

# Le Cercle des Entrepreneurs du Futur

en association avec



## Grand Prix de la Réflexion Pertinente et Impertinente

**Nouveaux vieux matériaux et les enjeux du 21<sup>ème</sup> siècle :  
développement durable, énergie et CO<sub>2</sub>.**

Jean-Pierre Chevalier,  
Lauréat, Grand Prix

Professeur, Chaire des matériaux industriels  
Conservatoire national des arts et métiers  
292, rue Saint-Martin, 75141 Paris cedex 03



Paris, le 13 décembre 2007

## **Résumé :**

Après une brève présentation de travaux antérieures, une définition pour le développement durable, distinguant les pays développés et les pays en voie de développement, sera proposée. En s'appuyant sur une classification des produits inspirée des travaux d'Ashby, le rôle et l'utilisation des matériaux dans ce contexte seront examinés.

Face aux enjeux de ce siècle, essentiellement en termes de besoins énergétiques et réchauffement planétaire, l'importance primordiale des matériaux de structures et notamment ceux de grande diffusion, pour les biens de consommation et les infrastructures, deviendra apparente. Malheureusement, les matériaux existants ne répondent pas aux enjeux dans de nombreux secteurs clés (transport, production d'énergie, ...) et un réel effort de recherche, passant par un rééquilibrage des priorités, est essentiel.

## **Sommaire :**

1- Introduction	p. 2
2- Développement durable et les enjeux liés à l'énergie	p. 3
3- Et les matériaux ?	p.10
3.1- Matériaux et développement durable	p. 12
3.2- Matériaux, énergie et CO <sub>2</sub>	p. 14
3.3- Les exigences du 21ème siècle pour les matériaux ou pourquoi on doit faire mieux	p. 16
3.4- Les difficultés fondamentales	p. 19
4- Que faire ?	p. 20
4.1- Pourquoi peut-on faire mieux ?	p. 21
4.2- Une esquisse partielle et personnelle de quelques "nouveaux vieux" matériaux	p. 22
5- Conclusions	p. 24
Annexe 1	p. 26
Annexe 2	p. 27

## 1-Introduction

Les nuages annonciateurs de gros temps pour l'homme au 21<sup>ème</sup> siècle s'amoncellent de manière menaçante. Les médias font état, en fonction des autres sujets d'actualités, de changement climatique, d'environnement, de coût du pétrole, ... Certains scientifiques et technologues ont clairement identifié des problèmes majeurs liés à une insuffisance prévisible d'énergie et aux risques, devenus aujourd'hui presque des certitudes inéluctables, du réchauffement de la planète. L'objectif de cet essai est :

- de brièvement présenter ce que certains considèrent comme étant les enjeux majeurs de ce début de 21<sup>ème</sup> siècle, c'est-à-dire l'approvisionnement en énergie et le réchauffement de la planète et ces conséquences ;
- de situer la place incontournable des matériaux, notamment métalliques, face à ces enjeux, dans un contexte de développement durable.

Après une proposition de définition de développement durable, les liens entre matériaux et développement durable seront identifiés. Il deviendra rapidement évident que les points durs concernent les matériaux pour des produits de très grande diffusion ou des produits destinés à l'industrie, car ces produits sont souvent indispensables. Leur grande diffusion implique une forte consommation de matière première et d'énergie, ainsi qu'une contribution significative aux émissions de CO<sub>2</sub>. Bien qu'il soit souvent considéré que les matériaux courants (métaux, céramiques, et même polymères,...) soient largement maîtrisés, et donc se rapportent plutôt aux domaines de la simple ingénierie (et non pas d'une recherche scientifique), il sera démontré qu'il n'en n'est rien, et que des difficultés fondamentales subsistent. Ces difficultés interdisent de faire immédiatement ce que l'on voudrait avec les matériaux (par ex. concevoir des matériaux permettant de réduire le poids d'une voiture par deux, ou augmenter la température de fonctionnement d'un turboréacteur de 50 %).

Ensuite, l'urgence du contexte de ce début de siècle sera mise en avant. De nombreux documents identifient la nécessité impérieuse d'agir de manière significative avant 2015, soit pour réaliser les investissements permettant un approvisionnement en énergie, soit pour mettre en oeuvre des modes de consommation (y compris la mise en place d'alternatives énergétiques) et de vie qui conduiraient à un plafonnement de la teneur en équivalent CO<sub>2</sub> autour de 500 ppm en 2050. Face à ces urgences, la réalité du facteur temps sera évoquée : le développement de matériaux aux performances nécessaires est long, il faut compter au moins 15 ans entre le succès d'une étude de laboratoire et une mise en application industrielle. Ceci concerne aussi bien des produits de grande consommation que les équipements industriels et les infrastructures.

Pour ce faire, cette présentation s'appuie sur de nombreux documents<sup>1</sup>, largement disponibles. Pourtant, il est stupéfiant de constater que cette analyse est aussi peu traduite dans les politiques de recherche et de stratégie industrielle. Cet aspect sera également abordé.

D'une certaine manière, il est tentant de faire un parallèle entre la situation en ce début de siècle et celle de la très sombre période entre environ 1935 et 1939. D'ailleurs, plusieurs personnes le font<sup>2</sup>, en ce qui concerne le refus de prendre en compte les données et les conséquences. Juste avant le début de la Deuxième Guerre mondiale le réarmement allemand était clairement documenté, la politique expansionniste d'Hitler également. Ces aspects sont largement rapportés dans les livres d'histoire, mais aussi dans les biographies des scientifiques qui ont travaillé sur la mise au point du radar<sup>3</sup> ou qui

---

<sup>1</sup> par ex "Energy prospects after the petroleum age", Deutsche Bank Research, 02/12/2004 ;  
"The economics of climate change - The Stern review" - Nicholas Stern, Cambridge University Press (2007) ;  
ainsi que ceux cités par la suite. (également disponible en téléchargement sur le site [http://www.hm-treasury.gov.uk/independent\\_reviews/stern\\_review\\_economics\\_climate\\_change/stern\\_review\\_report.cfm](http://www.hm-treasury.gov.uk/independent_reviews/stern_review_economics_climate_change/stern_review_report.cfm).

<sup>2</sup> Jean Malaurie, dans l'émission "Bibliothèque Médecis-spéciale Jean Malaurie", LCP (La Chaîne Parlementaire), Vendredi 16 mars 2007 - disponible en téléchargement sur le site [www.lcpan.fr/](http://www.lcpan.fr/).  
Chi-Jen Yang, Physics World, 20, 7 (July) p. 16 (2007).

<sup>3</sup> voir par ex : "Radar days" E.G. Bowen, Adam Hilger, Bristol (1987)

ont conseillé Churchill<sup>4</sup>. A peine vingt ans après la fin de l'épouvantable boucherie de la Première Guerre mondiale, on comprend qu'un message de mauvais augure, annonçant un risque d'une nouvelle guerre ne pouvait pas séduire. En ce qui concerne le Royaume-Uni, il a seulement été pris en compte très tardivement en termes de technologie (notamment le radar) et d'armement. Il en fallait de peu pour que ce soit trop tard.

Aujourd'hui, cela fait plus de 50 ans qu'il n'y a pas eu de guerres planétaires, que la production agricole des pays développés est largement excédentaire, que les progrès de la médecine sont énormes, que la révolution informatique a conduit à des changements majeurs de mode de vie, que la communication et la télévision sont des acquis capitaux, que la croissance est forte, que la richesse augmente presque partout, ... Dans ce contexte de progrès ininterrompu, il est tout aussi malvenu de faire des mises en garde en disant que cela ne pourra et ne doit pas durer comme avant (le scénario "business as usual" ou "BAU"). L'analyse existe, des rapports gouvernementaux ont été rédigés<sup>5</sup>, mais on continue, en gros, comme avant - business as usual. La recherche, notamment, persiste en grande partie à suivre le schéma des années '90 en cherchant, avec les nanotechnologies, les bases pour une nouvelle révolution post-microélectronique, tout en étant persuadée que le monde est définitivement entré dans une ère post-industrielle. L'homme du 21<sup>ème</sup> siècle vivrait donc d'amour (ou plutôt de Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication, NTIC) et d'air pur !

## **2- Développement durable et les enjeux liés à l'énergie**

De manière générale, la situation paradoxale de l'énergie au début du 21<sup>ème</sup> siècle est très bien résumée dès la première ligne des "Résumé et Conclusions" du "World Energy Outlook 2006"<sup>6</sup> :

*"Le monde est confronté à une double menace liée à l'énergie : celle de ne pas disposer d'approvisionnements suffisants et sûrs à des prix abordables, et celle de nuire à l'environnement par une consommation excessive."*

Cette double menace est tellement lourde de conséquences qu'elle conditionne largement le développement durable. Ici, trois aspects seront abordés, d'abord le contexte énergétique, puis le lien entre consommation d'énergie fossile, concentration de CO<sub>2</sub> et réchauffement, et finalement une définition du développement durable. La trame est celle du rôle des matériaux, notamment métalliques, par rapport à ces enjeux.

### *Le contexte énergétique*

Les ordres de grandeur des prévisions<sup>7</sup> pour la première partie de ce siècle sont les suivants :

- d'ici à 2015, une augmentation de 25% de la demande énergétique ;

---

<sup>4</sup> "Prof, the life of Frederick Lindemann" Adrian Fort, Jonathan Cape, London (2003)

<sup>5</sup> voir par ex : "Nouvelles technologies de l'énergie", par Thierry Chambolle et Florence Méaux, rapport auprès du ministre de l'Economie, des Finances et de l'Industrie, de la ministre de l'Ecologie et du Développement durable, de la ministre déléguée à la Recherche et aux Nouvelles Technologies, de la ministre déléguée à l'Industrie, confié à un groupe de travail le 17 mars 2003.

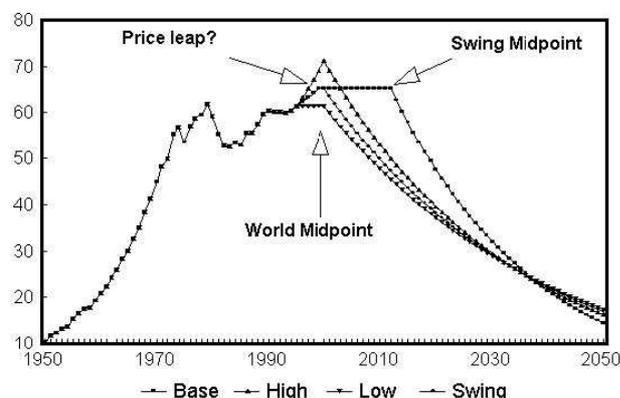
<sup>6</sup> "World Energy Outlook 2006 – Résumé et Conclusions", Agence International pour l'Energie, disponible en téléchargement sur le site [www.iea.org/](http://www.iea.org/)

<sup>7</sup> Note : ces augmentations sont par rapport aux valeurs actuelles. Les données sont issues des rapports de l'AIE (= International Energy Agency, [www.iea.org](http://www.iea.org)), des séminaires du GDR-CNRS "GEDEPEON"<sup>7</sup> ainsi que de diverses lectures. Ils sont à prendre comme des ordres de grandeur indicatifs des grandes tendances. Il est également à noter que l'accroissement des populations des villes en général et des mégalofoles en particulier, nécessite, tôt ou tard la mise en place d'infrastructures, grandes consommatrices de fort tonnage de matériaux, notamment aciers et bétons. Le GDR-CNRS GEDEPEON (Gestion des Dechets et Production d'Energie par des Options Nouvelles) regroupe le CNRS, le CEA, EDF et AREVA et fait partie du programme CNRS PACE (Programme pour l'Aval du Cycle Electronucléaire).

- d'ici à 2020, un accroissement de population mondiale de 30%, largement concentrée dans des mégapoles des pays en voie de développement (pvd) ;
- d'ici à 2030, une augmentation de 50% de la demande énergétique ;
- en 2050, un accroissement de population de 50% (ou peut-être un peu moins) et une augmentation de la demande en énergie de 100%.

En étant très optimiste, et donc en maximisant les possibilités de production<sup>8</sup>, il semblerait qu'il soit possible d'augmenter la production d'énergie de 50% d'ici 2050. Il reste donc un différentiel énorme entre besoins et production. En étant plus réaliste, la situation est bien pire et le différentiel devient bien plus important. En effet, les possibilités d'augmentation significative de la production de pétrole sont incertaines. Il est évident que les ressources en énergie fossile (non-renouvelable sur des temps non géologiques) sont bornées dans un système fermé (c.-à-d. la Terre). La question qui se pose est celle du temps durant lequel ces ressources seront disponibles. Ceci est particulièrement sensible en ce qui concerne le pétrole<sup>9</sup>.

Pour tenter de cerner une durée de vie possible des ressources pétrolières, on peut prendre une fourchette donnée par ce qu'on peut considérer comme étant deux des extrêmes disponibles. D'un côté, les plus alarmistes sont regroupés dans l'organisation "peak oil"<sup>10</sup>. Ils se basent sur la démarche de M. K. Hubbert, géophysicien américain, qui à partir d'une analyse des relevés pétrologiques du sous-sol américain, et des prévisions d'augmentation de consommation, avait prévu en 1956 et avec précision, le moment (1970) où la consommation cumulée dans le temps dépasse le volume des réserves des États-Unis. L'extrapolation de cette démarche au niveau de l'ensemble de la Terre est plus délicate, car la connaissance du sous-sol est moins complète, et les évolutions de l'exploration et des technologies de forage permettront d'augmenter les réserves exploitables<sup>11</sup>. La figure 1 montre que cette démarche conduit à prévoir, selon les modèles utilisés, le pic du pétrole entre 2007 et un peu avant 2030.



**Figure 1** : Prévision pour le pic du pétrole. D'après <http://www.hubbertpeak.com>.

<sup>8</sup> C'est-à-dire : développement des énergies renouvelables, extension de l'énergie nucléaire, pas de problème d'approvisionnement en énergie fossile.

<sup>9</sup> Les problèmes sont moins sensibles pour les gaz et beaucoup moins sensibles pour le charbon, dont le contenu en carbone proportionnellement plus élevé conduit à plus de CO<sub>2</sub> émis.

<sup>10</sup> Voir par ex. <http://www.hubbertpeak.com>.

<sup>11</sup> Par contre il faut réaliser qu'il existe une limite physique à l'exploitation ; celle-ci est atteinte lorsque l'énergie nécessaire pour extraire le pétrole devient supérieure à l'énergie récupérée sous forme de pétrole - outre l'énergie consommée lors de l'exploitation, il faut également faire l'analyse complète du cycle de vie pour intégrer le contenu énergétique des matériaux utilisés. Ceci est clairement présenté dans "La vie après le pétrole : de la pénurie aux énergies nouvelles", Jean-Luc Wingert, ed. autrement frontières, Paris (2005)

Les récents rapports de l'Agence Internationale pour l'Energie<sup>12</sup> sont un peu moins alarmistes : ils proposent que les réserves de pétrole sont suffisantes jusqu'au moins 2030 et que le pic se produirait plus tard. Cependant, les résumés ("Executive summary") mettent en avant un ensemble de recommandations qui tempèrent la conclusion sur les réserves. Le résumé du rapport 2006 mettait en avant les points suivants :

- *L'énergie fossile reste prédominante d'ici à 2030.*
- *La menace sur la sécurité énergétique mondiale est réelle et de plus en plus vive.*
- *Les investissements seront-ils au rendez-vous ?*
- *Les tendances actuelles dans le secteur de l'énergie laissent augurer une accélération des émissions de dioxyde de carbone.*
- *Une action rapide des gouvernements peut infléchir les tendances dans les domaines de l'énergie et des émissions.*
- *Les nouvelles politiques et mesures envisagées seraient rentables.*
- *Les perspectives de l'énergie nucléaire redeviennent prometteuses - à condition de répondre aux préoccupations du public.*
- *Le rôle des biocarburants dépend des nouvelles technologies.*
- *Faire du scénario de politiques (NDLR énergétiques) alternatives une réalité.*
- *Des économies d'énergie plus importantes réclameraient un effort encore plus considérable des pouvoirs publics.*
- *Il est impératif et urgent de faire accéder les pauvres aux énergies modernes.*

Le rapport 2006 précisait que des investissements cumulés de l'ordre de \$ 20 trillions (\$ 20 000 milliards), dont \$ 4 000 milliards pour le pétrole, seraient nécessaires pour assurer l'approvisionnement en énergie pendant la période 2005 - 2030 (période qui correspondrait à une augmentation de 50% de la demande). A titre de comparaison :

- Les investissements jusqu'à aujourd'hui pour l'usine de semiconducteurs Crolles 2 (Alliance Crolles 2 : Freescale Semiconductors, Philips and STMicroelectronics) correspondent à environ \$ 5 milliards.
- Un réacteur nucléaire de type EPR à environ \$ 3 milliards.
- Un Airbus A380 à \$ 275 millions.

Des investissements de \$ 20 000 milliards sur 25 ans correspondraient donc à :

- 4000 usines de type Crolles 2, soit 160/an sur 25 ans.
- 6000 réacteurs EPR, soit 240/an sur 25 ans<sup>13</sup>.
- 80 000 Airbus A380, soit 3200/an sur 25 ans.

Les investissements nécessaires sont donc colossaux, et on peut se demander si les ressources industrielles, y compris la production des matériaux de base (aciers, alliages de nickel, cuivre, aluminium, béton), seront suffisantes. Quelle que soit la raison, il est plus que vraisemblable que le coût du pétrole augmentera de manière inéluctable, entraînant celui du gaz et du charbon.

---

<sup>12</sup> "International Energy Agency" ([www.iea.org/](http://www.iea.org/)). Cette agence publie de nombreux rapports sur l'énergie et notamment "Perspectives énergétiques mondiales" (= World Energy Outlook) tous les deux ans (les années paires) avec une mise à jour les années impaires

<sup>13</sup> Le parc de réacteurs nucléaires civils mondial est aujourd'hui de l'ordre de 400.

Finalement, deux aspects de ce rapport sont à mettre en exergue : d'une part, des préoccupations liées aux émissions de CO<sub>2</sub> apparaissent plus fréquemment qu'en 2004 et d'autre part l'urgence liée à ces préoccupations est clairement mise en avant. A ce propos, il est plus fidèle de simplement citer ce texte issu du rapport 2006 :

*"L'analyse du scénario de politique alternative démontre combien il est urgent que les pouvoirs publics agissent. Chaque année de retard prise dans la mise en oeuvre des politiques analysées aurait un effet hors de proportion sur les émissions. Par exemple si l'application de ces politiques était différée de dix ans et qu'elle commençait en 2015 seulement, les émissions évitées totales en 2030, par rapport au scénario de référence, n'atteindraient que 2 %, contre 8 % dans le scénario de politique alternative. Si l'un tardait en outre à intensifier les efforts de recherche et développement énergétiques, surtout dans le domaine de la captation et du stockage du carbone, les chances de voir les émissions diminuer après 2030 seraient compromises."*

Pour conclure :

- d'une part la fourchette de dates pour le pic de pétrole se situerait entre maintenant et (un peu) après 2030, mais, dans le cadre de cette présentation, peu importe : la différence entre ces deux dates n'est pas réellement significative, car le temps pour mettre en oeuvre les matériaux et les technologies étant de l'ordre de 15 à 25 ans en général, on peut conclure qu'il est déjà tard et que le problème devrait être abordé immédiatement ;
- d'autre part, il est devenu urgent d'agir immédiatement pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub>. Cet aspect sera abordé ci-dessous.

#### *Le contexte du réchauffement*

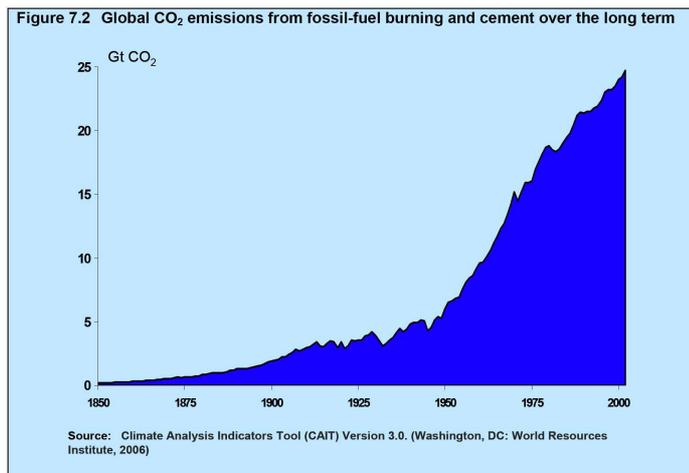
Ce dernier rapport de l'IAE (WEO 2006) offre une transition pour aborder de manière sommaire et rapide le réchauffement de la planète qui aura des conséquences dramatiques et catastrophiques pour l'homme. Cela fait sans doute plus d'une décennie que de nombreux scientifiques, notamment ceux participant à l'Intergovernmental Panel for Climate Change, proposent des liens entre gaz à effet de serre (dont le CO<sub>2</sub> est majoritaire) et réchauffement moyen de la planète. Récemment, l'ouvrage de John Houghton<sup>14</sup> fait un point complet. Ce qui est frappant, entre les premières mises en garde de l'effet de serre et maintenant, c'est le volume de recherche qui a été réalisé par les scientifiques qui a réduit les fourchettes des prévisions, confortant les craintes initiales. L'augmentation de CO<sub>2</sub> correspond bien à l'utilisation massive d'énergie fossile, dès le début de la révolution industrielle, avec une brusque augmentation vers la fin des années quarante (voir Figure 2).

Cette augmentation est remarquablement bien corrélée avec l'augmentation de la température terrestre moyenne (Figure 3). Les mécanismes physiques sous-jacents sont bien identifiés et plus sérieusement contestés. Les modèles utilisés pour les prévisions sont connus et font partie de ce qu'on peut considérer comme étant un acquis de la communauté scientifique avec les discussions et critiques normales. Les grandes tendances sont très claires et sont analysées par Houghton<sup>14</sup>. Plus récemment les conséquences économiques ont été présentées de manière particulièrement détaillée dans le rapport Stern<sup>15</sup>. Le message est aussi très clair : les conséquences du laisser-faire (le scénario "BAU") sont humainement désastreuses et économiquement catastrophiques.

---

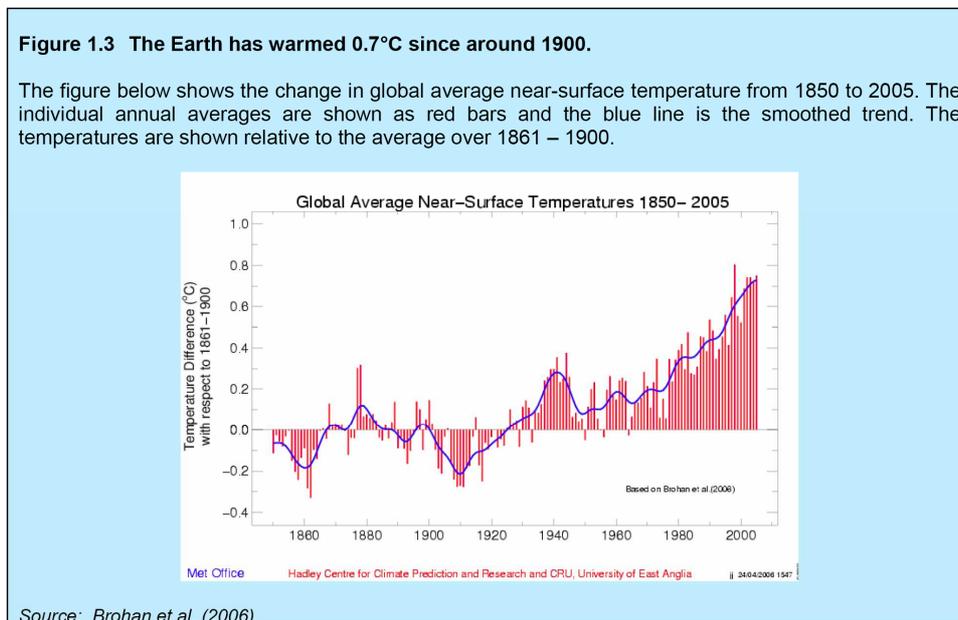
<sup>14</sup> "Global Warming : the complete briefing" - John Theodore Houghton, Cambridge University Press (2004)

<sup>15</sup> "The economics of climate change - The Stern review" - Nicholas Stern, Cambridge University Press (2007)  
également disponible en téléchargement sur le site [http://www.hm-treasury.gov.uk/independent\\_reviews/stern\\_review\\_economics\\_climate\\_change/stern\\_review\\_report.cfm](http://www.hm-treasury.gov.uk/independent_reviews/stern_review_economics_climate_change/stern_review_report.cfm)



**Figure 2 :** Augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique. Sans surprise, cette augmentation est très bien corrélée à l'augmentation de la consommation d'énergie fossile (cf Houghton<sup>14</sup>). D'après Stern<sup>15</sup>.

Selon le rapport Stern<sup>15</sup>, le coût de l'inaction serait énorme et largement supérieur à celui d'une action immédiate qui devrait viser à stabiliser le CO<sub>2</sub> équivalent dans l'atmosphère à environ 500 ppm au plus vers 2050, et limiter ainsi l'ampleur du réchauffement à la date de 2100. Cette action immédiate viserait à produire et utiliser plus efficacement l'énergie, augmenter la part des énergies n'émettant pas de CO<sub>2</sub> et réduire le CO<sub>2</sub> atmosphérique par la reforestation et le développement des technologies de séquestration. Si on ne fait rien (le scénario "BAU") la teneur en CO<sub>2</sub> atmosphérique pourrait atteindre 650 ppm<sup>16</sup> en 2100 correspondant (Tableau1) à une augmentation de la température moyenne terrestre de 3 à 7°C.



**Figure 3 :** Variation de la température terrestre moyenne depuis 140 ans. L'augmentation notable depuis 1940 est bien corrélée avec l'augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique (voir Figure 2). D'après Stern<sup>15</sup>.

<sup>16</sup> A titre de comparaison, la teneur actuelle de CO<sub>2</sub> atmosphérique est de 350 ppm, et la valeur avant la révolution industrielle est d'environ 275 ppm (Houghton<sup>14</sup>).

Le Tableau 1 traduit les valeurs de concentration en CO<sub>2</sub> atmosphérique en valeurs estimées de l'augmentation moyenne de la température terrestre. Les conséquences de ces augmentations de température terrestre, allant du très grave à l'extrêmement catastrophique sont présentées dans l'annexe 1.

**Table 1.1 Temperature projections at stabilisation**

Meinshausen (2006) used climate sensitivity estimates from eleven recent studies to estimate the range of equilibrium temperature changes expected at stabilisation. The table below gives the equilibrium temperature projections using the 5 – 95% climate sensitivity ranges based on the IPCC TAR (Wigley and Raper (2001)), Hadley Centre (Murphy *et al.* 2004) and the range over all eleven studies. Note that the temperature changes expected prior to equilibrium, for example in 2100, would be lower.

Stabilisation level (ppm CO <sub>2</sub> equivalent)	Temperature increase at equilibrium relative to pre-industrial (°C)		
	IPCC TAR 2001 (Wigley and Raper)	Hadley Centre Ensemble	Eleven Studies
400	0.8 – 2.4	1.3 – 2.8	0.6 – 4.9
450	1.0 – 3.1	1.7 – 3.7	0.8 – 6.4
500	1.3 – 3.8	2.0 – 4.5	1.0 – 7.9
550	1.5 – 4.4	2.4 – 5.3	1.2 – 9.1
650	1.8 – 5.5	2.9 – 6.6	1.5 – 11.4
750	2.2 – 6.4	3.4 – 7.7	1.7 – 13.3
1000	2.8 – 8.3	4.4 – 9.9	2.2 – 17.1

**Tableau 1 :** Correspondance entre valeurs de concentration en CO<sub>2</sub> atmosphérique et estimation (selon différents modèles) de l'augmentation moyenne de la température terrestre à l'équilibre. D'après Stern<sup>15</sup>.

### *Le contexte du développement durable*

Afin d'analyser le rôle des matériaux dans une démarche de développement durable, il est utile de proposer des définitions adaptées à cette démarche. Pour rester également dans un "esprit matériaux", la définition ci-dessous a été inspirée par les écrits de scientifiques (Schwartz<sup>17</sup> et d'Ashby<sup>18</sup>) issus de cette discipline.

En effet, Schwartz<sup>17</sup> propose :

*"sustainability implies a global economic and social system that both satisfies human needs and does not despoil the earth".*

Dans l'esprit de cette définition, l'importance de l'approvisionnement en énergie ("*satisfies human needs*") et du réchauffement climatique ("*does not despoil the planet*") n'est que trop apparente. De plus, comme le propose Richard Smalley<sup>19</sup> sans énergie on ne peut rien faire (pas de transport, pas d'eau, pas d'agriculture, pas de bâtiment, etc.).

Dans une première analyse, il peut être intéressant de distinguer les pays développés des pays en voie de développement (PVD), même si cette distinction est simplificatrice. Une autre définition du développement durable pourrait alors être :

<sup>17</sup> "Sustainability : the materials role", Lyle H. Schwartz, Met. And Mat. Trans. **30A**, 895 (1999).

<sup>18</sup> "Drivers for material development in the 21st century, M.F. Ashby, Prog. Mater. Sci. **46**, 191 (2001).

<sup>19</sup> Richard Smalley, Materials Research Society Bulletin, June 2005

- **assurer une croissance économique dans les pays développés ;**
  - **permettre aux pvd d'accéder à un niveau de vie acceptable (eau, énergie, infrastructures, ...);**
- tout en limitant les conséquences pour la planète (matières premières, énergie, réchauffement, pollution,...).**

En ce qui concerne le réchauffement, le rapport Stern<sup>15</sup> insiste sur la responsabilité incombant à la génération actuelle d'assurer un monde vivable aux générations futures.

D'une certaine manière, la classification proposée par Ashby<sup>18</sup> rejoint ces approches. Il propose de classer les biens, objets, achats,... dans deux catégories : celles qui correspondent à des "besoins" (NEED) et celles qui correspondent à des "envies" (WANT). Il devient tentant de dire, même si c'est schématique, que la croissance de la consommation (apparemment le moteur de la croissance économique) dans les pays développés correspond plutôt à des "envies" (WANT), la population étant majoritairement nourrie, logée, etc. A contrario, là où il subsiste de graves difficultés d'accès à un niveau de vie acceptable *a minima* (avec comme conséquence la malnutrition, une faible espérance de vie, une forte mortalité infantile, ...) on peut penser que ce sont les "besoins" (NEED) qui sont prioritaires.

La catégorie "besoins" couvre beaucoup de secteurs peu susceptibles de provoquer de l'excitation et encore moins de rêves. On citera les infrastructures (égouts, réseaux d'eau potable, routes, ponts, barrages, réseaux ferrés, installations portuaires, réseaux de distribution d'électricité, de gaz,...), le bâtiment, les transports (navires, camions, trains, autos, voire avions), les équipements industriels (centrales électriques, raffineries de pétrole, usines de tous genres, exploitations pétrolières, mines,...), les biens de grande consommation (électroménagers, chauffages domestiques, ...) et d'autres secteurs comme l'emballage.

Il est clair que ces besoins, notamment les infrastructures, soient pressants pour les pays en voie de développement et correspondent aux secteurs en forte croissance. Ainsi, la forte augmentation de la consommation d'acier et de béton de la Chine et l'Inde sont-elles largement liées à la mise en place des infrastructures et des bâtiments. Dans les pays développés, ces infrastructures ont été mises en place, soit il y a environ une centaine d'années, soit à partir de la fin de la Deuxième Guerre mondiale. Il ne faut cependant surtout pas oublier que les infrastructures vieillissent<sup>20</sup> et que leur remplacement nécessitera aussi de grandes quantités de matériaux, notamment aciers et bétons. Donc même si la partie besoin peut être considérée comme visant les PVD, des besoins subsistent, notamment en termes d'entretien et de renouvellement, dans les pays développés<sup>21</sup>.

De la même manière, mais avec une inversion pays développés/pvd par rapport aux besoins, il est possible de proposer que ce sont les "envies" qui jouent un rôle important dans la croissance de la consommation dans les pays riches. La consommation d'objets correspondant à des envies (voitures de luxe, ou même voiture tout court, articles de sport, vêtement de mode, électronique, ...) est clairement beaucoup plus importante dans les pays à hauts revenus que dans les pays les plus pauvres, même si ces produits ne sont pas totalement absents pour autant. Donc on pourrait très schématiquement dire que la consommation des pays développés, ayant largement satisfait leurs besoins, sera pilotée par les "envies" et que les PVD, a contrario, devront faire face aux nécessités des "besoins".

---

<sup>20</sup> Voir par ex. le rapport de l'American Society of Civil Engineers "Infrastructure Report Card 2005", disponible sur [www.asce.org](http://www.asce.org). Une page de ce rapport est présentée en annexe 2.

<sup>21</sup> Cette aspect est malheureusement souvent oublié. En effet il est tentant d'imaginer que lorsqu'un pont, bâtiment, etc est terminé, celui-ci sera, pour toutes fins utiles, éternel. Les accidents récents (tunnels à Boston, pont à Minneapolis) sont là pour nous rappeler que ce n'est pas le cas.

Dans cette analyse simplifiée, il ne faut pas imaginer que l'aspect "besoins", aujourd'hui à peu près assuré dans les pays développés, est un acquis définitif. Les infrastructures vieillissent, la demande en énergie est croissante et malgré tout, l'homme postmoderne et postindustriel continue de manger. La consommation de produits "envies" est d'abord conditionnée par la satisfaction des besoins, au moins en très grande partie.

Finalement, il faut réaliser que l'énergie, bien entendu, tombe dans la catégorie "besoins" et donc touche les pays développés et les PVD. De même, les conséquences d'un réchauffement climatique (voir annexe 1) sont tellement importantes qu'elles affecteront directement un ensemble de besoins fondamentaux (par ex. nourriture, habitation, ...).

### 3- Et les matériaux ?

Le classement sommaire, en deux catégories, de la nature des objets produits/consommés proposé par Ashby en "besoins" (NEED) et "envies" (WANT) fournit un cadre pratique pour aborder le rôle des matériaux dans un contexte de développement durable. Ce classement permet l'exploitation d'autres tableaux du même auteur<sup>22</sup> et la Figure 4 présente un certain nombre de produits en fonction de leur prix au kilo. A partir de ce tableau il est possible de situer approximativement les produits cités par Ashby dans les deux classes "besoins" et "envies".

Par exemple, il est possible de proposer pour :

**les "besoins" :** les secteurs du bâtiment, du transport et grosses infrastructures, une partie de l'emballage, une partie des biens de consommation, une grande partie des équipements de santé.

**les "envies" :** le luxe (par ex. Ferrari, la navigation de plaisance), une partie des biens de consommation (par ex. lampe de bureau), les articles de sport, et éventuellement une partie des équipements de santé (notamment pour la cosmétique).

En effet, sauf pour les applications médicales et l'aérospatiale, le gros des "besoins" correspond à des produits à faible prix au kilo et très fort volume. Les envies, sans exception, présentent des prix au kilo plus élevés. Certains secteurs comprennent les deux catégories (par ex. l'automobile qui commence avec la petite voiture utilitaire pour culminer avec les voitures "sportives" de grand luxe). Il est évident que dans certains cas il est difficile de déterminer une frontière entre "besoins" et "envies". C'est le cas, par exemple, du secteur aéronautique où il est difficile de déterminer jusqu'à quel point ce secteur est absolument indispensable ou pas. Il faut noter que le secteur "électronique" est absent de ce tableau. Aujourd'hui, on pourrait proposer qu'une partie de ce secteur corresponde bien à des "besoins" (l'informatique industrielle, ...) et le reste à des "envies" (au moins une partie de l'informatique grand public).

Lorsqu'on croise ce tableau avec les prix au kilo des matières premières (Figure 5), cela permet d'apprécier la valeur ajoutée pour chaque catégorie de produits. De manière un peu grossière, les produits des catégories "envies" (par ex : une canne à pêche en carbone, ...) correspondent à des fortes valeurs ajoutées tandis que les produits des catégories "besoins" correspondent à des valeurs ajoutées beaucoup plus faibles et souvent des masses unitaires beaucoup plus importantes (par ex. un pont).

---

<sup>22</sup> "Choix des matériaux en conception mécanique", M.F. Ashby, ed. Dunod, Paris (2000).

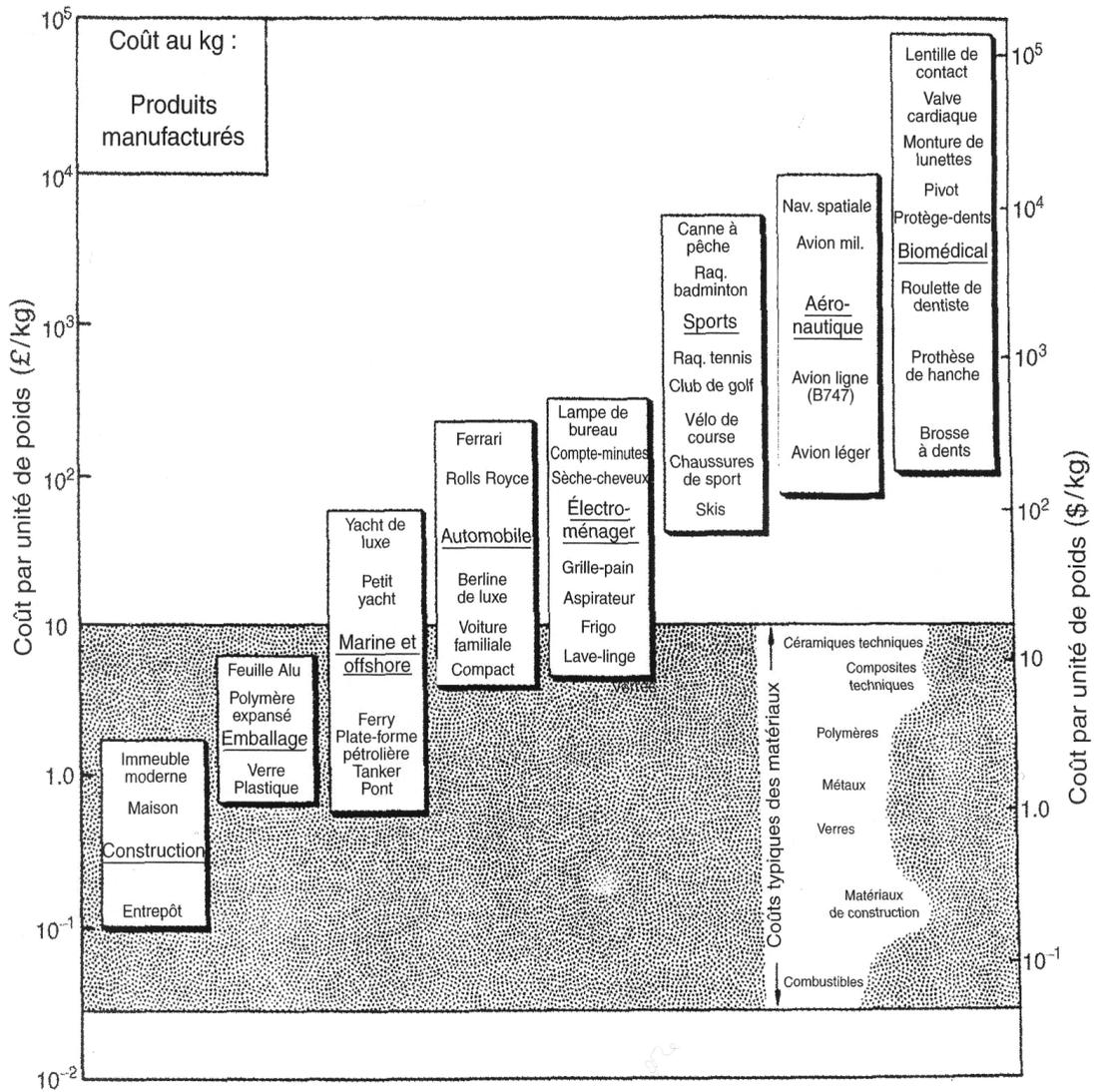


Figure 16.2 – Diagramme du coût au kilo des produits. La bande grisée couvre le champ des matériaux les plus utilisés. Les produits se trouvant à l'intérieur de cette bande sont très consommateurs de matériaux.

Figure 4 : Coût au kilo de produits courants. Il est intéressant de constater que les brosses à dents ont à peu près le même prix au kilo qu'une Ferrari ! Les valeurs absolues des coûts ne sont pas actualisées, mais le classement entre produits demeure le même. D'après Ashby<sup>22</sup>.

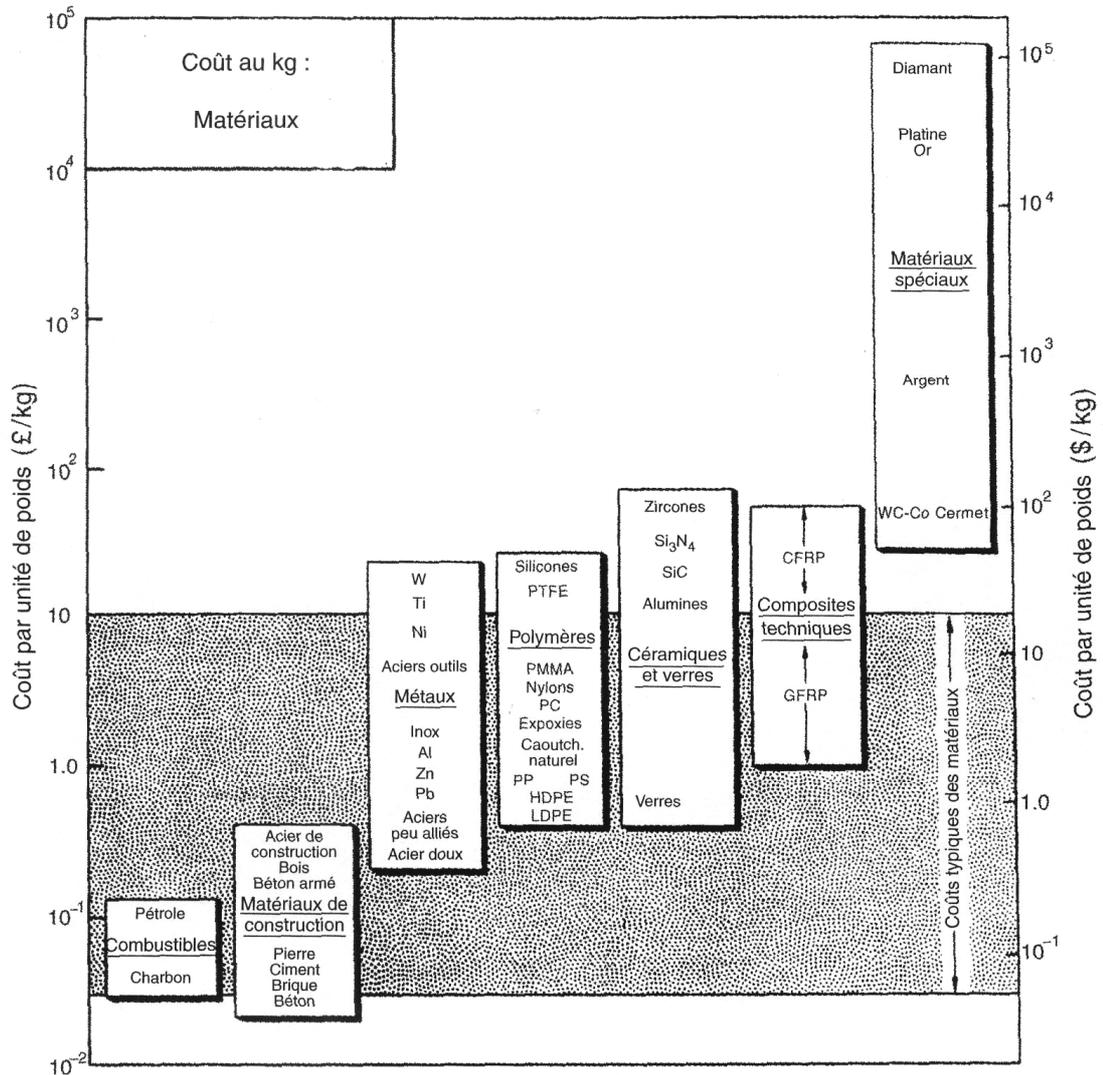


Figure 16.1 – Diagramme du coût au kilo des matériaux. La bande grisée couvre le champ des matériaux les plus utilisés (industrie manufacturière et construction).

**Figure 5 :** Coût au kilo des matériaux. La comparaison avec la Figure 4 permet d'apprécier la valeur ajoutée des produits par rapport à la valeur des matériaux les constituant. Par ex, si on considère deux produits essentiellement constitués d'acier (coût environ 1€/kg), la valeur ajoutée pour une lampe de bureau (coût 200 €/kg) est beaucoup plus importante que pour un pont (coût 1,5 €/kg). Les valeurs absolues des coûts ne sont pas actualisées, mais le classement entre produits demeure le même. D'après Ashby<sup>22</sup>.

### 3.1- Matériaux et développement durable

A partir de cette introduction, il est intéressant d'identifier soit le potentiel de développement soit les difficultés en ce qui concerne les matériaux pour les deux classes "envies" et "besoins" dans un contexte de développement durable (impact limité en termes de matières premières, d'énergie et de CO<sub>2</sub> produit). On ne considère pas dans cette présentation les problèmes liés aux produits toxiques, car dans l'ensemble ils sont plus ou moins réglables dès aujourd'hui. Les problèmes d'énergie et de réchauffement ne le sont pas aussi aisément.

### *Les produits et matériaux pour la classe "envies"*

- des produits sans matériaux. Ici il s'agit de la culture au sens large, de la communication et éventuellement de certains services. Bien qu'un support matériel existe souvent (par ex. la galette en plastique pour un CD/DVD, la toile et la peinture pour une oeuvre d'art,...), le coût du support est négligeable devant le coût du produit. Dans le contexte croisé d'une société de consommation et des contraintes du développement durable, les produits largement dématérialisés présentent des possibilités de croissance presque illimitées, car présentant une création de valeur avec un faible impact énergétique (et donc une faible production de CO<sub>2</sub>) et un très faible contenu en matériaux.
- des matériaux pour des produits à fortes valeurs ajoutées. Ceci correspond dans la Figure 6, en gros aux produits avec un prix au kilo élevé. La valeur de ces produits provient rarement seulement de la valeur des matériaux, mais intègre des procédés de fabrication plus ou moins complexes, la conception, les fonctionnalités jugées désirables, un "design" particulièrement réussi. On peut citer les articles de sport, la microélectronique grand public, les équipements pour l'aérospatiale, les produits à application médicale. Le cas des articles de sport est intéressant, car ici le produit n'est pas seulement un objet qui répond à une fonction (par ex. un club de golf) mais il véhicule également un contenu dématérialisé (plaisir, rêve de performance, appartenance à une communauté de golfeur, ...). Par exemple, la Figure 4 illustre un débouché pour une famille d'alliage, les verres métalliques massifs, qui a suscité une intense activité de recherche, mais dont l'utilité risque fort d'être limitée à quelques applications niches, plus ou moins marginales. Bien évidemment, le même type de raisonnement peut s'appliquer à d'autres articles de sport comme les cannes pour la pêche à la mouche, les skis, les chaussures de jogging, etc.



Fig. 21. Outer shapes of commercial golf clubs in wood-, iron and putter-type forms where the face materials are composed of Zr-Al-Ni-Cu bulk amorphous alloys.

*A. Inoue / Materials Science and Engineering A267 (1999) 171-183*

**Figure 6 :** Surfaces de frappe de clubs de golf réalisées en verre métallique massif Zr-Al-Ni-Cu. L'utilisation de cet alliage, qui peut apporter des petits avantages de performance, apporte surtout une nouveauté qui permet de vendre le produit plus cher. La décision d'achat ne repose pas sur des critères de performances objectifs (difficiles à évaluer de toute manière) mais sur le plaisir et le rêve que procure l'objet. D'après Inoue<sup>23</sup>

De la même manière que précédemment, le potentiel de croissance est relativement élevé, car relativement peu d'énergie et de matières premières sont consommées par rapport au prix de vente. Ce sont donc des produits (et des matériaux pour ces produits) tout à fait intéressants pour permettre une croissance de la consommation avec un impact relativement faible sur la consommation d'énergie et

<sup>23</sup> "Stabilisation and high strain rate superplasticity of metallic supercooled liquids", A. Inoue, *Mat. Sci. Eng. A* **267**, 171 (1999)

sur les émissions de CO<sub>2</sub>. Un exemple récent que l'on peut qualifier d'extraordinaire concerne la gamme de baladeurs numériques iPod, dont le prix au kilo est de l'ordre de 7000 € (c'est à dire le même qu'une canne à mouche très haut de gamme). Dans un contexte de développement durable, c'est un produit très séduisant, car il présente une très forte valeur ajoutée (fonctionnalité et design) et de plus il "consomme" un produit dématérialisé, la musique. Le prix moyen au kilo de la matière première pour un iPod (plastiques, semiconducteurs, conducteurs, piles, ...) est environ 100 fois moins élevé que celui du produit.

Pour faire bref, les produits "envies" à forte valeur ajoutée présentent des possibilités de croissance conformes à des objectifs de développement durable et de croissance de consommation. Les recherches des dernières décennies ont identifié de nombreux nouveaux matériaux avec des fonctionnalités variées qui laissent penser qu'il n'y aura pas beaucoup de difficultés pour développer de nouveaux produits dans cette catégorie. Bien entendu, cette analyse a des limites. Le raisonnement n'est plus du tout valable si l'objet des "envies" est très gros (beaucoup de kilos), très consommateur d'énergie et très producteur de CO<sub>2</sub>. Les voitures 4x4 de 385 ch, pesant 2300 kg à vide sont clairement exclues de cette analyse, car étant déjà un anachronisme à tout point de vue, bien qu'un succès commercial qui assure la rentabilité de Porsche.

#### *Les secteurs/produits et matériaux pour la classe "besoins"*

Si le message sur certains produits "envies" est porteur d'un certain optimisme, la situation se dégrade fortement lorsqu'on aborde les "besoins" et les matériaux pour ces besoins. Les secteurs à prendre en compte sont ceux liés :

- aux infrastructures (routes, ponts, chemins de fer, égouts, distribution d'eau, de gaz, d'électricité,...);
- aux transports (bateaux, camions, trains, voitures, avions, ...);
- à l'énergie (exploration et exploitation pétrolière, raffineries, centrales thermiques, centrales nucléaires, barrages, éoliennes, ...);
- aux bâtiments ;
- aux équipements industriels (machines, outils, lignes de production, bref ce qu'il y a dans les usines);
- aux biens de consommation courante (machines à laver, cuisinières, casseroles, ...).

Les raisons pour lesquelles les besoins en matériaux dans ces secteurs posent problème sont les suivantes :

- Ils nécessitent presque toujours de gros volumes impliquant beaucoup de matières premières. Il s'agit essentiellement de fer, nickel, cuivre et aluminium pour les matériaux métalliques, et de bétons et polymères pour les non métalliques. De l'énergie est nécessaire pour les produire et pour les transformer en produits finis (voir Figure 7 et Tableau 2).
- Sauf dans le cas des infrastructures fixes (par ex. un pont), ces secteurs consomment beaucoup d'énergie. Comme les énergies fossiles dominent le "mix" énergétique, cette consommation d'énergie conduit inévitablement à une production de CO<sub>2</sub>.

**Donc le secteur des "besoins" est celui qui pose les problèmes les plus cruciaux pour le développement durable. Le défi vise par voie de conséquence les matériaux qui sont nécessaires pour satisfaire ces besoins.**

### **3.2- Matériaux, énergie et CO<sub>2</sub>**

Les liens entre matériaux, énergie et CO<sub>2</sub> sont maintenant présentés. Ashby<sup>18</sup> synthétise très clairement les besoins en énergie à toutes les étapes du cycle de vie d'un produit (Figure 7). Cette figure montre que la consommation d'énergie (et donc les émissions de CO<sub>2</sub> et de chaleur) intervient à toutes les étapes de l'extraction de la matière première à la fin de vie du produit fini. Une première

remarque, contraire aux habitudes d'une société de consommation, s'impose. Si on doit réduire la consommation d'énergie/production de CO<sub>2</sub>, il faudrait que la durée de vie du produit soit prolongée. Une augmentation de la durée de vie<sup>24</sup> d'une voiture ou d'un lave-linge par un facteur deux apporterait une amélioration sensible (Ashby<sup>18</sup> l'estime à une réduction de 50 % pour trois des quatre postes<sup>25</sup> de la Figure 5, c'est-à-dire les postes de production de matière première, de fabrication de produits et traitement de fin de vie).

Ensuite, le coût de l'énergie a un impact direct sur les matières premières. Ainsi :

- le coût des polymères augmente de 50 % lorsque le prix du baril de pétrole double ;
- le coût du ciment dépend fortement (et vraisemblablement directement) du prix des énergies fossiles ;
- le coût de l'aluminium dépend du prix de l'électricité ;
- le coût de l'acier dépend du prix de l'électricité et du charbon ;

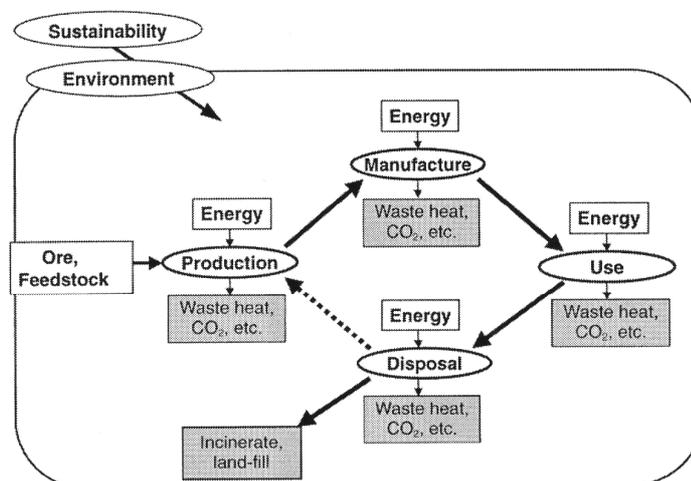


Fig. 3. The material life-cycle. Ore and feedstock are mined and processed to give a material. This is manufactured into a product that is used and, at the end of its life discarded or recycled. Energy and materials are consumed at each station, generating waste heat and solid, liquid and gaseous emissions.

**Figure 7 :** diagramme indiquant les besoins en énergie et la production de CO<sub>2</sub> à toutes les étapes de la vie d'un produit, du minerai jusqu'à un éventuel recyclage. Extrait de Ashby<sup>18</sup>.

En ce qui concerne les émissions de CO<sub>2</sub>, Stern<sup>15</sup> présente une représentation graphique synthétique (voir Figure 8) des sources de CO<sub>2</sub> et des autres gaz à effet de serre (CH<sub>4</sub> et NO<sub>2</sub>). Pour les matériaux les contributions sont les suivantes :

- la production d'aciers produit du CO<sub>2</sub> à hauteur de 3,2 % du total des gaz à effet de serre ;

<sup>24</sup> Cela impliquerait en partie un transfert d'activité de la production à l'entretien et il est intéressant de noter que ce dernier poste n'est pas délocalisable et qu'il est riche en main d'oeuvre ; il faut absolument réaliser que si l'on peut prévoir des difficultés d'approvisionnement en énergie, il n'y aura pas, en revanche, de pénurie d'hommes et de femmes sur terre.

<sup>25</sup> Il s'agit d'une réduction de 50% de l'énergie consommée et donc 50% de moins de CO<sub>2</sub> produit.

- pour l'aluminium et les métaux non ferreux,<sup>26</sup> il s'agit de 1,4 % du total ;
- pour le ciment, c'est 3,8 % du total ;
- pour le papier, c'est environ 1 % du total.

A titre de comparaison, à elle seule, l'industrie pétrolière produirait 6,3 % du total des gaz à effet de serre en exploitation, raffinage, etc. La part liée à la production des matériaux, sans être dominante dans les émissions de CO<sub>2</sub>, n'est néanmoins pas négligeable et nécessiterait d'être réduite de manière significative. Il faudrait donc pouvoir réaliser au moins le même volume de produits, mais en utilisant moins de matières. Ceci sera abordé ci-dessous. Un autre aspect qui mérite une mention dans ce contexte est, la réduction de CO<sub>2</sub> émis par le recyclage des métaux. Dans l'élaboration primaire d'un métal, une très grande part de l'énergie est apportée pour réduire les minerais en métal. Lors du recyclage, cette étape n'est plus nécessaire. Par exemple, l'acier issu du minerai dégage 2500 kg de CO<sub>2</sub> par tonne, tandis que l'acier issu de ferrailles dégage moins de 500 kg de CO<sub>2</sub> par tonne (valeur moyenne dépendant des modes de production d'électricité). En effet, l'acier issu de ferraille est simplement refondu et traité dans des fours électriques, tandis que le minerai subit une réduction de l'oxyde au métal par du carbone dans un haut fourneau (et donc, dégage du CO<sub>2</sub>). Cette dernière valeur pourrait tendre vers zéro si l'électricité était produite par des énergies renouvelables (hydroélectricité) ou nucléaire.

### **3.3- Les exigences du 21ème siècle pour les matériaux ou pourquoi on doit faire mieux**

En résumé, pour pouvoir commencer à envisager un développement durable dans les pays développés et les PVD, il faut avant tout faire face au double enjeu de l'approvisionnement en énergie et des émissions de CO<sub>2</sub>. Dans une première approximation, étant donné que les produits (et les matériaux utilisés pour les fabriquer) sont consommateurs d'énergie à toutes les étapes de leur vie (Figure 7), il faudra essayer de faire plus (compte tenu de l'augmentation prévisible de la population mondiale) avec moins de matériaux<sup>27</sup>. Ceci implique que les performances spécifiques (c'est-à-dire, par exemple, la résistance mécanique divisée par la densité) doivent être améliorées notamment pour tous les matériaux utilisés en grandes quantités (bétons, métaux, polymères). De plus, comme proposé par Ashby<sup>18</sup>, il est également très important d'allonger la durée de vie de tous les produits.

La suite de cet exposé sera focalisée sur les matériaux métalliques uniquement pour mieux illustrer les propos. Des raisonnements analogues sont évidents en ce qui concerne les matériaux de construction (béton, etc.) mais il faudrait une analyse plus fine pour les polymères.

La figure 8 indique les secteurs producteurs de CO<sub>2</sub> sont les secteurs des transports et du bâtiment (environ 30 % du CO<sub>2</sub> total) ainsi que le secteur des industries (également environ 30 % du CO<sub>2</sub>) sont aussi de grands consommateurs d'énergie (CO<sub>2</sub> induit par industrialisation). L'agriculture et les échanges avec les sols et la végétation contribuent pour presque tout le reste des émissions, mais avec une faible consommation moyenne d'énergie (CO<sub>2</sub> "naturelle").

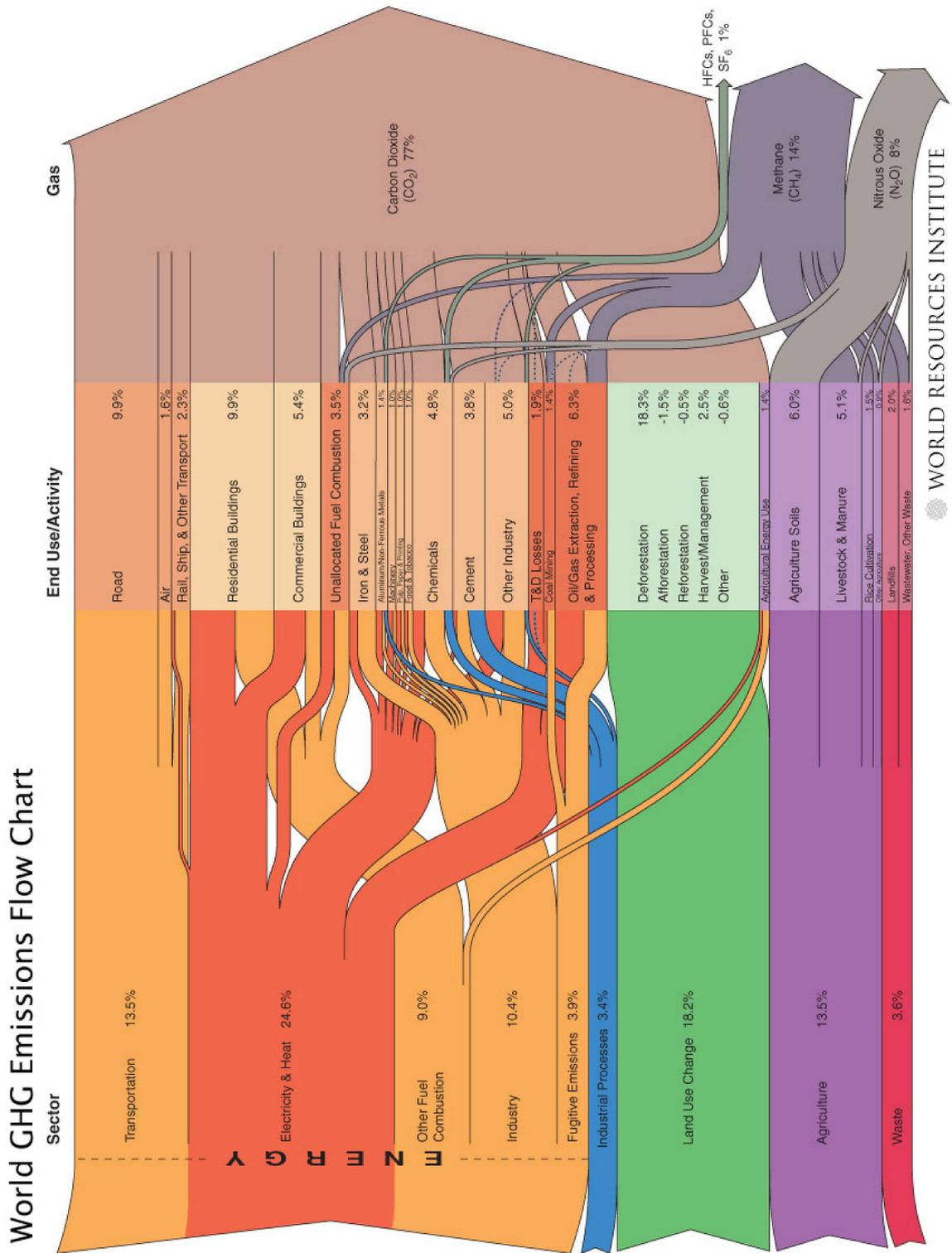
Ici, l'analyse qui suit aborde uniquement les secteurs transport, bâtiment et industrie, qui correspondent à 60 % des émissions de CO<sub>2</sub>, et une très grande partie de la consommation d'énergie<sup>28</sup>. Pour que ces secteurs réduisent leur consommation d'énergie et leur émission de CO<sub>2</sub>, il est possible

---

<sup>26</sup> La différence entre aciers et aluminium et les autres métaux non-ferreux provient des quantités en jeu. Comme cela sera montré plus loin, la production d'acier, en tonnage, est supérieure à celle de l'aluminium par un facteur 50.

<sup>27</sup> Paradoxalement ceci ne s'applique pas pour le bois, car plus on l'utilise dans des produits à durée de vie longue, plus on séquestre du CO<sub>2</sub> sans danger et sans inconvénient !

<sup>28</sup> Les secteurs du transport et du bâtiment sont des purs consommateurs d'énergie, tandis que le secteur industriel inclut des producteurs tels l'industrie pétrolière et la production d'électricité dans les centrales thermiques.



**Figure 8 :** Analyse des sources de production de gaz à effet de serre en fonction des secteurs d'activité. La production de matériaux courants (métaux, ciment, papier) correspond à un peu moins de 10 % du CO<sub>2</sub> émis. La part des plastiques est plus difficile à évaluer, car ils font partie des secteurs de la chimie et de l'industrie pétrolière qui contribuent à hauteur de 11 %. Extrait de Stern<sup>15</sup> et de <http://www.wri.org/>.

de proposer des voies d'amélioration assez génériques<sup>29</sup>.

En ce qui concerne les transports, il est impératif d'alléger tout ce qui bouge, de réduire les pertes (frottements, pertes aérodynamiques) et d'améliorer l'efficacité des moteurs thermiques et électriques.

Pour les matériaux, ceci implique :

- des matériaux plus légers à performances équivalentes pour l'allègement ;
- des revêtements à faible coefficient de frottement pour les pertes liées au frottement ;
- des matériaux résistants à hautes températures pour améliorer le rendement thermodynamique des moteurs thermiques ;
- des matériaux magnétiques plus performants pour les moteurs électriques ;

Pour le bâtiment, il faut des matériaux à résistance spécifique élevée pour réduire la masse totale employée et des matériaux isolants plus efficaces pour réduire les pertes thermiques. Le secteur de la production d'énergie nécessite surtout des matériaux permettant des gains en efficacité (augmentation des températures de fonctionnement pour augmenter le rendement thermodynamique, comme dans les moteurs thermiques évidemment). Ceci est vrai pour les centrales thermiques et les centrales nucléaires. Il serait une grave erreur de penser que les matériaux nécessaires existent. Par exemple, la Figure 9, extraite de "Nature", fait le point sur les besoins en recherche, y compris en ce qui concerne

**The six generation IV reactor concepts**  
 The Generation IV International Forum (GIF) consists of the United States, Argentina, Brazil, Canada, France, Japan, South Korea, South Africa, Switzerland and the United Kingdom

	Coolant	Temp. (°C)	Pressure	Waste recycling	Power output	Research needs	Earliest delivery
<b>Gas-cooled fast reactors</b>	Helium	850	High	Yes	Electricity and hydrogen	Irradiation-resistant materials, helium turbine, new fuels, core design, waste recycling	2025
<b>Lead-cooled fast reactors</b>	Lead-bismuth	550-800	Low	Yes	Electricity and hydrogen	Heat-resistant materials, fuels, lead handling, waste recycling	2025
<b>Molten salt reactors</b>	Fluoride salts	700-800	Low	Yes	Electricity and hydrogen	Molten salt chemistry and handling, heat- and corrosion-resistant materials, reprocessing cycle	2025
<b>Sodium-cooled fast reactors</b>	Sodium	550	Low	Yes	Electricity	Safety, cost reduction, hot-fuel fabrication, reprocessing cycle	2015
<b>Supercritical-water-cooled reactors</b>	Water	510-550	Very high	Optional	Electricity	Corrosion and stress, water chemistry, ultrastrong non-brittle materials, safety	2025
<b>Very-high-temperature reactors</b>	Helium	1,000	High	No—waste goes directly to repository	Electricity and hydrogen	Heat-resistant fuels and materials, temperature control in event of accident, high fuel burn-ups	2020

**Figure 9** : Présentation des concepts de réacteurs nucléaires de Génération IV. La colonne "research needs" indique les besoins, notamment en matériaux<sup>30</sup>. Même si l'expression est exagérée, les besoins indiqués pour le réacteur à eau supercritique "ultrastrong non-brittle materials" demeurent extravagants. Des résistances extrêmes s'accompagnent d'une contrainte d'écoulement élevée, souvent synonyme de fragilité. Extrait de Nature<sup>31</sup>

<sup>29</sup> Il est supposé que la solution de réduire l'activité de ces secteurs ne sera pas une voie choisie mais éventuellement subie.

<sup>30</sup> Le nombre de chercheurs équivalent temps plein en France travaillant sur les matériaux métalliques pour les réacteurs nucléaires de Génération IV peut être estimé à environ équivalent à celui d'un McDonald.

<sup>31</sup> Nature, **429**, 238 (2004).

les matériaux pour les réacteurs nucléaires de Génération IV. Bien qu'il y ait une certaine simplification "journalistique" (même dans Nature !), les exigences matériaux indiquées sont parfois extraordinaires et ne correspondent vraiment pas à ce que l'on peut trouver dans les catalogues des fournisseurs ("off the shelf").

Finalement, en ce qui concerne les secteurs industriels, les matériaux doivent accompagner les améliorations des procédés. Il est ici moins facile d'identifier des besoins génériques, mais tout ce qui réduirait la masse totale des matériaux utilisés et qui augmenterait la durée de vie des équipements ira dans le bon sens.

### 3.4- Les difficultés fondamentales

Qu'est-ce qui empêche de concevoir les nouveaux matériaux métalliques qui pourraient faire face à cet ensemble d'exigences ? Il serait illusoire de penser qu'il s'agit simplement d'une question de coût. La métallurgie est une activité humaine ancienne<sup>32</sup> et si aujourd'hui ce n'est pas si simple de tout améliorer, c'est qu'il y a des raisons. On peut en identifier plusieurs qui s'appliquent à la science des matériaux :

- les problèmes sont multi-échelles, c'est-à-dire qu'il faut tenter d'intégrer à la fois ce qui se passe à l'échelle des liaisons atomiques et à celle de la pièce. Par exemple, pour de grosses structures (bateau, pont, ...) la rigidité sera contrôlée à l'échelle des liaisons atomiques (~ 0,1 nm), la résistance à l'échelle de la microstructure (de  $10^3$  à  $10^5$  nm) et la rupture de l'ensemble par la longueur de la fissure critique (~ $10^8$  nm). Il faut donc intégrer des phénomènes physiques sur au moins 9 ordres de grandeur.
- de plus, il n'y a rarement qu'un phénomène qui se produit seul. Il faut souvent prendre en compte des couplages et interactions entre, par exemple, contraintes mécaniques et environnements chimiques (du milieu ambiant à des milieux oxydants ou corrosifs) ce qui correspond malheureusement aux réalités des conditions d'emploi.

Simplement en prenant ces deux exemples le résultat est d'une réelle complexité qui se traduit par le fait que l'on est quand même loin d'une situation de "y-à qu'a". Il y a de nombreux autres problèmes qui ont été abordés avec un certain succès par les métallurgistes, notamment dans la période 1950 — 1980. Mais les lois issues de ces études de métallurgie physique, bien qu'étant qualitativement justes, demeurent souvent insuffisantes pour permettre les prévisions quantitatives nécessaires pour réaliser une ingénierie des matériaux pour les applications visées.

Il y a d'autres aspects, souvent oubliés, qui prennent toute leur pertinence si on considère les matériaux métalliques pour des produits de masse ou de grands volumes, produits qui correspondent pour l'essentiel à la catégorie des "besoins" (celle qui a été identifiée comme étant critique). Il s'agit de leur abondance sur Terre et de l'énergie nécessaire pour obtenir les métaux à partir des minerais (essentiellement des oxydes). Ces deux facteurs régissent la réelle disponibilité des métaux de base. Le tableau 2 montre l'abondance des métaux dans la croûte terrestre et le coût énergétique pour produire ces métaux à partir de leurs minerais. Le résultat est clair. En tant que matériaux de structure pour des produits de masse le choix se limite à l'aluminium et les alliages de fer, avec les alliages de titane et de magnésium assez loin derrière. A ce quatuor de métaux, il faut rajouter des métaux plus rares, mais avec des propriétés spécifiques indispensables : le cuivre (conductibilité électrique et thermique) et le nickel (tenue mécanique à haute température).

---

<sup>32</sup> C'est justement ce que lui reproche une bonne partie de la communauté scientifique : la métallurgie c'est vieux, ce n'est pas original et c'est donc du ressort des industriels.

<b>Métaux</b>	<b>Abondance</b> (% poids de la croûte terrestre)	<b>Coût énergétique pour obtenir le métal à partir du minerai (MJ/kg)</b>
aluminium (Al)	8 %	290 à 305
fer (Fe)	5 %	50 à 60
magnésium (Mg)	2,8 %	410 à 420
titane (Ti)	0,4 %	555 à 565
nickel (Ni)	80 ppm	
cuivre (Cu)	5 ppm	95 à 115

**Tableau 2 :** Abondance des métaux en ordre décroissant avec le coût énergétique d'obtention correspondant<sup>22</sup>. L'abondance donne une idée générale de la disponibilité des minerais, mais pour être exploitables les gisements doivent présenter une teneur minimum de métal. Lorsque les deux colonnes de droite (abondance et coût énergétique) sont comparées, il est clair que les matériaux utilisables pour des produits correspondant à des volumes importants sont essentiellement le fer (acier) et l'aluminium.

Le tableau 3 montre que la production mondiale suit largement ce classement. La production mondiale d'acier ( $1,3 \times 10^9$  tonnes/an) correspond environ à 200kg/personne/an et est 50 fois supérieure à la production d'aluminium. Les aciers sont les alliages les plus utilisés aujourd'hui et le resteront parce qu'il n'y a pas d'alternative (l'oxyde de fer se réduit plus facilement que les oxydes des autres métaux abondants).

Donc non seulement il existe des difficultés fondamentales non résolues en métallurgie, mais en plus il faut faire face aux enjeux du 21ème siècle avec une gamme obligatoirement réduite de métaux : Fe, Al, Ti, Mg, Cu et Ni (en tant qu'éléments majoritaires d'alliages). Ce ne sont malheureusement que de vieux matériaux qui n'intéressent que très peu la recherche originale et novatrice sur les "nouveaux matériaux".

<b>Métaux</b>	<b>Production mondiale (t/année)</b>
aciers	$\sim 1,3 \times 10^9$
aluminium et alliages	$\sim 2,8 \times 10^7$
cuivre	$\sim 1,5 \times 10^7$
nickel et alliages	$\sim 1,3 \times 10^6$
magnésium et alliages	$\sim 4,3 \times 10^5$
titane et alliage	$\sim 1,5 \times 10^5$

**Tableau 3 :** Production mondiale de métaux par famille d'alliages.

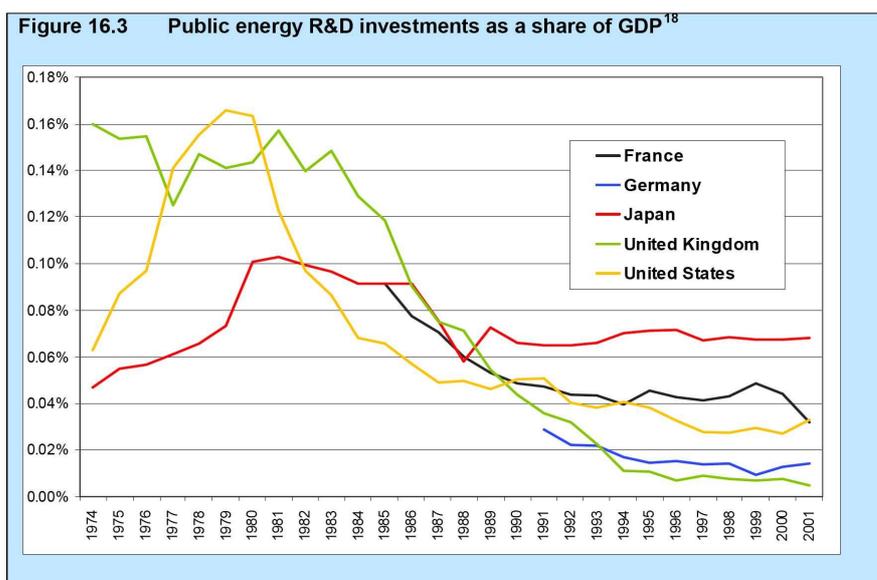
#### 4- Que faire ?

Les pressions conjuguées des besoins en énergie et de réduction de CO<sub>2</sub> vont exiger des matériaux plus performants, comme il a été exposé ci-dessus. Pour que les effets sur des deux paramètres soient significatifs, il faut surtout prendre en considération les matériaux produits en très grandes quantités (les matériaux pour les "besoins"), les plus critiques, dans le sens où ce sont surtout sur ceux-là que doivent porter les améliorations. Comme nous venons de le voir, ce choix porte essentiellement sur une demi-douzaine de métaux (Fe, Al, Cu, Ni, Mg, Ti) et leurs alliages. Ce sont ces familles qui ont

un rôle majeur à jouer par rapport aux enjeux et ce sont ces vieux matériaux, avec l'effort de recherche indispensable, qui deviendront les "nouveaux vieux matériaux" de demain.

Cependant, aujourd'hui, les efforts de recherche dans le domaine des matériaux portent surtout sur tout ce qui est nouveau. D'une manière générale, la recherche poursuit la nouveauté et l'originalité de manière obsessionnelle, et cela se traduit par des effets de mode importants (entraînant de manière perverse les financements, les promotions, les recrutements et donc le contenu des enseignements). Ainsi en juin 2006, le secteur des nanotubes était au palmarès des publications et en septembre 2006 les spécialistes de bibliométrie prévoient l'arrêt des recherches sur les supraconducteurs à haut  $T_c$  en raison du déclin du nombre de publications et en dépit des problèmes toujours non résolus.

L'activité de recherche est pilotée par un mélange, évidemment fluctuant en fonction des circonstances, de curiosité et de nécessité. On peut craindre que les enjeux du 21ème siècle correspondent plutôt à des nécessités. De plus, la période 1980-2000, caractérisée par un faible coût d'énergie et par l'arrivée de la microélectronique, a entraîné une chute du financement des recherches en énergie (voir Figure 10) et par voie de conséquence, en matériaux. Malheureusement, les pertes de compétences se produisent rapidement et le renouvellement des générations n'a pas été assuré. La mise en route d'un "nouveaux vieux matériaux" à l'échelle industrielle (pour avoir un impact significatif) nécessitera donc au mieux entre 15 et 25 ans, car souvent il sera nécessaire de partir de presque rien. Une fois de plus, on est mal positionné en 2007 pour faire face aux débuts des réductions de  $CO_2$  souhaitables à partir de 2015 !



**Figure 10 :** Evolution des efforts publics en recherche et développement pour l'énergie depuis 1974 en pourcentage du PNB, pour plusieurs pays industrialisés. On constate une très forte chute des investissements depuis 1980, ce qui correspond à peu près à l'essor de la microélectronique et des NTIC (Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication) et à la chute (temporaire) du coût de l'énergie. Les recherches sur les matériaux correspondant aux besoins suivent la même décroissance. Extrait de Stern<sup>15</sup>.

#### 4.1- Pourquoi peut-on faire mieux ?

La recherche est une activité cyclique, des périodes de faible activité suivent souvent des périodes de progrès spectaculaires. Pour la métallurgie, des progrès très rapides, en termes de compréhension de mécanismes et de mise au point d'alliages industriels, ont eu lieu entre environ 1950 et 1980. Ensuite,

d'une part les problèmes qui restaient étaient plus difficiles<sup>33</sup> à résoudre et d'autre part de nouveaux sujets plus rentables en terme de publications sont apparus. Par contre (et c'est heureux) depuis 30 ans des progrès importants ont été réalisés dans des disciplines scientifiques voisines. La simulation et la modélisation numériques se sont fortement développées. Les outils de caractérisation (microscopies de tous types) et d'analyse, les instruments d'essais et de mesure ont tous aussi fortement évolué. Les grands instruments (synchrotrons et sources de neutrons) permettent d'obtenir des informations nouvelles (par exemple, de suivre en temps réel des phénomènes physiques tels que les effets de la déformation, des changements de phases, ...).

Ces développements, ainsi que la grande maîtrise des procédés industriels, font qu'aujourd'hui il est possible de revisiter les problèmes non résolus en science des matériaux et de penser, de manière réaliste, pouvoir améliorer significativement ces matériaux de grande diffusion. Cependant, pour que cela se produise, il faudrait un réel ré-équilibre des priorités de recherche vers les matériaux et les problématiques identifiées ici. Ce ré-équilibre aura, bien entendu, un effet mécanique sur les matières enseignées dans le supérieur : les enseignants biaisent naturellement les matières enseignées vers leurs propres sujets d'intérêt.

#### **4.2- Une esquisse partielle et personnelle de quelques "nouveaux vieux" matériaux**

A partir de contacts avec le monde industriel et la participation à la vie scientifique normale (conseils scientifiques, congrès internationaux, ...) il est possible de proposer une liste personnelle et non exhaustive de quelques démarches matériaux qui pourraient être porteuses de progrès significatifs à grande échelle. Il est néanmoins important de réaliser que ce qui était facile à faire, a été fait, et que la mise au point de nouvelles familles d'alliages nécessitera plus de temps et plus de moyens, surtout si l'on intègre la chaîne complète allant à une industrialisation de produits. Aujourd'hui, on peut identifier les démarches suivantes comme étant particulièrement prometteuses :

- *les composites de grande diffusion (base acier, aluminium et magnésium).*

Les composites présentent beaucoup d'intérêt pour pouvoir combiner les avantages de matériaux de propriétés assez différentes et donc de dépasser les propriétés d'un matériau unique. Les composites à matrice métalliques ont fait l'objet de nombreuses recherches depuis au moins 20 ans, mais il faudrait maintenant réduire la dispersion des propriétés et surtout pouvoir passer à des procédés utilisables pour des volumes importants. L'augmentation de la rigidité spécifique des aciers et des alliages d'aluminium par l'incorporation de phases covalentes très rigides est un des aspects très intéressants. Un effort de recherche important est encore nécessaire ici.

- *les microstructures maîtrisées en terme de contrôle de tailles de grains (tous les alliages).*

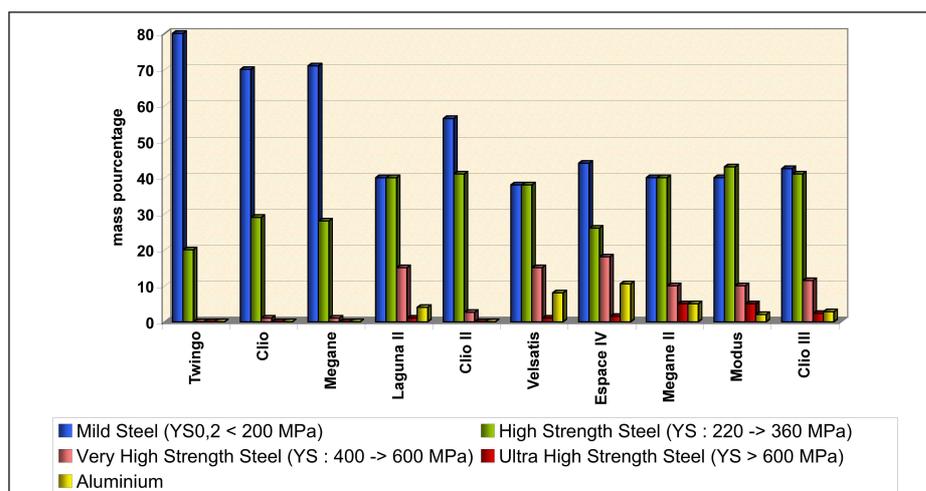
Une des spécificités de la métallurgie, notamment par rapport à la physique et la chimie du solide, est d'intégrer plusieurs échelles (au moins 9 ordres de grandeur) et de ne pas se cantonner à l'échelle atomique. Les microstructures, qui se situent à des échelles allant de 10 nm (dimensions de petits précipités durcissants) à 10<sup>5</sup> nm (taille de grains pour des alliages hautes températures), contrôlent en grande partie les propriétés mécaniques (limite d'élasticité, résistance mécanique, ductilité, ...). De pouvoir maîtriser la morphologie et la taille des microstructures dans tous les alliages est un défi majeur dont les bases théoriques restent encore légères. Par définition les microstructures sont hors équilibres thermodynamiques et la physique de la genèse des morphologies est complexe.

---

<sup>33</sup> La situation de la corrosion est intéressante à bien des égards. Le coût de la corrosion en France est de l'ordre de 4% du PIB, mais comme s'est un sujet d'étude difficile (et donc peu valorisable eu égard aux méthodes d'évaluations quantitative en vigueur), le volume de recherche est devenu très faible. Même le maintien de l'enseignement de ce sujet est problématique.

- les microstructures complexes polyphasées (alliages à transformation de phase : aciers et alliages de Ti)

Un des récents succès, notamment dans le domaine de l'automobile, est l'introduction d'aciers à très haute limite d'élasticité. La figure 11 montre l'évolution de la part de ces aciers en fonction du temps dans la gamme de modèles d'un constructeur français. Or les microstructures de ces aciers à très (voire très très) haute limite d'élasticité consistent en plusieurs phases (jusqu'à 4 ou 5 pour l'instant) à une échelle très fine, typiquement de l'ordre de  $10^3$  nm. Cet assemblage de phases, certaines très dures, d'autres plus ductiles, permet de réaliser un compromis résistance/ductilité intéressant. L'extension de cette démarche à d'autres familles d'alliages serait intéressante, notamment pour les phases intermétalliques.



**Figure 11** : Evolution de l'introduction de nouveaux aciers dans les caisses en blanc de véhicules Renault en fonction des modèles. La Clio III, par exemple, comporte une majorité d'aciers à haute, très haute et très très haute limite d'élasticité, tandis que la Clio I était essentiellement en acier doux. Les microstructures des derniers aciers à très hautes performances sont fines, polyphasées et complexes. Il est à noter la faible progression de l'aluminium. Il y a de nombreuses raisons pour cela, mais la coexistence acier/aluminium est difficile à mettre en œuvre dû aux fortes différences de coefficients d'expansion thermique. Document Renault/J-F. Beaudoin.

- les alliages concentrés (aciers, alliages d'aluminium, alliages de magnésium)<sup>34</sup>

Une autre évolution intéressante concerne les alliages concentrés<sup>35</sup>. En effet, si on considère les aciers des années '70 (à l'exception des aciers inoxydables qui sont des alliages concentrés), la part d'éléments d'alliages était faible, de l'ordre de quelques pour cent. Aujourd'hui par exemple, les aciers "TWIP"<sup>36</sup> prochainement utilisés pour l'automobile, contiennent plus de 10% d'éléments d'alliage. Cette tendance est appelée à s'étendre à d'autres alliages également.

- les intermétalliques bases Al, Fe et Ti.

Les aluminures de fer et les aluminures de titane font parti de ces matériaux prometteurs qui, 10 ou 20 plus tard restent toujours prometteurs, car bien qu'ayant un rapport propriétés/densité très intéressant, les difficultés, essentiellement liées à leur fragilité, restent difficiles à résoudre. Ces cas, sont difficiles et donc il est un normal que cela prend plus de temps pour aboutir à des applications. Néanmoins, compte tenu de leurs avantages, de leur coût intrinsèque relativement faible et des apports des progrès dans la maîtrise des microstructures complexes, on peut penser qu'ils présentent un potentiel réel pour l'avenir.

<sup>34</sup> Les alliages de titane et de nickel sont souvent déjà concentrés.

<sup>35</sup> Bien que cela rende le recyclage des produits plus complexe.

<sup>36</sup> TWinning Induced Plasticity.

Finalement, il serait une erreur de penser que l'introduction de "nouveaux vieux" matériaux puisse se faire par simple substitution des matériaux utilisés aujourd'hui. Le changement de matériaux, pour conduire à des progrès intéressants, doit être accompagné par une nouvelle conception des produits par les bureaux d'études. Ceci implique une formation large (du spécialiste matériaux jusqu'aux concepteurs et l'utilisateur) pour que les nouveautés puissent être introduites rapidement et de manière efficace. La politique d'attribution de postes d'enseignants par les établissements et les tutelles devrait être revue en conséquence.

## 6- Conclusions

A ce début du 21ème siècle, il faut impérativement faire face aux défis suivants :

- la disponibilité et le coût de l'énergie ;
- la diminution des émissions de CO<sub>2</sub> et la réduction du taux de réchauffement de la planète.

Ces pressions conjuguées des besoins en énergie et de réduction de CO<sub>2</sub> détermineront quelles sont les options réalistes pour tenter d'assurer un développement durable. Dans l'approche simpliste présentée ici, le développement durable se conjugue de manière un peu différente pour les pays développés et pour les pvd. Les économies des pays riches sont basées en partie sur la croissance de la consommation et celles des pvd sur la satisfaction des besoins de base (l'accès à un niveau de vie convenable).

L'utilisation de l'idée de "besoins" et "envies" proposées par Ashby<sup>18</sup> permet de simplifier les problèmes ainsi que les liens avec les matériaux. La croissance de la consommation des pays riches correspondrait à des "envies" et les besoins de tous les pays à des "besoins". On suppose que les priorités porteront d'abord sur les "besoins" et qu'une fois ceux-ci satisfaits les "envies" prendront le relais en termes de croissance de la consommation.

De manière générale, cette analyse rejoint celle d'Ashby<sup>18</sup> en ce concerne l'importance de la durabilité des biens et produits pour réduire la consommation d'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub>. Il est navrant que la recherche en corrosion soit sinistrée en France et dans de nombreux autres pays, malgré que la maîtrise de la corrosion soit essentielle pour assurer la durabilité. La recherche en métallurgie suit le même chemin.

### Les "besoins"

Cette présentation propose que le secteur des "besoins" est le plus critique. En effet, il est clair que l'énergie sera un problème de plus en plus crucial et il est plus que vraisemblable, à plus long terme, que le réchauffement induit par les émissions de CO<sub>2</sub> deviendra un problème critique. Il est indispensable de réaliser que **sans matériaux il ne peut pas y avoir de production d'énergie, de consommation d'énergie ou d'économie d'énergie**. Bien entendu, les mêmes liens existent pour la maîtrise des émissions de CO<sub>2</sub>. Pour les matériaux, ce seront les matériaux de grandes diffusions, nécessaires pour la satisfaction des "besoins" qui sont cruciaux.

Il est donc possible de prévoir que :

- De nouveaux matériaux de grande diffusion à performances nettement améliorées sont nécessaires ;
- La conception des produits devra s'adapter à ces nouveaux matériaux de grande diffusion ;
- L'acier et les alliages d'aluminium seront les métaux les plus utilisés (de "vieux" matériaux !) ;
- Les nouveaux matériaux (tel que les matériaux "intelligents") seront utiles, mais pas déterminants ;
- Le pilotage informatique de procédés, au sens large, aidera, mais ne suffira pas.

## Les "envies"

En ce qui concerne la croissance de la consommation (les "envies"), il faudra viser la **création durable de richesse**. En terme de matériaux, les possibilités sont plus étendues, et des matériaux pour des applications niches existent et pourront être exploités.

On peut donc prévoir :

- Des matériaux pour produits à forte valeur ajoutée ;
- La montée en puissance de la dématérialisation (du "design" à la culture) .

Finalement, le temps passe et les échéances présentées ici se rapprochent. Outre une prise de position politique essentielle, hors du sujet de cet essai, **il est impératif que la recherche et la formation soient rééquilibrées pour préparer l'amélioration incontournable des matériaux de grande diffusion.**

## Remerciements

Je tiens à remercier Yves Farge qui a été le premier à me faire prendre conscience de l'importance des matériaux pour les produits diffusés en grandes quantités. Jean Morlet, décédé depuis, m'a permis de travailler auprès de l'IRSID, devenu Arcelor Research SA, ce qui m'a ouvert les yeux sur les aciers et leur métallurgie. Hubert Doubre et Christian Lebrun m'ont associé au GDR GEDEPEON du CNRS me sensibilisant aux difficultés à venir en matière d'approvisionnement en énergie. Je tiens aussi à remercier Olivier Bouaziz et Frédéric Bonnet d'Arcelor Research et Thierry Auger du CNRS (ex CECM Vitry) pour de nombreuses discussions stimulantes.

**Annexe 1 :**

Conséquences du réchauffement climatique selon le rapport Stern<sup>15</sup>.

<b>Table 3.1 Highlights of possible climate impacts discussed in this chapter</b>						
<b>Temp rise (°C)</b>	<b>Water</b>	<b>Food</b>	<b>Health</b>	<b>Land</b>	<b>Environment</b>	<b>Abrupt and Large-Scale Impacts</b>
<b>1°C</b>	Small glaciers in the Andes disappear completely, threatening water supplies for 50 million people	Modest increases in cereal yields in temperate regions	At least 300,000 people each year die from climate-related diseases (predominantly diarrhoea, malaria, and malnutrition)  Reduction in winter mortality in higher latitudes (Northern Europe, USA)	Permafrost thawing damages buildings and roads in parts of Canada and Russia	At least 10% of land species facing extinction (according to one estimate)  80% bleaching of coral reefs, including Great Barrier Reef	Atlantic Thermohaline Circulation starts to weaken
<b>2°C</b>	Potentially 20 - 30% decrease in water availability in some vulnerable regions, e.g. Southern Africa and Mediterranean	Sharp declines in crop yield in tropical regions (5 - 10% in Africa)	40 – 60 million more people exposed to malaria in Africa	Up to 10 million more people affected by coastal flooding each year	15 – 40% of species facing extinction (according to one estimate)  High risk of extinction of Arctic species, including polar bear and caribou	Potential for Greenland ice sheet to begin melting irreversibly, accelerating sea level rise and committing world to an eventual 7 m sea level rise
<b>3°C</b>	In Southern Europe, serious droughts occur once every 10 years  1 - 4 billion more people suffer water shortages, while 1 – 5 billion gain water, which may increase flood risk	150 - 550 additional millions at risk of hunger (if carbon fertilisation weak)  Agricultural yields in higher latitudes likely to peak	1 – 3 million more people die from malnutrition (if carbon fertilisation weak)	1 – 170 million more people affected by coastal flooding each year	20 – 50% of species facing extinction (according to one estimate), including 25 – 60% mammals, 30 – 40% birds and 15 – 70% butterflies in South Africa  Collapse of Amazon rainforest (according to some models)	Rising risk of abrupt changes to atmospheric circulations, e.g. the monsoon  Rising risk of collapse of West Antarctic Ice Sheet  Rising risk of collapse of Atlantic Thermohaline Circulation
<b>4°C</b>	Potentially 30 – 50% decrease in water availability in Southern Africa and Mediterranean	Agricultural yields decline by 15 – 35% in Africa, and entire regions out of production (e.g. parts of Australia)	Up to 80 million more people exposed to malaria in Africa	7 – 300 million more people affected by coastal flooding each year	Loss of around half Arctic tundra  Around half of all the world's nature reserves cannot fulfill objectives	
<b>5°C</b>	Possible disappearance of large glaciers in Himalayas, affecting one-quarter of China's population and hundreds of millions in India	Continued increase in ocean acidity seriously disrupting marine ecosystems and possibly fish stocks		Sea level rise threatens small islands, low-lying coastal areas (Florida) and major world cities such as New York, London, and Tokyo		
<b>More than 5°C</b>	The latest science suggests that the Earth's average temperature will rise by even more than 5 or 6°C if emissions continue to grow and positive feedbacks amplify the warming effect of greenhouse gases (e.g. release of carbon dioxide from soils or methane from permafrost). This level of global temperature rise would be equivalent to the amount of warming that occurred between the last age and today – and is likely to lead to major disruption and large-scale movement of population. Such "socially contingent" effects could be catastrophic, but are currently very hard to capture with current models as temperatures would be so far outside human experience.					
<p><i>Note: This table shows illustrative impacts at different degrees of warming. Some of the uncertainty is captured in the ranges shown, but there will be additional uncertainties about the exact size of impacts (more detail in Box 3.2). Temperatures represent increases relative to pre-industrial levels. At each temperature, the impacts are expressed for a 1°C band around the central temperature, e.g. 1°C represents the range 0.5 – 1.5°C etc. Numbers of people affected at different temperatures assume population and GDP scenarios for the 2080s from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Figures generally assume adaptation at the level of an individual or firm, but not economy-wide adaptations due to policy intervention (covered in Part V).</i></p>						

## Annexe 2

Un extrait, à titre d'exemple, du "Infrastructure Report Card 2005" de l'American Society of Civil Engineers, décrivant l'évolution de l'état de certaines infrastructures aux États-Unis.

(voir [www.asce.org](http://www.asce.org))

(**A** serait bien, **D** beaucoup moins bien)

### 2005 Grades

Subject	2001 Grade	2005 Grade	Comments
Aviation	<b>D</b>	<b>D+</b>	Gridlock on America's runways eased from crisis levels earlier in the decade due to reduced demand and recent modest funding increases. However, air travel and traffic have reportedly surpassed pre-Sept. 11 levels and are projected to grow 4.3% annually through 2015. Airports will face the challenge of accommodating increasing numbers of regional jets and new super-jumbo jets.
Bridges	<b>C</b>	<b>C</b>	Between 2000 and 2003, the percentage of the nation's 590,750 bridges rated structurally deficient or functionally obsolete decreased slightly from 28.5% to 27.1%. However, it will cost \$9.4 billion a year for 20 years to eliminate all bridge deficiencies. Long-term underinvestment is compounded by the lack of a Federal transportation program.
Dams	<b>D</b>	<b>D</b>	Since 1998, the number of unsafe dams has risen by 33% to more than 3,500. While federally owned dams are in good condition, and there have been modest gains in repair, the number of dams identified as unsafe is increasing at a faster rate than those being repaired. \$10.1 billion is needed over the next 12 years to address <b>all critical</b> non-federal dams--dams which pose a direct risk to human life should they fail.
Drinking Water	<b>D</b>	<b>D-</b>	America faces a shortfall of \$11 billion annually to replace aging facilities and comply with safe drinking water regulations. Federal funding for drinking water in 2005 remained level at \$850 million, less than 10% of the total national requirement. The Bush administration has proposed the same level of funding for FY06.
Energy (National Power Grid)	<b>D+</b>	<b>D</b>	The U.S. power transmission system is in urgent need of modernization. Growth in electricity demand and investment in new power plants has not been matched by investment in new transmission facilities. Maintenance expenditures have decreased 1% per year since 1992. Existing transmission facilities were not designed for the current level of demand, resulting in an increased number of 'bottlenecks' which increase costs to consumers and elevate the risk of blackouts.