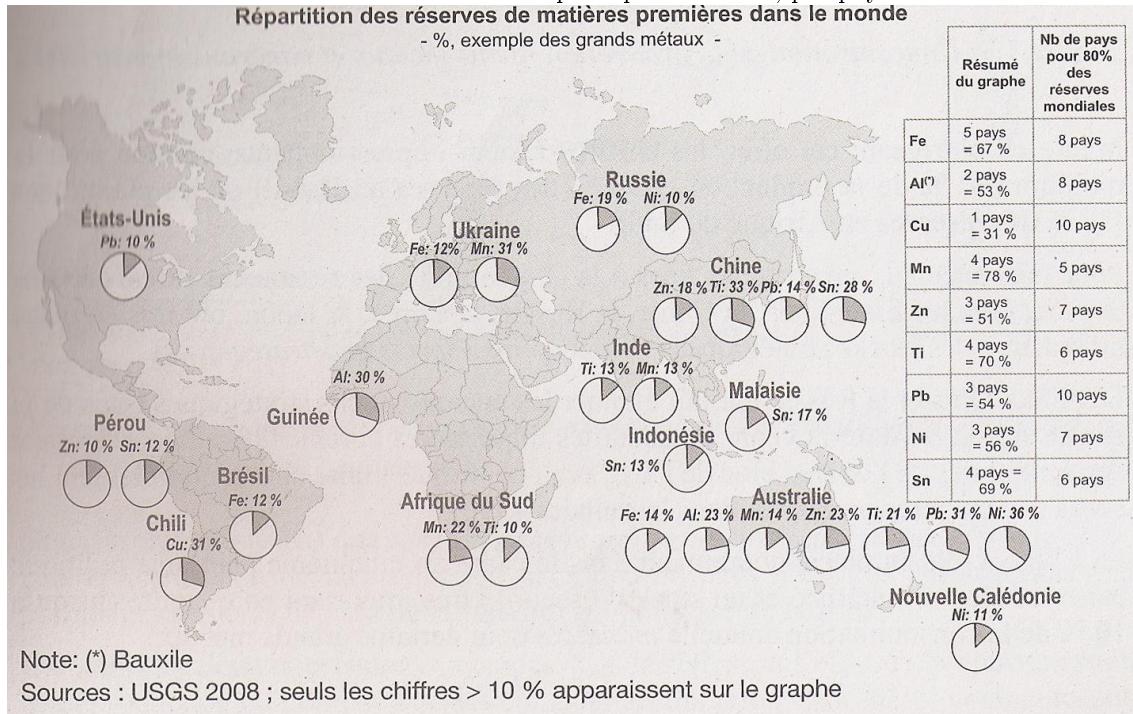
TABLE 5 – Réserves par pays

Pays (réserves)	Autres pays	Chine	Australie	Afrique du Sud	USA	Russie	Canada	Mexique	Pérou	Chili	Indonésie	Brésil	RDC	Guinée	Ukraine	Nouvelle-Calédonie
Aluminium	47%	23%														30%
Antimoine	7%	37%	2%		17%											
Argent	18%	10%	11%		9%	6%	14%	13%								
Cobalt	5%	21%			2%											48%
Cuivre	13%	5%	4%		5%	4%	2%	7%	11%	29%	7%					
Etain	3%	31%	3%		5%	5%			13%		14%	10%				
Fer	43%		14%			19%						12%				
Lithium	2%	13%	4%			4%				72%		5%				
Manganèse	42%		14%	22%												
Nickel	8%	2%	37%	5%	10%	7%						5%	6%			
Or	22%	3%	11%	13%	6%	11%	4%	3%	3%	4%	6%	4%				10%
Pétrole																
Phosphate (P_2O_5)		37%			8%	7%										
Platinoides	1%				89%	1%	9%									
Plomb	46%	14%	31%		10%											
Potasse (K_2O)	0															
Sélénium		28%														
Titane	30%	33%	21%		10%											
Tungstène	15%	61%			5%	8%	9%									
Zinc	49%	18%	23%								10%					

TABLE 6 – Réserves basée par pays

Réserves base (pays)	Autres pays	Chine	Russie	USA	Afrique du Sud	Australie	Canada	Mexique	Bolivie	Chili	Pérou	Brésil	Indonésie	Pologne	RDC
Antimoine	8%	56%	9%	2%	5%	6%	6%	7%		15%		7%			
Argent	14%	21%	14%	6%	14%	3%	2%	4%						25%	5%
Cobalt	9%	4%	3%	7%											36%
Cuivre	11%	6%	3%		3%										
Etain	2%	33%	3%												
Lithium		10%		4%											
Nickel	7%	5%	6%		8%	19%	10%								
Or	21%	4%	7%	5%	30%	6%	4%	3%		3%	2%	2%			
Platine & Palladium	1%		8%	3%	88%										
Tungstène	14%	67%	9%	3%				8%			1%				

FIGURE 6 – Réserves des principaux métaux, par pays
Répartition des réserves de matières premières dans le monde



3.4 Pureté et interdépendance

Deux facteurs viennent encore complexifier la problématique des réserves disponibles. Le premier est la question de la pureté des métaux. Les applications de plus en plus pointues exigent souvent un degré de pureté supérieur, qui rend incompatibles avec ces usages aussi bien les métaux issus du recyclage qu'une partie des réserves, car ils contiennent des traces de métaux indésirables.

Le second est l'interdépendance forte qui existe entre métaux. En effet, plus de la moitié des 50 à 60 métaux que nous utilisons aujourd'hui ont ainsi leur destin lié à d'autres d'une des façons suivantes :

- de nombreux petits métaux ne font pas l'objet d'une exploitation minière spécifique, mais sont les coproduits de l'exploitation des grands métaux, car les processus de minéralisation et leurs caractéristiques respectives les ont généralement liés dans les mêmes minerais. C'est par l'exemple le cas du cobalt, coproduit du nickel ; du sélénium, du tellure et de l'arsenic, souvent coproduits du cuivre ; de l'indium, du cadmium, du germanium et du thallium, coproduits du zinc ; de l'antimoine et du bismuth, coproduits du plomb ; du gallium, coproduit de l'aluminium ;
- d'autres petits métaux, comme le molybdène, l'or, l'argent ou le platine, peuvent être produits en association avec les grands métaux, mais aussi

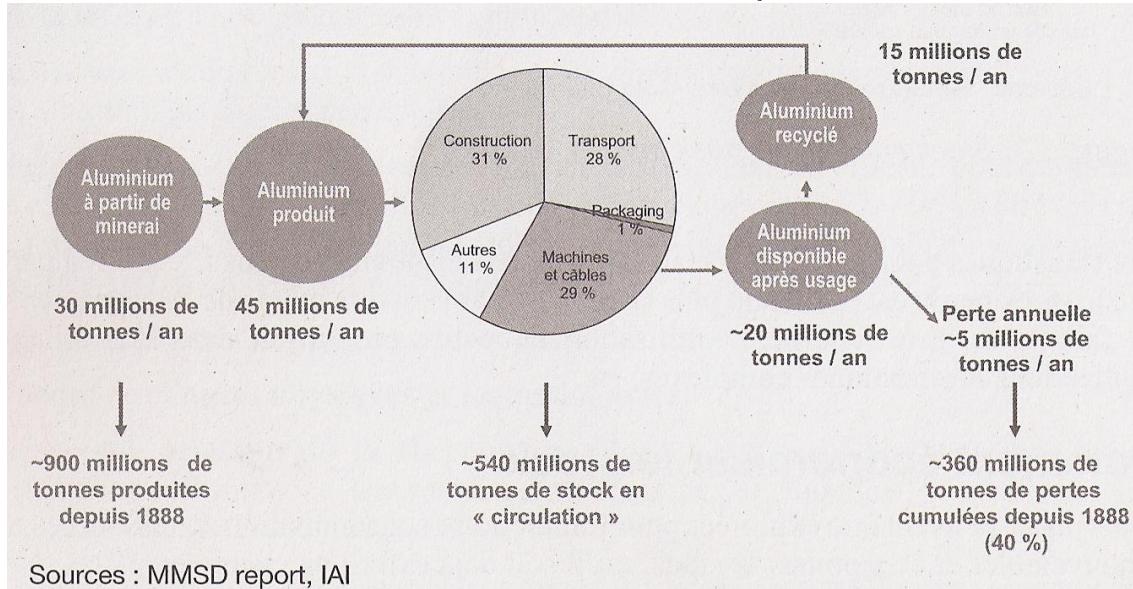
- faire l'objet d'une exploitation spécifique ;
- enfin, certains petits métaux sont eux-mêmes des coproduits d'autres petits métaux, qui font l'objet d'une exploitation spécifique. On peut citer le césum, coproduit du lithium, le rhénium qui peut être un coproduit du molybdène (et du cuivre), l'yttrium parfois coproduit de l'uranium (mais principalement produit avec les autres terres rares), le thorium souvent associé aux terres rares, et toutes les platinoïdes (palladium, iridium, osmium, rhodium, rhuténium) produits dans les mines de platine.

Cette interdépendance est économique : la teneur en or ou en argent d'une mine de cuivre va permettre d'améliorer les retours sur investissement attendus, en exploitant éventuellement le métal principal à une concentration inférieure à ce qui aurait été nécessaire dans le cas d'une exploitation monométallique. La déplétion de certains métaux peut ainsi entraîner la déplétion des petits métaux associés, c'est d'ailleurs ce qui est en train de se passer pour l'indium, utilisé dans les écrans tactiles, pour lequel l'offre n'arrive pas à faire face à la hausse de la demande. L'exploitation isolée des petits métaux peut finalement devenir extrêmement coûteuse en énergie et globalement économiquement non rentable : il serait probablement difficile de tenter d'exploiter de l'indium indépendamment du zinc, ou du bismuth indépendamment du plomb.

3.5 Le rapport flux/stock

La différence majeure entre les ressources minérales non énergétiques et les ressources énergétiques est la question du stock. Les hydrocarbures sont principalement brûlés, il s'agit donc essentiellement d'un flux non récupérable. Les métaux, eux, sont introduits dans le circuit économique. Nous avons donc à notre disposition un stock mondial encore sous terre (les réserves) et un stock mondial en circulation. Chaque année, le stock en circulation augmente de la quantité produite et se réduit de la quantité perdue à travers les usages dispersifs (usages des métaux comme colorants, catalyseurs ou fertilisants par exemple) et le non-recyclage (incinération ou mise en décharge qui revient à *diluer* ou *disperser* le stock). La figure 7 schématise ce circuit en prenant l'exemple de l'aluminium.

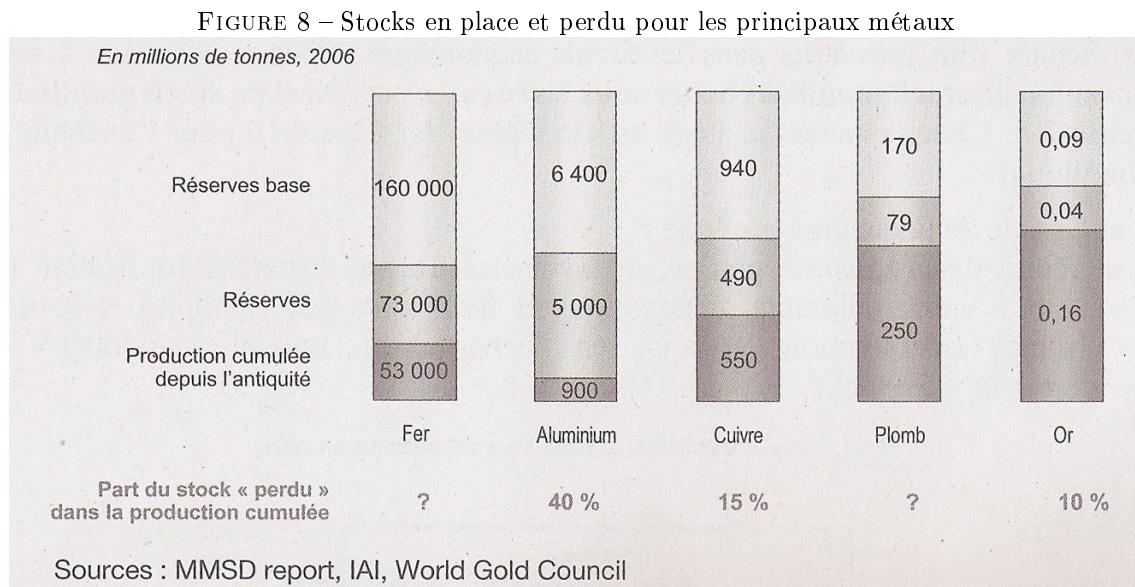
FIGURE 7 – Flux annuel d’aluminium et stock déjà extrait en 2004



Pour certains métaux précieux (comme l’or) ou facilement recyclables et d’une certaine valeur (comme le cuivre), le stock perdu est finalement très limité. Moins de 10% de l’or produit depuis l’antiquité a été perdu (galions coulés, satellites lancés ou cartes électroniques non recyclées), tandis que le stock en circulation est jalousement gardé par les banques centrales et les particuliers. Mais il s’agit d’un cas particulier et si l’on regardait uniquement l’usage industriel de l’or, la proportion perdue serait bien plus élevée.

Le cuivre est encore majoritairement en place car il se recycle bien et correspond souvent à des applications de durée de vie longue (infrastructures, bâtiments...). Il représente un stock en circulation de plusieurs centaines de kilos par habitants dans les pays de l’OCDE. Des métaux moins nobles comme l’aluminium ou le zinc présentent des taux de perte plus importants : l’hémorragie est d’environ 15% du poids extrait de la lithosphère chaque année pour l’aluminium, tandis qu’elle est de 30 à 40% pour le zinc, car l’usage majoritaire en galvanisation ou en alliage ne facilite pas le recyclage.

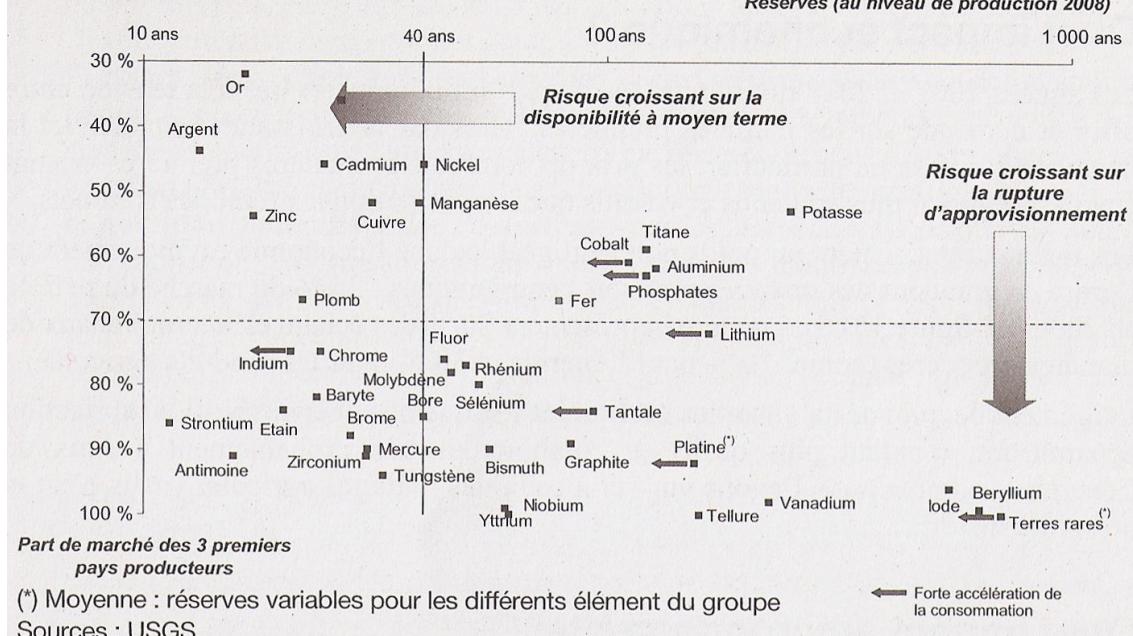
Les statistiques pour les petits métaux ne sont pas disponibles, mais il y a fort à parier que le stock perdu est beaucoup plus important, par la nature même de l’usage que l’on en fait (peu propice au recyclage) : utilisation en petite proportion dans des alliages, applications électroniques complexes, etc.



3.6 Ressources critiques

On trouve un certain nombre de ressources critiques, du point de vue de la concentration en un petit nombre de pays (dimension stratégique), du point de vue de l'insuffisance des réserves (dimension géologique), ou selon les deux dimensions réunies. Il conviendrait cependant d'étudier dans le détail la réalité de la menace d'épuisement (en estimant mieux les réserves potentielles) et son impact sur les filières et les usages. La question se pose d'autant plus d'acuité pour les métaux peu substituables et d'usage indispensable comme le cuivre (applications électriques), l'étain (soudure) ou le nickel (alliages inox), ainsi que pour les petits métaux spécifiques nécessaires au développement des énergies renouvelables et des TIC (le lithium pour les batteries par exemple).

FIGURE 9 – Criticité des métaux : niveau des réserves et concentration
Réserves (au niveau de production 2008)



Ainsi, la situation d'une dizaine de petits métaux pourrait s'avérer critique à court terme, pour une raison ou une autre (disponibilité, concentration des réserves, lien avec les grands métaux, fort développement de la demande) : lithium, cobalt, platine et platinoides (palladium, rhodium), argent, palladium, gallium, tantale...

Une dizaine d'autres vont finir par poser des problèmes de ressources à moyen terme, d'autant plus importants qu'il n'existe souvent pas vraiment de solution de substitution : cuivre, nickel, zinc, plomb, étain, tungstène, or, molybdène, cadmium...

4 Un défi écologique

4.1 Impact

Le poids économique des métaux est indéniable : ils représentent 20% des échanges internationaux de matières premières (contre 50% pour l'énergie et 30% pour les produits agricoles). En outre, les années 2007 et 2008 ont montré les risques inflationnistes liés à la tension entre offre et demande sur les métaux. Tirés par la croissance mondiale, les prix de nombreuses matières premières se sont envolés, d'autant plus soutenus et volatils que la spéculation a atteint des sommets.

Plus inquiétant encore, l'impact environnemental de l'exploitation des métaux est très fort, car il combine :

- la consommation énergétique directe pour extraire, transporter, et raffiner les minéraux — opérations particulièrement énergivores car basées sur des procédés haute température qui permettent de séparer les différents éléments présents dans un minéral, elles représentent 9% de l'énergie primaire mondiale ;
- les émissions de gaz à effet de serre directes (CO_2 pour l'acier avec la réduction du minéral de fer par le charbon à coke, perfluorocarbones pour l'aluminium) ou indirectes (CO_2 de combustion), au total 5% des émissions anthropiques ;
- l'utilisation massive de produits chimiques utilisés dans les procédés d'extraction ou de traitements du minéral (cyanure, mercure, acides, bases, solvants...), conduisant à des pollutions à très long terme après la fin de l'exploitation (drainage minier acide) ;
- l'impact des exploitations sur les écosystèmes locaux : déforestation, perturbation du cycle de l'eau, volumes des déchets (qui contiennent des traces de métaux lourds) ;
- la pollution généralisée des écosystèmes par les rejets de certains métaux nocifs, en production, en utilisation et en fin de vie (impact plus diffus et global que dans le cas des activités minières).

Par exemple, la production d'une tonne de cuivre implique une centaine de kg d'explosifs (nitrate d'ammonium) pour les mines à ciel ouvert, autant de résidus stériles, une demi-tonne d'acide sulfurique, 20 à 2500 kg de dioxyde de soufre émis dans l'air, et de fortes teneurs en métaux dans les gaz émis (germanium, bismuth, mercure, plomb...).

La déplétion des ressources s'accompagnera hélas d'une augmentation de l'impact environnemental, car il faudra mettre en production des endroits encore inexploités (sous les dernières forêts primaires, aux pôles, en mer...). Nous allons de plus produire dans les trente prochaines années une quantité de métaux plus grande que pendant toute l'histoire de l'humanité. L'impact sur l'environnement sera sans précédent et reste mal appréhendé.

4.2 Pistes pour économiser les métaux

Le premier levier pour lequel on dispose d'une marge de manœuvre importante afin d'économiser le stock est le recyclage, en particulier pour les petits métaux dont les filières sont souvent mal organisées. Il existe cependant de nombreuses limites physiques, technologiques, économiques et sociétales au recyclage *infini* et à la pure économie circulaire.

La deuxième piste consiste à développer l'innovation dans le sens d'une substitution des éléments rares vers des éléments plus abondants. Le défi est grand puisque c'est la tendance exactement inverse qui a prévalu dans les dernières décennies, avec une sollicitation toujours plus grande de la table de Mendeleïev. Ainsi, Brian Skinner prédit-il un retour à l'âge de fer.

La troisième solution est de travailler sur la réduction des besoins en ressources. Cela englobe les logiques d'écoconception, de réutilisation et plus généralement de frugalité.

4.3 Limites au recyclage

Les taux de recyclage peuvent atteindre des niveaux relativement élevés, notamment dans les pays riches et pour les grands métaux où les filières de récupération sont bien établies : ainsi en France 85% du fer, 80% de l'aluminium et du cuivre, 70% du plomb et 50% du zinc sont recyclés. Ces chiffres cachent des disparités : le recyclage industriel est plus facile et mieux organisé, ainsi la quasi-totalité de l'aluminium des automobiles est recyclé, contre seulement 60% dans les emballages.

Au niveau mondial, les taux sont bien moins élevés puisque de nombreux pays n'ont pas structuré les filières nécessaires.

D'après le second principe de la thermodynamique, un recyclage intégral est impossible, puisque les métaux sont extraits de minerais à basse entropie. Ainsi, lors de la refonte d'un lingot d'aluminium il y a une perte de matière dite « perte au feu » de l'ordre de 1 à 2%. Le recyclage n'est donc qu'un moyen de repousser une échéance inéluctable : on peut repousser l'échéance d'un facteur 10 ou 100, mais elle existe. Par exemple, un taux de recyclage de 99,9% n'augmenterait les réserves que d'un facteur 500 par rapport à un taux de 50%. Si l'humanité existe encore dans quelques dizaines de milliers d'années, elle n'aura donc vraisemblablement plus accès à la plupart des métaux actuels. Ces considérations ont poussé des économistes, comme Nicholas Georgescu-Roegen, à considérer que la décroissance de consommation de matières premières, à l'échelle globale, est nécessaire, car toute utilisation de ressource non renouvelable — a fortiori si celle-ci n'est pas recyclée — se fait au détriment des générations futures.

À cette limite physique s'ajoute une limite au recyclage liée à l'usage même que nous faisons de nos ressources. Nous faisons une utilisation toujours plus importantes d'alliages et concevons des produits de plus en plus complexes. Ainsi, il y a plus de 30 métaux différents dans un ordinateur portable, il y a facilement 10 types d'acier différents dans une voiture, les superalliages (conçus pour l'aéronautique notamment) contiennent jusqu'à 15 métaux, etc. Cette complexité nous empêche de récupérer les métaux dans les alliages, du fait des coûts énergétiques ou du manque de capacité technologique. Les faibles quantités de métaux non ferreux contenues dans certains aciers sont donc ferraillées, la plupart du temps sans possibilité de récupération (sauf mise en place de filières très spécifiques avec tri plus fin) et finissent dans des usages moins nobles, comme les ronds à béton pour le bâtiment. Ce phénomène de « dégradation de l'usage » des matières recyclées n'est pas spécifique aux métaux. Dans l'économie actuelle, les filières de recyclage consistent souvent à récupérer des matières premières ayant servi pour des usages « nobles » pour les réutilisés dans des usages techniques ou visuellement moins exigeants. C'est le syndrome de la bouteille de plastique recyclée en chaise de jardin, jamais en bouteille !

Le cycle des matières premières devra être fortement repensé pour éviter ce phénomène. Avec des conséquences sur la conception des produits (comment intégrer des matières premières issues du recyclage, éventuellement moins pures, moins performantes, moins esthétiques, comment repérer les métaux dans les alliages...) et la gestion de la fin de vie (un recyclage peut-être plus coûteux,

plus consommateur de main d'œuvre...). Pour les métaux, une partie de la solution consiste à organiser les filières de récupération (ferrailleurs) pour trier les différentes sortes d'alliage et valoriser au mieux leur contenu en métaux non ferreux. Mais avec 3000 sortes d'alliages au nickel, on comprend que la solution a ses limites. Aussi, 10 métaux sont utilisés majoritairement en alliage avec l'acier et sont donc très peu recyclés.

La course à la complexité est en partie fondée sur la recherche de meilleures performances énergétiques : c'est vrai dans le domaine des transports (alliages de performance pour réduire le poids des voitures ou des avions), de l'énergie (nouvelles technologies photovoltaïques, batteries, nucléaire...), de la chimie (amélioration des rendements par la catalyse), des travaux publics (réduction du poids de l'acier dans les ouvrages d'art), du bâtiment (équipement électronique de gestion technique pour optimiser la consommation...), développement des nouvelles technologies pour limiter les déplacements, etc. En faisant le pari du « tout technologique » dans l'optimisation de notre consommation énergétique et la lutte contre le changement climatique, nous recourons donc de façon accrue aux matières premières rares que nous ne savons pas recycler, et dont la déplétion pourrait elle-même devenir un enjeu énergétique.

La troisième limite est liée à l'usage dispersif que nous faisons des produits. C'est le cas des matières utilisées comme pigments dans les encres et les peintures, comme colorants (98% du titane utilisé sous forme de TiO_2 , colorant blanc qu'on retrouve notamment en produits d'hygiène), comme catalyseurs, comme fertilisants (phosphates, zinc, molybdène, manganèse, bore...), comme additifs (plomb, chrome dans le verre, etc.), comme pesticides (la bouillie bordelaise au sulfate de cuivre).

Ainsi, si l'on prend le cas du cobalt et du molybdène, leurs usages sont quasiment exclusivement des usages dispersifs ou en alliage. Autant dire que nous ne sommes pas près d'atteindre un recyclage de 90% pour ces métaux.

En pratique, les matières premières non recyclées se retrouvent soit dans les mâchefers (les résidus d'incinération) utilisés comme sous-couche routière (usage dispersif avec pollution à la clé par l'action de l'eau, compte tenu du contenu en métaux lourds), soit dans les sites d'enfouissement (décharges). Les décharges sont donc peut-être les mines de demain. Ainsi 16% des réserves mondiales pour l'or et 23% pour l'argent et l'indium seraient contenus dans les déchets. La récupération des métaux ferreux est imaginable par aimantation, et les matériaux légers comme l'aluminium peuvent être séparés par différentes méthodes, mais restent coûteuses en l'état actuel. Reste l'exploitation manuelle, après tout couramment utilisée dans les pays pauvres — certes dans des conditions sanitaires, économiques et éthiques déplorables — qui, paradoxalement, peuvent ainsi atteindre des taux de recyclage plus élevés que les pays riches.

5 L'économie des métaux

J'ai jusqu'ici résumé les données et les enseignements scientifiques du livre. Désormais, je vais donner la teneur politique de l'ouvrage, qui découle logi-

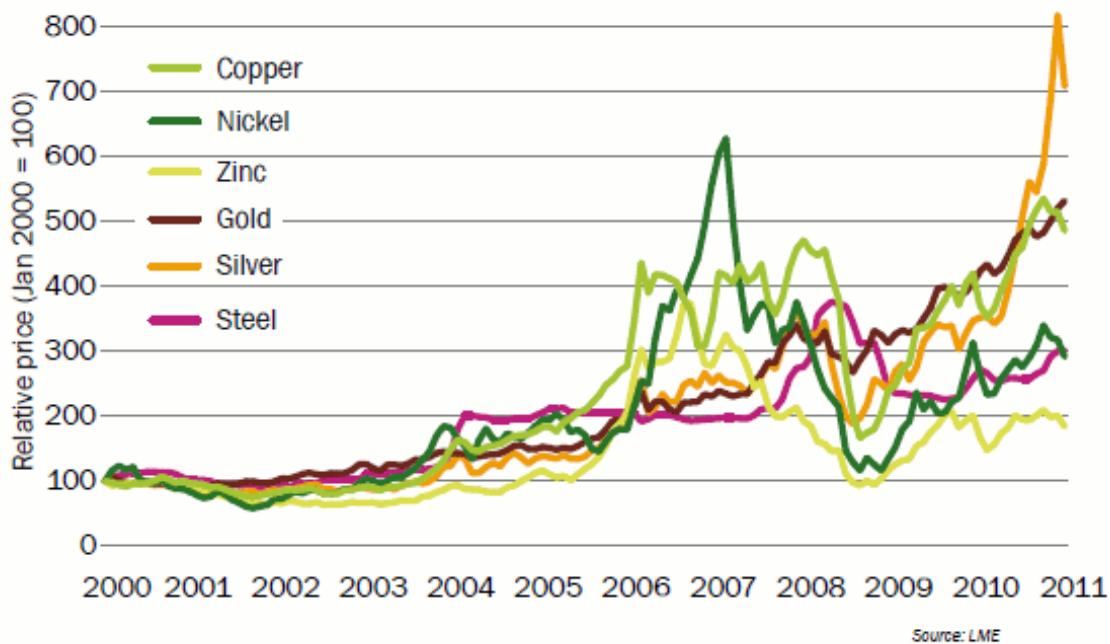
quement de la situation de pénurie de ressources à venir, et vais tenter de la prolonger.

5.1 Épuisement des ressources dans notre économie de marché

Personne ne peut prévoir quel métal viendra à manquer en premier, quand cela se passera, et surtout comment les choses vont se dérouler. On peut imaginer des guerres pour l'approvisionnement, le blocage des exportations de la part de certains pays possiblement autarciques (Australie, Chine...), l'abandon de certaines technologies qui nécessitent des ressources épuisées... Mais le plus probable, c'est l'envolée brutale des cours et une inégalité toujours plus accrue dans l'accès aux ressources. La volatilité des cours est grande pour des ressources au petit nombre de fournisseurs, pour lesquelles des innovations technologiques peuvent rapidement changer la demande, et qui sont soumises à une spéculation importante, au comportement moutonnier.

FIGURE 10 – Évolution du prix de 6 métaux, base 100 en 2000

Metals prices 2000 - 2011



Source: LME

En outre, le capital accumulé en métal est essentiellement détenu par certains états riches en infrastructure et par la fraction des humains qui possèdent immeubles et machines (par le truchement de parts d'entreprises). Aussi, il n'est pas exclu qu'une hausse des prix des métaux enrichisse la minorité qui possède déjà l'essentiel du stock extrait et éloigne un peu plus des autres la perspective d'un niveau de confort équivalent. Ainsi, le monde pourrait-il être définitivement scindé entre ceux qui ont accès au mode de vie occidental et se cloîtreraient derrière des frontières militarisées (ou simplement financières), et ceux qui seraient relégués à un mode de vie paysan traditionnel. Quoiqu'il en soit, un certain nombre d'entreprises (BHP Billiton, Rio Tinto...) et d'états (Australie, Chili, Afrique du Sud...) vont bénéficier d'une rente colossale à mesure que des mines fermeront alors que la demande ne se contractera pas.

Malgré les progrès dans le recyclage et les efforts de substitution, viendra sans doute un jour où la dernière mine de cuivre fermera. Devant le coût de la ressource, seul un nombre limité d'acteurs aurait continué à acheter du cuivre. Mais, alors que les coûts d'extraction feraient face à une nouvelle augmentation, du fait de l'utilisation de procédés toujours plus polluants et coûteux énergétiquement, et que la société aurait déjà adapté son mode de consommation, il n'y aurait plus d'acheteurs au nouveau prix, trop exorbitant.

Cependant, nous ne serons pas là pour voir si un tel scénario se réalisera. C'est d'ailleurs peut-être la raison pour laquelle l'humanité est si insouciante face à un problème qui ne se posera concrètement que pour ses descendants, et qu'elle continue à gâcher les ressources de la Terre comme s'il y en aurait indéfiniment.

5.2 Penser notre exploitation de la Nature

Il est pourtant urgent de prévoir comment utiliser les ressources à notre disposition. Il se pourrait par exemple qu'on soit entré dans un cercle vicieux entre métaux et ressources énergétiques : l'énergie, toujours moins accessible, requiert de plus en plus de matières premières (déjà 5% de l'acier mondial est consacré à l'exploration/production d'hydrocarbures, alors que la production *offshore* et les énergies renouvelables, en plein développement, consomment bien plus de métal) tandis que les métaux, toujours moins concentrés, requièrent de plus en plus d'énergie pour être extraits.

Ne nous cachons pas derrière des concepts fallacieux : la prétendue « dématérialisation » de l'économie ne réduit pas la consommation de matières premières ou d'énergie. Bien au contraire, les technologies de l'information sont gourmandes de nombreux petits métaux et d'électricité. La miniaturisation de certains objets ne réduit pas systématiquement la consommation des matières premières : d'abord parce qu'il faut considérer la consommation directe (dans l'objet) et indirecte (lors de sa production), cette dernière pouvant être de loin la plus importante pour des objets à fort contenu technologique. Ensuite parce que la miniaturisation peut rendre plus difficiles les opérations de recyclage. En réalité, nous avons autant besoin de moins de technologie que de plus de technologie, étant donné la quantité de matières premières et l'énergie requises par

les nouvelles technologies.

Il est donc nécessaire de changer nos comportements et de faire preuve de frugalité, l'écoconception des produits ne suffira pas à rendre notre économie durable. En effet, les gains unitaires de consommation (en énergie ou en ressources) réalisés sur un objet ne conduisent pas automatiquement à des gains globaux de consommation, en raison de l'effet rebond, qui fait que souvent la consommation globale augmente lorsque les biens sont plus économies. Même sans effet rebond, l'effort à réaliser pour convertir l'économie actuelle vers une économie durable sera considérable. L'économie française, par exemple, consomme, pour chaque euro de valeur ajoutée, 10 grammes de métaux.

Pour assurer cette transition, nous devons changer notre perspective temporelle, penser au long terme. Nous exploitons un stock fini de ressources, les contestations sur le diagnostic en termes temporels est donc nul et non avenu : il y aura un jour un problème de disponibilité des ressources, et il sera d'autant plus grand et les conséquences irréversibles que nous nous y prendrons tard pour l'aborder. Pour que les générations futures puissent profiter de notre niveau de confort, il est donc indispensable d'adopter une attitude humaniste et écologiste et de sensibiliser tout le monde à ces enjeux.

Concrètement, cela consisterait d'abord à sortir de la logique d'annonce qui a pour seul but de se donner bonne conscience (comme le mythe de la voiture électrique propre ou l'écotaxe d'un euro sur les téléphones) et mettre en place un véritable pilotage de notre économie au niveau européen. Le gâchis actuel est tel que rien qu'avec des réglementations et incitations adéquates qui ne remettraient pas vraiment en cause notre niveau de confort, nous aboutirions à des gains rapides et très substantiels : je pense aux taxes sur la pollution et l'utilisation de matières premières, à l'obligation de recyclage et au soutien aux filières de recyclage encore non rentables, aux contraintes en conception, à la lutte contre l'obsolescence programmée par l'obligation de garantie sur 10 ans et au développement de l'économie de la fonctionnalité.

5.3 Vers une planification ?

La gestion libérale des ressources qui prévaut consiste à laisser aux intérêts particuliers le soin de guider les comportements économiques ; les choix dans la production et l'allocation des ressources ne sont pas discutés mais découlent des désirs non coordonnés de ceux qui commandent le travail : les riches. L'allocation est évidemment déplorable, et les choix de production certainement sous-optimaux. En effet, les prix des biens et services ne prennent pas en compte l'impact environnemental que leur production fait subir, car les externalités pèsent sur d'autres personnes que les parties prenantes à l'échange, et elles ne sont en outre pas forcément quantifiables (quel est le prix d'une vie?). De plus, les prix des ressources non renouvelables sont incohérents d'un point de vue inter-temporel, car ils souffrent d'un biais pour le présent (à cause d'un effet psychologique et d'une absence des générations futures sur le marché). Enfin, l'absence de régulation ou de répression conduit les producteurs d'une ressource en voie d'épuisement à en extraire le plus possible avant qu'il ne soit

trop tard, quand le prix est au plus haut. C'est ce qui se passe actuellement avec les ressources halieutiques, et il est fort probable qu'on se soit engagé vers des consommations absurdes de certains métaux au regard d'usages alternatifs qui seraient bien plus appropriés.

J'ai donc imaginé une approche méthodologique qui permettrait de mieux appréhender la rareté des ressources.

Définissons le débit de production d'un bien j comme la quantité k_j de ce bien produite par unité de temps. On considère que la production annuelle de biens et de services peut être classée dans un nombre fini n de catégories. Des exemples de catégories sont : carottes bio, production de 1000 voitures de type 1, production d'un million de voitures de type 1, production d'un million de voitures de type 2, etc. On considère que le nombre de ressources primaires est fini et vaut m . Des exemples de telles ressources sont : le temps de travail humain disponible, le cuivre de la mine de Chuquicamata, les terres avec telle teneur en tel élément minéral et exposé à tel ensoleillement et telle pluviométrie, etc. On appelle matrice de transformation une matrice T de taille $m \times n$ dont chaque coefficient T_{ij} représente le débit de ressource primaire i nécessaire à la production d'une unité de bien j . Le débit de production k est le vecteur de taille n dont les coefficients k_j correspondent aux quantités de biens j produits par période. Le produit $d = T \cdot k$ constitue alors le débit d'extraction des ressources primaires. En appelant D_i les réserves de la ressource i (et en prenant $D_i = +\infty$ si i s'y prête (vent, soleil...)), la quantité $\min \frac{D_i}{d_i}$ donne la durabilité d'une production décrite par k .

La construction la plus fine possible de la matrice de transformation de notre économie permettrait de mieux appréhender les tensions à venir sur les matières premières, et de guider nos choix d'investissement, notamment en matière d'énergie. J'ai rassemblé les diverses informations du livre qui pouvaient l'être dans la matrice ci-après. J'aimerais plus tard prolonger ce travail pour tenter de décrire l'économie de la façon la plus désagréée possible, en termes de ressources et non plus en termes monétaires.

41348 caractères.

TABLE 7 – Matrice de transformation

Ressources fossiles (kg)	étagé principal Ariane 5	A350 (nouvelle génération)	engrais	agriculture	automobile	Full Electric Vehicles	Hybrid Electric Vehicles	Plug-in-Hybrid Electric Vehicles	construction	construction en France	400km LGV	1 kg acier	PVC	1M téléphones portable	centrale nucléaire
Vecteur de ressources actuel	100	1300		7E7								1,5E7		20	
Acier	1E3			780					4E9	1E8					
Aluminium	4E3	2,3E4			130										
Antimoine															
Argent														350	
Azote			1E11												
Chrome		2E3													
Ciment								3E9							
Cobalt		1E3				3									
Cuivre					20									1,6E4	
Étain														2	
Granulats									4E11						
Lithium		160				3	0,2	1,4							
Manganèse						38	3	18,2				0,008			
Molybdène		350													
Nickel		6E3				5	0,4	2,4							2,4E5
Niobium		650													
Or														34	
Palladium														15	
Phosphore (P)			4E10												
Platine			1000											0,34	
Plomb					8									7	
Potassium (K)			2,6E10												
Rhénium		1													
Terres arables (M km ²)					15										
Terres : pâtures (M km ²)					35										
Titane		1,7E4													
Vanadium		700													
Zinc					15										