

Matériaux du futur : l'enjeu du développement durable

Jean-Claude Prevot¹.

Introduction : évolution de la société industrielle.

La maîtrise du cycle de la matière ou des matériaux par la réutilisation et le recyclage était une caractéristique de l'ère pré-industrielle, dans la mesure où les matériaux étaient coûteux à fabriquer et le transport difficile. Ce mode de civilisation était un mélange d'autarcie et d'échanges limités aux besoins : matières non-présentes à proximité et non substituables. La notion de coût relatif ou de dumping n'intervenait pas ou peu dans les échanges. Le recyclage est le plus vieux métier du monde : « on fondra les épées pour forger des socs de charrue » (Isaïe).

La société industrielle a apporté deux grandes modifications :

- l'intensification considérable des rythmes de fabrication de produits et la mondialisation des échanges ;
- une approche consumériste des produits, rejetés en fin d'usage et faiblement réutilisés ou recyclés.

Cette évolution a culminé et probablement atteint ses limites avec la dernière mondialisation qui marque la fin du 20^{ème} siècle. Un chiffre : on estime la quantité de déchets collectés dans le monde (hors construction et démolition, mines et agriculture) entre 2,5 et 4 Mds de T/an, ce qui représente 2 à 3 fois la consommation annuelle mondiale de métaux. Siècle de la consommation sans limites, tout au moins dans les pays développés, le XX^e siècle s'est terminé avec une vision irréaliste de la disponibilité en matières premières de la planète : les cours des principaux métaux ont globalement baissé durant 50 ans en raison des gains de productivité (Fig. 1) ; malgré l'alerte lancée par le Club de Rome en 1972,

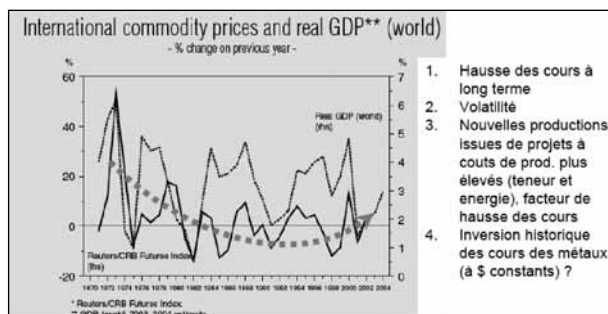


Figure 1. Évolution des cours des matières premières depuis 1970.

biaisée par la confusion entre ressources et réserves, le rythme des découvertes de gisements a permis de soutenir l'idée de ressources sans limites.

Les enjeux en termes de disponibilité des ressources

Dès son début, le XXI^e siècle change considérablement la donne avec, d'une part, l'évolution du climat liée à un accroissement de l'effet de serre dû en majeure partie à l'activité industrielle, d'autre part une inquiétude sur la disponibilité des ressources fossiles non-renouvelables (énergies et substances minérales).

L'évolution critique de ces deux facteurs est sans conteste à rapprocher du développement économique de quatre puissances émergentes (les BRIC²), dont l'influence se fait sentir depuis 2003 sur les cours et la disponibilité des matières premières et a généré le développement d'un super-cycle des matières premières, notamment en raison de la simultanéité des stades de développement économique habituellement successifs (Fig. 2).

Ces évolutions, globalement corrélées à l'accroissement de la population mondiale, sont encore aggravées par des conflits d'usage des territoires alimentés par le NIMBY² dont les conséquences sont généralement non mesurées mais qui, à terme, peut amener des blocages et des dysfonctionnements graves. Enfin, on note depuis peu que les États producteurs de matières premières et énergétiques « reprennent la main » sur ces secteurs, de

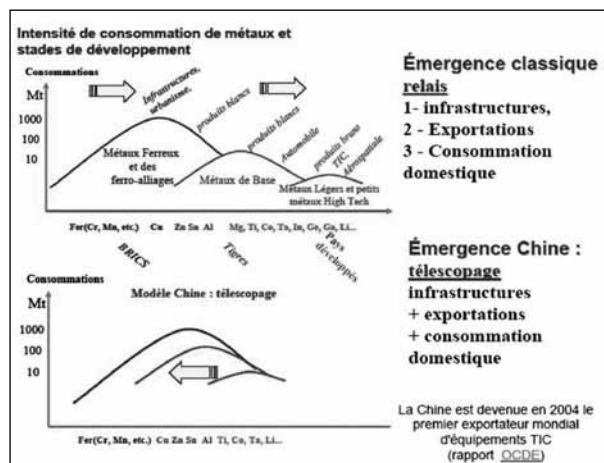


Figure 2. Têlescopage des stades de développement en Chine (C. Hocquard, 2004).

1. Directeur Agence Rhône-Alpes pour la Maîtrise des Matériaux (ARAMM). www.agmat.asso.fr, avec la participation de Christian Hocquard, Expert Économie des matières premières - BRGM.
 2 BRIC : Brésil, Russie, Inde, Chine.
 3. NIMBY : Not In My BackYard : refus par les riverains d'implantation d'infrastructures.

façon parfois brutale (Russie, Venezuela, Bolivie, etc.). Ces mesures qui vont de la taxation des superprofits, de l'instauration ou augmentation des royalties, jusqu'aux nationalisations annoncent-elles la fin de la mondialisation effrénée ?

En réaction à tous ces facteurs de tensions se produit une montée en puissance :

- du recyclage, fondé sur l'exploitation des gisements anthropiques (produits en fin de vie) ;
- de l'utilisation de ressources renouvelables.

Les tendances matériaux par marchés

Malgré l'émergence des préoccupations environnementales, notamment au niveau de la maîtrise des émissions de gaz à effet de serre (GES), et la recherche d'économies d'énergie, les marchés occidentaux matures restent caractérisés par quelques grandes tendances, comme la personnalisation (« customisation ») des produits, la multi-fonctionnalité et la miniaturisation, d'une part, la sécurité sanitaire et la traçabilité, d'autre part.

L'allègement est plus que jamais un enjeu majeur pour le transport (même si les allègements réalisés depuis 20 ans ont été largement compensés par une dérive massique liée à l'augmentation de taille et à l'ajout de nouvelles fonctions sur les véhicules), de même que les énergies alternatives basées sur l'hydrogène (un vecteur et non une énergie *sensu stricto*) ou les carburants renouvelables.

Une grande question se pose : quelle sera la part des énergies alternatives ou des matières premières de substitution ou issues du recyclage dans les sociétés du XXI^e siècle ? L'Europe en général, la France en particulier, très dépendantes des importations minérales et énergétiques pourront-elles maintenir leur niveau de vie ou devront-elles modifier considérablement leur comportement consumériste ?

Les pistes de solutions

Face aux perspectives dramatiques du XXI^e siècle pour les énergies et matières premières, et pour satisfaire les besoins d'une société fondée sur la croissance de la consommation, notamment dans les pays émergents, les développements matériaux sont appelés à suivre trois voies sein d'une démarche globale **d'éco-conception** :

- la dématérialisation : favoriser les économies matières dans les produits ;
- le recyclage et le développement de l'utilisation de matières premières secondaires : l'enjeu est désormais

d'accroître la qualité des matériaux recyclés en plus de celui d'améliorer le taux de recyclage ; pour ce faire les problèmes de résiduels doivent être résolus ;

- la substitution et notamment l'utilisation de matériaux issus de la biomasse animale ou végétale.

Dématérialisation

Cette démarche consiste en particulier à **favoriser les économies matières dans les produits** ; cependant, elle présente le risque de disséminer des matières en très faibles quantités dans des produits finis de plus en plus complexes et donc de moins en moins facilement recyclables, tout au moins avec les procédés traditionnels ; on constate de plus l'accroissement des problématiques de **résiduels** susceptible de diminuer la qualité des matériaux recyclés. Sous ce terme, on entend les éléments ou matières contenus dans des matières secondaires, non ou difficilement séparables, et dont la présence est une gêne pour les procédés de fabrication, de mise en œuvre, voire l'utilisation optimale de ces matières secondaires (exemple cuivre contenu dans les aciers incorporant des ferrailles issues du broyage de véhicules hors d'usage, VHU).

Recyclage

La première notion difficile à définir est celle de déchet, en particulier la limite entre le déchet et la matière secondaire ou valorisable. Le devenir des déchets varie depuis l'abandon sauvage, l'enfouissement en centres spécialisés (CET⁴) plus ou moins évolués, l'incinération avec ou sans récupération d'énergie, la réutilisation, l'exportation (et ce, en dépit des accords de Bâle), et le recyclage matière. Les déchets proviennent de plusieurs grandes sources : ils sont soit générés durant l'élaboration des produits (déchets industriels banaux ou DIB et spéciaux ou DIS), soit issus de la consommation (produits en fin de vie).

La problématique du recyclage est actuellement posée comme un problème de déchets dont il faut se débarrasser en les valorisant du mieux possible, tant du point de vue environnemental que du point de vue économique⁵ (Tabl. 1).

Matières premières secondaires (MPS) : inverser le paradigme !

Une nouvelle approche est nécessaire dans laquelle un parallèle doit être établi avec l'approche du mineur : les MPS sont contenues dans des *gisements anthropiques complexes*. D'abord, ils sont très dispersés géographiquement, ce qui joue d'abord sur la collecte,

4. CET : Centre d'enfouissement technique.

5. D'ailleurs, de grandes quantités de « déchets » collectés sont valorisées financièrement comme « scrapes » par des recycleurs qui les vendent à des pays friands de matières pour alimenter leur industrie émergente. Certains pays interdisent d'ailleurs leur exportation (en les considérant comme une matière première nationale). Le gain du recyclage est également énergétique dans la mesure où, par exemple pour l'aluminium, l'énergie pour le recycler n'est que 5% de l'énergie nécessaire à son élaboration à partir d'une filière primaire (bauxite et alumine).

Métal	Recyclé (kT)	Ex-minerai (kT)	Production (kT/an)	Taux recyclage (%)	Remarques
Acier	480 000	480 000	960 000	50	
Al	10 000	15 000	25 000	40	Durée de vie longue
Cu	3 000	12 000	15 000	20	Durée de vie longue
Zn	2 700	6 300	9 000	30	
Pb	3 600	2 400	6 000	60	Batteries
Ni	500	500	1 000	50	
Mg	60	240	300	20	
Sn	25	225	250	10	Très disséminé
Ti	22,5	22,5	45	50	Scrapes neufs

Tableau 1. Estimation de la part du recyclage dans la production des principaux métaux (source : document interne ARAMM d'après compilation de diverses sources, 2003).

tant au niveau de son coût que de l'impact environnemental du transport. Ensuite, ils sont hétérogènes, et l'on doit leur appliquer des critères de tonnage, de teneur, de maille de libération pour chaque substance, alliage, etc. De nouveaux systèmes analytiques (appareils de fluorescence X, comme ceux de Nitton) permettent des tris de plus en plus efficaces.

Telle matière première secondaire (MPS), définie par un cahier des charges correspondant à son utilisation en terme de matériau, se trouve dans le gisement avec les caractéristiques qui permettent ou non son extraction grâce à un procédé adapté et à un coût compétitif par rapport au coût de la matière première primaire correspondante. En outre, si une substance est d'intérêt stratégique ou présente des caractéristiques particulières du point de vue environnemental, le coût économique de son extraction ne devrait pas être le seul critère : par exemple, certains petits métaux comme l'indium, le cobalt, ou l'étain, de récupération difficile dans les déchets d'équipements électriques et électroniques (D3E).

La **durée de vie des produits** est un facteur important à plusieurs titres :

- immobilisation de matière dans les produits à durée de vie longue dans des domaines tels que l'aéronautique, l'habitat ou les infrastructures (par exemple on estime qu'en 2003, 516 Mt d'aluminium soit les $\frac{3}{4}$ du métal fabriqué depuis l'origine en 1888 étaient encore en usage !);
- évolution rapide et complexification des produits à durée de vie courte à moyenne (comme les appareils électroniques, les batteries ou les articles de sport), qui pose notamment des problèmes d'adaptation des procédés de tri à un gisement variable en teneur et en assemblage de matériaux ;
- du fait de leur durée de vie moyenne de 13 ans, les avancées en termes de recyclabilité des matériaux et d'écoconception mises en place aujourd'hui pour les

véhicules hors d'usage (VHU) seront elles encore utiles dans 13 ans, compte tenu des probables perfectionnements des méthodes de séparation des matières ?

L'**écoconception** devrait donc se concentrer en priorité sur :

- les produits à durée de vie courte ;
- l'optimisation énergétique du service rendu ;
- la simplification des gammes de matériaux utilisés et de leur assemblage.

Substitution

La substitution de matériaux par d'autres obéit à trois raisons principales.

D'abord, l'amélioration des propriétés : un des exemples les plus importants est l'allègement dans les moyens de transport (conjuguer maintien ou amélioration des performances et des coûts avec diminution de poids). D'où une chaîne de substitution avec : fonte et acier → aciers spéciaux → aluminium → magnésium → titane → composites → hybrides (composites à renforts fibres de verre ou de carbone), dans l'aéronautique d'abord, puis dans l'automobile (Fig. 3).

Ensuite, la **réponse à des contraintes environnementales**, par exemple la directive RoHS⁶ : ce type de substitution, motivé par l'application du principe de précaution, est rarement fondé sur des analyses risques-bénéfices et des analyses de cycle de vie (ACV) des produits.

Par exemple, le remplacement du plomb par l'étain dans les brasures électroniques a causé une très forte élévation de la consommation d'étain (de 250 kT en 2004 à 350kT en 2006) dont les conséquences vis-à-vis de l'environnement et du social sont importantes : la régulation des pics de demande se fait en effet largement par une augmentation de la mine et de la métallurgie informelles (notamment Indonésie, Brésil, Chine).

6. Directive RoHS : « Restriction on Hazardous Substances » - Interdiction ou limitation d'usage de substances dangereuses (métaux lourds, Hg, Pb, Cd, Cr hexavalent ; produits bromés, etc.).

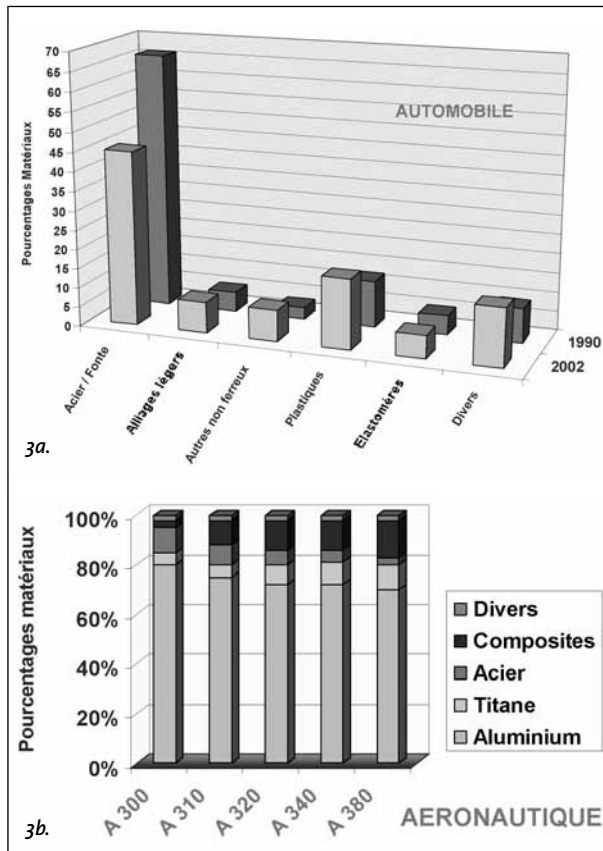


Figure 3. La compétition des matériaux pour l'allègement.
3a. Aciers et autres matériaux.
3b. Aéronautique.

Les ACV sur les produits électroniques laissent planer des doutes sur l'innocuité environnementale des nouveaux alliages (SnCuAg). De plus le recyclage du métal blanc est très peu efficace (<20%), contrairement à celui du plomb (>60%). La substitution de certains métaux considérés comme dangereux peut avoir des conséquences inattendues et doit donc être accompagnée d'ACV et d'analyses risques-bénéfices. Mais, les ACV étant souvent longues et coûteuses, on considère les études simplifiées qualitatives sur le cycle de vie, ESQCV, qui sont des ACV restreintes et ciblées sur les goulets à problèmes identifiés de manière précoce comme plus rapides et efficaces.

Troisième raison, le **remplacement de matières non renouvelables** devenues rares et chères par des matières renouvelables tels que les **matériaux issus de la biomasse** animale ou végétale : l'utilisation industrielle de la biomasse devra être gérée en termes d'impacts environnementaux, de gestion des eaux et des espaces pour éviter l'épuisement de ressources renouvelables dans un espace limité.

L'apport de la biomasse à la substitution des matériaux reste faible et devrait représenter en 2015 moins

de 5% de la production totale de polymères d'origine pétrochimiques, pour environ 1% des 18 Millions d'hectares cultivables. Coté biocarburants, environ 10% de cette surface fournissent 11 Mtep (bioester et éthanol) en 2006 à partir des filières de première génération. Le développement de la 2^{ème} génération à partir de cellulose devrait doubler cette production vers 2015. (Source : Claude ROY, coordonnateur interministériel pour la valorisation de la biomasse ; Colloque IFP sur les biocarburants, Lyon, 8 fév. 2007).

Conclusion

Le monde entre dans une ère de restrictions même si la conscience n'en est pas encore répandue : l'accroissement démographique qui pourrait amener la population mondiale à 9 milliards d'habitants en 2050 est le moteur de pressions inégalées sur l'eau, les sols, la biosphère, les ressources naturelles et l'atmosphère. Ces évolutions, difficilement maîtrisables, ne manqueront pas de poser des problèmes croissants d'ordre alimentaire, sanitaire et énergétique.

Les innovations des prochaines décennies devront donc prendre en compte le cycle de vie des produits et des matériaux et pratiquer une démarche d'écoconception systématique, fondée sur des analyses de cycle de vie précises. L'écoconception combinera la recherche de solutions fondées sur la dématérialisation (nanotechnologies), les procédés, le recyclage, et la substitution des matériaux et matières premières dans un souci d'économies d'énergie et de matière systématiques.

Documentation

- Colloque « Les Résiduels en Métallurgie » organisé le 30 mai 2006 à St-Étienne par l'Agence Rhône-Alpes pour la Maîtrise des Matériaux, le Cercle d'Etude des Métaux, la Société des Ingénieurs Automobiles et le Rhône-Alpes Automotive Cluster.
- « Du rare à l'Infini – Panorama mondial des déchets 2006 » par E. Lacoste et P. Chalmin, 2006 – Ed. ECONOMICA.
- « Cycles et super-cycles dans le domaine des matières premières minérales – Analyse des risques et comportement des acteurs » par C. Hocquard et J-C Samama – Les techniques de l'industrie minérale, N°29, mars 2006.
- « Prospective – Les matériaux : l'enjeu du développement durable », par J.-C. Prévôt, R. Lévêque, G. Buisson, C. Hocquard in « L'innovation, quelle sacré aventure ! » Hors-série JITEC – 2006.
- Colloque IFP sur les biocarburants, Lyon, 8 fév. 2007.