Éditions-Diffusion Charles Léopold Mayer
38, rue Saint Sabin
75011 Paris
tel/fax : 01 48 06 48 86
diffusion@eclm.fr
www.eclm.fr

Les versions électroniques et imprimées des documents sont librement diffusables,
à condition de ne pas altérer le contenu et la mise en forme.
Il n'y a pas de droit d'usage commercial sans autorisation expresse des ECLM.

vers une écologie industrielle

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 5

Suren Erkman

Vers une écologie industrielle

Éditions Charles Léopold Mayer
38, rue Saint-Sabin
75011 Paris
France

L'association Éditions-Diffusion Charles Léopold Mayer a pour objectif d'aider à l'échange et à la diffusion des idées et des expériences de la Fondation Charles Léopold Mayer pour le progrès de l'Homme (FPH) et de ses partenaires. On trouvera en fin d'ouvrage un descriptif sommaire de cette Fondation, ainsi que les conditions d'acquisition des ouvrages et dossiers édités et coproduits.

L'auteur

Suren Erkman, journaliste scientifique, dirige l'Institut pour la communication et l'analyse des sciences et des technologies (ICAST), à Genève.

© Éditions-Diffusion Charles Léopold Mayer, 2004
Dépôt légal, 3e trimestre 2004
Dossier FPH n° DD 137 ∗ ISBN: 2-84377-088-2
2e édition, enrichie et mise à jour
1re édition: 1998.
Diffusion: Éditions-Diffusion Charles Léopold Mayer,
38 rue Saint-Sabin, 75011 Paris
Graphisme et mise en page: Madeleine Racimor
Maquette de couverture: Vincent Collin

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 7

Du même auteur

Suren Erkman et Jean-Pierre Hurni, *Introduction aux nouvelles armes nucléaires*, Paris, Éditions Descartes, 2004.

Suren Erkman et Ramesh Ramaswamy, *Applied Industrial Ecology. A New Platform for Planning Sustainable Societies (Focus on Developing Countries with Case Studies from India)*, Bangalore, Aicra Publishers, 2003.

Dominique Bourg et Suren Erkman (éd.), *Perspectives on Industrial Ecology* (préface du président Jacques Chirac), Sheffield (UK), Greenleaf, 2003.

Introduction à la deuxième édition

Depuis la parution initiale de cet ouvrage, en 1998, l'écologie industrielle a connu d'importants développements au plan international, y compris en France. Le moment était donc venu de rendre à nouveau disponible cette première synthèse, en français, sur une approche qui tente de renouveler les rapports entre la société industrielle et la Biosphère.

Cette deuxième édition, qui reprend le texte original de 1998, comprend un chapitre supplémentaire (addendum) offrant une vue d'ensemble de l'évolution récente et des tendances de l'écologie industrielle au plan international. Le lecteur trouvera également deux nouvelles annexes en fin d'ouvrage: un aperçu du développement de l'écologie industrielle en France, ainsi qu'une sélection bibliographique enrichie et actualisée.

S. E.
Genève, mai 2004

« Les concepts d'écologie industrielle doivent être connus des fonctionnaires, utilisés par eux, par les cadres de l'industrie et par les médias. Ils doivent être présentés à tous les citoyens, et guider la conduite des gouvernements et des industriels. »

Robert Frosch et Nicholas Gallopoulos,
General Motors Laboratories,
Pour La Science, novembre 1989

Prologue

Écologie industrielle? L'expression surprend, intrigue, retient immédiatement l'attention. Spontanément, « écologie industrielle» évoque une contradiction dans les termes, un oxymore comme « obscure clarté » ou « glace brûlante ».

D'où nous vient cette réaction ? De l'habitude, sans doute, que nous avons de considérer le système industriel comme séparé de la Biosphère. D'un côté, les usines, les villes ; de l'autre, la nature. Dans cette vision cloisonnée, il s'agit de minimiser les impacts du système industriel sur le « dehors», sur ce qui l'entoure, sur « l'environnement ». Les environnementalistes et leurs précurseurs se sont depuis longtemps préoccupés des conséquences de l'activité industrielle, essentiellement en étudiant les effets des pollutions sur les écosystèmes. Mais le fonctionnement du système industriel en tant que tel restait extérieur au champ de l'analyse.

L'écologie industrielle explore l'hypothèse inverse: il est possible d'envisager le système industriel comme un cas particulier d'écosystème. Après tout, on peut décrire le système industriel comme une certaine configuration de flux et de stocks de matière, d'énergie et d'information, tout comme les écosystèmes biologiques. De plus, le système industriel tout entier repose sur les ressources et les services fournis par la Biosphère,

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 12

dont il constitue en quelque sorte une excroissance. Il existe ainsi un large spectre d'écosystèmes industriels en interaction plus ou moins directe avec la Biosphère, depuis certains écosystèmes agricoles, presque «naturels», jusqu'aux écosystèmes les plus artificiels, comme les vaisseaux spatiaux.

La notion d'écologie industrielle n'est pas vraiment nouvelle. L'expression et le concept apparaissent de manière sporadique dans la littérature scientifique des années soixante et soixante-dix, sans donner lieu pour autant à des développements approfondis. L'expression a resurgi au début des années quatre-vingt-dix, d'abord parmi certains ingénieurs de l'industrie proches de l'Académie nationale des ingénieurs aux États-Unis. Depuis, l'idée poursuit son chemin avec une remarquable vigueur. Il ne semble pas exagéré de dire que l'on assiste actuellement à la naissance d'un nouveau champ scientifique et technique, à la confluence de l'ingénierie, de l'écologie et de la bioéconomie. Malgré sa jeunesse, l'écologie industrielle fait déjà preuve d'une maturité certaine, comme en témoigne le lancement, au printemps 1997, du *Journal of Industrial Ecology* (MIT Press), la première revue scientifique consacrée à cette nouvelle discipline en plein développement.

Au cours des trois dernières années, l'expression «écologie industrielle» a commencé à se répandre dans certains cercles académiques et milieux d'affaires. On peut même déceler un début d'effet de mode, bien que le concept ne semble pas toujours clairement compris. Pour éviter toute confusion, précisons d'emblée ce qu'il convient d'entendre par «métabolisme industriel» et «écologie industrielle».

Le métabolisme industriel est l'étude de l'ensemble des composants biophysiques du système industriel. Cette démarche, essentiellement analytique et descriptive, vise à comprendre la dynamique des flux et des stocks de matière et d'énergie liés aux activités humaines, depuis l'extraction et la production des

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 13

ressources jusqu'à leur retour inévitable, tôt ou tard, dans les processus biogéochimiques.

L'écologie industrielle entend franchir une étape supplémentaire: en s'inspirant des connaissances sur les écosystèmes et la Biosphère, il s'agit de déterminer les transformations susceptibles de rendre le système industriel compatible avec un fonctionnement «normal» des écosystèmes biologiques. L'étude du métabolisme industriel constitue donc un préalable indispensable à l'écologie industrielle.

L'écologie industrielle fait appel en priorité à l'écologie scientifique, aux sciences naturelles et aux sciences de l'ingénieur. Elle s'intéresse à l'évolution du système industriel dans sa globalité et à long terme. Par conséquent, les problèmes d'environnement ne constituent qu'un aspect, parmi d'autres, de l'écologie industrielle. Contrairement à la plupart des discussions actuelles sur les questions d'environnement, l'écologie industrielle ne s'aventure pas sur le terrain de l'écologisme politique: elle ne fait preuve ni de catastrophisme ni de son symétrique inverse, l'optimisme technologique à outrance.

Le présent ouvrage a pour but de fournir une introduction succincte, la première en langue française, à l'écologie industrielle, telle qu'elle émerge depuis le début des années quatre-vingt-dix. Il offre également un aperçu sur son arrière-plan historique et ses principaux acteurs. Une sélection bibliographique en fin d'ouvrage indique les principales sources d'information sur ce domaine susceptibles de renouveler profondément la vision traditionnelle du système industriel. Les notes de bas de page renvoient à des publications plus techniques.

Ce «Dossier pour un débat» constitue la version mise à jour d'une étude rédigée pour la Fondation Charles Léopold Mayer pour le progrès de l'Homme (FPH), sur la base d'une centaine d'interviews effectuées en 1993 et 1994, principalement aux

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 14

États-Unis[1]. Je remercie la Fondation Charles Léopold Mayer pour le progrès de l'Homme, notamment Maurice Cosandey, Pierre Calame et Gustavo Marin, dont le soutien m'a permis de réaliser cette recherche dans des conditions idéales, ainsi que mon assistante, Gisèle Spescha, pour ses patientes relectures du manuscrit. Je remercie également tous ceux qui m'ont accordé leur temps et ont généreusement partagé leurs connaissances, à un moment où les publications sur l'écologie industrielle étaient encore très rares. Ma reconnaissance s'adresse particulièrement à David Allen, Braden Allenby, Jesse Ausubel, Robert Ayres, Raymond Côté, John Ehrenfeld, Robert Frosch, Arnulf Grübler, Ernie Lowe, David Rejeski, Deanna Richards, Walter Stahel, William Stigliani, Hardin Tibbs, Chihiro Watanabe et enfin à Jacques Grinevald pour ses nombreuses suggestions et sa disponibilité sans faille.

Genève, février 1998

1. Suren Erkman, *Écologie industrielle, métabolisme industriel et société d'utilisation*, Genève, octobre 1994, 276 p. (disponible auprès de l'Institut pour la communication et l'analyse des sciences et des technologies, ICAST, BP 474, CH-1211 Genève 12. www.icast.org).

1.
L'industrie hors nature

Le fait de considérer le système industriel comme séparé de la Biosphère entraîne une importante conséquence pratique : l'impact des activités humaines est considéré comme se réduisant essentiellement à des problèmes de «pollution de l'environnement». La solution, estime-t-on alors, consiste à traiter la pollution par le biais de divers dispositifs techniques intervenant généralement en fin de processus, nommés *end of pipe* en anglais.

Depuis quelques années, entreprises et administrations aiment à répéter qu'il faut «prévenir la pollution à la source». L'idée est séduisante, mais, d'une certaine manière, elle relève encore de la philosophie *end of pipe*, car l'attention reste focalisée sur la pollution et les déchets (fût-ce pour les minimiser), au détriment d'une vision plus large. De toute manière, il faut bien constater qu'en pratique le traitement des polluants en fin de processus domine encore largement. Pourtant, il devient de plus en plus clair que l'approche *end of pipe* se révèle insuffisante pour maintenir les perturbations de la Biosphère à un niveau acceptable.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 16

Critique de l'approche *end of pipe*

On peut adresser sept principaux griefs à l'approche *end of pipe*:

1. Elle est cloisonnée

Le traitement des déchets solides, des déchets dangereux ou toxiques, des déchets liquides, des pollutions atmosphériques relève généralement de différents corps administratifs, qui vont de la santé publique au service des eaux. Ces organismes, jaloux de leurs privilèges, ont des pouvoirs de réglementation qui dépendent de législations variées, lesquelles s'inspirent parfois de philosophies divergentes, voire contradictoires. Ce cloisonnement institutionnel rigide a pour effet de renforcer de manière excessive une approche sectorielle des problèmes d'environnement.

La « solution » d'un problème aux yeux d'un département peut alors fort bien se révéler n'être que son transfert sur un terrain relevant d'un autre département, la «dépollution» consistant simplement à déplacer la pollution. Le traitement des eaux usées, par exemple, produit de l'eau «propre», mais également des boues d'épuration en très grandes quantités. Or, le stockage de ces boues, ou leur épandage sur les terres agricoles, peut entraîner une contamination du sol et des eaux souterraines, notamment par des métaux lourds. De même, l'incinération des déchets solides permet de réduire considérablement leur volume, mais le stockage des cendres d'incinération présente également un problème pour le sol et les eaux souterraines. De plus, l'incinération risque de polluer l'atmosphère. Pour satisfaire aux normes de qualité de l'air, on peut alors installer des filtres. Ces derniers se chargent de substances solides qu'il convient, à leur tour, d'éliminer.

Dans une certaine mesure, on observe un cloisonnement similaire dans l'approche des problèmes d'environnement global. Il existe des conventions internationales qui traitent

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 17

séparément des changements climatiques, de la biodiversité, de l'ozone stratosphérique, de la désertification, et bientôt des forêts. Les textes de ces conventions ont été élaborés, sans réelle coordination, par des spécialistes représentant leur discipline respective, rattachés à des institutions et à des administrations sourcilleuses quant à leur autonomie. Pourtant, comme le montre la science de l'écologie globale, qui considère la Biosphère comme un tout, ces problèmes sont indissolublement liés[2].

2. Elle est incrémentale

D'une manière générale, l'approche *end of pipe* est incrémentale : elle procède par petites améliorations graduelles. Cette méthode présente des avantages, mais elle a pour effet de renforcer le système technique qu'elle perfectionne de manière marginale, au détriment d'une véritable innovation. On s'enfonce ainsi progressivement dans une « ornière technologique », d'où il devient toujours plus difficile de sortir.

Par exemple, on sait depuis longtemps qu'il faudrait remplacer le moteur à explosion par d'autres modes de propulsion, notamment le moteur électrique. Mais tant d'investissements humains et financiers ont été, et continuent à être, consentis pour rendre le moteur à explosion moins polluant (pot catalytique, mélange maigre, etc.), que chaque «amélioration» renforce la position sur le marché de cette vieille technologie. Ainsi, le passage à d'autres types de moteurs devient paradoxalement de plus en plus difficile économiquement, et donc politiquement, compte tenu de l'importance du secteur automobile dans les pays industrialisés (un emploi sur dix).

2. Sur le concept de Biosphère, en tant qu'objet de la science de l'écologie globale, voir les travaux de Jacques Grinevald, notamment: «On a holistic concept for deep and global ecology: The Biosphere», *Fundamenta Scientiae*, vol. 8, n° 2, 1987, p. 197-226; «L'effet de serre de la Biosphère: de la révolution thermo-industrielle à l'écologie globale», *Stratégies énergétiques, Biosphère et Société*, Genève, vol. 1, 1990, p. 9-34.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 18

3. Elle coûte de plus en plus cher

L'approche incrémentale se caractérise par un rendement décroissant: il en coûte de plus en plus cher pour diminuer une proportion de plus en plus faible de polluants. Quant au coût du traitement des déchets, il se révèle prohibitif à mesure que les normes deviennent plus sévères.

Une difficulté majeure de l'approche *end of pipe* résulte de l'effet multiplicateur du traitement des déchets toxiques. Prenons l'exemple d'un déchet dangereux devant être incinéré. L'incinérateur nécessite des filtres à air et de l'eau de rinçage, eux-mêmes considérés comme des déchets dangereux après usage. Naturellement, la gestion des déchets secondaires résultant du traitement d'un déchet toxique primaire peut, à son tour, produire d'autres déchets « ultimes », également classés comme dangereux. Par exemple, les eaux de rinçage peuvent être traitées, mais le déchet solide résiduel reste considéré comme un produit dangereux. David Allen (Université du Texas, Austin) indique que l'incinération d'une tonne de déchets dangereux, aux États-Unis, génère en moyenne quarante tonnes de déchets divers, principalement des cendres et de l'eau de lavage des filtres[3].

4. Elle induit des effets économiques pernicieux

Selon plusieurs estimations concordantes, le marché des équipements de dépollution et de traitement des déchets dans les pays membres de l'OCDE s'élève aujourd'hui à environ 300 milliards de dollars par an, et devrait atteindre 600 milliards de dollars par an en l'an 2000. Ce marché, selon l'International Finance Corporation (un organe de la Banque mondiale), peut être divisé en trois grandes catégories[4] :

3. David T.Allen and Kirsten Sinclair Rosselot, «Pollution Prevention at the Macro Scale: Flows of Wastes, Industrial Ecology and Life Cycle Analyses», *Waste Management*, vol. 14, n° 3-4, 1994, p. 317-328.

4. Pour les estimations du marché des dispositifs *end of pipe*, voir *OECD: The OECD Environment Industry : Situation, Prospects and Government*

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 19

a) les équipements de traitement des déchets, les équipements des stations d'épuration des eaux, les dispositifs de contrôle des polluants (filtres, précipitateurs électrostatiques, etc.);

b) les installations elles-mêmes, qui constituent l'infrastructure pour effectuer les traitements de la pollution et des déchets dangereux;

c) les services de suivi et de conseil, y compris les mesures, les analyses, les études d'impact, les évaluations de l'état de l'environnement, ou encore la mise en œuvre de normes et labels « verts ».

D'un certain point de vue, on peut se réjouir de voir se développer un secteur d'activité économique si florissant. Un marché promis à un brillant avenir: d'un côté, des normes de plus en plus sévères dans les pays industrialisés, de l'autre, une pollution en augmentation dans les pays en voie d'industrialisation, assurent des débouchés juteux aux dispositifs *end of pipe*.

Mais il faut garder à l'esprit que, lorsque la pollution elle-même devient un énorme marché, le lobby de la dépollution s'efforce d'étouffer dans l'œuf toute tentative sérieuse de stratégie préventive, ce qui se reflète notamment dans les législations environnementales[5]. De plus, la pollution, par le biais du marché créé par les mesures pour la combattre, se voit compta-

Policies, Paris, OECD, Environment Directorate, OECD/GD (92) 1, 1992; *International Finance Corporation (IFC), Investing in the Environment: Business Opportunities in Developing Countries*, publié par The World Bank and The International Finance Corporation, Washington, DC, mai 1992; US Congress, Office of Technology Assessment: *Industry, Technology, and the Environment: Competitive Challenges and Business Opportunities*, Washington, DC, OTA-ITE-586, Government Printing Office, janvier 1994.

5. Pour une critique documentée et acérée de l'impact du lobby *end of pipe* sur la législation environnementale américaine, voir Paul Palmer, *Recycling USA – A Formula for Failure*, Proceedings of the 1st European Conference on Industrial Ecology, Barcelona, 27-28 février 1997, p. 93-99 (disponible auprès de l'Asociación de Quimicos del Instituto quimico de Sarria, Via Augusta 390, 08017 Barcelona, Espagne); on peut également

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 20

bilisée comme accroissement du PNB, autrement dit comme une augmentation de la richesse nationale. En réalité, cet accroissement du PNB traduit indirectement un appauvrissement des écosystèmes.

5. Elle constitue un oreiller de paresse technologique

L'approche *end of pipe* est foncièrement une stratégie coercitive qui suscite une attitude réactive: les industriels se contentent de respecter des normes imposées par le législateur. Dans leur grande majorité, au lieu d'investir dans la recherche pour tenter de trouver des méthodes de production moins polluantes, les entreprises se contentent d'acheter les dispositifs antipollution les moins chers qu'elles trouvent sur le marché, pour autant qu'ils satisfassent de justesse aux normes imposées.

D'une manière générale, cette approche suscite un climat de méfiance réciproque et de confrontation paralysante entre les milieux de l'économie privée, d'un côté, l'administration et le public, de l'autre. Exception qui confirme la règle : quelques grandes entreprises mettent un point d'honneur à respecter, et même à devancer, les régulations environnementales. Encore faudrait-il s'assurer, au-delà de l'opération de relations publiques, qu'elles n'ont pas simplement transféré les problèmes environnementaux chez leurs fournisseurs ou leurs sous-traitants.

consulter le site web de Paul Palmer: www.sonic.net/chemsurf. Un criminologue américain a étudié en détail certains aspects souterrains du lobby *end of pipe*, Alan A. Block, «Into the Abyss of Environmental Policy: The Battle over the World's Largest Commercial Hazardous Waste Incinerator Located in East Liverpool, Ohio», *The Journal of Human Justice*, vol.5, n° 1, automne 1993, p. 1-49 ; Alan A. Block, « Organized Crime and the US Waste Disposal Industry : Contemporary Issues », TMA (*Tijdschrift voor Milieu Aansprakelijkheid*) – *Environmental Liability Law Review*, Rotterdam, vol. 7, n° 2, avril 1992, p. 46-50 (numéro spécial : Environment and Criminal Law).

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 21

6. Elle peut porter préjudice aux pays en développement

L'approche *end of pipe* pourrait se révéler défavorable pour les pays en développement (PVD). En effet, les pays de l'OCDE, où se trouve pour l'instant le gros du marché des dispositifs antipollution, augmentent leur pression commerciale sur les PVD pour leur vendre ces technologies. Cette pression commerciale sur les PVD va s'accroître à mesure que le secteur des technologies *end of pipe* se développe dans les pays de l'OCDE, alors que leurs marchés approchent de la saturation.

Cette stratégie des pays industrialisés suscite une double crainte pour les économies des PVD. Premièrement, les technologies *end of pipe*, étant donné leur nature incrémentale, pourraient en se généralisant empêcher ces pays de sauter des étapes et de passer directement à des méthodes de production plus modernes et moins polluantes. Deuxièmement, la philosophie *end of pipe* a donné naissance à toute une série de normes environnementales, de labels écologiques, de spécifications techniques diverses qui nécessitent non seulement des méthodes de production de plus en plus complexes, mais encore des infrastructures et une organisation sociale très élaborées (réseaux informatiques, éducation, expertise administrative, législations). Les PVD n'en disposent généralement que très partiellement, ce qui risque de renforcer leur dépendance, notamment par l'intermédiaire de l'aide au développement[6].

6. Pour une analyse critique des technologies environnementales dans la perspective des pays en développement, voir Veena Jha and Ana Paola Teixera, « Are Environmentally Sound Technologies the Emperor's New Clothes ? », Genève, United Nations Conference on Trade and Development, UNCTAD, *Discussion Papers Series* n° 89, septembre 1994 ; United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD), « Report of the Workshop on the Transfer of Environmentally Sound Technologies (ESTs) », Genève, Nations unies, UNCTAD/ITD/TEC/13, novembre 1993. Pour une présentation succincte de la philosophie américaine, voir US Congress, Office of Technology Assessment, «Development Assistance, Export Promotion, and Environmental Technology », Background Paper, Washington, DC, OTA-BP-ITE-107, *US Government Printing Office*, août 1993.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 22

7. Elle n'offre pas de vision globale

Le reproche le plus fondamental que l'on puisse sans doute adresser à l'approche *end of pipe*, c'est son incapacité à offrir un cadre conceptuel global. Par ses aspects techniques, cette approche induit même une spécialisation croissante qui renforce les barrières entre les spécialistes des différents domaines. On pare au plus pressé sur la base de normes qui reposent sur des connaissances toxicologiques et écologiques fragmentaires. On s'attaque ainsi à des nuisances particulières de manière très rationnelle, mais globalement de façon désordonnée, sans avoir une vue d'ensemble des problèmes liés à la perturbation de la Biosphère.

Au-delà des nombreuses réglementations et mesures techniques, aussi sophistiquées soient-elles, on ne dispose pas d'un cadre de référence, d'un schéma conceptuel qui permette de concevoir et d'évaluer les décisions qu'il conviendrait de prendre dans le domaine de l'environnement et du développement.

Toutefois, il ne faut pas perdre de vue que l'approche *end of pipe* continuera à dominer l'approche des problèmes environnementaux pour longtemps encore, ne serait-ce que pour des raisons d'inertie politique et administrative. Les technologies de dépollution, et les normes légales qui constituent le cadre de leur développement, ne vont pas disparaître du jour au lendemain, et resteront nécessaires dans une certaine mesure. Elles vont continuer à former, avec ce que l'on appelle traditionnellement la protection de la nature, la base de la régulation par l'État des conséquences environnementales des activités économiques[7].

Simplement, il devient de plus en plus clair que cette démarche ne suffit pas. Plusieurs entreprises ont déjà expérimenté des stratégies de prévention de la pollution. Mais il s'agit

7. Myron F. Uman (éd.), *Keeping Pace with Science and Engineering* (Case Studies in Environmental Regulation), Washington, DC, National Academy of Engineering, National Academy Press, 1993.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 23

encore de cas relativement isolés, souvent très médiatisés, qui concernent quelques grandes entreprises ayant les moyens de tester des méthodes telles que le *Life Cycle Analysis* (LCA), le *Design for Environment* (DfE) ou encore le *Total Quality Management* (TQM).

De plus, les approches préventives de la pollution, comme la *Cleaner Production*, connaissent elles-mêmes des limites. Plusieurs activités industrielles génèrent nécessairement des déchets et des sous-produits : impossible de fabriquer du fromage, par exemple, sans qu'une partie du lait, non utilisée, se transforme en « déchet » ou en sous-produit[8].

Il s'agit donc d'intégrer et de subordonner l'approche *end of pipe*, ainsi que les diverses méthodes de prévention de la pollution, à une perspective plus vaste. C'est cette perspective qu'ambitionne d'offrir l'écologie industrielle.

8. Pour une synthèse critique de ces différentes approches, voir Gregory A. Keoleian et Dan Menerey, «Sustainable Development by Design: Review of Life Cycle Design and Related Approaches», *Air and Waste*, vol. 44, mai 1994, p. 645-668.

2.
L'écologie industrielle

Chaque année, au mois de septembre, le mensuel de vulgarisation *Scientific American* (*Pour La Science*, en version française) publie un numéro thématique. En septembre 1989, le numéro spécial est consacré à «la gestion de la planète Terre». On peut y lire un article intitulé «Des stratégies industrielles viables». Ses deux auteurs travaillent dans la plus grande entreprise industrielle du monde: Robert Frosch, vice-président de la recherche chez General Motors (aujourd'hui à l'université de Harvard), et Nicholas Gallopoulos, responsable de la recherche sur les moteurs, également chez General Motors.

Dans leur article, les deux auteurs développent l'idée qu'il devrait être possible de mettre au point des méthodes de production industrielle dont l'impact sur l'environnement serait considérablement réduit. Cette hypothèse les conduit à introduire la notion d'écosystème industriel:

«Dans le système industriel traditionnel, chaque opération de transformation, indépendamment des autres, consomme des matières premières, fournit des produits que l'on vend et des déchets que l'on stocke; on doit remplacer cette méthode

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 26

simpliste par un modèle plus intégré: un écosystème industriel. […]

Un écosystème industriel pourrait fonctionner comme un écosystème biologique: les végétaux synthétisent des substances qui alimentent les animaux herbivores, lesquels sont mangés par les animaux carnivores, dont les déchets et les cadavres servent de nourriture à d'autres organismes. On ne parviendra naturellement jamais à établir un écosystème industriel parfait, mais les industriels et les consommateurs devront changer leurs habitudes s'ils veulent conserver ou améliorer leur niveau de vie, sans souffrir de la dégradation de l'environnement[9].»

Ces lignes semblent avoir joué un rôle de catalyseur, comme si elles avaient cristallisé une intuition latente chez bon nombre de gens. Dès sa publication, l'article de Frosch et Gallopoulos a inspiré plusieurs auteurs, qui ont tous proposé leur interprétation, de sorte qu'il n'existe pas de définition standard de l'écologie industrielle. Raymond Côté, de l'université Dalhousie à Halifax (Nouvelle-Écosse, Canada), a recensé une vingtaine de définitions différentes dans la jeune littérature sur l'écologie industrielle[10]. Mais, quelles que soient les définitions,

9. Robert A.Frosch et Nicholas E. Gallopoulous, «Des stratégies industrielles viables», *Pour La Science*, n° 145, novembre 1989, p. 106-115. Version originale: Robert A. Frosch and Nicholas E. Gallopoulos, «Strategies for Manufacturing», *Scientific American*, vol. 261, Special Issue «Managing Planet Earth», septembre 1989, p. 144-152. Texte original: «…The traditional model of industrial activity – in which individual manufacturing processes take in raw materials and generate products to be sold plus waste to be disposed of – should be transformed into a more integrated model: an industrial ecosystem. […] The industrial ecosystem would function as an analogue of biological ecosystems. (Plants synthesize nutrients that feed herbivores, which in turn feed a chain of carnivores whose wastes and bodies eventually feed further generations of plants.) An ideal industrial ecosystem may never be attained in practice, but both manufacturers and consumers must change their habits to approach it more closely if the industrialised world is to maintain its standard of living […] without adversely affecting the environment».
10. Raymond P. Côté, *The Industrial Ecology Seminar: Principles, Topics for Discussion and Dictionary*, School for Resource and Environmental Studies,

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 27

tous les auteurs s'accordent pour reconnaître au moins trois éléments principaux dans le concept d'écologie industrielle :

1. C'est une vision globale, intégrée, de tous les composants du système industriel et de leurs relations avec la Biosphère.

2. Le substrat biophysique du système industriel, c'est-à-dire la totalité des flux et des stocks de matière et d'énergie liés aux activités humaines, constitue le domaine d'étude de l'écologie industrielle, par opposition aux approches usuelles, qui considèrent l'économie essentiellement en termes d'unités de valeur immatérielle.

3. La dynamique technologique, c'est-à-dire l'évolution sur le long terme de grappes de technologies clés, constitue un facteur crucial (mais pas exclusif) pour favoriser la transition du système industriel actuel vers un système viable, inspiré par le fonctionnement des écosystèmes biologiques.

Naturellement, comme l'a bien précisé Robert Frosch lors d'une conférence prononcée en 1990 devant l'Association des ingénieurs britanniques, le concept d'écosystème industriel est une analogie qu'il ne faut pas prendre au pied de la lettre :

« L'analogie entre le concept d'écosystème industriel et d'écosystème biologique n'est pas parfaite, mais on aurait beaucoup à gagner si le système industriel venait à imiter les meilleurs aspects de son analogue biologique[11]. »

Au premier abord, le concept d'écologie industrielle apparaît simple et séduisant. Mais a-t-il la moindre chance de dépasser le stade d'une belle idée abstraite ? La réponse est positive, comme en témoigne le plus ancien et le plus étudié des écosystèmes industriels fonctionnant aujourd'hui : la symbiose de

Faculty of Management, Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia, Industrial Park as an Ecosytem Project, décembre 1995.

11. Robert A. Frosch and Nicholas E. Gallopoulos, «Towards An Industrial Ecology», *in* A. D. Bradshow *et al.* (éd.), *The Treatment and Handling of Wastes*, Chapman and Hall, London, 1992, p. 269-292. Texte original: «The analogy between the industrial ecosystem concept and the biological ecosystem is not perfect, but much could be gained if the industrial system were to mimic the best features of the biological analogue.»

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 28

Kalundborg. Avant d'aborder quelques implications pratiques et théoriques de l'écologie industrielle, un bref détour par Kalundborg s'avérera instructif.

La symbiose de Kalundborg

Située au bord de la Mer du Nord, à une centaine de kilomètres à l'ouest de Copenhague, Kalundborg est une petite ville industrielle de vingt mille habitants. Kalundborg doit sa bonne fortune principalement à son fjord, l'un des principaux ports accessibles durant l'hiver à cette latitude dans l'hémisphère Nord. C'est précisément l'accessibilité de ce port tout au long de l'année qui se trouve à l'origine du développement industriel de Kalundborg à partir des années cinquante, qui a débuté par l'implantation d'une centrale électrique et d'une raffinerie de pétrole.

Au fil des ans, les principales entreprises de Kalundborg ont commencé à échanger des «déchets»: de la vapeur, de l'eau (à différentes températures et différents degrés de pureté), ainsi que divers sous-produits. À la fin des années 80, les responsables du développement local ont réalisé qu'ils avaient progressivement et spontanément créé un système, qu'ils baptisèrent «symbiose industrielle».

La symbiose de Kalundborg comprend cinq partenaires principaux, distants les uns des autres de quelques centaines de mètres seulement, et reliés entre eux par un réseau de pipelines *ad hoc*:

– Asnaesvaerket, la plus grande centrale électrique du Danemark. D'une capacité de 1500 MW, alimentée au mazout puis au charbon (après le premier choc pétrolier), elle emploie 600 personnes.

– Statoil, la plus grande raffinerie de pétrole du Danemark, avec une capacité supérieure à trois millions de tonnes de pétrole par an et 250 employés.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 29

– Novo Nordisk, la grande société danoise de biotechnologies, l'un des principaux producteurs mondiaux d'enzymes industriels et d'insuline. L'usine de Kalundborg, la plus grande du groupe, occupe 1 200 personnes.

– Gyproc, société suédoise dont l'usine de Kalundborg produit des panneaux de construction en gypse (14 millions de m^2 par an), avec 175 collaborateurs.

– Enfin, la municipalité de Kalundborg, qui utilise, pour le chauffage à distance de toute la ville, de la vapeur vendue par la centrale électrique.

L'eau, sous forme de liquide ou de vapeur, constitue le « déchet» valorisé de la manière la plus systématique. Elle provient soit directement du lac Tissø, distant d'une quinzaine de kilomètres, soit du réseau de la municipalité de Kalundborg. La raffinerie Statoil fournit de l'eau usée pour refroidir la centrale électrique Asnaesvaerket. Cette dernière vend de la vapeur à la raffinerie Statoil, mais aussi à Novo Nordisk (pour ses tours de fermentation). La centrale électrique vend de la vapeur également à Gyproc, ainsi qu'à la municipalité de Kalundborg pour son réseau de chauffage urbain à distance. Elle fournit même de l'eau chaude à une ferme d'aquaculture qui élève des turbots.

En 1990, la centrale électrique a mis en service sur l'une de ses unités une installation de désulfuration: le soufre des gaz de combustion réagit avec de la chaux, ce qui donne du gypse (sulfate de calcium). Asnaesvaerket produit ainsi plus de cent mille tonnes de gypse par an. Transporté par camion jusqu'à l'entreprise voisine, Gyproc, ce gypse est aujourd'hui utilisé comme matière première pour ses panneaux de construction. Gyproc a pu ainsi cesser d'importer du gypse naturel, jusqu'alors extrait de gisements en Espagne. Quant au gaz produit en excès par la raffinerie, il est utilisé comme combustible aussi bien par Asnaesvaerket que par Gyproc. La figure 1 donne une idée schématique des principaux échanges qui se déroulent dans la symbiose de Kalundborg.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 30

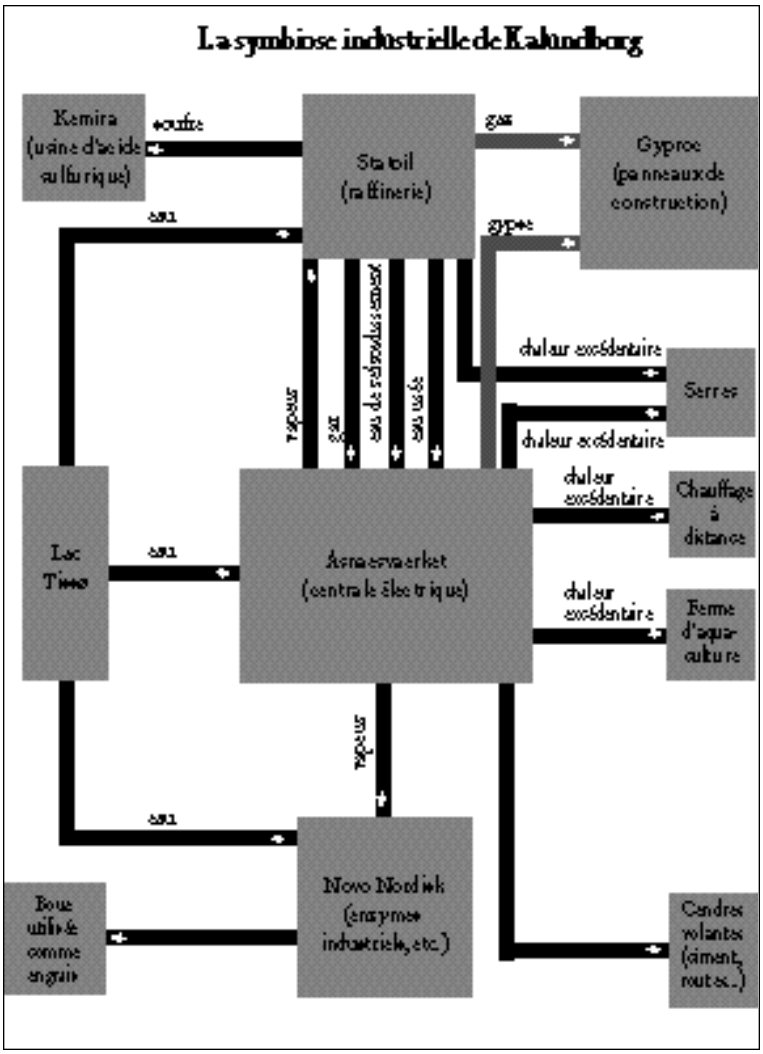

Fig. 1: Schéma des principaux échanges de déchets entre les partenaires de la symbiose industrielle de Kalundborg (source: The Symbiosis Institute, Kalundborg).

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 31

Il serait fastidieux d'énumérer dans le détail tous les échanges de déchets qui se sont progressivement mis en place au cours des années. De plus, il n'existe pas encore d'étude exhaustive sur la symbiose industrielle de Kalundborg, à l'exception de quelques publications préliminaires[12]. Sur la base des informations partielles disponibles actuellement, on peut toutefois dresser un bilan estimatif des avantages environnementaux et économiques de la symbiose industrielle de Kalundborg :

– Réduction de la consommation des ressources : 45 000 tonnes par an de pétrole, 15000 tonnes par an de charbon, et surtout 600 000 m^3 par an d'eau, une ressource relativement rare dans la région.

– Réduction des émissions de gaz à effet de serre et de polluants: 175000 tonnes par an de gaz carbonique, 10200 tonnes par an de dioxyde de soufre.

– Réutilisation des déchets : 130 000 tonnes par an de cendres (pour la construction routière), 4500 tonnes par an de soufre (pour la fabrication d'acide sulfurique), 90000 tonnes par an de gypse, 1440 tonnes par an d'azote, et 600 tonnes par an de phosphore.

Les avantages économiques, qui se trouvent en réalité à l'origine de ces échanges, sont également substantiels. Selon les indications dont on dispose publiquement, les investissements totaux sur une période de vingt ans (soit seize projets d'échanges de déchets) sont estimés à 60 millions de dollars.

12. Sur la symbiose de Kalundborg, voir Robert Rasmussen, «The Industrial Symbiosis in Kalundborg and The Symbiosis Institute», *in Proceedings of the 1st European Conference on Industrial Ecology*, Barcelone (Espagne), 27-28 février 1997, p. 49-70 [The Symbiosis Institute, PO Box 25, 4400 Kalundborg, Denmark]; Nicholas Gertler, *Industrial Ecosystems: Developing Sustainable Industrial Structures*, Cambridge, MA, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Technology and Policy Program, Master's Thesis, 141 p., 1995; John Ehrenfeld et Nicholas Gertler, «A Down-to-Earth Approach to Clean Production», *Technology Review*, vol. 99, n° 2, février-mars 1996, p. 48-54; John Ehrenfeld et Nicholas Gertler, «Industrial Ecology in practice. The Evolution of Interdependence at Kalundborg», *Journal of Industrial Ecology*, vol. 1, n° 1, p. 67-79.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 32

Les revenus annuels sont évalués à 10 millions de dollars (du fait de l'économie en ressources et de la vente des déchets), et les revenus cumulés jusqu'à aujourd'hui s'élèvent à environ 120 millions de dollars. Le temps moyen d'amortissement reste inférieur à cinq ans.

Les enseignements de Kalundborg

On peut tirer trois conclusions majeures de la symbiose de Kalundborg.

Premièrement, il s'agit d'un processus spontané, qui s'est progressivement mis en place sur des bases commerciales, où toutes les entreprises y trouvent leur compte. Chaque livraison de « déchets » entre les partenaires fait l'objet d'une négociation séparée et confidentielle. Les échanges obéissent aux lois du marché, selon plusieurs modalités : vente directe, troc, ou encore échange de bons procédés (par exemple, l'entreprise réceptrice construit à ses frais le pipe-line et reçoit en échange le déchet à un très bon prix).

Deuxièmement, le succès du système repose largement sur la confiance existant entre les différents partenaires. Kalundborg est une petite ville où tout le monde se connaît. Cette proximité facilite les contacts informels à tous les niveaux hiérarchiques entre les entreprises concernées.

Troisièmement, la symbiose de Kalundborg se caractérise par la proximité de quelques grandes entreprises qui sont à la fois différentes et complémentaires. Pour reproduire ailleurs un tel système, il faudrait donc favoriser certains «panachages industriels» propices aux échanges de déchets et de ressources.

Depuis le début des années quatre-vingt-dix, l'expérience de Kalundborg a suscité une attention croissante, étant fréquemment citée en exemple dans de nombreuses publications, souvent sur la base d'informations de seconde main. On peut se réjouir de cette soudaine célébrité, mais on aurait tort toutefois

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 33

d'idéaliser la symbiose de Kalundborg. Quelques observations critiques s'imposent.

En premier lieu, le système souffre d'une rigidité due au nombre restreint de partenaires de la symbiose et à la nature des infrastructures qui assurent le transport de la plupart des déchets: les pipe-lines ne conviennent que pour l'échange d'un déchet précis entre des partenaires fixes.

Deuxièmement, en cas de modifications des procédés de fabrication, ou simplement si l'un des partenaires vient à cesser ses activités, un déchet pourrait manquer, et le système d'échanges se verrait alors gravement perturbé. L'absence de redondance des fournisseurs dans un écosystème industriel comme celui de Kalundborg le rend vulnérable à toute perturbation de ce genre (contrairement aux écosystèmes biologiques, où la redondance est généralement de règle). À Kalundborg, l'échange d'un déchet donné se justifie principalement par la proximité du producteur et du consommateur. Dans la situation courante, à l'inverse, il est en principe possible de pallier toute rupture d'approvisionnement en s'adressant à un autre fournisseur, où qu'il se trouve. En réalité, on sait que cette situation de marché idéal connaît de nombreuses exceptions. La question de la fiabilité des approvisionnements est un problème général pour toutes les entreprises. En fin de compte, on peut penser qu'une structure économique comme la symbiose de Kalundborg ne se trouve pas dans une situation d'approvisionnement réellement plus fragile que beaucoup d'autres zones industrielles ordinaires ne pratiquant pas d'échanges régionaux de déchets.

Troisièmement, les procédés industriels des entreprises qui achètent les déchets tolèrent mal toute variation dans la nature ou la composition des substances qui leur sont livrées. Le cas de Gyproc constitue un bon exemple des subtilités du métabolisme industriel. En 1995, Gyproc a constaté, au cours d'analyses de routine, que le gypse était fortement contaminé par du vanadium, un métal susceptible de provoquer des allergies chez

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 34

certaines personnes. La raison de cette contamination a été trouvée au terme d'une minutieuse enquête: la centrale électrique Asnaesvaerket avait commencé à expérimenter un combustible d'un prix très avantageux, en provenance du Venezuela, l'orimulsion. Or, l'orimulsion, un pétrole extrait dans le bassin de l'Orénoque, contient des traces de vanadium, qui se retrouvaient finalement dans le gypse. Asnaesvaerket a ainsi dû adapter ses installations pour prévenir l'accumulation de vanadium et d'autres contaminants dans le gypse générée par son unité de désulfuration.

Quatrièmement, on peut relever des distorsions économiques. Par exemple, Kalundborg n'est pas desservie par un gazoduc, afin de prévenir une concurrence qui serait fatale au chauffage à distance. En effet, la chaleur fournie par le réseau transportant la vapeur d'Asnaesvaerket revient nettement plus cher aux particuliers que ne le serait le chauffage au gaz. Paradoxe: du gaz naturel danois alimente une usine de Gyproc en Suède, alors qu'à Kalundborg, Gyproc doit recourir à des bonbonnes de gaz liquéfié ou au gaz de raffinerie fourni par Statoil!

Cinquièmement, on constate également une difficulté à intégrer les petites et moyennes entreprises, notamment du fait de leur faible capacité de production ou d'absorption de sous-produits. Toutefois, certains des principaux partenaires de la symbiose de Kalundborg cherchent activement de nouveaux partenaires. Asnaesvaerket, par exemple, songe à valoriser son excédent de vapeur en l'utilisant pour produire du froid. Si une entreprise agroalimentaire s'installait à proximité, elle aurait ainsi à disposition une réfrigération à très bon compte.

Les parcs éco-industriels

Serait-il possible de reproduire ailleurs, voire de généraliser, la symbiose de Kalundborg? D'abord, il faut remarquer que l'on

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 35

rencontre un peu partout de nombreux proto-écosystèmes industriels similaires : dans des régions à forte tradition industrielle, comme la Ruhr, la Lorraine ou le Houston Channel, on pratique depuis longtemps des formes plus ou moins élaborées de symbioses entre différentes entreprises. La principale différence réside dans le fait qu'à Kalundborg les échanges symbiotiques se sont développés d'une manière consciente et systématique.

Sur le modèle de Kalundborg est apparu, au début des années quatre-vingt-dix, le concept de « parc éco-industriel » (en anglais, *eco-industrial park* ou *EIP*). Il s'agit d'une zone où les entreprises coopèrent pour optimiser l'usage des ressources, notamment en valorisant mutuellement leurs déchets (les déchets d'une entreprise servant de matière première à une autre). Toutefois, la notion de «parc» ne doit pas être comprise au sens d'une zone géographiquement confinée : un parc éco-industriel peut très bien inclure l'agglomération voisine, ou une entreprise située à grande distance, si celle-ci est la seule à pouvoir valoriser un déchet rare qu'il serait impossible de traiter sur place. L'idée des parcs éco-industriels se distingue des traditionnels programmes d'échanges de déchets, car elle vise une valorisation systématique de l'ensemble des ressources dans une région donnée, et ne se contente pas simplement de recycler des déchets au coup par coup.

En quelques mois, à partir de 1993, on a assisté à une floraison de projets de parcs éco-industriels, principalement aux États-Unis. À Washington, le Conseil du président pour le développement durable (*President's Council on Sustainable Development, PCSD*) a mis sur pied une *task force* sur les parcs éco-industriels. Dans son rapport final, publié en février 1997, on trouve la description d'une quinzaine de projets disséminés sur le territoire américain. D'autres projets ont vu le jour à la même époque au Canada (Halifax), en Hollande (port de Rotterdam), et en Autriche (Graz). Mais, pour l'instant, il ne

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 36

s'agit que de projets qui n'ont pas encore débouché sur des réalisations tangibles[13].

L'expression nouvelle de «parcs éco-industriels» a généré un effet de mode, mais, une fois passée une première période d'excitation, les résultats concrets se font attendre. Il faut aussi reconnaître que si l'idée, dans son principe, est extrêmement simple, sa mise en œuvre n'a rien de trivial. Elle peut même aller en apparence à rebours du bon sens: par exemple, on peut imaginer des situations où une entreprise devrait accroître sa production de déchets (au lieu de la diminuer), dans la mesure où une entreprise voisine pourrait les utiliser comme matière première.

De plus, les procédés industriels sont généralement conçus pour des matières premières vierges et répondant à des critères très stricts de pureté et de qualité, ce qui les rend très peu flexibles. À Kalundborg, Gyproc a dû modifier sa méthode de préparation de la matière première, car le taux d'humidité du gypse provenant de la centrale électrique Asnaesvaerket diffère

13. Il existe déjà une littérature assez abondante sur les parcs éco-industriels. Quelques références de base : « President's Council On Sustainable Development: Eco-Industrial Park Workshop Proceedings» (17-18 octobre, 1996, Cape Charles, Viginie), Washington, DC, février 1997 [PCSD, 730 Jackson Place, NW, Washington, DC 20503, Tél.: (202) 408 5296, Fax: (202) 408 6839, Site web: www.whitehouse.gov/PCSD]; Ernest A. Lowe, Stephen A.Moran et Douglas B.Holmes, «Fieldbook for the Development of Eco-Industrial Parks», Report prepared for the Office of Policy, Planning and Evaluation, *US Environmental Protection Agency*, Washington, DC, 1996, Prepared by Indigo Development, 6757 Thornhill Drive, Oakland, CA 94611, USA. On peut consulter également le site web d'Indigo Development : www.indigodev.com; éd. Cohen-Rosenthal, Tad McGalliard, Michelle Bel, « Designing eco-industrial parks. The North American experience », *in Proceedings of the 1st European Conference on Industrial Ecology*, Barcelone (Espagne), 27-28 février 1997, p.35-48. On peut aussi consulter le site web du Cornell Center for the Environment (Cornell University, Ithaca), pour des informations sur leur « Eco-Industrial Development Program » : www.cfe.cornell.edu/wei/; Raymond P. Côté, Robert Ellison, Jill Grant, Jeremy Hall, Peter Klynstra, Michael Martin, Peter Wade, «Designing and Operating Industrial Parks as Ecosystems», Report of the project «The Industrial Park as an Ecosystem », Dalhousie University, School

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 37

de celui du gypse naturel. C'est un bon exemple d'adaptation réussie d'un processus pour tirer parti d'un déchet. Mais, en règle générale, lorsqu'il s'agit d'entrer dans les détails pour modifier les processus de fabrication afin de rendre les sous-produits et les déchets utilisables par d'autres usines, on se heurte à de redoutables difficultés techniques et économiques. Les « réseaux trophiques » industriels ne sont pas nécessairement moins complexes que ceux rencontrés dans les écosystèmes naturels! Dans ces conditions, on peut comprendre que les responsables d'entreprises, tout comme les promoteurs de zones industrielles, restent, dans un premier temps, méfiants devant cette approche nouvelle. Les parcs éco-industriels ne vont donc pas surgir et devenir opérationnels du jour au lendemain, mais l'idée fait son chemin.

for Resource and Environmental Studies, août 1994; Raymond Côté et Jeremy Hall (éd.), *The Industrial Park as an Ecosystem: Updated Bibliography*, School for Resource and Environmental Studies, Faculty of Management, Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia, Canada, 31 mars 1995; Erich J. Schwarz, «Industrial Recycling-Network. A Model to Integrate Ecological Aspects in a Production Economy», Monography, Institute of Innovation Management, Karl-Franzens-University, Graz, Austria, avril 1995, 24 p.; R. U. Ayres, « Creating Industrial Ecosystems : A Viable Management Strategy ? », Fontainebleau, INSEAD, Center for the Management of Environmental Resources, Monography, novembre 1994 (boulevard de Constance, F-77305 Fontainebleau Cedex). Pour une excellente introduction comprenant des exemples concrets aux États-Unis, voir Andrew Mangan, *By-product Synergy: A Strategy for Sustainable Development, A Primer*, Published by the Business Council for Sustainable Development – Gulf of Mexico, Andy Mangan, Executive Director, avril 1997. Sur les programmes d'échanges de déchets, l'Agence américaine pour la protection de l'environnement a publié une synthèse utile, «P. Pesacreta: Review of Industrial Waste Exchanges», Washington, DC, US Environmental Protection Agency, Waste Minimization Branch, Office of Solid Waste, Report EPA-530-K-94-003, 61 p., 1994.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 38

Les biocénoses industrielles

Une idée voisine des parcs éco-industriels est celle de «biocénoses industrielles». En biologie, le concept de biocénose se réfère au fait que, dans les écosystèmes, les différentes espèces d'organismes se rencontrent toujours selon des associations caractéristiques. On peut étendre ce concept aux complexes industriels en cherchant à déterminer les « bonnes » associations, les meilleurs panachages d'activités industrielles. Par exemple, au lieu d'implanter isolément une unité de production de sucre de canne, on devrait, dès le départ, songer à réaliser un complexe intégré visant à utiliser de manière optimale tous les flux de matière et d'énergie liés à l'exploitation de la canne à sucre. En l'occurrence, on associerait au moins une papeterie, une raffinerie et une centrale thermique, afin de valoriser les différents sous-produits de la canne à sucre. On peut ainsi envisager des complexes «pulpe-papier», «engrais-ciments», «aciéries-engrais-cimenteries », etc. Des exemples partiels et spontanés de tels complexes existent depuis longtemps, mais il s'agit désormais de les développer de manière explicite et systématique[14].

Comme dans les écosystèmes naturels, il existe des «espèces clés» dans les biocénoses industrielles. Les centrales thermiques constituent à l'évidence l'une des principales «espèces». Il est possible d'envisager toute une série de complexes éco-industriels autour des centrales thermiques, notamment au charbon,

14. L'ouvrage de référence sur les biocénoses industrielles est celui de Nelson Nemerow, *Zero Pollution for Industry. Waste Minimization Trough Industrial Complexes*, New York, John Wiley and Sons, 1995. Ce concept a été récemment repris par Gunter Pauli dans un programme de l'université des Nations unies (Tokyo) sous le nom de ZERI (Zero Emissions Research Initiative). Pour des informations régulièrement mises à jour, voir le site web de ZERI: www.zeri.org. Pour une brève présentation écrite, voir G. Pauli, «Industrial Clusters of the Twenty-first Century », *in Steering Business Toward Sustainability*, F. Capra and G. Pauli (éd.) Tokyo, United Nations University Press, 1995, p. 145-162.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 39

du fait de l'ampleur des flux de matière en jeu, et surtout en raison de la quantité considérable d'énergie gaspillée sous forme de chaleur. Dans le cas de Kalundborg, par exemple, la centrale brûle environ 4,5 millions de tonnes de charbon par année. Or, les 140000 tonnes de vapeur consommées par année par la raffinerie Statoil ne représentent que 0,3 % de l'énergie totale produite par la centrale; les 225000 tonnes de vapeur nécessaires annuellement pour le chauffage résidentiel à distance 0,5 %, et les 215000 tonnes de vapeur utilisées chaque année par Novo Nordisk également 0,5 %.

À pleine puissance, l'électricité produite par une centrale comme Asnaesvaerket à Kalundborg ne représente que 40 % de l'énergie totale libérée par la combustion du charbon. Il existe donc une quantité d'énergie considérable, disponible sous forme de vapeur, qui pourrait être exploitée dans le cadre d'activités « symbiotiques ». Cette possibilité revêt une importance particulière dans des pays comme la Chine ou l'Inde, où la majorité de la production électrique, en très forte augmentation, provient de la combustion du charbon. Dans ce cas, on pourrait utiliser la chaleur excédentaire pour générer du froid, pour de la réfrigération à distance (*district cooling*), ou même utiliser ce froid pour des industries alimentaires ou chimiques[15].

Conséquences pour les entreprises

Les entreprises vont-elles mettre en pratique les idées de l'écologie industrielle? Si oui, comment? Il serait certainement prématuré de prétendre répondre à ces questions, à l'heure où l'écologie industrielle commence à peine à sortir du cercle restreint de ses initiateurs. Mais on peut déjà faire quelques observations d'ordre général.

15. Pour une brève et pénétrante analyse du potentiel de la centrale à charbon de Kalundborg, voir David T. Allen, «Waste Exchanges and Materials Recovery», *Pollution Prevention Review*, printemps 1996, p. 105-112.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 40

– L'idée que le système industriel peut être considéré comme un type particulier d'écosystème n'est pas pour déplaire aux milieux de l'économie. Ils y voient une possibilité de sortir du vieux débat stérile « écologie contre économie », ce qui présente naturellement aussi des risques de récupération: certaines entreprises ne manqueront pas, un jour ou l'autre, d'invoquer l'écologie industrielle pour tenter de justifier des pratiques peu défendables…

– Les milieux d'affaires, inondés par une pléthore de discours plus ou moins éthérés sur le développement durable, et submergés par un déluge de théories (et de consultants) sur le management environnemental, l'analyse du cycle de vie (LCA), les normes ISO et autres écolabels, apprécient dans l'écologie industrielle son côté intellectuellement rigoureux (l'écologie scientifique), mais aussi et surtout son aspect opérationnel.

– Dans le domaine du management, l'écologie industrielle entraîne deux conséquences majeures :

D'une part, elle remet en cause la focalisation quasi obsessionnelle sur le produit. Traditionnellement, toutes les forces des entreprises se concentrent sur la vente de produits, alors que la gestion des déchets et des questions d'environnement est abandonnée à un département plus ou moins marginal. Il s'agit maintenant de donner autant d'importance à la valorisation des déchets, et en fait à l'optimisation de tous les flux de matière et d'énergie mobilisés par l'entreprise, qu'à la vente des produits.

D'autre part, le management traditionnel a érigé en dogme la notion de « compétitivité » dans un contexte de concurrence acharnée entre entreprises. Or, l'écologie industrielle rappelle la nécessité de pratiquer, en plus des relations concurrentielles, une forme de management *over-the-fence*, une collaboration entre entreprises pour assurer une gestion optimale des ressources.

– Le fait d'optimiser l'ensemble des flux de matière et d'énergie devrait se traduire tôt ou tard par une performance et une compétitivité accrue. C'est pour cette raison que les petites et

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 41

moyennes entreprises ont une chance de mettre en pratique l'écologie industrielle, et pas seulement un petit nombre de grandes sociétés qui peuvent s'offrir le luxe de s'y intéresser sans en retirer des bénéfices immédiats.

La performance accrue constitue du reste l'argument central de «l'éco-efficacité» (*eco-efficiency*), un terme proposé en 1992 par Frank Bosshardt, l'un des responsables de Anova (la holding de l'industriel suisse Stephan Schmidheiny, initiateur du *Business Council for Sustainable Development*). Récemment, Claude Fussler, de Dow Europe, a brillamment développé l'idée de l'éco-efficacité et ses implications pratiques pour le monde de l'entreprise[16]. Pour l'essentiel, l'éco-efficacité propose une approche très semblable à l'écologie industrielle, exprimée dans le langage des milieux d'affaires (compétitivité, innovation, etc.). La principale différence réside dans le fait que l'éco-efficacité demeure centrée sur la stratégie de l'entreprise individuelle, alors que l'écologie industrielle vise une optimisation à l'échelle de groupes d'entreprises, de régions, et même du système industriel dans son ensemble.

L'évolution du système industriel

La notion d'écosystème industriel est une analogie qu'il convient de ne pas prendre au pied de la lettre. Néanmoins, cette analogie mériterait d'être explorée en détail, sur la base du savoir considérable accumulé depuis une cinquantaine d'années

16. Claude Fussler (with Peter James), *Driving Eco-innovation. A breakthrough discipline for innovation and sustainability*, London, Pitman Publishing, 1996; Business Council For Sustainable Development (éd.), « Getting Eco-Efficient», Report of the Business Council for Sustainable Development First Antwerp Eco-Efficiency Workshop, novembre 1993. Genève, Business Council for Sustainable Development, 51 p., 1994; Livio D. Desimone et Frank Popoff avec le World Business Council for Sustainable Development, *Eco-efficiency. The Business Link to Sustainable Development*, Cambridge, MA, The MIT Press, 1997.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 42

concernant le fonctionnement des écosystèmes naturels. Sur le plan théorique, les premiers jalons ont certes été posés, mais presque tout reste à faire pour analyser sérieusement la validité et les implications du concept d'écosystème appliqué à l'industrie[17].

Les connaissances sur l'évolution de la vie sur Terre offrent ainsi des perspectives intéressantes pour réfléchir sur le devenir du système industriel, qui résulte, tout comme la Biosphère, d'une longue histoire évolutive. Au début de la vie, les ressources potentielles étaient si vastes, et la quantité d'organismes si minime que leur présence exerçait un impact tout à fait négligeable sur les ressources disponibles. On peut décrire cette situation comme étant un processus linéaire, dans lequel les flux de matière sont indépendants les uns des autres. Les ressources apparaissent illimitées et les déchets peuvent aussi être produits de manière illimitée. La vie a pu assurer les conditions de son développement à long terme, un processus dont la société industrielle pourrait s'inspirer, grâce à une longue succession d'« inventions » : fermentation anaérobique, puis aérobique, puis photosynthèse.

L'analogie entre les premières étapes de la vie sur Terre et le fonctionnement de l'économie moderne est frappante: en fait, le système industriel actuel est moins un véritable «système» qu'une collection de flux linéaires qui s'ignorent entre eux. Ce fonctionnement, consistant simplement à extraire des ressources et à rejeter des déchets, se trouve à la source de nos problèmes environnementaux. Braden Allenby, l'un des premiers chercheurs à explorer le concept d'écologie industrielle, a proposé d'appeler ce fonctionnement « l'écologie de type I », que l'on peut schématiser de la manière suivante[18].

17. Braden R. Allenby et William E. Cooper, «Understanding Industrial Ecology from a Biological Systems Perspective», *Total Quality Environmental Management*, vol. 3, n° 3, printemps 1994, p. 343-354.

18. L. W. Jelinski, T. E. Graedel, R. A. Laudise, D. W. McCall and C. K. N. Patel, «Industrial Ecology: Concepts and approaches», *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, vol. 89, n° 3, 1er février, 1992, p.793-797.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 43

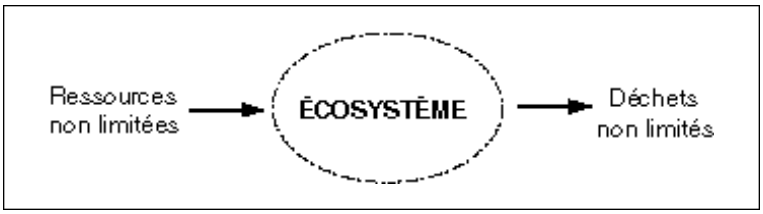

Fig. 2: Schéma d'un écosystème de type I (source: Braden R. Allenby).

Dans un stade d'évolution ultérieure, les ressources sont limitées. Dans cette situation, les organismes vivants deviennent fortement interdépendants et forment des réseaux d'interactions complexes, tels que nous les connaissons aujourd'hui dans les communautés biologiques. Les flux de matière entre les différents composants, c'est-à-dire à l'intérieur d'un tel écosystème de type II, deviennent très importants, alors que les flux entrant et sortant (les ressources et les déchets) connaissent des limites imposées par la disponibilité des ressources et la capacité d'accueil des déchets par l'environnement (Fig. 3).

L'écosystème de type II est déjà nettement plus efficace, en termes d'utilisation des ressources, que le type I, mais à l'évidence il n'est pas non plus viable à long terme, car les flux sont unidirectionnels: les ressources diminuent et les déchets continuent à augmenter inexorablement.

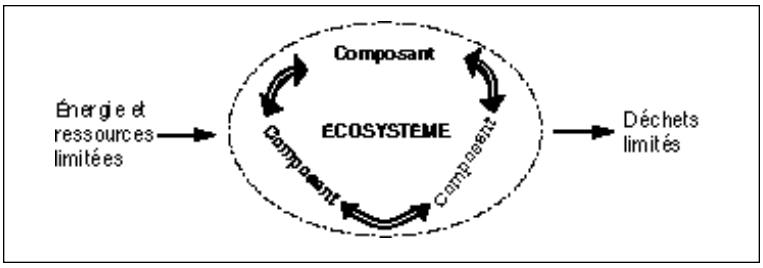

Fig. 3: Schéma d'un écosystème de type II (source: Braden R. Allenby).

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 44

Pour devenir vraiment viables, les écosystèmes biologiques ont évolué jusqu'à fonctionner de manière entièrement cyclique. Dans ce cas, il est impossible de distinguer entre les ressources et les déchets, car les déchets d'un organisme constituent une ressource pour un autre organisme. Seule l'énergie solaire constitue un apport extérieur. Toujours selon la terminologie suggérée par Braden Allenby, il s'agit alors d'un écosystème de type III. À l'intérieur d'un tel système, les nombreux cycles, interconnectés entre eux et auto-entretenus par l'énergie solaire, fonctionnent sur des échelles temporelles et spatiales très variées. Idéalement, la société industrielle (y compris les infrastructures et l'agriculture) devrait s'approcher autant que possible d'un écosystème de type III.

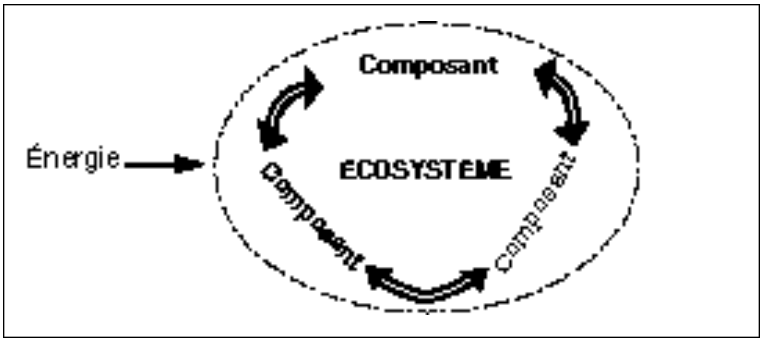

Fig. 4: Schéma d'un écosystème de type III (source: Braden R. Allenby).

D'une manière générale, un écosystème industriel idéal comporte quatre catégories principales d'acteurs: des extracteurs de ressources, des processeurs (les fabricants), des consommateurs et des processeurs de déchets. Du fait du recyclage intensif, les flux intervenant entre ces différents acteurs sont beaucoup plus importants que les flux qui entrent et sortent du système.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 45

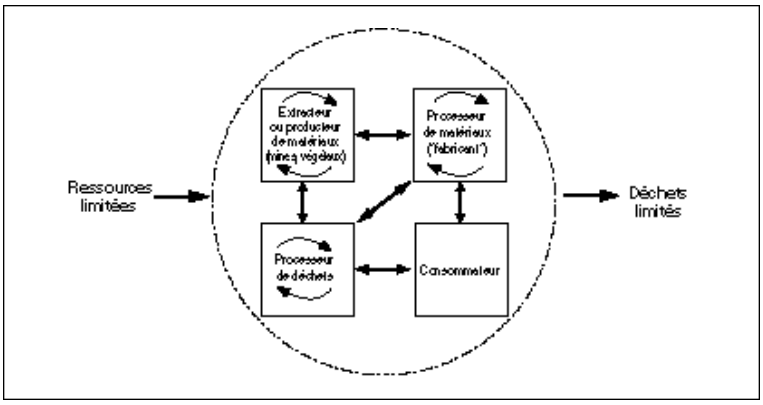

Fig. 5: Schéma d'un écosystème industriel idéal (source: Braden R. Allenby).

Les activités humaines, surtout telles qu'elles se sont développées depuis la révolution industrielle, relèvent largement d'un écosystème de type I. Les produits ont une durée de vie utile souvent très courte: ils ne servent que quelques semaines, voire quelques jours. La plupart des matériaux continuent d'être utilisés d'une manière qu'on pourrait qualifier de frivole: ils sont jetés et dispersés dans l'environnement souvent après un seul usage. De très nombreux produits sont utilisés de manière dissipative: par exemple, les lubrifiants, les solvants, les peintures, les pesticides, les engrais et même les pneus (dépôt de gomme sur les routes). Le recyclage demeure marginal. De plus, le recyclage des objets de consommation, tel qu'il se pratique aujourd'hui, est une activité souvent polluante, elle-même dissipative, dont les bénéfices réels pour l'environnement sont loin d'être clairs.

Contrairement aux réactions biochimiques, les processus industriels utilisent presque exclusivement de l'énergie fossile, qui, par définition, n'est pas régénérée dans le système. Dans ce sens, l'écosystème industriel d'aujourd'hui, basé sur des combustibles fossiles, ressemble aux premiers stades de l'évolution

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 46

biologique, lorsque les organismes les plus primitifs obtenaient leur énergie d'un stock de molécules organiques accumulé durant la période prébiotique.

Au lieu de cycles régénératifs entraînés par l'énergie solaire (les cycles biogéochimiques), les processus industriels actuels ne sont que des séquences linéaires de transformations par étapes et irréversibles. Le processus commence par l'extraction de matières premières brutes, suivie par la séparation physique et l'élimination des impuretés, puis par la réduction ou la recombinaison en intermédiaires primaires. C'est ainsi que l'on obtient les matériaux constituant le substrat premier de la société industrielle : les métaux primaires et d'autres éléments sous forme pure, comme la cellulose, le carbonate de sodium, l'ammoniaque, le méthane, l'éthane, le propane, le butane, le benzène, le xylène, le méthanol, l'éthanol, l'acétylène, l'éthylène, le propylène et quelques autres. L'obtention de ces matériaux se fait par des réactions endothermiques, c'est-à-dire nécessitant des apports extérieurs d'énergie.

Ces matériaux primaires, à leur tour, sont transformés et recombinés dans les formes physiques et chimiques désirées. Dans la plupart des cas, les réactions entre ces matériaux primaires sont exothermiques, de sorte qu'il n'est pas besoin de leur fournir de l'énergie. La plupart des réactions d'hydrogénation, de chloration, d'hydrochloration sont également exothermiques, de même que la plupart des réactions entre des acides forts et des métaux ou des hydroxydes.

De ce fait, les matériaux primaires renferment l'énergie nécessaire aux réactions servant à produire les produits finaux. On pourrait dire qu'ils jouent un rôle quelque peu analogue à l'ATP dans les systèmes biochimiques (l'ATP, adénosine triphosphate, est la molécule principale fournissant l'énergie nécessaire au métabolisme cellulaire). Cependant, l'ATP est régénérée de façon cyclique à l'intérieur des cellules. En revanche, les intermédiaires primaires ne sont pas régénérés, mais se trouvent incorporés de manière irréversible dans les

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 47

produits. C'est là encore, comme le fait remarquer Robert U. Ayres, une différence fondamentale entre le métabolisme industriel actuel et le métabolisme biologique[19].

Au cours de centaines de millions d'années, la Biosphère a produit tous les éléments nécessaires au fonctionnement d'une écologie de type III. En revanche, le système industriel est en train de passer difficilement et partiellement d'un écosystème de type I à une écosystème de type II, semi-cyclique, sous la pression d'une raréfaction de certaines ressources (principalement des ressources renouvelables comme l'eau et les sols), de pollutions diverses et de facteurs législatifs ou économiques (par exemple, le recyclage des métaux précieux).

L'enjeu du concept d'écologie industrielle est de favoriser la transition vers un écosystème de type III. La stratégie permettant d'effectuer cette transition comprend quatre axes: valoriser les déchets comme des ressources; boucler les cycles de matière et minimiser les émissions dissipatives; dématérialiser les produits et les activités économiques; décarboniser l'énergie. (Ces axes sont décrits en détail au chapitre 5.)

Au-delà de telle ou telle notion particulière, l'apport le plus précieux des concepts de l'écologie au système industriel réside sans doute dans la vision globale, intégrée, qu'elle peut offrir. En particulier, il s'agira de tirer profit des connaissances sur les mécanismes de fonctionnement et de régulation des écosystèmes, un savoir imprégné du langage de la cybernétique, développé depuis une cinquantaine d'années par l'écologie théorique. À terme, la connaissance des mécanismes de régulation des écosystèmes biologiques et industriels pourrait devenir un savoir stratégique, tout comme l'est, depuis longtemps, la connaissance des techniques servant à optimiser les divers composants du système de production industrielle.

19. Robert U. Ayres, «Industrial Metabolism», *in* Jesse H. Ausubel and Hedy E. Sladovich (éd.), *Technology and Environment*, Washington, DC, National Academy of Engineering, National Academy Press, 1989, p. 23-49.

3.
Perspectives historiques

Dès les débuts de l'écologie scientifique, les chercheurs ont reconnu que le substrat biophysique des activités humaines obéit aux mêmes lois que les écosystèmes naturels et que, par conséquent, le système industriel peut être considéré comme un sous-système de la Biosphère. Le concept d'écosystème industriel est ainsi clairement présent, bien qu'il ne soit pas explicitement nommé, dans les publications de pionniers comme Evelyn Hutchinson, Howard Odum et Ramon Margalef[20].

Curieusement, cette ligne de recherche n'a jamais été poursuivie activement par les écologues, comme si le système industriel ne méritait pas autant d'attention que les écosystèmes naturels, à une notable exception près: les agro-écosystèmes. Il est révélateur que la collection de monographies intitulée « Ecosystems of the World» consacre un ouvrage aux «écosys-

20. Voir H. T. Odum and R. C. Pinkerton, «Time's Speed Regulator: The Optimum Efficiency for Maximum Power Output», *in* «Physical and Biological Systems», *American Scientist*, vol. 43, p. 331-343, 1955; E. G. Hutchinson, «On Living», *in* «The Biosphere», *The Scientific Monthly*, vol. LXVII, p. 393-398, 1948; Ramón Margalef, «On certain unifying principles in ecology», *The American Naturalist*, vol. 97, n° 897, novembre-décembre 1963, p. 357-374.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 50

tèmes bio-industriels» (élevage, agriculture), au même titre que la trentaine d'autres volumes concernant les écosystèmes terrestres, aquatiques et marins[21].

Au cours des trente dernières années, plusieurs tentatives ont toutefois été faites dans ce sens, généralement sans lendemain, à l'exception du Japon. Charles Hall, un écologiste à l'université de l'État de New York, a commencé à enseigner et à publier sur les écosystèmes industriels au début des années quatre-vingt, sans rencontrer d'écho[22]. À peu près à la même époque, à Paris, un autre universitaire, Jacques Vigneron, a, de manière indépendante, tenté de lancer la notion d'écologie industrielle, là encore sans éveiller de réel intérêt sur le moment[23]. De même en Russie, où un département d'écologie industrielle existe

21. D. J. A. Cole and G. C. Brander, «Bioindustrial Ecosystems», *in* D. W.Goodall (éd.), *Ecosystems of the World*, vol. 21, Amsterdam, Elsevier, 1986. En France, les dernières pages de l'excellent ouvrage de S. Frontier et D. Pichod-Viale (*Ecosystèmes, structure-fonctionnement-évolution*, Paris, Masson, 1993) abordent les systèmes socio-économiques sous l'aspect de l'écologie scientifique. Mais, là encore, il ne s'agit que de pistes intéressantes, qui mériteraient d'être approfondies.

22. C. A. S. Hall, «The biosphere, the industriosphere and the interactions», *Bulletin of the Atomic Scientists*, vol. 31, p.11-21, 1975. La notion d'écosystème industriel est explicitement mentionnée dans la préface de l'ouvrage de Charles S.Hall, Cutler J.Cleveland et Robert Kaufmann, *Energy and Resource Quality: The Ecology of the Economic Process*, Niwot, Colorado, University Press of Colorado, 1992. Voir également Harrison Brown, «Human Materials Production as a Process» *in* « The Biosphere», *Scientific American*, vol. 223, n° 3, septembre 1970, p. 194-208 [numéro spécial: the Biosphere].

23. Jacques Vigneron, «Écologie et écosystème industriel», *in* Philippe Esquissaud, *Écologie industrielle*, Paris, Hermann, 1990, p. 1-26.

24. V. A. Zaitsev, «Solution of ecological problems in the creation of non-waste or cleaner production processes, enterprises, and regions», *Russian Chemical Industry*, vol. 25, p. 1-4, 1993; B. V. Ermolenko, «Ecological Problems of the Economy», *Russian Chemical Industry*, vol. 26, p. 3-17, 1994; V. A. Zaitsev, «Preservation of the Environment – the Beginning of Stable Development of Society», *Russian Chemical Industry*, vol. 26, p. 1-2, 1994; E. V. Yurtov, V. M. Shkinev, and N. V. Khromykh, «Consideration of the Combined Effect of Industrial Objects on the Environment», *Russian Chemical Industry*, vol. 26, p. 20-24, 1994.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 51

depuis une dizaine d'années à l'Institut Mendeleiev de génie chimique[24].

Les études des flux et des stocks de matière ont progressivement préparé le terrain. Ainsi, la métaphore du métabolisme a été proposée indépendamment par Robert U. Ayres, aux États-Unis et Peter Baccini, en Suisse. Plusieurs auteurs ne font pas clairement la distinction entre écologie industrielle et métabolisme industriel. Pourtant, cette distinction se justifie, non seulement pour des raisons historiques (la métaphore du métabolisme industriel proposée par Robert Ayres était couramment en usage durant les années quatre-vingt), mais aussi d'un point de vue méthodologique[25].

Ce qui pourrait bien être la première (ou du moins l'une des toutes premières) occurrence de l'expression « écosystème industriel» (selon le concept récent) se trouve dans un article du géochimiste américain Preston Cloud. Cet article est le texte d'une communication présentée au congrès annuel de l'Association géologique allemande en 1977. Il est très intéressant de noter que ce texte est dédié à Nicholas Georgescu-Roegen, le père de la bioéconomie, qui n'a jamais cessé, dans son œuvre considérable, d'insister sur l'importance des flux de

25. L'article «princeps» pour le métabolisme industriel date de 1969: Robert U. Ayres and Allen V. Kneese, « Production, Consumption, and Externalities», Resources for the Future, Inc., Washington, DC, 1969 [réédition n° 76, *American Economic Review*, juillet 1969, p. 282-297]. Voir aussi Robert U. Ayres et Udo E. Simonis (éd.), *Industrial Metabolism. Restructuring for Sustainable Development*, Tokyo, New York, United Nations University Press, 1994; Peter Baccini et Paul Brunner, *Metabolism of the Anthroposphere*, Berlin, Springer Verlag, 1991.

26. Preston Cloud, « Entropy, materials, and posterity », *Geologische Rundschau*, vol. 66, 1977, p.678-696, article présenté à la conférence annuelle du Geologische Vereinigung in Tübingen sur «Earth Sciences and the Future of Mankind», 24-26 février 1977; Nicholas Georgescu-Roegen, qui a beaucoup écrit sur la dynamique de la technologie, a publié de nombreux articles extrêmement intéressants pour l'écologie industrielle : « Economics and Mankind's Ecological Problem in US Economic Growth from 1976 to 1986 : Prospects, Problems and Patterns», H. H. Humphrey (éd.), Washington, DC, *Government Printing Office*, 1976, p. 62-91; «Myths about Energy and

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 52

matière et d'énergie dans son analyse thermodynamique de l'économie humaine[26].

Au milieu des années soixante-dix, l'écologie industrielle se trouvait incontestablement en gestation dans le bouillonnement d'idées qui a marqué les premières années suivant la création du Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE). Créé au lendemain de la Conférence des Nations unies sur l'environnement humain, à Stockholm en 1972, le PNUE a eu comme premier directeur Maurice Strong, aujourd'hui conseiller spécial du président de la Banque mondiale. Son bras droit, à l'époque, n'était autre que Robert Frosch, qui allait contribuer de manière décisive à ressusciter le concept de l'écologie industrielle, grâce au désormais fameux article paru en 1989 dans le mensuel *Scientific American*.

Une atmosphère intellectuelle similaire régnait dans des milieux institutionnels voisins, comme l'Organisation des Nations unies pour le développement industriel (Unido) et la Commission économique des Nations unies pour l'Europe (ECE). Par exemple, plusieurs articles présentés durant un

—

Matter», *Growth and Change*, vol. 10, p. 16-23, 1979; «Energy and Matter go Mankind's Technological Circuit», *in Energy Policy: The Global Challenge*, P. N. Nemetz (éd.), London, Butterworth, 1979, p. 107-127; «Matter: A resource ignored by thermodynamics – Renewable resource economics», *in Future Sources of Organic Materials*, L. E. St-Pierre and G. R. Brown (éd.), Oxford, Pergamon Press, 1980, p. 79-87; «The Entropy Law and the Economic Process in Retrospect», *Eastern Economic Journal*, vol. XII, p. 3-25, 1986; «Thermodynamics, Economics and Information», *in Organization and Change in Complex Systems*, M. Alson (éd.), New York, Paragon House, An Icus Book, 1990, p. 225-234; «The Promethean Condition of Viable Technologies», *Materials and Society*, vol. 7, p. 425-435, 1983; «Feasible Recipes Versus Viable Technologies», *Atlantic Economic Journal*, vol. XII, p.21-31, 1984. Je suis redevable à Jacques Grinevald de m'avoir fait découvrir le très beau texte de Preston Cloud, ainsi que les articles de Nicholas Georgescu-Roegen. Voir sa synthèse, J. Grinevald «The Biosphere and the Noosphere revisited: Biogeochemistry and Bioeconomics», *in Entropy and Bioeconomics*, J. C. Dragan *et al*. (éd.), Milan, Nagard, 1993, p. 241-258.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 53

séminaire organisé par l'ECE en 1976 sur ce qui s'appelait alors la «technologie et production sans déchets» exposent des idées très similaires à celles que l'on trouve aujourd'hui dans la littérature de la *Cleaner Production* et de l'écologie industrielle. Nelson Nemerow, qui est actif dans le domaine du traitement des déchets industriels aux États-Unis depuis plus de cinquante ans, affirme que l'idée de « complexes industriels environnementalement équilibrés » et de pollution zéro est apparue lors d'une discussion à l'Unido à Vienne au début des années soixante-dix[27].

Des conceptions très proches, préfigurant les idées actuelles sur les parcs éco-industriels, ont été exposées à la même époque par Ted Taylor, un physicien nucléaire qui s'était reconverti aux questions d'environnement à la fin des années soixante. Il avait créé, en 1967, l'*International Research and Technology Corporation*, à Washington DC, dont il était le président et dont le jeune vice-président n'était autre que le pionnier du métabolisme industriel, Robert Ayres[28].

27. Economic Commission for Europe (ECE), *Non-waste Technology and Production*, Oxford, Pergamon Press Ltd/United Nations, 1978 (Proceedings of an international seminar by the Senior Advisers to ECE Governments on Environmental Problems on the Principles and Creation of Non-waste Technology and Production, Paris, 29 novembre-4 décembre 1976); Nelson L. Nemerow, *Zero Pollution for Industry. Waste Minimization Through Industrial Complexes*, New York, John Wiley and Sons, 1995. Voir également M. T. Farvar et J. P. Milton, *The Careless Technology: Ecology and International Development*, New York, Natural History Press, Doubleday and Co, 1972; R. F. Dasmann, J. P. Milton et P. H. Freeman, *Ecological Principles for Economic Development*, London, John Wiley and Sons Ltd, 1973.

28. T. B. Taylor and C. Humpstone, *The Restoration of the Earth*, New York, Harper and Row, 1972. L'idée de complexes industriels fonctionnant avec une « pollution zéro» a été récemment relancée par Gunter Pauli, à l'université des Nations unies (Tokyo), sous le nom de ZERI (Zero Emissions Research Initiative). Voir G. Pauli, «Industrial Clusters of the Twenty-first Century», *in Steering Business Toward Sustainability*, F. Capra and G. Pauli (éd.), Tokyo, United Nations University Press, 1995, p. 145-162.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 54

On trouverait sans doute encore bien d'autres publications préfigurant l'écologie industrielle d'aujourd'hui. On peut notamment mentionner l'unique numéro de la revue *Industrial Ecology*, au titre un peu trompeur car il s'agissait plus à l'évidence d'une réaction de certains milieux économiques inquiets de la création de l'*US Environmental Protection Agency* que d'écologie industrielle scientifique… [29]

Parmi les nombreuses tentatives antérieures, deux méritent une mention détaillée dans le cadre de ce survol historique : l'étude sur « L'écosystème Belgique » et le travail d'avant-garde effectué au Japon.

« L'écosystème Belgique »

En 1983 paraît à Bruxelles un ouvrage collectif intitulé *L'écosystème Belgique. Essai d'écologie industrielle* [30], publié par le Centre de recherche et d'information sociopolitiques (CRISP), un bureau d'études indépendant, proche des milieux progressistes. Le livre résume les réflexions d'une demi-douzaine d'intellectuels se situant dans la mouvance de la gauche socialiste. Inspiré par les débats autour du rapport Meadows au Club de Rome, et surtout par la Lettre de Sicco Mansholt (commissaire du Marché commun), ce petit groupe cherchait à pallier une lacune régnant dans la pensée économique standard, y compris de gauche. Son idée était de réaliser une synthèse de l'économie belge sur la base des statistiques industrielles de la

29. D. Gussow and J. Meyers, «Industrial Ecology», *Industrial Ecology*, vol. 1, 1970 (sans indication de lieu ni d'éditeur). Mes recherches pour en savoir plus sur cette éphémère revue sont restées infructueuses jusqu'à présent.

30. G. Billen, F. Toussaint, P. Peeters, M. Sapir, A. Steenhout et J.-P. Vanderborght, *L'écosystème Belgique. Essai d'écologie industrielle*, Bruxelles, Centre de recherche et d'information sociopolitiques – CRISP, 1983. Je suis redevable à Gonzague Pillet (université de Fribourg) d'avoir attiré mon attention sur cet ouvrage.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 55

production, mais de l'exprimer en flux de matière et d'énergie, plutôt que dans les traditionnelles unités monétaires abstraites.

Le point de départ résidait « dans la conviction que les concepts et les méthodes de l'écologie sont transposables à l'étude du fonctionnement des sociétés industrielles et permettent d'en éclairer certains aspects d'un jour nouveau » (*ibid*., p. 11). On trouve ainsi très clairement exprimés les principes de base de l'écologie industrielle :

« Pour prendre en compte l'activité industrielle dans le champ d'une analyse écologique, il faut s'interroger sur les relations de cette usine avec les autres usines productrices de matières premières qu'elle consomme, avec les circuits de distribution dont elle dépend pour l'écoulement de ses produits, avec les consommateurs qui les utilisent. […] Il faut, en somme, définir la société industrielle comme un écosystème, formé par l'ensemble de ses moyens de production, de ses circuits de distribution et de consommation ainsi que par les réserves de matières premières et d'énergie qu'elle utilise et les déchets qu'elle produit. […] Une description en termes de circulation de matière ou d'énergie donne, en effet, une vision des activités économiques dans leur réalité physique et montre comment la société gère ses ressources matérielles» (*ibid*., p. 19 et 21). Dans cette optique, le groupe a étudié six grandes filières : le fer, le verre, le plastique, le plomb, le bois et le papier, les matières alimentaires.

L'une des constatations principales réside dans le phénomène dit de «désarticulation» entre deux étapes d'une même filière. Il faut entendre par là que « deux secteurs d'une même filière qui pourraient être complémentaires et se développer en étroite interaction l'un avec l'autre connaissent des orientations quantitativement et/ou qualitativement divergentes » (p. 31). Par exemple, 80 % de la production nette d'acier en Belgique sont destinés à l'exportation, grâce à l'ouverture des frontières européennes. Sous l'égide de la Ceca (Communauté européenne du charbon et de l'acier), la sidérurgie belge a ainsi connu un déve-

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 56

loppement très rapide, sans liaison avec le développement du secteur des fabrications métalliques.

L'ouverture des marchés extérieurs a encouragé l'hypertrophie d'une sidérurgie lourde, tournée essentiellement vers l'exportation, au détriment de sa spécialisation dans des produits technologiquement plus élaborés. La sidérurgie se trouve ainsi complètement déconnectée du secteur des constructions métalliques. Conséquence : cette désarticulation rend la sidérurgie belge très dépendante de l'extérieur pour l'écoulement d'une production assez banale. Elle devient ainsi très vulnérable à la concurrence sur le marché mondial, tout en répondant assez mal aux besoins intérieurs.

Autre exemple très significatif: la désarticulation agriculture-élevage (*ibid.*, p. 67). Traditionnellement, il régnait un certain équilibre entre l'agriculture et l'élevage au sein d'exploitations paysannes mixtes: les sous-produits et les déchets d'une agriculture polyvalente servaient à nourrir le bétail. La densité animale restait faible, et les déjections animales (fumier, purin) constituaient la base de l'amendement des terres agricoles, éventuellement complétée par des engrais minéraux. Or, la « modernisation » de l'agrobusiness a bouleversé ce système. Désormais, le bétail, beaucoup plus nombreux, est engraissé à l'aide d'aliments industriels, réalisés à partir de matières premières importées.

L'élevage s'est ainsi progressivement coupé des activités agricoles en ce qui concerne les ressources alimentaires. Il en va de même pour les déjections animales : la masse considérable de déjections ne trouve plus d'utilisation, car elle dépasse largement la capacité d'épandage sur les sols agricoles. Dans les deux cas (élevage et agriculture), les sous-produits ne trouvent plus de débouchés. Ils deviennent des déchets qui posent des problèmes d'élimination !

L'analyse des ces filières conduit les auteurs à décrire quelques caractéristiques générales du fonctionnement du système industriel belge (p. 87).

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 57

Premièrement, le «caractère ouvert» (au sens national) des schémas de circulation de matière à travers la chaîne transformation-consommation dans quelques filières industrielles belges : les flux d'importations et d'exportations sont importants par rapport à la production indigène, de sorte qu'ils peuvent influencer fortement les appareils de production.

Deuxièmement, cette ouverture s'accompagne souvent d'une « spécialisation », certaines activités industrielles successives d'une filière se développant beaucoup plus que d'autres.

Troisièmement, les spécialisations d'un segment de production peuvent créer des «désarticulations sectorielles», définies comme des situations dans lesquelles « les liens d'échange de matière entre deux activités industrielles successives d'une même filière deviennent faibles par rapport aux échanges avec l'extérieur, ces deux activités cessant alors d'être complémentaires » (p. 87).

L'ouverture, la spécialisation et les désarticulations sectorielles témoignent ainsi de l'internationalisation de l'économie belge. Il en résulte plusieurs dysfonctionnements de « L'écosystème Belgique », notamment (p. 89) :

1. L'ouverture économique du système belge entraîne l'ouverture écosystémique des cycles de matière. Les résidus de consommation, qui pourraient constituer une ressource, sont de plus en plus considérés comme des déchets dont l'évacuation pose problème.

2. Le fonctionnement de ce système économique réclame de grandes dépenses énergétiques. Sur ce point, l'analyse du groupe de Bruxelles met notamment en lumière un fait intéressant: l'augmentation de la consommation en énergie primaire provient moins de l'accroissement de la consommation finale que d'un certain type d'organisation de la chaîne énergétique elle-même, ainsi que du système industriel tout entier.

3. La structure de la circulation de la matière dans le système industriel génère une pollution qui pourrait être évitée. Par

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 58

exemple, l'organisation actuelle de la chaîne alimentaire provoque la dégradation des eaux de surface.

Le groupe belge développe également des idées intéressantes sur le problème des déchets, en rappelant que les notions de « matière première» et de «déchet» n'ont de sens que dans un système où la circulation de la matière est ouverte. Contrairement au préjugé courant, qui voit de manière simpliste l'origine du problème des déchets dans une augmentation de la production et de la consommation, les auteurs de « L'Ecosystème Belgique» font observer que «notre consommation de matière première, d'une part, notre production de déchets, d'autre part, constituent donc une conséquence de la structure ouverte de la circulation de la matière dans notre système industriel, plus encore que l'augmentation du volume de la production et de la consommation» (p. 91). Quant à la réutilisation des déchets, il faut bien voir que les difficultés principales se situent non pas à l'étape de la collecte, où même à celle du tri, mais «en aval de la collecte, dans les possibilités réelles d'écoulement des déchets dans la structure actuelle de notre appareil de production » (p. 96).

Francine Toussaint – ingénieur commercial travaillant actuellement comme économiste pour l'administration bruxelloise et qui fut la principale instigatrice du projet – explique aujourd'hui que l'expression « écologie industrielle » semble avoir surgi spontanément, sans qu'elle ait été lue ou entendue ailleurs. Le petit groupe comptait six personnes de professions très diverses (biologiste, chimiste, économiste, etc.) qui ont accompli ce travail en dehors de leurs occupations courantes. Bien que l'ouvrage exprime de manière remarquablement claire et synthétique les idées de base de l'écologie industrielle, l'accueil resta extrêmement réservé. «Nous avons vraiment eu le sentiment d'être une voix criant dans le désert», se souvient Francine Toussaint. Progressivement, le groupe d'amis s'est disséminé; chacun a poursuivi sa carrière, et, malgré son intérêt et

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 59

son originalité, « L'écosystème Belgique » a rapidement sombré dans l'oubli.

La vision japonaise

Dans l'histoire de l'écologie industrielle, le Japon mérite une mention particulière. À la fin des années soixante, le ministère du Commerce extérieur et de l'industrie (MITI, *Ministry of International Trade and Industry*), prenant acte du coût environnemental élevé de l'industrialisation, confie une mission de réflexion prospective à l'un de ses organes consultatifs indépendants, le Conseil pour la structure industrielle (*Industrial Structure Council*). Une cinquantaine d'experts, provenant d'horizons très divers (industriels, hauts fonctionnaires, représentants d'associations de consommateurs, etc.) explorent alors les possibilités de faire évoluer l'économie japonaise vers des activités moins dépendantes de la consommation de matières, et davantage basée sur l'information et les connaissances.

Au cours de l'année 1970, durant les séances du Conseil pour la structure industrielle, l'idée émerge (sans qu'il soit possible apparemment d'en attribuer la paternité à une personne précise) qu'il serait souhaitable de concevoir l'activité économique dans « un contexte écologique ».

Le rapport final du Conseil pour la structure industrielle, intitulé « Vision pour les années soixante-dix », est rendu public en mai 1971. Suivant les recommandations de ce rapport, le MITI met immédiatement sur pied une quinzaine de groupes de travail. L'un d'entre eux, le groupe de travail industrie-écologie (*Industry-Ecology Working Group*) reçoit précisément pour mission d'approfondir l'idée d'une ré-interprétation du système industriel en terme d'écologie scientifique.

Ce groupe de travail était animé par Chihiro Watanabe, un jeune ingénieur urbaniste alors responsable des problèmes environnementaux au sein d'un organe du MITI, le Bureau pour la

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 60

protection de l'environnement. (Après avoir occupé divers postes au MITI durant 26 ans, Chihiro Watanabe est aujourd'hui professeur à l'Institut de technologie de Tokyo et conseiller du directeur de l'IIASA, l'International Institute for Applied Systems Analysis, à Laxenburg, en Autriche). Assistés de plusieurs experts extérieurs, les membres de ce groupe de travail industrie-écologie commencent par effectuer une recherche systématique de la littérature scientifique, puis vont consulter les meilleurs spécialistes internationaux. C'est ainsi qu'en mars-avril 1973, au cours d'une tournée aux États-Unis, Chihiro Watanabe rend visite à l'une des grandes figures de l'écologie moderne, Eugene Odum, à la Georgia State University, à Atlanta (toutefois, ce dernier ne parut pas particulièrement intéressé par la démarche japonaise).

Après environ un an de travaux, en mai 1972, le groupe de travail industrie-écologie publie son premier rapport, un document en japonais de plus de trois cents pages, dont il existe un bref résumé en anglais[31]. Selon Chihiro Watanabe, le rapport fut largement distribué au sein du MITI, également auprès des organisations industrielles et de la presse, où il fut considéré comme «stimulant», mais aussi comme étant encore très «philosophique». Un deuxième rapport, plus concret, comprenant des études de cas, voit le jour un an plus tard, au printemps 1973. Il est difficile de prendre la mesure exacte de la postérité du groupe de travail industrie-écologie. Mais il ne fait aucun doute que cette démarche a largement contribué à la conception et au lancement de plusieurs grands programmes de recherche du MITI sur les technologies industrielles.

Pour preuve, en avril 1973, le secrétariat du ministre responsable du MITI recommande officiellement d'élaborer une nouvelle politique sur la base des principes de l'écologie, l'accent étant mis sur les aspects énergétiques. En août 1973, deux mois

31. C. Watanabe, Industry-Ecology, «Introduction of Ecology into Industrial Policy», Tokyo, Ministry of International Trade and Industry (MITI), 12 p., 1972.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 61

avant le premier choc pétrolier, le MITI soumet une première demande de budget pour le « Projet plein soleil » (*Sunshine Project*). Ce projet, visant à développer de nouvelles technologies énergétiques (notamment dans le domaine des énergies renouvelables), démarre effectivement en juillet 1974. Quelques mois avant la seconde crise pétrolière, en 1978, le MITI lance un programme complémentaire, le «Projet clair de lune » (*Moonlight Project*), consacré aux technologies accroissant l'efficacité énergétique. En 1980, le MITI crée l'Organisation pour le développement des nouvelles énergies (*New Energy Development Organization, NEDO*), puis lance en 1988 le Programme pour les technologies environnementales globales (*Global Environmental Technology Program*).

Enfin, le «Nouveau programme plein soleil» (*New Sunshine Program*), consacré aux technologies énergétiques avancées, notamment dans la perspective d'une forte réduction des émissions de gaz à effet de serre, démarre en 1993. Le *New Sunshine Program* constitue lui-même un composant d'un programme encore plus vaste, le *New Earth 21*. Dans la foulée, à l'automne 1994, est inauguré en grande pompe à Kansai, près de Kyoto, le siège principal du nouvel Institut de recherches des technologies innovatrices pour la Terre (*Research Institute of Innovative Technology for the Earth, RITE*).

Sans tomber dans les stéréotypes habituels sur le Japon (vision stratégique à long terme, approche systémique, etc.), il faut reconnaître que c'est dans ce pays seulement que les idées de l'écologie industrielle, pourtant déjà présentes à l'état diffus aux États-Unis et en Europe, ont été prises au sérieux et mises en pratique à grande échelle. Avec des conséquences non négligeables, puisque c'est par le biais de technologies développées dans le contexte d'une économie ayant pleinement intégré les contraintes écologiques que le Japon entend maintenir son statut de grande puissance économique.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 62

À la base de cette stratégie, un principe de base: substituer la technologie aux ressources naturelles. C'est pourquoi la dynamique technologique se trouve au cœur de la réflexion japonaise sur l'écologie industrielle. Et ce n'est sans doute pas un hasard si le mouvement récent de l'écologie industrielle aux États-Unis a pris naissance dans le milieu des ingénieurs de l'industrie, particulièrement attentif à l'évolution et à la diffusion des technologies[32].

32. Sur les réflexions japonaises concernant la dynamique technologique, voir C. Watanabe, « The Interaction between Technology and Economy : National Strategies for Constrained Economic Environments. The Case of Japan 1955-1992», Laxenburg, IIASA Working Paper WP-95-16, 98 p., février 1995; MITI, «Trends and Future Tasks in Industrial Technology. Developing Innovative Technologies to Support the 21st Century», Tokyo, Ministry of International Trade and Industry (MITI), Summary of the White Paper on Industrial Technology, 29 p., septembre 1988; MITI, «New Sunshine Program », Tokyo, New Sunshine Program Promotion Headquarters, Agency for Industrial Science and Technology (AIST), Ministry of International Trade and Industry (MITI), Brochure de présentation, 40 p., sans date (probablement 1992); Y. Ishida, «Regreening the Earth. Japan's 100-Year Plan», *The Futurist*, 1993, p. 20-24; D. J. Richards et A. B. Fullerton, «Industrial Ecology: U.S.-Japan Perspectives», Washington, DC, *National Academy Press*, 1994 ; C. Watanabe, « Energy and Environmental Technologies in Sustainable Development: A View from Japan», *The Bridge*, vol. 23, p. 8-15, 1993; C. Watanabe, «An Ecological Assessment of Japan's Industrial Technology System», Cambridge, MA, Massachussetts Institute of Technology, Special Lecture to MIT, Boston, 42 p., June 1993; H. Inoue, «Ecofactory. Concept and R and D Themes», *New Technology Japan*, 1992; C. Watanabe, I. Santoso et T. Widayanti, *The Inducing Power of Japanese Technological Innovation*, London, Pinter Publishers, 1991 ; C. Watanabe, « The Feedback Loop between Technology and Economic Development : An Examination of Japanese Industry », *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 49, 1995, p. 127-145 ; H. Yoshikawa, « Manufacturing and the 21st Century – Intelligent Manufacturing Systems and the Renaissance of the Manufacturing Industry», *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 49, 1995, p. 195-213 ; Y. Akimoto, « A New Perspective on the Eco-Industry », *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 49, 1995, p. 165-173.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 63

Un nouveau départ avec *Scientific American*

Nous avons déjà mentionné l'impact exercé par l'article de Robert Frosch et Nicholas Gallopoulos dans le numéro spécial de *Scientific American* de septembre 1989, intitulé « Des stratégies industrielles viables ». À l'occasion du premier colloque consacré à l'écologie industrielle, qui s'est déroulé à Washington en mai 1991 sous l'égide de l'Académie nationale des sciences, Robert Frosch, qui fut le premier directeur-adjoint du Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE) lors de sa création en 1973, a rappelé que cette idée était dans l'air depuis plusieurs décennies, notamment lors des discussions suivant la création du PNUE[33].

Contrairement aux tentatives précédentes, l'article de Frosch et Gallopoulos allait susciter un fort intérêt. On peut y voit plusieurs raisons : le prestige d'une revue comme *Scientific American*, la notoriété de Robert Frosch, le poids conféré par l'affiliation des deux auteurs à General Motors, et le contexte

33. Voici ce qu'en dit Robert Frosch lors du colloque de 1991: «The idea of industrial ecology has been evolving for several decades. For me the idea began in Nairobi with discussions at the United Nations Environment Programme (UNEP), where we were concerned with problems of waste, with the value of materials, and with the control of pollution. At the same time, we were discussing the natural world and the nature of biological and ecological systems. There was a natural ferment of thinking about the human world, its industries, and its waste products and problems and about the coupling of the human world with the rest of the natural world. […] With this background, when writing an article for *Scientific American*, Nicholas Gallopoulos and I found ourselves falling naturally into use of the term « industrial ecosystem», thinking of industry as heavily analogous to the behavior of the natural world with regards to the use of materials and energy. We later found ourselves automatically entitling a talk before the United Kingdom Fellowship of Engineering, «Towards An Industrial Ecology», because the ideas had continued to ferment and the ecological analogy seemed natural» (Source: R. A. Frosch, «Industrial Ecology: A philosophical introduction», *Proceeedings of the National Academy of Sciences of the USA*, vol. 89, 1992, p. 800-803).

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 64

général devenu favorable aux questions d'environnement, notamment les discussions autour du rapport de la Commission Brundtland sur le développement durable. Bien qu'il ne présente pas d'idées à proprement parler inédites, l'article de Frosch et Gallopoulos dans *Scientific American* se trouve ainsi à la source du développement actuel de l'écologie industrielle[34].

À la même époque (fin des années quatre-vingt), à Washington, la National Academy of Engineering avait lancé le « Technology and the Environment Programme », qui consiste essentiellement à organiser des colloques et à en publier les comptes rendus. Le premier ouvrage, paru en 1989, *Technology and Environment*, contient déjà bon nombre d'idées qui ont évolué en direction de l'écologie industrielle. Généralement, ces rencontres ne réunissent guère plus d'une vingtaine de personnes, sur invitation. L'un des participants au programme de la National Academy of Engineering, Braden Allenby, cadre dans l'entreprise de télécommunications américaine AT & T, a soutenu la première thèse sur l'écologie industrielle en 1992[35].

34. Pour mémoire, les deux articles de bases sont: Robert A. Frosch et Nicholas E. Gallopoulos, «Strategies for Manufacturing», *Scientific American*, vol. 261, n° 3, septembre 1989, p.94-102, numéro spécial: «Managing Planet Earth» [Traduction française: Robert A. Frosch et Nicholas E. Gallopoulos, « Des stratégies industrielles viables », *Pour La Science*, n° 145, novembre 1989, p. 106-115]; R. A. Frosch et N. E. Gallopoulos, «Towards An Industrial Ecology. in The Treatment and Handling of Wastes», A. D. Bradshow *et al*. (éd.), London, Chapman and Hall, 1992, p. 269-292. Plus récemment: Robert A. Frosch, «Sustainable Development and Industrial Ecology», *The Bridge*, National Academy of Engineering, vol. 23, n° 2, été 1993, p. 2; Robert A. Frosch, «Industrial Ecology: Minimizing the Impact of Industrial Waste», *Physics Today*, vol. 47, n° 11, novembre 1994, p. 63-68 [numéro spécial: «Physics and the Environment»]; Robert A. Frosch, «The Industrial Ecology of the 21st Century», *Scientific American*, vol. 273, n° 3, septembre 1995, p. 144-147 [numéro spécial 150e anniversaire: « Key Technologies for the 21st Century»].

35. Jesse H. Ausubel et Hedy E. Sladovich (éd.), « Technology and Environment», Washington, DC, National Academy of Engineering,

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 65

Les idées de l'écologie industrielle se sont également répandues dans les milieux d'affaires, toujours sur la base du fameux article du *Scientific American*, mais indirectement. Hardin Tibbs, un consultant anglais qui travaillait en 1989 à Boston pour la société Arthur D. Little, raconte qu'il éprouva un déclic en lisant l'article de Frosch et Gallopoulos. Dans la foulée, il rédigea une brochure d'une vingtaine de pages, intitulée « Industrial Ecology : A New Environmental Agenda for Industry », publiée par Arthur D. Little en 1991. Puis Global Business Network, près de San Francisco, le republie en 1993, après que Hardin Tibbs ait rejoint cet organisme de prospective qui élabore des scénarios pour les entreprises membres de son réseau[36].

Sur le fond, la brochure de Tibbs redit pour l'essentiel ce qu'on peut lire dans l'article de Frosch et Gallopoulos. Mais l'apport décisif de Hardin Tibbs a consisté à traduire ces idées dans le langage et la rhétorique des milieux d'affaires, et à les présenter de manière très synthétique dans un document de quelques pages, estampillé du prestigieux label Arthur D. Little

National Academy Press, Washington, 1989; B. R. Allenby, «Design for Environment: Implementing Industrial Ecology», (Doctoral Dissertation for Rutgers University), Ann Arbor, MI, University Microfilms, Pub. n° 9232896, 1992; B. R. Allenby, «Commentary: Achieving Sustainable Development through Industrial Ecology», *International Environmental Affairs*, vol. 4, p. 56-68, 1992; B. R. Allenby, «Industrial Ecology: The Materials Scientist in an Environmentally Constrained World», *MRS Bulletin (Materials Research Society)*, vol. 17, 1992, p. 46-51 ; B. R. Allenby, « Supporting Environmental Quality : Developing an Infrastructure for Design », *Total Quality Environmental Management*, vol. 2, 1993, p. 303-308 ; B. R. Allenby, «Industrial Ecology Gets Down to Earth», *IEEE Circuits and Devices*, vol. 10, 1994, p. 24-28.

36. H. Tibbs, *Industrial Ecology. An Environmental Agenda for Industry*, Emeryville, CA, Global Business Network, 1993.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 66

puis Global Business Network. Rapidement épuisée, photocopiée à des milliers d'exemplaires, la brochure de Hardin Tibbs a ainsi permis aux idées de Frosch et Gallopoulos de circuler largement dans le milieu des entreprises[37].

37. Pour plus de détails sur l'histoire de l'écologie industrielle, voir Suren Erkman, «Industrial Ecology: An Historical View», *Journal of Cleaner Production*, vol. 5, n° 1-2, p. 1-10, 1997.

4.
Le métabolisme industriel

En novembre 1986, l'incendie d'une halle de stockage de l'entreprise Sandoz, à Schweizerhalle (Bâle), entraîne le déversement de 33 tonnes de substances toxiques dans le Rhin. Cet accident a provoqué une émotion considérable. Pourtant, à la même époque, le Rhin charriait chaque jour 27 tonnes de matières toxiques se déversant dans le delta hollandais et la mer du Nord, soit dix mille tonnes par an, sans que personne, à part quelques spécialistes, ne s'en émeuve outre mesure !

Dans le cas du Rhin, comme pour les autres grands bassins fluviaux à forte densité de population, le point essentiel dans la perspective de l'écologie industrielle réside dans le fait que les principaux flux de substances toxiques ne résultent pas d'accidents spectaculaires, mais d'activités de routine : industries, agriculture, occupations urbaines, consommations individuelles de produits divers. La majorité de ces substances (75 % de métaux) s'accumule dans les sédiments, notamment dans les deltas.

Cet exemple met bien en lumière le fait qu'une attention disproportionnée a été accordée ces dernières décennies aux sources de pollution ponctuelles et parfois spectaculaires. Mais les émissions de polluants provenant des entreprises

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 68

industrielles, du moins dans les pays de l' OCDE, ont considérablement diminué au cours des vingt dernières années, sous la pression des régulations étatiques et de l'utilisation de dispositifs de dépollution en fin de processus (*end of pipe*). Au point qu'aujourd'hui, la principale charge polluante provient souvent de sources diffuses, multiples, dispersées, qu'il est impossible de mesurer individuellement. Il faut alors adopter une approche apparue au cours des années quatre-vingt, actuellement en plein développement : le métabolisme industriel[38].

L'approche du métabolisme industriel trouve son fondement dans le principe de la conservation de la masse. La quantité de matière qui transite dans la Biosphère du fait des activités humaines reste constante. En effet, contrairement à la vision économiste standard, les matières ne disparaissent pas de la planète lorsqu'elles n'ont plus (ou pas) de prix ! À l'inverse, l'approche du métabolisme industriel cherche à refléter quantitativement et qualitativement la dimension proprement physique des activités économiques, à savoir les flux et les stocks de matière (et pas seulement d'énergie) qui forment le substrat de toute activité industrielle. La méthodologie du métabolisme industriel consiste donc à établir des bilans de masse, à estimer les flux et les stocks de matière, à retracer leurs itinéraires et leur dynamique complexes, mais également à préciser leur état physique et chimique.

La difficulté de l'étude de ces flux résulte notamment de la diversité des modalités d'émissions : les émissions ponctuelles,

38. Quelques références de base sur le métabolisme industriel: Robert U.Ayres and Leslie W.Ayres, *Industrial Ecology. Towards Closing the Materials Cycle*», Cheltenham (UK), Edward Elgar, 1996; Robert U. Ayres et Udo E. Simonis (éd.), *Industrial Metabolism. Restructuring for Sustainable Development*, Tokyo, New York, United Nations University Press, 1994; Peter Baccini et Paul Brunner, *Metabolism of the Anthroposphere*, Berlin, Springer Verlag, 1991; J. Yanowitz, «Industrial Metabolism, the Environment, and Application of Materials – Balance Principles for Selected Chemicals», Laxenburg, IIASA Research Report RR-89-11, octobre 1989.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 69

les émissions agrochimiques (engrais, pesticides, etc.), les émissions dissipatives durant l'usage d'un produit, et les émissions résultant de l'entreposage des produits en fin de vie (y compris la mise en décharge des filtres des dispositifs de dépollution *end of pipe*…). Ces polluants diffusent dans l'environnement par divers mécanismes : volatilisation, érosion éolienne, érosion pluviale, lessivage, infiltration. Pour corser l'affaire, leur comportement varie beaucoup selon les conditions climatiques et physicochimiques.

Il faut également prendre en compte les effets de synergie : par exemple, le taux de corrosion du zinc est fortement corrélé avec les concentrations de dioxyde de soufre (SO_2) dans l'air. On attribue ainsi aux importantes réductions des émissions de SO_2 la baisse de zinc dans la poussière urbaine dans le bassin du Rhin. En théorie, le métabolisme industriel ne se limite pas aux polluants, mais à tous les flux de matière circulant dans le système industriel, encore bien plus complexes. Enfin, les études de métabolisme industriel cherchent également à comprendre les interactions dynamiques se déroulant entre les flux de substances d'origine industrielle et les flux biogéochimiques naturels.

Il ne fait guère de doute que les études de métabolisme industriel vont se multiplier au cours des années à venir. En effet, aussi étonnant que cela puisse paraître, on ne dispose encore que d'une compréhension très limitée du fonctionnement de la société industrielle, du moins de son substrat biophysique. Pourtant, dans bien des cas, la plupart des données existent déjà dans les statistiques économiques, industrielles et toxicologiques : il s'agit de les intégrer pour reconstruire les méandres des circuits du métabolisme industriel.

Les études de métabolisme industriel peuvent prendre plusieurs formes :

– Il peut s'agir de suivre certains polluants dans des territoires délimités. Les bassins fluviaux constituent des zones particulièrement adaptées pour de telles études, pour des raisons

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 70

méthodologiques, mais aussi du fait des urgences. Ces territoires concentrent souvent de fortes implantations industrielles ainsi que des densités élevées de population. Après le Rhin et le Danube, les bassins du Gange, du Mékong et d'autres grands fleuves, notamment dans le sud de la Chine, mériteraient d'urgence d'être étudiés sous l'aspect du métabolisme industriel.

– Il peut s'agir d'étudier un groupe de substances, notamment certains métaux lourds. Ces derniers constituent une priorité du fait de leur toxicité potentielle ; de plus, il est relativement facile d'analyser les métaux présents dans l'environnement. Certaines substances organiques de synthèse, comme les PCB ou les dioxines, présentent des dangers équivalents ou supérieurs aux métaux lourds, mais il est en pratique beaucoup plus difficile de les suivre durant leurs transformations dans le système industriel, puis dans l'environnement.

– Les études de métabolisme industriel peuvent également se concentrer sur un seul élément, pour déterminer son comportement sous ses différentes formes et ses interactions avec les flux biogéochimiques naturels. Par exemple le métabolisme industriel du soufre, du carbone, etc.

– Les études de métabolisme industriel peuvent enfin s'intéresser aux différents flux de matière et d'énergie associés à tel ou tel produit, par exemple, le jus d'orange ou les «puces» électroniques.

Afin de donner une idée plus concrète de l'approche du métabolisme industriel, les pages qui suivent présentent des exemples de différents types d'études possibles : les métaux lourds dans le bassin du Rhin, le jus d'orange, les ménages d'une ville suisse de taille moyenne, les semi-conducteurs pour la micro-électronique, et enfin le métabolisme industriel du soufre et son impact sur les cycles biogéochimiques.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 71

Le cadmium dans le bassin du Rhin

Dans le delta du Rhin, les sédiments sont devenus si toxiques, du fait de la pollution chronique, que la vase draguée pour assurer la navigation ne peut plus être déversée sur les polders, par risque de contamination des eaux souterraines. Les autorités hollandaises ont dû recourir à une solution provisoire : un gigantesque bassin entouré d'une digue, construit à la sortie du port de Rotterdam, qui sert à stocker la vase draguée. Mais ce réservoir arrivera à saturation dans une dizaine d'années. Il faudra donc trouver une solution définitive, c'est-à-dire préventive.

Prévoyant l'ampleur du problème à venir, les Pays-Bas ont financé une vaste étude sur les origines et la nature de cette pollution diffuse qui s'accumule tout au long du cours du Rhin, dans l'espoir qu'une bonne compréhension de ce processus pourrait permettre de réduire le problème à la source. C'est ainsi que la première grande étude du métabolisme industriel des métaux lourds s'est terminée en 1993. Elle a été effectuée par William Stigliani et ses collègues à l'International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), près de Vienne. Un travail de même nature s'est achevé fin 1996, toujours à l'IIASA et sous la direction de Stefan Anderberg, pour la région du « Triangle noir», en Europe centrale, en bordure de la Pologne, de l'Allemagne et de la Tchéquie[39].

39. Sur les études de l'IIASA, F. Elgersma, S.Anderberg, and W. M.Stigliani, « Emission Factors for Aqueous Industrial Cadmium Discharges to the Rhine Basin. A Historical Reconstruction of the Period 1970-1988», Laxenburg, IIASA Research Report RR-94-1, 34 p., mars 1994 (ISBN: 3-7045-0124-7) ; William M. Stigliani, «The Integral River Basin Approach to Assess the Impact of Multiple Contamination Sources Exemplified by the River Rhine», *in* H. J. P. Eijsackers and T. Hamers (éd.), *Integrated Soil and Sediment Research: a Basis for Proper Protection*, Dordrecht, Kluwer, 1993; William M. Stigliani et Stefan Anderberg, «Industrial Metabolism at the Regional Level: The Rhine Basin», Laxenburg, IIASA Working Paper n° WP-92-10, janvier 1992; William M. Stigliani et Stefan Anderberg, «Industrial metabolism at the regional level: The Rhine Basin», *in* Robert U. Ayres and Udo

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 72

Les bassins fluviaux constituent une entité géographique idéale pour les études de métabolisme industriel, car en tenant compte des transports atmosphériques et des flux de la rivière, on peut parvenir à une bonne estimation des quantités de polluants qui s'accumulent dans différents réservoirs (sols agricoles, eaux souterraines, sédiments lacustres, décharges, etc.). L'étude de l'IIASA sur le bassin du Rhin porte sur sept substances: cadmium, plomb, zinc, azote, phosphore, lindane, et PCB. Voyons de plus près le cas du cadmium.

Ce métal lourd entre dans le système économique de manière involontaire, comme impureté sous forme de traces. Les sources les plus importantes sont les minerais de phosphate, de fer, le charbon et le pétrole lourd. Dans le cas du bassin du Rhin, le raffinage du zinc est l'une des sources les plus importantes.

Les résultats montrent que les flux polluants de cadmium dans le bassin du Rhin ont beaucoup diminué entre 1970 et 1988:

– En 1970, les émissions atmosphériques s'élevaient à 171 tonnes, contre 34 tonnes en 1988, un abaissement dû aux dispositifs de dépollution *end of pipe*.

– La quantité de cadmium dans les déchets solides est passée de 790 tonnes en 1970 à 382 tonnes en 1988 (y compris l'augmentation des déchets solides provenant des filtres atmosphériques).

– Dans les déchets industriels, le cadmium est passé de 129 tonnes en 1970 à 45 tonnes en 1988, principalement grâce aux efforts de recyclage consentis par les entreprises. L'immobilisation du cadmium, emprisonné dans des matériaux de

E. Simonis (éd.), *Industrial Metabolism. Restructuring for Sustainable Development*, Tokyo, New York, United Nations University Press, 1994, p. 119-162; William M. Stigliani et Peter R. Jaffe, «Industrial Metabolism and River Basin Studies: A New Approach for the Analysis of Chemical Pollution», Laxenburg, IIASA Research Report RR-93-6, 45 p., septembre 1993 (ISBN: 3-7045-0123-9); William M. Stigliani, Peter R. Jaffe, Stefan Anderberg, « Heavy Metal Pollution in the Rhine Basin », *Environmental Science and Technology*, vol. 27, n° 5, mai 1993, p. 786-793.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 73

construction, a également contribué à cette baisse: les cendres des centrales électriques à charbon, riches en cadmium, sont aujourd'hui systématiquement utilisées dans la fabrication du ciment.

– Le cadmium dans les déchets urbains solides a diminué de 667 tonnes en 1970 à 337 tonnes en 1988, principalement du fait d'une réduction de 50 % de l'usage du cadmium dans les produits de consommation.

– Les émissions de cadmium dans le Rhin (égouts, industrie) sont passées de 172 tonnes en 1970 à quatorze tonnes en 1988, une baisse due à des réglementations de plus en plus sévères.

Mais la seule comptabilité des quantités émises ne suffit pas. Il importe également d'estimer la «disponibilité maximale» du polluant. Ce paramètre, élaboré à partir de mesures expérimentales en laboratoire sur des échantillons de sol, sert à déterminer la mobilité maximale du polluant dans l'environnement sur une longue période de temps (30 à 50 ans), c'est-à-dire sa capacité à se retrouver dans les aquifères et les chaînes alimentaires.

Selon les estimations de Stigliani et ses collègues, la disponibilité de cadmium dans le bassin du Rhin en 1970 était de quatorze tonnes sur un total de 790 tonnes. En 1988, elle était de six tonnes sur un total de 382 tonnes.

Deux tendances se dégagent sur cette période de dix-huit ans:

a) Les émissions totales de cadmium dans le bassin du Rhin ont fortement diminué entre 1970 et 1988, du fait des réglementations de plus en plus strictes.

b) La proportion des sources diffuses par rapport à la charge aqueuse totale est passée de 17 % en 1970 à environ 52 % en 1988. Ceci provient du fait que les sources diffuses ne sont pas réellement contrôlées. La principale source de cadmium dans l'environnement du bassin du Rhin est aujourd'hui l'usage d'engrais phosphatés, responsable d'un apport de 36 tonnes par an sur les sols agricoles.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 74

Bannir le cadmium? Pas si simple…

Comme indiqué plus haut, le métabolisme industriel offre des outils précieux pour les acteurs politiques et administratifs (notamment les responsables du développement économique et de l'aménagement du territoire). Dans cette perspective, Stigliani et ses collègues ont évalué l'efficacité d'une interdiction du cadmium dans tous les produits, excepté les batteries au nickel-cadmium.

La production du cadmium résulte presque exclusivement du raffinage du zinc. La demande en cadmium dans le bassin du Rhin se monte à 1500 tonnes par an, dont près de la moitié, soit 600 tonnes, doit être importée. Ce cadmium est utilisé pour la fabrication de quatre produits de consommation : les pigments dans les plastiques, les batteries au Ni-Cd, les revêtements de surface pour l'acier et d'autres métaux, et comme agent stabilisateur dans le PVC. Avec une baisse massive de l'utilisation du cadmium suite à une interdiction, la raffinerie de zinc se retrouverait avec un gros surplus, de l'ordre de 425 tonnes par an. En effet, l'apport de cadmium dans le bassin du Rhin est inélastique: on produira du cadmium tant que l'on raffinera du zinc.

Que faire alors de ce cadmium? L'entreposer dans des conteneurs placés dans des décharges ne constitue pas une solution fiable. Le mieux serait de lui trouver un usage qui l'immobilise. Stigliani propose de l'utiliser comme stabilisateur dans le PVC de revêtement des fenêtres. Sous cette forme il se révèle très stable, du moins tant que les matériaux de construction sont enterrés ou recyclés.

On voit donc qu'il ne suffit pas simplement de bannir une substance de tel ou tel produit de consommation. La complexité du métabolisme industriel montre qu'il faut d'abord réfléchir à des *rescue pathways,* comme on dit en biochimie, c'est-à-dire à des circuits métaboliques de secours offrant en

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 75

l'occurrence un débouché au cadmium produit de toute manière. Ou alors il faut cesser de raffiner du zinc…

Rappelons que les huit métaux lourds toxiques (arsenic, argent, chrome, plomb, cadmium, zinc, mercure, cuivre) entrent tous dans le circuit économique par inadvertance, comme sous-produits inévitables d'autres activités minières. L'arsenic est un sous-produit des minerais de cuivre (on le trouve également dans les minerais de fer et les roches de phosphate). Le cadmium est un sous-produit du minerai de zinc. L'argent, un sous-produit des minerais de cuivre, de zinc et de plomb. Le zinc et le plomb sont eux-mêmes des contaminants de tous les autres minerais.

Or, on retrouve ces métaux toxiques dans de nombreux produits : l'arsenic, le cuivre, le chrome, le plomb et le mercure entrent dans la composition des pesticides, des fongicides et des bactéricides. Le plomb, le cadmium, le chrome et le zinc sont utilisés comme pigments. Le cadmium, le chrome et le zinc interviennent dans le revêtement des métaux. Le cadmium, le mercure, le zinc et l'argent sont tous utilisés dans les batteries électriques.

Cadmium et politique agricole

Nous venons de le voir, environ 36 tonnes de cadmium se déposent chaque année sur les terrains agricoles du bassin du Rhin par le biais des engrais phosphatés. Cette quantité est aujourd'hui trois fois supérieure au cadmium provenant d'émissions atmosphériques. La priorité devrait donc viser à réduire la contamination en cadmium des engrais phosphatés ou à diminuer l'usage de ces engrais.

Au cours des dernières décennies, surtout depuis 1950, plusieurs métaux lourds, dont le cadmium, se sont progressivement accumulés dans les sols, notamment dans les terrains agricoles. Stigliani et ses collègues avancent les chiffres suivants pour les

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 76

doses cumulées dans le bassin du Rhin : de 1950 à 1988, la quantité de cadmium accumulé aurait atteint 830 tonnes dans les zones urbaines non asphaltées, 4000 tonnes dans les terrains agricoles, et 1 500 tonnes dans les forêts.

Or, les sols agricoles ont un pH maintenu artificiellement élevé, par l'adjonction régulière de produits basiques. Ces conditions favorisent une stabilité des cations cadmium, absorbés à la surface de particules dans le sol. Mais si le pH devient plus acide, des quantités importantes de cadmium peuvent être libérées, puis absorbées par les cultures agricoles ou parvenir dans les eaux souterraines, un processus connu sous le nom de « bombes chimiques à retardement ».

Il se trouve que la Communauté européenne, dans le cadre de sa politique agricole commune, entend retourner à la friche d'importantes surfaces cultivées, de l'ordre de cent millions d'hectares d'ici une dizaine d'années. Mais à Bruxelles, personne ne semble avoir encore considéré sérieusement le danger d'une « bombe chimique » associé à cette option politique : le pH du sol agricole en friche va redevenir acide, ce qui pourrait entraîner un relâchement relativement rapide des métaux lourds qui s'y trouvent, avec un risque de polluer gravement les aquifères.

On voit également l'effet de l'accumulation des polluants: la mise en friche pose un problème aujourd'hui, alors qu'elle n'en aurait pas posé il y a cinquante ans, lorsque le sol renfermait beaucoup moins de substances telles que le cadmium. Le même concept vaut pour les écosystèmes humides que l'on assèche, ou les écosystèmes secs que l'on irrigue. Si les conditions de pH, de potentiel redox, changent, la capacité tampon du sol peut brusquement cesser, entraînant un comportement nouveau des polluants qui s'y sont accumulés.

Les études de métabolisme industriel ne présentent donc pas qu'un intérêt académique. Elles permettent également d'évaluer les avantages et les inconvénients liés à l'utilisation de

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 77

certaines technologies, et fournissent des éléments d'information cruciaux pour des décisions économiques et politiques.

Métabolisme industriel du jus d'orange

Les chercheurs de l'Institut Wuppertal ont effectué des études de métabolisme industriel sur plusieurs produits de consommation courants. Ils ont ainsi analysé le cas du jus d'orange, dont l'Allemagne est le plus gros consommateur mondial par habitant : 21 litres par personne et par an[40].

Chaque année, on produit dans le monde 55 millions de tonnes de jus d'orange, dont plus de 90 % sont consommés en Europe, au Japon et aux États-Unis. Plus de 80 % du jus d'orange bu en Europe proviennent du Brésil, principal producteur mondial. Ce jus d'orange effectue un voyage de 12000 km pour aller du Brésil (principalement de la région de São Paulo) en Allemagne. Pour le transport, le jus est concentré à 8 % de sa masse originale, puis congelé à – 18 degrés.

La fabrication du jus d'orange nécessite deux principaux inputs: l'eau et le pétrole. Le pétrole sert principalement à produire de la vapeur pour le procédé de concentration du jus : dans le cas du Brésil, la moitié de l'énergie provient de la bagasse, le reste est fourni par du combustible fossile, à raison de 8,1 kg de pétrole par tonne de jus concentré. En tout, y compris le transport et la congélation, chaque tonne de jus d'orange nécessite environ cent kilos de pétrole.

La consommation d'eau n'est également pas négligeable : pour chaque verre de jus d'orange consommé en Allemagne, il faut utiliser pas moins de 22 verres d'eau, principalement pour

40. S. Kranendonk et Stefan Bringezu, «Major material flows associated with orange juice consumption in Germany», *Fresenius Environmental Bulletin*, vol. 2, n° 8, août 1993, p. 455-460 (Wuppertal Institut, Döppersberg 19, D-5600 Wuppertal, Allemagne fédérale).

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 78

la vapeur durant la concentration, puis pour la dilution après l'arrivée en Allemagne.

La méthodologie de l'Institut Wuppertal étant encore en voie de maturation, ces chiffres ne tiennent pas compte de ce que Friedrich Schmidt-Bleek appelle les «rucksacks» (de l'allemand Rucksack, sac à dos) c'est-à-dire, en l'occurrence, l'énergie et les matières nécessaires à l'obtention du pétrole et de l'eau utilisés pour la fabrication du jus d'orange.

Par exemple, le raffinage d'un kilogramme de diesel nécessite entre 0,5 et vingt litres d'eau, qu'il conviendrait d'ajouter si l'on voulait effectuer une évaluation complète. Il faudrait également prendre en compte les matériaux et l'énergie utilisés pour la fabrication des pesticides, de même que pour les innombrables emballages, souvent de très faible capacité dans le cas du jus d'orange (portions individuelles servies dans les avions, les trains, etc.), qui génèrent de grands volumes de déchets.

Les flux de matière associés à la production et à la distribution du jus d'orange au Brésil sont donc loin d'être négligeables. Mais ces flux sont encore bien supérieurs aux États-Unis : en moyenne, un litre de jus d'orange américain nécessite 1 000 litres d'eau d'irrigation et deux litres de pétrole. Cette différence s'explique en partie par le fait que les pompes pour l'irrigation (pas nécessaire au Brésil) consomment du diesel, de même que les systèmes de chauffage pour protéger les orangeraies en Floride des gels printaniers.

En tout, pour l'Allemagne, on aboutit à un chiffre de 25 kg de matière pour la fabrication d'un seul litre de jus d'orange (sans inclure les «rucksacks»). On peut envisager deux options pour rendre cette activité industrielle plus « écocompatible » : les producteurs peuvent tenter de diminuer les 25 kg de matière, notamment en modifiant leurs pratiques agricoles et en rendant le processus de concentration plus efficace. L'autre option, peu vraisemblable, supposerait une baisse de la consommation de jus d'orange…

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 79

Les flux de matière ne constituent pas le seul critère d'efficacité écologique: les surfaces agricoles utilisées représentent également un facteur important, car elles sont à l'évidence limitées. Aujourd'hui, si le sol était réparti équitablement entre tous les habitants de la planète, chaque être humain aurait à sa disposition 0,28 hectare de terre arable. En réalité, les pays industrialisés en utilisent beaucoup plus : la Hollande, par exemple, mobilise sept à huit fois plus de terre agricole à l'étranger que sur son propre territoire pour couvrir ses besoins alimentaires.

Dans le cas des Allemands, il faut environ 24 m^2 de terrain pour produire les 21 litres de jus d'orange que chacun boit annuellement. Autrement dit, la consommation totale annuelle de jus d'orange en Allemagne nécessite une surface de 150000 hectares au Brésil, soit trois fois plus que la surface consacrée aux cultures fruitières en Allemagne (48000 hectares). Si tous les habitants de la planète consommaient autant de jus d'orange que les Allemands, il faudrait consacrer 130000 km^2 aux orangeraies, soit plus de trois fois la superficie totale d'un petit pays comme la Suisse.

Ce raisonnement en termes de surfaces agricoles nécessaires pour satisfaire le style de vie consumériste constitue un thème de recherches qui suscite un intérêt croissant. Toutes les études de bassin d'approvisionnement (essentiellement pour des zones urbaines) visent à établir le bilan des ressources non seulement en matière, mais aussi en surfaces agricoles, forestières, etc., dont une région donnée a besoin pour maintenir son train de vie. William Rees et ses collègues de l'Université de Colombie britannique à Vancouver arrivent ainsi à la conclusion que si tous les habitants de la planète avaient la même « empreinte écologique » (*ecological footprint*), c'est-à-dire un mode de vie identique à celui en vigueur dans les pays industrialisés, il

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 80

faudrait une surface totale équivalant à deux planètes Terre supplémentaires[41].

Dans le prolongement du concept d'empreinte écologique, une équipe de l'université technique de Graz développe le concept d'«îles de développement durable» (*islands of sustainability*). Il ne s'agit évidemment pas de bannir le commerce transrégional ou international au profit d'un isolationnisme radical. L'objectif consiste à tenter d'intensifier autant que possible les interactions entre les agents économiques « proches » (locaux et régionaux) ; dans le même temps, on s'efforce à ce que les flux de matière et d'énergie importés dans une région proviennent d'un surplus net (si possible renouvelable) de l'écosystème de la région exportatrice, et non d'un prélèvement consistant à entamer son capital en ressources naturelles (sols, forêts, eaux, etc.). Concrètement, l'équipe de l'université de Graz tente actuellement de susciter l'émergence de tels écosystèmes industriels régionaux dans la province de Styrie, près de Graz[42].

Dans le cadre de ces réflexions sur les « empreintes écologiques » et les « îles de développement durable », l'apport de l'écologie industrielle réside dans une vision renouvelée des

41. William E. Rees et Mathis Wackernagel, «Ecological Footprints and Appropriated Carrying Capacity : Measuring the Natural Capital Requirements of the Human Economy», in A. M. Jansson, M. Hammer, C.Folke, and R. Costanza (éd.), Investing in Natural Capital: The Ecological Economics Approach to Sustainability, Washington, DC, *Island Press*, 1994, p. 363-390; Mathis Wackernagel et William Rees, *Our Ecological Footprint. Reducing Human Impact on the Earth* », Philadelphia, PA, *New Society Publishers*, 1996.

42. Heinz Peter Wallner et Michael Narodoslawsky, «Evolution of Regional Socio-Economic Systems Towards ëIslands of Sustainability (IOS) » », *Journal of Environmental Systems*, vol. 24, n°3, p.221-240, 1995; Heinz Peter Wallner et Michael Narodoslawsky, «The Concept of Sustainable Islands – Cleaner Production, Industrial Ecology, and the network paradigm as preconditions for regional sustainable development», *Journal of Cleaner Production*, vol. 2, n° 3-4, p. 167-171, 1995.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 81

activités économiques pleinement intégrées aux flux de matière et d'énergie des écosystèmes régionaux (gestion du territoire) et de la Biosphère.

Métabolisme des ménages urbains

Une approche un peu différente de celle des chercheurs de l'Institut Wuppertal (et qui lui est également antérieure) est illustrée par l'étude menée à St-Gall, dans le cadre du Programme national suisse de recherche « Ville et transport ». Ce travail s'inscrit dans une approche ancienne qui connaît un renouvellement et un regain d'intérêt: le métabolisme urbain. Le projet Metapolis (Métabolisme de la cité) a été réalisé par des chercheurs de l'Institut fédéral pour l'aménagement, l'épuration et la protection des eaux (EAWAG) et de l'École polytechnique fédérale de Zurich (ETHZ). Avec une densité d'occupation de deux personnes par ménage, St-Gall se positionne très près de la moyenne Suisse, et cette ville de 70000 habitants répartis en 35 000 ménages constitue donc un cas représentatif.

Le projet Metapolis visait à comprendre la circulation des flux de matière dans une ville en étudiant les ménages privés, considérés comme les éléments de base du métabolisme urbain. Les chercheurs ont déterminé les flux de matière à l'échelle des constituants chimiques élémentaires (phosphore, carbone, chlore, etc.).

Les flux d'approvisionnement ont été établis en intégrant des statistiques économiques, notamment des données provenant d'études de marché. Les flux de désapprovisionnement (en d'autres termes, les déchets) ont été calculés sur la base de statistiques municipales ainsi qu'à l'aide de campagnes de mesures à l'usine d'incinération des ordures ménagères et aux stations d'épuration des eaux. C'est la première fois qu'une étude de cette nature combinait les données d'études de marché et les

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 82

statistiques urbaines. L'étude a été menée en 1990. Il a fallu plus de deux ans pour analyser les résultats, qui ont été publiés à l'été 1993[43].

La méthode de l'analyse des flux de matière portait sur huit substances chimiques indicatrices: carbone, soufre, phosphore, chlore, aluminium, fer, cuivre et zinc. Le phosphore, par exemple, qui se concentre dans les boues des stations d'épuration, est un bon indicateur des flux de denrées alimentaires. Le flux de chlore constaté à l'usine d'incinération indique la présence de matières plastiques (PVC). Les flux de matière ont été ventilés selon quatre grands types d'activité des habitants : « nourriture», «nettoyage», «habitation», «transport et communication ».

L'étude Metapolis aboutit aux principaux résultats suivants :

– Les ménages saint-gallois consomment environ 100 tonnes de matière par habitant et par an, soit 270 kg par jour, dont environ 80 % d'eau et près de 20 % d'air.

– Les biens de consommation à courte durée de vie et les agents énergétiques (produits pétroliers principalement) atteignent chacun environ 1 %, soit deux tonnes par habitant et par an.

43. Sur l'étude Metapolis, voir Peter Baccini, Hans Daxbeck, Emmanuel Glenck, Georg Henseler, *Metapolis. Güterumsatz und Stoffwechselprozesse in den Privathaushalten einer Stadt* », Bericht 34A des Nationales Forschungsprogramm NFP25 «Stadt und Verkehr», 164 p., Zürich, 1993 ; Peter Baccini, Hans Daxbeck, Emmanuel Glenck, Georg Henseler, *Metapolis. Güterumsatz und Stoffwechselprozesse in den Privathaushalten einer Stadt*, Technischer Anhang, Bericht 34B des Nationales Forschungsprogramm NFP25 «Stadt und Verkehr», 321 p., Zürich, 1993; Paul H. Brunner et Peter Baccini, «Regional Material Management and Environmental Protection», *Waste Management and Research*, vol. 10, 1992, p. 203-212; Paul H. Brunner, Hans Daxbeck et Peter Baccini, «Industrial Metabolism at the regional and local level: A case study on a Swiss region», in Robert U. Ayres and Udo E. Simonis (éd.), *Industrial Metabolism. Restructuring for Sustainable Development*, Tokyo, New York, xI, 1994, p. 163-193.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 83

– Les biens à longue durée de vie (automobiles, meubles, équipements ménagers) représentent 0,1 % (un pour mille), soit 100 kg par habitant et par an.

– Le stock de biens mobiles (à l'exception des agents énergétiques fossiles) s'élève à près d'une tonne par habitant, et sa croissance annuelle est de 2 %. L'automobile y occupe la première place, avec une masse de 400 kg par habitant, soit près de 50 % du stock des biens mobiles.

Pour des raisons de temps et de moyens, l'étude Metapolis n'a pas pu prendre en compte les biens appartenant à l'immobilier (bâtiments, routes, etc.). Cette lacune importante mériterait d'être comblée, car les quantités de matière immobilisée dans les habitations, ainsi que dans les infrastructures routières et urbaines, sont phénoménales.

La contribution de l'industrie et de l'économie aux flux de matière s'élève à 30 tonnes par habitant et par an, soit nettement moins que les 100 t/hab./an des ménages. Toutefois, pour l'ensemble de St-Gall, le flux total atteint 270 t/hab./an. Ce doublement provient à 95 % des pluies et des eaux de ruissellement qui pénètrent dans le réseau des canalisations. Les 5 % restant résultent de l'air consommé par l'incinérateur, qui brûle en partie des déchets amenés de l'extérieur de la ville. Le flux sortant le plus important est l'eau épurée, à raison de 230 t/hab./an, suivie par l'air vicié.

Les chiffres fournis par l'étude de St-Gall paraissent élevés, car ils prennent en compte la consommation d'eau et d'air. En ne tenant compte que des flux de matière solide, on trouve des estimations moins élevées: Jesse Ausubel et Iddo Wernick, par exemple, arrivent au chiffre de 50 tonnes par habitant et par an pour les États-Unis, ce qui reste considérable[44].

44. Iddo K. Wernick et Jesse H. Ausubel, «National Materials Flows and the Environment», *Annual Review of Energy and Environment*, vol. 20, 1995, p.463-492; Iddo K. Wernick et Jesse H.Ausubel, «National Material Metrics for Industrial Ecology», *Resources Policy*, vol. 21, n° 3, 1995, p. 189-198.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 84

Ces résultats conduisent les auteurs de l'étude Metapolis aux constats suivants :

1. Les villes typiques des pays industrialisés, comme St-Gall, ne possèdent pas de boucles de rétroaction pour les biens consommés. La ville se présente alors comme un système fonctionnant sur le mode d'un « réacteur piston » ou « réacteur à flux continu ».

Autrement dit, les flux de matière ne se trouvent pas, du moins pas encore, dans un état stationnaire. Il en résulte que ces habitants nécessitent de grands réservoirs urbains: ils tirent leur approvisionnement d'une région géographique très étendue et ont également besoin d'une vaste région pour la gestion de leurs déchets. Il faut noter que la croissance de ce type de réservoirs urbains durant les vingt dernières années résulte d'une augmentation des flux d'approvisionnement par habitant, et non d'une croissance démographique.

2. Du point de vue de l'impact sur l'environnement, les produits consommés les plus importants par le métabolisme des ménages urbains sont les agents énergétiques, liés aux activités « habitation» et «transport et communication.» Les auteurs de l'étude en tirent des conclusions catégoriques : la principale cause de consommation des ressources pour les activités de transport et de communication, à savoir l'automobile, «requiert de nouvelles conditions-cadres de type énergétique et structurel. Sans ces mesures, tout autre effort entrepris s'avère superficiel. Une exploitation écologique des ressources doit donc conduire à de véritables transformations structurelles du système urbain et de ses connections avec son environnement ».

En clair, il faut restructurer l'espace et les activités urbaines de manière à minimiser les déplacements en voiture, il faut rapprocher les centres d'approvisionnement des centres de désapprovisionnement, il faut une recirculation plus intensive des ressources dans un espace plus restreint. «De tels changements requièrent de nouvelles stratégies de remaniement des systèmes urbains, ceci sur le plan physique, économique et

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 85

social, et sur une période portant sur plusieurs décennies», affirment les auteurs.

3. La plupart des autres ressources importantes (métaux et matières plastiques) font déjà l'objet d'une collecte séparée ou d'un tri en vue du recyclage. Mais le recyclage ne constitue pas une solution miracle ni une fin en soi, estiment les auteurs de l'étude, rappelant que l'on connaît encore très mal les impacts économiques et écologiques du recyclage. Autrement dit, il faudrait étudier les processus de recyclage avant d'intensifier le triage des déchets au sein des ménages.

Cette affirmation peut surprendre, car elle va à l'encontre de tout un discours écologiste militant qui promeut systématiquement le recyclage et la responsabilisation individuelle par le tri personnel de ses déchets. L'équipe zurichoise prend le contrepied de cette position et affirme carrément que «les démarches politiques amorcées actuellement dans ce domaine s'expliquent par le fait que l'individu ne perçoit principalement que le flux des biens consommés à courte durée de vie».

Effectivement, autant il semble aisé de culpabiliser le consommateur sur les emballages alimentaires, autant il semble difficile de faire comprendre que l'usage de leur voiture consomme de l'air en grande quantité. Quant aux responsables politiques, ils savent bien qu'un brin de démagogie sur le recyclage des bouteilles et des barquettes d'aluminium peut contribuer à leur donner une image verte sans les mettre en danger, alors que s'ils s'en prenaient à la voiture…

4. Le réseau d'égouts urbains joue un rôle satisfaisant du point de vue de l'hygiène, de la sécurité sanitaire et de la protection des eaux. Mais pour l'environnement en général, ce système se révèle insuffisant. La collecte des eaux usées puis leur traitement ne constituent un processus de concentration chimique efficace que pour le phosphore. Les autres substances se retrouvent dans les boues d'épuration, puis tôt ou tard dans le sol ou dans l'atmosphère. Selon les auteurs, il est «impossible d'améliorer la qualité des boues d'épuration et de l'eau épurée

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 86

sans modifier la structure de l'habitat (approvisionnement et désapprovisionnement, techniques de construction et technologie domestique) ».

Comme pour la recherche de l'IIASA sur le métabolisme du cadmium dans le bassin du Rhin, on voit que l'étude du métabolisme urbain des ménages de St-Gall, outre son intérêt scientifique propre, aboutit à des recommandations de politique publique qui vont à l'encontre de certaines idées reçues. Il faut donc souhaiter que l'approche du métabolisme urbain et industriel prenne de l'ampleur, et surtout que les responsables politiques et économiques aient le courage et les moyens de tenir compte des conclusions pratiques auxquelles ces études aboutissent.

La pollution électronique

L'industrie électronique, systématiquement présentée comme l'industrie «propre» par excellence, incarne la société «postindustrielle», une civilisation de l'immatériel où ne circuleraient que d'évanescents flux d'informations… Or, la première étude de métabolisme industriel des semi-conducteurs, récemment effectuée par des collaborateurs de Robert Ayres, fait apparaître une tout autre réalité. La raison en est très simple: le silicium utilisé pour fabriquer les «puces» électroniques doit être extrêmement pur. Le long processus de purification, à partir du sable de quartz, se traduit par un énorme gaspillage de matière première et nécessite l'usage de grandes quantités de produits chimiques toxiques[45].

On part du silicium de qualité métallurgique (MGS = Metal Grade Silicon), un sous-produit de la sidérurgie. En 1990, la

45. Paolo Frankl, Howard Lee et Nichole Wolfgang, «Electronic grade silicon (EGS) for semiconductors», in Robert U. Ayres et Leslie W. Ayres, *Industrial Ecology, Towards Closing the Materials Cycle*, Edward Elgar, 1996, p. 180-204.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 87

production mondiale de MGS atteignait environ 800 000 tonnes, dont seulement 32 000 tonnes (soit 4 %) se trouvent converties en silicium ultra pur de qualité électronique (EGS = Electronic Grade Silicon). De plus, compte tenu des ultimes étapes de purification et des importants déchets de fabrication, seule une petite partie des 32000 tonnes de silicium de qualité électronique se trouve incorporée dans des produits utiles : 3 200 tonnes par an dans des cellules photovoltaïques (soit 10 % de l'EGS, ou 0,4 % des 800 000 tonnes de MGS de départ), et seulement 750 tonnes par an dans des microprocesseurs (puces électroniques).

Pour obtenir ce résultat, il aura fallu utiliser plus de cent mille tonnes de chlore, et quelque deux cent mille tonnes d'acides et solvants divers. Or, la récupération, le traitement et le recyclage de ces trois cent mille tonnes de produits chimiques est encore rare. Très souvent, on les injecte directement dans le sous-sol, ce qui a occasionné plusieurs pollutions graves de l'eau souterraine dans la Silicon Valley par exemple.

L'étude du métabolisme industriel met donc en lumière non seulement un gaspillage considérable de matière première (le silicium de qualité métallurgique, puis électronique), mais aussi une consommation très importante de produits chimiques dangereux, utilisés généralement de manière dissipative avec des conséquences souvent graves pour l'environnement et la santé. À l'échelle globale, l'industrie électronique n'est pourtant pas considérée comme un pollueur important, car, en chiffres absolus, les quantités de matière en jeu restent très faibles par rapport aux autres secteurs d'activités (mines, chimie, pétrole, etc.). Mais, en réalité, l'industrie électronique est la plus polluante qui soit (avec l'industrie pharmaceutique), si l'on considère la quantité de polluants générés par unité de produit final.

Toutefois, si la production de silicium ultra pur devait augmenter fortement, l'industrie électronique deviendrait un pollueur de première importance. C'est précisément ce qui pourrait se passer si l'électricité photovoltaïque devait se développer de

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 88

façon significative. Selon une estimation du département de l'énergie américain, la puissance installée à l'échelle mondiale pourrait passer de 50 megawatts/an aujourd'hui à 100 gigawatts/an, autrement dit être multipliée par un facteur deux mille d'ici à la période 2020-2030. Avec les méthodes de fabrication actuelles, les conséquences environnementales, de même que le gaspillage de matière première et de produits chimiques, deviendraient difficilement tolérables.

Cette première étude du métabolisme industriel des semiconducteurs conclut logiquement à l'urgence de mettre au point de nouvelles méthodes de fabrication des cellules photovoltaïques, plus efficaces et moins polluantes. Les milieux écologistes militants, partisans candides d'un développement idyllique de l'électricité solaire, auraient ainsi tout à gagner à intégrer la perspective du métabolisme industriel, afin de se prémunir contre certaines illusions résultant d'une vision simpliste du fonctionnement du système industriel.

Métabolisme industriel du soufre

Les études de métabolisme industriel peuvent également se concentrer sur un élément chimique, comme le soufre, et tenter d'évaluer l'impact de ses flux et stocks anthropogéniques sur la Biosphère. Les grands cycles biogéochimiques, en particulier les cycles des éléments vitaux comme le carbone, l'azote, le phosphore, se voient de plus en plus perturbés par les émissions d'origine humaine, notamment par l'introduction dans les cycles naturels de volumes croissants de matière extraite de stocks fossiles. Le soufre constitue un exemple intéressant. On pense que le flux de soufre sur les terres émergées a plus que quadruplé depuis le début de l'industrialisation. En ce qui concerne le soufre dans les eaux courantes, ce flux aurait doublé.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 89

Dans le système industriel, le soufre est principalement utilisé sous forme d'acide sulfurique. À l'échelle mondiale, l'acide sulfurique représentait même, jusqu'à récemment, le principal produit chimique en volume, avant que l'ammoniaque ne lui dérobe cette première place. Au point que l'on appelait l'acide sulfurique le «baromètre de l'activité industrielle», en vertu de ses très nombreuses utilisations dans divers secteurs de l'industrie. La production mondiale d'acide sulfurique s'élève actuellement à environ 160 millions de tonnes par an.

On utilise quatre sources principales de soufre: le soufre natif dans différentes formations géologiques, notamment les dépôts volcaniques; sous forme de sulfure d'hydrogène dans le gaz naturel; les gaz de raffinerie et de processus industriels divers; les sulfures métalliques. On trouve également du soufre dans les combustibles minéraux (surtout le charbon) et dans certains minerais (cuivre, nickel, plomb, zinc).

L'étude du métabolisme industriel du soufre reste encore largement inachevée. Sa complexité provient du grand nombre de processus dans lesquels il joue un rôle. De plus, la majeure partie de ce soufre intervient dans les procédés de fabrication, mais ne se trouve pas incorporé dans les produits finaux. Or, il n'existe que deux possibilités: soit le soufre est recyclé, soit il finit comme déchet.

Une étude effectuée par Robert Ayres attire l'attention sur un élément préoccupant[46]. On s'est beaucoup soucié des sources de soufre atmosphérique à cause des pluies acides. Mais on ne sait pas grand-chose sur les déchets de soufre industriel dans l'eau ou en surface, ainsi que dans le sol. C'est un bon exemple de l'insuffisance de l'approche compartimentée: les normes sont établies selon le milieu (air, eau, sol), de sorte que le soufre extrait des effluents gazeux, pour respecter les normes de qualité de l'air, se retrouve simplement stocké à terre.

46. Robert U. Ayres et Vicki Norberg-Bohm, «Industrial Metabolism of Sulfur», INSEAD, Center for the Management of Environmental Resources, Working Paper n° 93/23/EPS, 36 p., 1993.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 90

On observe une situation semblable pour les huiles de chauffage légères, à faible teneur en soufre. Le soufre contenu dans le pétrole ne s'est pas volatilisé, il est simplement déplacé. Au lieu de polluer l'atmosphère lors de sa combustion dans les chaudières, il est extrait durant le raffinage, de sorte que les raffineries se retrouvent avec des stocks grandissants d'acide sulfurique. Ces stocks, qui cherchent à s'écouler sur le marché, entrent ainsi en compétition avec le développement du recyclage de l'acide sulfurique.

La majeure partie de l'acide sulfurique qui n'est pas recyclée ou dissipée dans l'atmosphère est finalement convertie en sulfate ou en sulfite de calcium. La désulfuration des gaz de combustion génère également de grandes quantités de ces déchets soufrés, qui posent trois problèmes potentiels :

– L'entreposage en lui-même: les boues soufrées se trouvent sous des formes souvent difficiles à faire sécher. Ces matériaux stockés en surface rendent le site inutilisable pour d'autres usages durant des périodes illimitées.

– Il existe un risque de mobilisation de ce soufre dans l'environnement, provoquant des dommages secondaires. La mobilisation se fait par des fuites, des écoulements, qui peuvent contenir de fortes concentrations de sulfates, de chlorures, etc. De plus, dans le cas des déchets de combustion, les écoulements peuvent contenir des traces de métaux lourds.

– Le troisième problème, peut-être le plus sérieux, concerne le devenir de fortes concentrations de sulfates dans des milieux anaérobies riches en matière organique. En l'absence d'oxygène, des bactéries peuvent extraire l'oxygène des sulfates pour leur propre métabolisme, dégageant ainsi du sulfure d'hydrogène toxique.

On a donc des raisons de s'inquiéter des conséquences à long terme de l'accumulation de déchets de sulfates solides ou liquides, tendance encouragée par la législation environnementale imposant de réduire les émissions atmosphériques de soufre.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 91

Car les déchets soufrés d'origine humaine vont de plus en plus s'accumuler sur terre et dans les eaux.

La recherche se poursuit pour trouver des débouchés pour les déchets de sulfates provenant des installations de désulfuration de gaz. Une possibilité semble se dessiner dans l'industrie du ciment. La seule autre possibilité réside dans le recyclage accru du soufre. Naturellement, on pourrait également extraire moins de soufre, ou encore on pourrait utiliser celui récupéré lors du traitement des combustibles fossiles et des minerais non ferreux.

L'importance des translocations

Les études de métabolisme industriel concernent généralement des flux de matière ayant une valeur économique directe. Mais cette approche ne tient pas compte du fait que l'extraction de minerais, de combustibles fossiles, la construction de routes, etc., nécessitent souvent de gigantesques déplacements de terre et d'eau, ce que l'on nomme les «translocations». Or, ces matériaux n'entrent à aucun moment dans le circuit économique et ne se voient jamais attribués une quelconque valeur. Les translocations ne retiennent généralement guère l'attention, à l'exception de quelques rares recherches, comme celles menées par Friedrich Schmidt-Bleek et ses collaborateurs du département « Flux de matière et écorestructuration » de l'Institut Wuppertal.

A priori, ces translocations ne menacent pas directement et gravement les écosystèmes. Néanmoins, elles ont des impacts environnementaux (et esthétiques) certains: érosion due à des excavations, déversement d'eaux polluées des exploitations minières, déplacements de terre pour les routes, barrages et constructions diverses, écoulements d'eau sur des surfaces asphaltées ou bétonnées, rivières au cours déplacé, etc. Par exemple, l'extraction massive et en profondeur de charbon dans la Ruhr a provoqué des dépressions en surface d'une vingtaine

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 92

de mètres de profondeur, ce qui oblige aujourd'hui à pomper en permanence des eaux de surface pour éviter l'inondation de 75 000 hectares.

Dans le cas des activités minières, qui représentent (avec les combustibles fossiles) la source première de toute activité industrielle, il importe de souligner que les masses de matière et d'eau déplacées sont bien supérieures aux matières premières proprement dites. Ces matières premières elles-mêmes, le minerai brut, représentent souvent une masse énorme par rapport à la teneur en minerai recherché. Les étapes de concentration et de purification du minerai, à leur tour, génèrent d'importantes quantités de déchets, parfois toxiques selon le procédé d'extraction utilisé.

Par exemple, les minerais de cuivre exploités aux États-Unis ont une teneur moyenne inférieure à 0,4 %, de sorte que, pour une tonne de cuivre raffiné, il faut avoir traité 250 tonnes de minerai. Dans le cas de métaux rares, comme ceux du groupe du platine, pour en obtenir une tonne, il faut extraire et traiter plus de cent mille tonnes de minerai. De plus, la quantité de ces déchets augmente au fur et à mesure que l'on exploite des filons de moins en moins riches: plus la teneur en minerai diminue, plus le volume des déchets et des translocations augmente, de même que l'énergie nécessaire pour les bouger et les traiter[47].

La perturbation des cycles biogéochimiques

Il n'y a peut-être pas de raison de s'inquiéter outre mesure de la perturbation du cycle du soufre en soi, ni de celle des autres cycles biogéochimiques. Du reste, et c'est l'une des grandes inconnues concernant les changements environnementaux globaux, on ignore quelles sont l'amplitude et la rapidité des

47. Stefan Bringezu, «Where does the cradle really stand? System boundaries for ecobalancing procedures could be harmonized», *Fresenius Environmental Bulletin*, vol. 2, n° 8, août 1993, p. 419-424.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 93

perturbations des cycles biogéochimiques que le système Terre peut tolérer sous sa forme actuelle. Mais il semble raisonnable de penser que les conséquences de telles perturbations ne sont jamais tout à fait bénignes. Par exemple, l'oxydation de grandes quantités de soufre va continuer à acidifier les sols et les océans, ce qui peut entraîner des transformations importantes pour la Biosphère.

Le même genre d'étude pour les autres grands cycles biogéochimiques conduit à des conclusions semblables : les cycles de l'azote, du phosphore et du carbone sont perturbés par les émissions humaines, qui atteignent des proportions significatives par rapport aux flux naturels. Dans le cas de très nombreuses substances, on observe même que leur métabolisme industriel dépasse de loin l'ampleur des flux naturels : les émissions humaines de plomb sont 300 fois supérieures aux quantités naturelles, 38 fois supérieures dans le cas de l'antimoine, 23 fois pour le zinc, 20 fois pour le cadmium, 14 fois pour le cuivre, etc.

Dans ce contexte, il serait naturellement très utile de disposer d'une méthode d'évaluation de l'activité économique permettant de mesurer l'impact de l'homme sur les cycles biogéochimiques et la Biosphère. Dans les années soixante-dix, de nombreux auteurs ont exploré la possibilité d'utiliser comme indicateur la consommation d'énergie libre. Cette approche a connu un certain engouement et des développements très sophistiqués. Toutefois, on peut estimer qu'elle reste insuffisante, notamment par le fait qu'elle ne fournit aucune indication sur les flux de matière.

Friedrich Schmidt-Bleek et Robert Ayres ont proposé de prendre comme indicateur l'entropie des processus liés aux activités humaines. La grandeur mesurée serait l'entropie totale créée par un processus. Cette méthode, encore au stade embryonnaire, présenterait l'avantage de rendre compte aussi bien de l'usage dissipatif des matériaux que de la consommation d'énergie. Si elle se développe, elle pourrait présenter une

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 94

utilité très concrète: en comparant deux processus équivalents du point de vue économique, on choisirait celui qui génère le moins d'entropie[48].

L'approche du métabolisme industriel conduit ainsi à aborder le problème central de la substituabilité. Les économistes ont tendance à considérer que la technologie et le marché parviennent toujours à trouver un substitut à l'épuisement des ressources et à la dégradation de l'environnement : lorsque le pétrole aura disparu, une autre forme d'énergie prendra le relais, la culture hydroponique se substituera aux sols, les banques de gènes à la biodiversité, etc. Or, le métabolisme industriel conduit à la conclusion que certains «services environnementaux» essentiels, c'est-à-dire ceux qui permettent le maintien de la vie sur Terre, ne sont pas substituables : notamment le climat global, les grands cycles biogéochimiques, le cycle hydrologique, les sols, la biodiversité.

La Terre n'est pas un simple amas d'éléments chimiques, un milieu inerte auquel la vie se serait simplement adaptée. La Terre, ou plus exactement la Biosphère de la Terre, est un système auto-organisé, dynamique, qui se maintient dans un état relativement stable sur des millions d'années, mais très éloigné de l'équilibre thermodynamique. Ce système se perpétue grâce au flux d'énergie libre provenant du soleil. Si l'on considère les

48. Robert U. Ayres et Vicki Norberg-Bohm, «Industrial Metabolism of Nitrogen», INSEAD, Center for the Management of Environmental Resources, Fontainebleau, Working Paper n° 93/11/EPS/TM, 25 p., 1993 ; Robert U. Ayres, «Industrial Metabolism and the Grand Nutrient Cycles», INSEAD, Center for the Management of Environmental Resources, Fontainebleau, Working Paper n° 92/64/EP, 24 p., octobre 1992; Robert U. Ayres et Katalin Martinas, «Waste Potential Entropy: The Ultimate Ecotoxic», INSEAD, Center for the Management of Environmental Resources, Fontainebleau, Working Paper n° 94/05/EPS, Part 2, 20 p., janvier 1994; Robert U. Ayres et Friedrich B. Schmidt-Bleek, «Toward a Universal Measure of Environmental Disturbance», INSEAD, Center for the Management of Environmental Resources, Fontainebleau, Working Paper n° 93/36/EPS, 16 p., mai 1993.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 95

planètes semblables à la Terre, comme Mars, Vénus et Mercure, on constate que les conditions qui y règnent ne sont pas favorables à la vie. À l'inverse, l'atmosphère de la Terre, très réactive car riche en oxygène notamment, constitue une aberration du point de vue de l'équilibre physicochimique. La raison de la composition tout à fait particulière de l'atmosphère terrestre réside dans l'existence même de la Biosphère, c'est-à-dire dans l'évolution de la vie, qui a pu maintenir, par des mécanismes très subtils (encore largement incompris, voire inconnus), les conditions nécessaires à son développement.

Dans la perspective du métabolisme industriel, le principal danger à long terme réside ainsi dans la perturbation des grands cycles de la Biosphère, et non pas dans l'épuisement des ressources naturelles ou les désagréments de la pollution. Cette perturbation pourrait finir par pousser la Terre dans un autre état thermodynamique, toujours éloigné de l'équilibre thermodynamique mais plus stable, qui n'offrirait plus les conditions nécessaires à l'existence des organismes supérieurs. On pourrait même imaginer que la Terre atteigne un jour un état d'équilibre thermodynamique, ce qui impliquerait la disparition de la vie.

Une gestion optimale des ressources

En résumé, on peut dire que l'approche du métabolisme industriel présente trois intérêts principaux :

1. Il offre une compréhension globale du fonctionnement du système industriel. De ce fait, il permet d'identifier les vrais problèmes et de fixer les priorités.

Le métabolisme industriel ne se contente pas d'établir des bilans de matière. Il donne des indications sur les états physiques et chimiques des substances toxiques présentes dans l'environnement. Ces informations se révèlent cruciales pour évaluer les risques potentiels et établir les stratégies de contrôle adéquates. En effet, un produit chimique toxique peut présenter

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 96

un risque très différent selon qu'il se trouve sous une forme mobile, susceptible d'entrer dans les chaînes alimentaires (biodisponibilité), ou sous une forme immobilisée.

Par exemple, rien ne sert de déployer de grands efforts pour éliminer le cadmium dans le PVC utilisé pour les cadres de fenêtres. Conditionné de la sorte, le cadmium reste emprisonné de manière très stable dans le PVC (sauf en cas d'incinération), même lors du stockage de ces fenêtres après démolition. En revanche, la priorité devrait porter sur le recyclage poussé des batteries au nickel-cadmium, qui relâchent ces métaux lourds dans les conditions hautement corrosives des décharges.

2. Il permet d'élaborer des politiques pour contrôler et prévenir les pollutions diffuses.

Comme nous l'avons vu à propos des métaux lourds dans le bassin du Rhin, les pays industrialisés sont entrés dans une phase nouvelle en ce qui concerne les sources de pollution, de plus en plus diffuses. Les émissions résultant du stockage final des produits de consommation, des eaux usées, de la corrosion dans les grands centres urbains, des eaux de ruissellement (surtout durant les crues d'orages), des sols urbains et agricoles, et d'innombrables autres sources individuelles, constituent aujourd'hui l'origine principale de plusieurs polluants.

Le contrôle de la pollution ne consiste donc plus principalement à dépolluer les émissions de telles ou telles entreprises à l'aide de filtres et autres dispositifs *end of pipe*. Il faut élaborer des stratégies de contrôle et de prévention de la pollution entièrement nouvelles, préventives et systémiques, et le métabolisme industriel peut précisément servir de base au développement de ces stratégies. L'établissement d'un bilan des masses doit notamment permettre de détecter les fausses dépollutions, celles qui se contentent de transférer la pollution d'un compartiment à un autre (de l'eau dans le sol, du sol dans l'air, etc.).

3. Il permet d'estimer l'histoire et l'évolution de la pollution, notamment en tenant compte des doses cumulées.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 97

La reconstruction des émissions passées est très utile pour évaluer le cumul des dépositions dans le sol et les rivières. On peut ainsi déterminer, en quantités absolues, l'importance de la pollution accumulée au cours des années, ce qui peut permettre d'évaluer le comportement futur d'une zone atteinte, notamment sa capacité à supporter de nouvelles charges polluantes. Cette reconstruction peut également servir à établir des scénarios d'évolution en fonction de certaines conditions économiques et de réglementations antipollution.

Enfin, il faut insister sur le fait que le métabolisme industriel ne se limite pas au contrôle et à la prévention des pollutions. En fait, dans la mesure où il offre à la fois une perspective globale et une méthodologie opérationnelle, le métabolisme industriel devrait devenir un outil indispensable pour les responsables politiques, administratifs et économiques, pour une gestion optimale des ressources et du territoire, et la planification d'un développement socio-économique viable.

5.
La maturation du système industriel

Si l'on veut formuler de manière très générale l'objectif de l'écologie industrielle dans les termes de l'écologie scientifique, on peut dire qu'il s'agit de faire passer le système industriel actuel, considéré comme «juvénile», au stade d'un écosystème « mature». Ce vocabulaire fait référence à l'une des théories de base en écologie décrivant l'évolution des écosystèmes, la « théorie du climax » [49].

Les écosystèmes juvéniles se caractérisent par des flux d'énergie et de matière rapides ainsi que par un faible taux de recyclage de la matière; ils ont des réseaux trophiques simples et linéaires; les espèces interagissent peu entre elles, hormis la compétition directe pour les ressources. À l'inverse, les écosystèmes matures se caractérisent par des flux de matière et

49. Le terme «climax» (apogée, en latin) désigne ici le stade ultime, et supposé stable, de l'évolution d'un milieu naturel. La théorie du climax, qui est loin de faire l'unanimité parmi les écologues, décrit la succession des différents écosystèmes que l'on observe dans les milieux perturbés par l'homme ou par les éléments (éruptions volcaniques, feux, etc.). Par exemple, un champ agricole abandonné évolue en prairie, puis en broussaille et se stabilise finalement en forêt.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 100

d'énergie proportionnellement plus faibles ; un taux élevé de recyclage de la matière ; des réseaux trophiques variés et très spécifiques; des interactions complexes entre un nombre élevé d'espèces, telles que la symbiose et le parasitisme[50].

L'analogie avec le système industriel est frappante puisque ce dernier présente les traits essentiels d'un écosystème juvénile. L'agriculture intensive moderne, notamment, offre de spectaculaires exemples d'écosystèmes naturels ayant régressé au stade juvénile sous l'action humaine, et demeurant artificiellement dans cet état par des apports massifs d'énergie, d'engrais et de pesticides.

La stratégie qui vise à favoriser la maturation du système industriel, couramment nommée « restructuration écologique » ou « écorestructuration », comporte quatre grands axes :

– valoriser les déchets comme des ressources ;

– boucler les cycles de matière et minimiser les émissions dissipatives ;

– dématérialiser les produits et les activités économiques ;

– décarboniser l'énergie.

Avant d'examiner en détail ces quatre principes, il convient de préciser que l'écorestructuration peut s'appliquer à plusieurs échelles : macro-, méso- et microscopique :

– à l'échelle macroscopique, il s'agit d'améliorer l'efficacité matérielle et énergétique dans l'ensemble de l'économie. C'est la perspective globale de l'écologie industrielle ;

– à l'échelle mésoscopique, celle des usines et des unités de production, il s'agit principalement de repenser les produits et

50. Tout bon manuel d'introduction à l'écologie comporte un tableau comparant les principales caractéristiques des écosystèmes juvéniles et matures. Il serait intéressant d'examiner en détail la pertinence de la théorie du climax pour l'évolution du système industriel, ce qui n'a pas encore été fait, à l'exception d'une brève tentative préliminaire. Voir Braden R. Allenby et William E. Cooper, «Understanding Industrial Ecology from a Biological Systems Perspective», *Total Quality Environmental Management*, vol. 3, n°3, printemps 1994, p. 343-354.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 101

les processus de fabrication, notamment pour réduire les déchets;

– à l'échelle microscopique, enfin, il s'agit d'optimiser les processus au niveau moléculaire, pour améliorer le rendement des réactions, élaborer des voies de synthèse chimique comportant le moins d'étapes possible, etc.

À des degrés divers, les quatre principes de l'écorestructuration s'appliquent à ces trois échelles[51].

Les déchets comme ressources

L'idée de valoriser systématiquement les déchets comme des ressources se trouve en fait à l'origine du mouvement récent de l'écologie industrielle. Dans leur article du *Scientific American*, Frosch et Gallopoulos l'énoncent ainsi: «La consommation d'énergie et de matériaux doit être optimisée, on doit minimiser les déchets, et les rejets de chaque transformation – les catalyseurs usés de l'industrie pétrolière, les rejets gazeux ou solides des centrales thermiques, ou les emballages à base de polymères des biens de grande consommation – doivent servir de matière première à d'autres industries.» (*Pour La Science*, nov. 1989, p. 106).

L'idée peut paraître triviale, mais il semble qu'elle ne le soit pas du tout dans les milieux économiques, où l'on continue encore largement à encourager, et même à imposer, l'usage de produits neufs et de substances vierges. Peu d'entreprises considèrent leurs déchets comme des richesses gaspillées. Pourtant, les effluents liquides, surtout ceux des petites et moyennes

51. Robert U. Ayres, «Eco-Restructuring: The Transition to an Ecologically Sustainable Economy», Fontainebleau, INSEAD, Center for the Management of Environmental Resources, Working Paper n° 93/35/EPS, 31 p., mai 1993; David T. Allen, «Pollution Prevention: Engineering Design at Macro-, Meso- and Micro Scales», *Advances in Chemical Engineering*, vol. 19, 1994, p. 251-323.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 102

entreprises qui n'ont pas les moyens d'investir dans des dispositifs de dépollution performants, renferment souvent une concentration en métaux bien supérieure à la teneur du minerai naturel !

Les entreprises et les pouvoirs publics devraient donc commencer à considérer d'un autre œil les montagnes de déchets qui s'accumulent dans les décharges : non plus comme des immondices à faire disparaître, mais comme de véritables gisements de matières premières qu'il sera possible d'exploiter un jour. Dans l'optique de l'écologie industrielle, les décharges ne sont rien d'autre que des mines artificielles !

Fermer les cycles matériels et minimiser les usages dissipatifs

Depuis quelques années, le recyclage est à la mode, au point qu'on le présente souvent comme une panacée. Certes, le recyclage constitue le fondement de toute politique visant à fermer les flux de matière, mais il faut garder à l'esprit deux faits :

– Premièrement, le recyclage peut certes contribuer à stabiliser, voire à diminuer les flux de matière, mais il ne fait pas nécessairement décroître leur vitesse. Au contraire même, le recyclage a tendance à accroître la circulation de la matière (le *turn over*), ce qui peut induire des effets pernicieux. Par exemple, la campagne de publicité réalisée par plusieurs constructeurs automobiles mettant en avant le fait que leurs véhicules sont recyclables à près de 90 % (ce qui, soit dit en passant, ne signifie pas qu'ils sont effectivement recyclés !), avait pour but de déculpabiliser les conducteurs et les inciter à changer plus souvent de voiture. Résultat : à supposer que le recyclage des véhicules soit réalisé de manière efficace (ce qui est loin d'être encore le cas), la vitesse et même l'ampleur

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 103

des flux de matière liés à l'industrie automobile risqueraient d'augmenter.

– Deuxièmement, le recyclage sous sa forme actuelle est une activité souvent relativement polluante, qui consomme de l'énergie, et surtout qui dissipe diverses substances dans l'environnement.

Prenons le cas des plastiques : les colorants, stabilisants et autres additifs sont en général purement et simplement dissipés lors des opérations de recyclage. Un défi majeur posé aux ingénieurs consistera donc à fermer également les boucles de recyclage elles-mêmes, autrement dit à rendre les activités de recyclage matériellement « étanches ». Idéalement, bien que cela semble techniquement difficile à imaginer pour l'instant, le recyclage industriel devrait posséder une propriété essentielle des cycles naturels : l'auto-entretien énergétique. Les cycles biogéochimiques, en effet, fonctionnent grâce à l'apport de l'énergie solaire, contrairement au recyclage dans nos sociétés, qui consomme de l'énergie fossile pour le réseau de rétrodistribution (collecte), ainsi que de l'électricité, de l'eau et divers produits pour les opérations de traitement.

En attendant d'éventuels progrès dans cette direction, l'approche préventive devrait prévaloir: la priorité devrait aller au design de produits conçus dès le départ pour être intégralement recyclés, de préférence à l'approche *end of pipe*, qui chercherait à résoudre ce problème après coup en perfectionnant les seules techniques de recyclage.

Défis techniques du recyclage

Naturellement, la teneur en substance à recycler dans une matière première ou un déchet constitue un facteur crucial, car la valeur d'une ressource recyclable est proportionnelle à son

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 104

taux de dilution. Les ressources présentes à très basse concentration entraînent des coûts élevés pour leur récupération, alors que les ressources présentes à haute concentration peuvent être recyclées de manière rentable.

En se basant sur les prix courants des substances, on peut estimer la concentration minimale à laquelle les matériaux peuvent être recyclés. On peut ainsi déterminer, par exemple, la fraction de métaux, dans les déchets, qui peut être recyclée. Comme l'a bien montré David Allen, les métaux restent aujourd'hui largement sous-recyclés par rapport au maximum théorique. Indépendamment des progrès techniques, des mesures économiques, législatives et logistiques suffiraient déjà à accroître fortement la proportion de matériaux recyclés, par exemple en levant l'obligation d'utiliser des matières vierges[52].

Toutefois, la fermeture des cycles de matière dans la société industrielle nécessitera d'importantes innovations technologiques avant d'approcher la spécificité et l'efficacité des processus biologiques de recyclage.

Ces technologies devront résoudre au moins deux grands problèmes.

1. Le tri et la séparation

Le tri des ferrailles mélangées, des plastiques et des déchets en général reste encore trop coûteux, notamment en raison des frais de rétrodistribution (collecte et transport). Le tri et, le cas échéant, le démontage, devraient être automatisés, ce qui implique un marquage des objets au moment de la fabrication ainsi qu'un design facilitant leur démontage.

La séparation pose des difficultés plus coriaces, car les nouveaux matériaux n'ont absolument pas été conçus dans l'optique du recyclage : certains alliages métalliques, comme l'aluminium-lithium, les alliages de titane, et surtout les

52. Voir David T. Allen et Kirsten Sinclair Rosselot, *Pollution Prevention for Chemical Processes*, New York, John Wiley and Sons, Inc., 1997, p. 56-62.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 105

composites (comprenant des fibres de bore, de germanium, de carbone, etc.), sont aujourd'hui pratiquement impossibles à recycler, faute de pouvoir séparer leurs composants. Même les métaux posent des difficultés croissantes, car ils se rencontrent dans une grande variété d'objets sous forme complexe: couche mince par déposition physique ou chimique en phase vapeur, alliages magnétiques et électroniques divers, semi-conducteurs, supraconducteurs.

2. La dégradation

Contrairement au recyclage dans les organismes et les écosystèmes, le recyclage industriel dégrade les matières. Même l'acier des vieilles voitures, par exemple, ne sert pas à construire de nouveaux véhicules, mais à produire du fer à béton. Par conséquent, les boucles de recyclage industriel sont en fait des spirales de performance décroissante, des cascades d'usages de moins en moins « nobles ».

La situation est particulièrement préoccupante pour les polymères plastiques, qui représentent un volume de déchets en pleine croissance. Le recyclage des plastiques nécessite de les broyer, puis de les chauffer lors du moulage, ce qui entraîne une dégradation inévitable de leurs propriétés mécaniques. À partir des plastiques automobiles, par exemple, on ne peut guère faire mieux que des piquets de vigne ou des canalisations, ce qui ne représente pas des débouchés illimités… Après trois ou quatre cycles seulement, ces polymères ne peuvent plus être valorisés que comme source d'énergie dans des incinérateurs adéquats.

Certes, on peut envisager de retourner aux constituants élémentaires des matériaux, aux monomères de base, comme le fait le recyclage biologique. Il existe quelques installations expérimentales qui explorent cette voie, principalement en recourant à la technique de la pyrolyse (la pyrolyse est une décomposition chimique sous l'action de la chaleur), mais cette approche reste complexe et coûteuse.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 106

Pour corser le tout, le recyclage des plastiques pourrait accroître la consommation d'additifs. Ces substances, parfois toxiques, confèrent à chaque plastique ses caractéristiques: couleur, résistance à l'oxydation, à la lumière, à la poussière, etc. Ces additifs sont en général dissipés lors du recyclage, de sorte qu'il faut en rajouter de plus en plus, à chaque cycle, pour compenser la baisse de qualité du recyclat[53].

Par conséquent, on voit qu'il ne suffit pas de viser simplement la récupération de matériaux, mais aussi la conservation de leurs propriétés durant le recyclage, car les débouchés dégradés ne constituent pas une vraie solution. Il faut donc développer des matériaux et des technologies permettant l'immobilisation des substances qui doivent en rester prisonnières, même lors des opérations de recyclage.

Freiner la dissipation

Au cours des dernières décennies, les environnementalistes et les autorités régulatrices se sont intéressés de manière presque exclusive au contrôle des polluants émis lors des processus de fabrication. Il importe aujourd'hui d'élargir cette perspective. D'une manière générale, on peut dire que l'ampleur de la pollution dissipative est largement sous-estimée dans le grand public, mais aussi dans les milieux politiques, administratifs et même économiques.

53. Sur le recyclage, voir Susan J. Ainsworth, «Plastics Additives», *Chemical and Engineering News*, août 31, 1992, p. 34-55; Chris Hendrickson, Lester Lave, Francis McMichael, «Time to Dump Recycling?», *Issues in Science and Technology*, vol. 11, n° 3, printemps 1995, p. 79-84; Silvia Pizzocaro, «Recyclers as decomposing entities of the industrial ecosystem: theoretical implications», *in* Anis Barrage and Xavier Edelmann (éd.), *R'95 – Recovery Recycling Re-integration*, 1995, vol. 1, p. 339-345.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 107

L'approche du métabolisme industriel fait clairement ressortir le fait que de très nombreux produits sont utilisés de manière dissipative : les matériaux d'emballage, les lubrifiants, les solvants, les floculants, les antigels, les détergents, les savons, les agents blanchissants et nettoyants, les colorants, les peintures et les pigments, la majeure partie du papier, les cosmétiques, les médicaments, les engrais, les pesticides, les herbicides et les germicides. La plupart des métaux lourds toxiques, tels que l'arsenic, le cadmium, le chrome, le cuivre, le plomb, le mercure, l'argent et le zinc, inclus dans différents produits, sont également dissipés durant l'usage ou le vieillissement normal.

Certains usages dissipatifs se révèlent insidieux, car ils se déroulent très lentement. C'est le cas notamment des peintures, qui contiennent souvent du plomb, du zinc ou du chrome, et qui se dégradent progressivement. L'usure des pneus, et surtout la corrosion, constituent également des sources importantes de dissipation progressive de matériaux.

Parfois, la dissipation est inhérente au produit, et s'effectue entièrement lors d'un unique usage: c'est naturellement le cas de la nourriture et des additifs qu'elle contient (conservateurs, colorants, etc.), ainsi que des carburants et des combustibles fossiles. Ces derniers constituent même l'exemple par excellence d'une consommation dissipative, non seulement au sens énergétiste traditionnel de la thermodynamique (entropie), mais aussi du point de vue matériel (dissipation irréversible du charbon, du pétrole, du gaz naturel).

Mais, contrairement à la nourriture, aux combustibles et aux carburants, de nombreux usages dissipatifs ne sont pas inhérents au produit. On dispose en théorie des technologies qui permettraient d'éviter ces contaminations de la Biosphère : par exemple, la culture hydroponique dans des serres à atmosphère contrôlée, avec des agents antiparasitaires et des substances stimulant la croissance provenant de la biotechnologie, préviendrait toute perte d'engrais et de pesticides dans les eaux, le sol et l'atmosphère. Dans ce concept des serres contrôlées, on

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 108

reconnaît une idée de base de l'écologie industrielle : il peut s'avérer, dans certains cas, bénéfique d'isoler autant que possible un écosystème industriel, pour minimiser ses impacts sur les autres écosystèmes naturels. On trouve en fait ce principe dans la Biosphère elle-même, où de nombreux écosystèmes évoluent en étant strictement isolés les uns des autres (c'est du reste l'un des éléments du processus de formation des espèces).

L'incinération des déchets, ainsi que les boues des stations d'épuration sont également responsables d'émissions de métaux lourds. Mais il s'agit d'un transfert, non d'une véritable source de métaux polluants. Tous les métaux émis par les incinérateurs se trouvaient originellement inclus dans des objets de consommation rejetés comme des déchets. En revanche, les engrais et les cendres de la combustion du charbon, qui renferment toujours des métaux lourds comme impuretés, constituent de véritables sources primaires de pollution dissipative[54].

Étant donné l'ampleur, encore largement méconnue, du phénomène des émissions dissipatives, la stratégie principale

54. Sur les problèmes de dissipation, voir les travaux en rapport avec le métabolisme industriel, notamment ceux de Robert U. Ayres : Robert U. Ayres et Leslie W. Ayres, « Consumptive Uses and Losses of Toxic Heavy Metals in the United States : 1880-1980 », *in* Robert U. Ayres and Udo E. Simonis (éd.) : *Industrial Metabolism. Restructuring for Sustainable Development*, Tokyo, New York, United Nations University Press, 1994, p. 259-295 ; Robert U. Ayres, « Industrial metabolism – closing the materials cycle », *in* Tim Jackson (éd.) *Clean Production Strategies* (Developing Preventive Environmental Management in the Industrial Economy), Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, 1993, p. 165-188 ; Jerome Nriagu, « Industrial Activity and Metals Emissions », *in* Robert Socolow, Clinton Andrews, Frans Berkhout, and Valerie Thomas (éd.), *Industrial Ecology and Global Change*, Cambridge University Press, 1994, p. 277-285 ; Valerie Thomas and Thomas Spiro, « Emissions and Exposure to Metals : Cadmium and Lead », *in* Robert Socolow, Clinton Andrews, Frans Berkhout et Valerie Thomas (éd.), *Industrial Ecology and Global Change*, Cambridge University Press, 1994, p. 297-318 ; Ester van der Voet, René Kleijn, Gjalt Huppes, « Economic characteristics of chemicals as a basis for pollutants policy », *Ecological Economics*, vol. 13, 1995, p. 11-26 ; Alison J. Gilbert, Jan F. Feenstra, « A sustainability indicator for the Dutch environmental policy theme 'Diffusion' : cadmium accumulation in soil », *Ecological Economics*, vol. 9, 1994, p. 253-265.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 109

devrait résider dans la prévention. Une prévention basée sur une conception nouvelle, non seulement des produits eux-mêmes, mais aussi des modalités de leur utilisation. Concrètement, on peut envisager trois types de solutions :

1. Améliorer les matériaux. Il s'agit de mettre au point des matériaux capables de prévenir et de minimiser la dissipation de substances diverses lors de l'utilisation des produits de consommation courants. On peut inclure dans cette stratégie la lutte contre la corrosion des métaux. Concernant les composés organiques, comme les additifs, on peut espérer beaucoup des techniques d'immobilisation des substances dangereuses au sein des produits.

Dans ce contexte, on peut se demander quel serait l'équivalent industriel des procédés biologiques de détoxication, qui permettent de neutraliser des substances dangereuses diffuses dans l'environnement. Certains organismes incorporent les métaux lourds dans des molécules stables telles que des métalloprotéines. Le métal n'est libéré qu'à la mort de l'organisme, lors de la décomposition de sa matière organique. D'autres organismes font carrément sortir des substances toxiques de l'écosystème. On peut citer l'exemple des cétacés. Le mercure s'associe au sélénium dans leur foie, formant des calculs de séléniure mercurique. Après la mort de l'animal, ces concrétions se fossilisent dans les sédiments. L'écosystème marin se détoxique ainsi du mercure, grâce au foie des cétacés[55]. Dans un but similaire, des chimistes organiciens développent actuellement plusieurs familles de molécules susceptibles de piéger sélectivement et de manière stable des substances dangereuses.

2. Le recyclage, lorsque l'usage le permet. Par exemple, Dow, le géant américain de la chimie, a récemment développé le concept « Rent a Molecule » pour les solvants chlorés. Les clients de Dow n'achètent plus la molécule elle-même, mais sa

55. On trouve cet exemple dans l'ouvrage de Serge Frontier et Denise Pichod-Viale, *Écosystèmes : structure, fonctionnement, évolution*, Masson, collection d'Écologie 21, Paris, 1993 (2e édition).

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 110

fonction. Ils retournent donc le solvant après usage à Dow, qui se charge de le régénérer.

3. La substitution des substances dangereuses par des composés inoffensifs, voire le bannissement pur et simple, lorsque la substance dissipée est considérée comme trop dangereuse et qu'aucune autre solution n'apparaît satisfaisante. Il est ainsi de plus en plus question de supprimer totalement l'usage du chlore, ce qui supposerait une restructuration majeure du système industriel, car cet élément intervient dans de très nombreux procédés de fabrication.

Dématérialiser les produits et les services

Si l'on veut atteindre un niveau de vie élevé pour une population mondiale en augmentation, tout en minimisant les impacts sur l'environnement, il faudra obtenir plus de services et de biens à partir d'une quantité de matière identique, voire moindre. Telle est l'idée de base de la dématérialisation, qui consiste, en d'autres termes, à accroître la productivité des ressources[56].

Les analyses historiques font apparaître que l'économie industrielle, depuis plus d'un siècle, suit la bonne pente: pour produire des biens, on utilise proportionnellement de moins en moins de matière et d'énergie. Cette diminution provient en

56. La réflexion sur la dématérialisation en rapport avec le marché et les réserves de minerais est assez ancienne. Quelques références de base: W. Malenbaum, *World Demand For Raw Materials in 1985 And 2000*,New York, McGraw-Hill, Inc., 1978; L. L. Fischman, «World Mineral Trends and US Supply Problems. Resources for the Future», Washington, DC, Research Paper R-20, 1980; D. Humphreys, «A mineral commodity life-cycle? Relationships between production, price and economic resources», *Resources Policy*, vol. 8, p. 215-229, 1982; D. Humphreys and S. Briggs, «Mineral consumption *in* the UK, 1945-1980», *Resources Policy*, vol. 9, p. 4-22, 1983; R. Auty, «Materials intensity of GDP. Research issues on the measurement and explanation of change», *Resources Policy*, vol. 11, p. 275-283, 1985.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 111

premier lieu des progrès technologiques. Les nouveaux matériaux deviennent à la fois plus résistants et plus légers. C'est ainsi que le poids moyen de la carcasse métallique des voitures a fortement diminué, grâce à différents polymères plastiques qui remplacent l'acier. L'industrie des télécommunications offre un autre exemple spectaculaire de substitution technologique : 25 kg de fibre de verre suffisent pour fournir des services équivalents à une tonne de fil de cuivre. Mieux encore: pour produire la fibre de verre, il faut seulement 5 % de l'énergie nécessaire à l'obtention du cuivre. En termes techniques, on nomme «transmatérialisation » ce phénomène de substitution de matériau.

Pour donner une idée du potentiel de dématérialisation des objets usuels, on peut considérer, par exemple, les petites boîtes cylindriques en plastique qui contiennent les films 35 mm. Les boîtes de Kodak, noires avec un couvercle gris, pèsent 7,2 grammes chacune. Or, les boîtes de Fuji (transparentes) ne pèsent, elles, que 5,5 grammes, soit 25 % de moins. Avec la même quantité de matière, Fuji fabrique donc cinq boîtes là où Kodak n'en produit que quatre. La différence peut sembler minime, mais elle vaut son pesant de polymère: aux États-Unis, 700 millions de ces boîtes sont fabriquées chaque année. Si toutes les boîtes pesaient 5,5 grammes, on réaliserait une économie de plusieurs centaines de tonnes de matière première par an! Kodak n'a pas fourni d'explication à ce gaspillage, mais on peut penser qu'il s'agit d'une question d'image de marque. En effet, l'excès de poids des boîtes de Kodak provient du mécanisme de fermeture du couvercle, qui donne aux consommateurs une impression de solidité et de sécurité. Dans ce cas, l'obstacle à la dématérialisation n'est pas de nature technologique, mais uniquement socio-économique.

Un important facteur de dématérialisation est ce que l'on peut appeler la substitution informationnelle. En agriculture, par exemple, les différents pesticides sont souvent répandus en quantités importantes, de manière préventive, avec une bonne marge de sécurité. Un système informatique combinant l'obser-

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 112

vation en temps réel des populations de prédateurs et un dispositif d'alerte permettrait aux agriculteurs de n'utiliser, au moment adéquat, que les quantités de pesticides strictement nécessaires.

Il existe également d'intéressants exemples historiques de dématérialisation liée à une substitution basée sur la valorisation d'un déchet. Jesse Ausubel mentionne le cas de l'origine de l'industrie du papier comme conséquence de la manufacture des textiles il y a 700 ans. L'arrivée du rouet en Europe, au XIIIe siècle, a accéléré la production de fil, abaissé le prix des vêtements, et augmenté leur consommation. Le lin commença à être très utilisé, et les chiffons se révélèrent être le meilleur matériau pour faire du papier. La production de papier put augmenter, à des prix plus bas. Auparavant, il fallait les peaux de deux à trois cents moutons ou veaux pour fabriquer une Bible. C'est ainsi que les déchets du rouet assurèrent le succès de l'invention de Gutenberg[57].

57. Sur la dématérialisation, voir notamment les travaux de Jesse Ausubel et Iddo Wernick à la Rockefeller University (New York) : R. Herman, S. A. Ardekani et J. H. Ausubel, *Dematerialization. in Technology and Environment*, J. H. Ausubel and H. E. Sladovich (éd.), Washington, DC : National Academy of Engineering, National Academy Press, 1989, p. 50-69 ; I. Wernick, « Dematerialization and Secondary Materials Recovery », *Journal of the Minerals, Metals, and Materials Society*, vol. 46, 1994, p. 39-42 ; I. Wernick et J. H. Ausubel, « National Materials Flows and the Environment », *Annual Review of Energy and Environment*, vol. 20, 1995, p. 463-492 ; I. K. Wernick et J. H. Ausubel, « National material metrics for industrial ecology », *Resources Policy*, vol. 21, n° 3, 1995, p. 189-198 ; I. K. Wernick, « Consuming Materials : The American Way », *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 53, n° 1, 1996, p. 111-122 ; I. K. Wernick, R. Herman, S. Govind et J. H. Ausubel, « Materialization and Dematerialization : Measures and Trends », *Daedalus*, vol. 125, p. 171-198, 1996. Voir également : L. M. Waddell et W. C. Labys, « Transmaterialization : Technology and materials demand cycles », *Materials and Society*, vol. 12, p. 59-86, 1988 ; T. Kanoh, « Toward Dematerialization and Decarbonization », *in Science and Sustainability* (Selected Papers on IIASA 20th Anniversary), IIASA, éd. Laxenburg : IIASA, 1992, p. 63-94. O. Bernardini et R. Galli, « Dematerialization : Long-Term Trends in the Intensity of use of Materials and Energy », *Futures*, p. 431-448, 1993 ; F. Schmidt-Bleek,

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 113

Les limites de la dématérialisation

Toutefois, ce dernier exemple montre bien les limites de la dématérialisation, dans la mesure où les flux de matière associés à la production de papier ont littéralement explosé. La même remarque vaut pour le développement de l'informatique. Selon les prédictions des prophètes de la soi-disant société «postindustrielle», les ordinateurs étaient censés reléguer le papier au rang de curiosité historique. C'est exactement l'inverse qui s'est produit: aux États-Unis, la consommation annuelle de papier à écrire et à imprimer est passée de 7 à 22 millions de tonnes entre 1956 et 1986. De plus, le phénomène s'accélère: pour la seule période 1981-1984, la consommation de papier des entreprises américaines est passée de 850 milliards à 1400 milliards de pages par année. Quant au fulgurant succès du fax au cours des quinze dernières années, il s'accompagne d'une non moins phénoménale augmentation de la consommation de papier… C'est un exemple caractéristique de «l'effet de revanche technologique», où une innovation technique (en l'occurrence l'informatique, censée faire diminuer la consommation de papier) génère de manière inattendue un résultat opposé[58].

Dans le domaine de l'électronique, la miniaturisation, si souvent vantée comme parangon de «l'âge de l'information», peut également être considérée comme responsable, en réalité, d'un accroissement des flux de matière. Certes, les fonctions infor-

---

«Revolution in resource productivity for a sustainable economy: A new research agenda», *Fresenius Environmental Bulletin*, vol. 2, p. 485-490, 1993; M. J. Welfens, «De-Materialization Strategies and Systems of National Accounts», *Fresenius Environmental Bulletin*, vol. 2, p. 431-436, 1993; F. Schmidt-Bleek,» Where We Stand Now. Actions Toward Reaching a Dematerialized Economy», Wuppertal Institute, Carnoules (France) Declaration of the First Meeting of the Factor 10 Club in Carnoules (France), septembre 1994, 26 octobre 1994.

58. Claudia G. Thompson, *Recycled Papers – The Essential Guide*, The MIT Press, Cambridge, MA, 1992. Sur le *revenge effect*, voir le stimulant essai d'Edward Tenne, *Why Things Bite Back. Technology and the revenge of Unintended Consequences*, New York, Alfred A. Knopf, 1996.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 114

matiques sont aujourd'hui effectuées à des coûts de plus en plus bas, par des puces toujours plus petites. Mais on omet généralement de préciser que la consommation en matériaux et en énergie exigée par les processus de fabrication a crû de manière inversement proportionnelle. Il en va de même pour la taille de l'infrastructure de fabrication, surtout les gigantesques installations de ventilation et de purification de l'air, grosses consommatrices d'énergie. C'est ainsi que le coût des unités de production de microprocesseurs et de mémoires micro-électroniques est devenu prohibitif, même si le coût relatif de la capacité de calcul a beaucoup baissé.

Ce genre d'exemples apporte de l'eau au moulin de ceux qui doutent de la réalité de la dématérialisation. Ainsi, Cesare Marchetti, de l'IIASA, rappelle que cette notion signifie simplement que la valeur ajoutée par unité de poids va en augmentant[59]. Autrement dit, il serait plus juste de parler de «dématérialisation de la valeur ajoutée». À vrai dire, il règne une certaine confusion autour de la notion de dématérialisation. Il convient en premier lieu de préciser que l'on parle généralement de dématérialisation des produits : considérés individuellement, de nombreux objets nécessitent aujourd'hui moins de matière. Mais cela ne signifie pas nécessairement que les procédés de production sont devenus plus économes en matière, ni qu'il en résulte une dématérialisation de la consommation, au sujet de laquelle force est de reconnaître que l'on ne connaît pas grand-chose.

Par exemple, une forte réduction de la masse des grille-pain, des machines à laver et autres objets courants peut fort bien se traduire par une plus grande fragilité. La diminution de la durée de vie du produit qui en résulte suscite une augmentation de la

59. Cesare Marchetti, «Infrastructures for Movement : Past and Future», *in* Jesse H. Ausubel et Robert Herman (éd.), *Cities and their Vital Systems. Infrastructure. Past, Present and Future*, p. 146-174. National Academy of Engineering, Series on Technology and Social Priorities, National Academy Press, Washington, DC, 1988.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 115

consommation. Autrement dit, la dématérialisation de la production peut fort bien conduire à une matérialisation de la consommation. Cette observation contredit des slogans simplistes, comme celui affirmant qu'il suffit de « produire plus avec moins» (*doing more with less*), adoptés par certaines entreprises en quête de respectabilité environnementale. Car, comme le font pertinemment remarquer Jesse Ausubel et ses collègues, « moins ne signifie pas nécessairement moins du point de vue de l'environnement » [60].

En réalité, les flux totaux de matière et d'énergie (en chiffres absolus) ont considérablement augmenté au cours des dernières décennies, et la tendance à l'accroissement se poursuit. Les facteurs favorisant la matérialisation de l'économie abondent. La quasi-totalité des efforts de marketing et de publicité vise à augmenter les achats de produits neufs à courte durée de vie, ce qui constitue une incitation permanente à accroître les flux de matière et d'énergie. L'habitat en banlieue, de même que l'atomisation de la cellule familiale, sont de forts « matérialiseurs ».

La voiture privée est peut-être le plus puissant de tous les matérialiseurs, de par le style de vie et de consommation qu'elle induit. En elles-mêmes, les infrastructures routières, mais également les biens immobiliers, sont des matérialiseurs de première importance. Il existe un énorme potentiel de dématérialisation dans le secteur des infrastructures liées aux transports et dans le domaine de l'immobilier. Mais, bien plus qu'une adaptation du système de production industriel, une telle dématérialisation supposerait une transformation en profondeur du tissu urbain, et donc de l'organisation de la société.

Il faut insister sur le fait que la dématérialisation ne concerne pas que les produits, mais aussi les services. Le tourisme, les loi-

60. « Less is not necessarily less from an environmental point of view », p. 51 dans le chapitre « Dematerialization » écrit par Robert Herman, Siamak A. Ardekani et Jesse H. Ausubel, *in* Jesse H. Ausubel and Hedy E. Sladovich (éd.), *Technology and Environment*, National Academy of Engineering, National Academy Press, Washington, DC, 1989, p. 50-69.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 116

sirs, la santé, l'enseignement, les télécommunications induisent des flux de matière et d'énergie de plus en plus importants. Par exemple, on constate que les voyages (notamment d'affaires) augmentent parallèlement au trafic des télécommunications, alors que ces dernières sont censées se substituer aux déplacements. On peut même soupçonner que le développement de l'offre en télécommunications, en multipliant les occasions de contacts entre individus, provoque en réalité une augmentation des voyages. Par conséquent, la stratégie de la dématérialisation implique également une réflexion sur les moyens de rendre les services plus frugaux en matière et en énergie.

Trois conclusions sur la dématérialisation

On peut provisoirement tirer trois conclusions de ces considérations sur la dématérialisation :

1. Comme les exemples ci-dessus le font apparaître, la notion de dématérialisation, telle qu'elle est couramment utilisée, est ambiguë. En effet, la dématérialisation d'un produit peut très bien entraîner la matérialisation de sa consommation : on achète plus de produits plus fragiles, ou difficilement réparables. C'est pourquoi l'une des priorités des groupes qui travaillent sur le sujet est de mettre au point des indicateurs et des méthodologies de mesure. Lorsque de telles méthodologies seront au point, lorsque l'on disposera de données pertinentes décrivant le fonctionnement réel du substrat matériel de l'économie, on pourra alors commencer à départager les facteurs matérialiseurs et dématérialiseurs.

2. Il existe incontestablement une tendance à la dématérialisation des produits et des procédés de fabrication, qui devrait s'accélérer avec le développement de nouveaux matériaux, le perfectionnement du recyclage, le Design for Environment, etc.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 117

Sur ce plan, la nanotechnologie représente un dématérialiseur potentiel extrêmement puissant : le contrôle à l'échelle atomique et moléculaire de la fabrication des objets permettrait de réaliser des matériaux avec des propriétés (résistance, légèreté, etc.) à peine imaginables aujourd'hui. Surtout, en théorie, cette maîtrise supprimerait tout déchet de production, puisque l'on n'utilise que les atomes ou les molécules dont on a besoin (voir la fin du chapitre VI).

3. Il apparaît clairement que la dématérialisation envisagée uniquement dans la perspective des objets de consommation ne suffit pas. Il s'agit de sortir du paradigme productiviste pour adopter une perspective systémique. Concrètement, cela signifie qu'il faut commencer par déterminer la fonction dont on a besoin (par exemple : la production de froid) et concevoir le produit (un réfrigérateur) en s'efforçant de minimiser la consommation de matériaux et d'énergie durant la production, l'utilisation, l'entretien, les réparations, le recyclage et l'entreposage final (voir chapitre VII).

Décarboniser la diète énergétique

La littérature dans le domaine énergétique est si abondante qu'il ne semble pas nécessaire de traiter ici ce sujet en détail. Il suffira de faire ressortir l'apport de l'écologie industrielle à la problématique de l'énergie, que l'on peut résumer en quatre points :

1. À chaque flux de matière est associé un flux d'énergie. Or, dans le système industriel, une majeure partie des flux d'énergie résulte des activités de transformation et de transport de matière. Par conséquent, l'une des manières les plus efficaces de modérer la consommation d'énergie réside précisément dans la stratégie de dématérialisation décrite plus haut.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 118

2. Les flux d'énergie reflètent la structure des flux de matière. Il ne suffit donc pas de fabriquer des objets plus légers (dématérialisation simple). Il s'agit de réorganiser la circulation de la matière (processus de fabrication, gestion des infrastructures, agriculture, etc.), pour rendre le système industriel énergétiquement plus frugal.

3. Les centrales électriques au charbon, au mazout, au gaz pourraient être conçues dès le départ comme des écosystèmes industriels en eux-mêmes, optimisant tous leurs flux de matière, y compris les résidus de combustion. L'idée dépasse la simple valorisation des cendres volantes et du gypse produit par les unités de désulfuration ; comme déjà indiqué au chapitre 2 à propos des biocénoses industrielles, on pourrait réaliser des « parcs énergético-éco-industriels», où l'un des partenaires principaux de l'écosystème industriel serait une installation de production d'énergie. En fait, ce cas de figure existe déjà à Kalundborg, structuré originellement autour d'une centrale électrique au charbon et d'une raffinerie de pétrole.

4. Il semble raisonnable d'admettre que le carbone continuera encore longtemps à jouer un rôle primordial dans le métabolisme industriel. La démarche la plus réaliste consiste à admettre ce fait, et à opter pour une stratégie de «décarbonisation». On entend par là qu'il faut passer progressivement à des hydrocarbures contenant proportionnellement moins de carbone[61].

Depuis les débuts de la révolution industrielle, le carbone sous forme d'hydrocarbures d'origine fossile représente l'élément principal, la substance vitale irriguant toutes les économies qui se développent sur le mode occidental. Les

61. Pour une synthèse des idées sur la décarbonisation, voir Robert Socolow (éd.), « Fuels Decarbonization and Carbon Sequestration : Report of a Workshop », PU/CEES Report n° 302, Princeton University, The Center for Energy and Environmental Studies, septembre 1997.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 119

hydrocarbures (charbon, pétrole, gaz) représentent plus de 70 % des matériaux que nous extrayons de la Terre. Or, ce carbone fossile se trouve à la source de nombreux problèmes: effet de serre, smog, marées noires, pluies acides.

La consommation de carbone provenant de gisements fossiles a considérablement augmenté au cours des dernières décennies, et continuera à suivre une courbe ascendante, principalement dans les pays en développement, du fait de la croissance économique et démographique. Des auteurs comme Jesse Ausubel et Cesare Marchetti avancent que durant le siècle prochain, nous consommerons environ 500 milliards de tonnes de carbone, soit plus du double de la quantité utilisée depuis le début de la Révolution industrielle. On estime que 100 milliards de tonnes de pétrole ont été extraites depuis le début de ce siècle, et l'on prédit que 300 milliards de tonnes supplémentaires seront pompées d'ici 2100[62].

Certes, les énergies renouvelables vont se développer. Mais, selon toute vraisemblance, elles continueront à jouer un rôle relativement marginal et resteront cantonnées dans des marchés particuliers, pour des raisons techniques, économiques, mais aussi structurelles. En effet, les centres urbains exigent des densités énergétiques élevées, de sorte que la taille des installations de production d'énergie semble augmenter avec la taille des villes, un facteur en défaveur d'une énergie diffuse comme le solaire. Quoi que l'on fasse, il semble bien que les hydrocarbures joueront pendant longtemps encore un rôle largement prédominant dans la consommation énergétique mondiale.

La stratégie de la décarbonisation constitue donc une politique du moindre mal. Concrètement, cela revient à favoriser la substitution du charbon par le pétrole, puis la substitution du pétrole par le gaz naturel. On peut également pratiquer une

62. Voir Marchetti (*op. cit.* à la note 59) et Jesse H. Ausubel, «Energy and Environment: The Light Path», *Energy Systems and Policy*, vol. 15, 1991, p. 181-188. Voir également National Research Council (éd.), *Coal, Energy for the Future*, National Academy Press, Washington, DC, 1995.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 120

décarbonisation relative, en extrayant plus d'énergie par unité de combustible, par exemple en augmentant le rendement des turbines. La meilleure manière de décarboniser l'énergie est évidemment de l'économiser. Malheureusement, les politiques visant à promouvoir l'efficacité énergétique se concrétisent bien moins rapidement que l'augmentation de la consommation des énergies fossiles. On peut enfin, par divers procédés, transformer les combustibles fossiles en séparant le carbone (destiné à un stockage souterrain ou sous-marin à long terme) et l'hydrogène, utilisé comme vecteur énergétique.

Cette évolution du système industriel vers une diète énergétique proportionnellement moins riche en carbone fossile entraînera des conséquences pour les infrastructures. Notamment pour le gaz naturel, dont la consommation devrait augmenter d'un facteur dix d'ici une cinquantaine d'années, ce qui nécessitera la construction d'un réseau de pipe-lines d'une capacité considérablement accrue. Le gaz naturel, outre sa faible teneur en carbone, présente l'avantage d'être extrêmement abondant: les gisements exploitables connus s'élèvent à environ un trillion de mètres cubes, soit l'équivalent de six fois les réserves de pétrole.

Pour le long terme, les opinions convergent pour dire qu'il faudra passer à l'hydrogène, vecteur énergétique idéal, virtuellement inoffensif d'un point de vue environnemental. Les conséquences de son utilisation sont certes faibles, mais pas entièrement nulles: la combustion de l'hydrogène génère de la vapeur d'eau. Produite en grande quantité, cette vapeur d'eau pourrait devenir problématique dans certaines conditions climatiques et géographiques. À haute température, la combustion de l'hydrogène produit également, en petites quantités, des oxydes d'azote. De plus, les problèmes technologiques liés à l'hydrogène sont encore loin d'être résolus: notamment la fragilisation des métaux, la sécurité du transport et du stockage.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 121

Toutefois, il ne faut pas perdre de vue que l'hydrogène n'est pas lui-même une source d'énergie, mais simplement un vecteur. Le problème de la source de chaleur ou d'électricité nécessaire à l'hydrolyse demeure entier. Les meilleures sources seraient évidemment le solaire, suivi par l'hydroélectrique et le nucléaire. En fait, l'hydrogène pourrait servir de vecteur énergétique flexible, transportable et stockable, lorsque les réseaux de distribution électrique à base de câbles arriveront à saturation, et qu'il deviendra de plus en plus difficile et coûteux de les agrandir. L'utilisation de l'hydrogène à grande échelle entraînera donc des conséquences non négligeables en termes de matérialisation, car il faudra construire un réseau de pipe-lines international, voire intercontinental.

Concernant les énergies fossiles, rappelons qu'il ne faut pas perdre de vue leur aspect matériel. Les produits énergétiques sont les principales matières que l'homme transporte à la surface de la terre. Ils occupent une position dominante dans le commerce mondial de produits en vrac, de même que dans les transports nationaux. Il serait donc souhaitable de réduire les distances de transport des agents énergétiques. Il faudrait s'efforcer de dématérialiser l'énergie, en ayant recours à des agents offrant un bon rapport masse/capacité énergétique, et en minimisant les infrastructures nécessaires à leur transport.

Précisons enfin un point important, mais généralement mal compris tant la problématique énergétique reste dominée par la rhétorique de la pénurie. Le principal problème, concernant l'énergie, ne réside pas dans une éventuelle disette, présente ou à venir, mais dans les impacts environnementaux qu'entraîne sa consommation immodérée, facilitée par l'abondance et le bas prix des agents énergétiques.

Imaginons en effet que nous disposions soudain d'une hypothétique nouvelle source d'énergie, non seulement propre lors de sa production et de sa distribution, mais encore abondante, illimitée et bon marché. Ce serait tout sauf une bonne nouvelle ; ce serait même l'une des plus grandes tragédies de

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 122

l'humanité, car les consommateurs ne connaîtraient plus de frein à l'abondance matérielle. Les conséquences pour la Biosphère seraient véritablement dramatiques[63].

L'alternative des hydrates de carbone

Il existe une alternative à la décarbonisation des hydrocarbures: utiliser des hydrates de carbone, autrement dit de la biomasse. Un certain nombre de spécialistes restent convaincus que les sucres et d'autres matières d'origine végétale offrent un potentiel important comme agents énergétiques à grande échelle. Bien que les hydrates de carbone ne soient pas «décarbonisés», ils présentent, outre leur toxicité environnementale généralement moindre, l'avantage d'être neutres à l'égard de l'effet de serre puisqu'ils ne proviennent pas de gisements fossiles.

À l'échelle industrielle, l'énergie à base de biomasse nécessite des cultures intensives, d'où une polémique récurrente sur leur impact écologique, notamment sur le plan de la biodiversité. Pour l'instant, les «carburants verts» restent largement subventionnés, avec des coûts de production bien supérieurs aux prix des énergies fossiles. En Europe, les tentatives effectuées dans ce sens découlent en réalité essentiellement de la politique agricole commune, qui cherche à aider les paysans à se reconvertir.

Les promoteurs de cette filière énergétique font valoir qu'elle présente également de véritables possibilités industrielles: à partir de la paille et d'autres résidus végétaux, on pourrait effec-

63. Sur la décarbonisation de l'énergie, voir N. Nakicenovic, «Decarbonizing Energy», *IIASA Options*, p. 2-9, 1992; J. H. Ausubel, «Productivity, Electricity, Science: Powering a Green Future», *The Electricity Journal*, vol. 9, 1996; N. Nakicenovic, «Freeing Energy from Carbon», *Daedalus*, vol. 125, 1996, p. 95-112; J. H. Ausubel et C. Marchetti, «Elektron: Electrical Systems in Retrospect and Prospect», *Daedalus*, vol. 125, 1996, p. 139-169; G. Dupont-Roc, *The evolution of the world's energy system 1860-2060*, Londres, Shell International Petroleum Company, Group Planning, 1994.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 123

tivement développer toute une filière industrielle, allant de la production de charbon végétal pour les hauts fourneaux (en remplacement du charbon fossile) jusqu'à la chimie pharmaceutique fine dérivée notamment des furanes, en passant par les polymères biodégradables. En Europe, certains agriculteurs se considèrent déjà comme de futurs « moléculteurs ».

Les partisans de la biomasse insistent également sur le fait qu'elle crée des emplois locaux. C'est la philosophie politique que défend, par exemple, l'Institute for Local Self-Reliance, à Washington: la valorisation de la biomasse et des déchets organiques nécessite des emplois de proximité et dynamise la vie des collectivités locales[64].

La biomasse et, d'une manière générale, la valorisation industrielle des hydrates de carbone vont certainement se développer. Toutefois, on peut penser que cette option restera cantonnée, dans un avenir prévisible, à des secteurs restreints, étant donné l'inertie du système actuel d'approvisionnement énergétique.

Les nouveaux métiers de l'éco-restructuration

Valoriser les déchets, rendre cycliques et étanches les flux de matière, dématérialiser les produits et les services, décarboniser l'énergie : ces défis concernent l'ensemble des acteurs de la société. Mais la responsabilité de la conception et de la mise en œuvre des principes de l'éco-restructuration revient d'abord aux

64. Sur la biomasse et les hydrates de carbone, voir Irshad Ahmed et David Morris, *The Carbohydrate Economy : Making Chemicals and Industrial Materials from Plant Matter*, Washington, DC, Institute for Local Self-Reliance, 1992, 66 p. ; David Morris et Irshad Ahmed, *Rural Development, Biorefineries and the Carbohydrate Economy*, Washington, DC, Institute for Local Self-Reliance, septembre 1993 ; David Morris et Irshad Ahmed, « Carbohydrates and Pollution Prevention : Making Chemicals and Industrial Materials from Plant Matter », *Pollution Prevention Review*, automne 1993, p. 383-396.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 124

ingénieurs, scientifiques, designers, bioéconomistes, urbanistes et aménageurs du territoire, ainsi qu'aux spécialistes de tous les nouveaux métiers qui vont apparaître avec le développement de l'écologie industrielle (concepteurs et animateurs de parcs éco-industriels, experts en métabolisme industriel, dématérialiseurs, « diététiciens industriels », etc.).

C'est à eux qu'il incombera de traduire les grands axes de la maturation du système industriel en actions particulières et concrètes, en développant des outils techniques, comme les normes, les labels, l'analyse du cycle de vie (LCA), le Design for Environment (DfE). À eux, surtout, de faire en sorte que la stratégie de l'éco-restructuration imprègne les décisions et les comportements quotidiens de millions d'agents économiques avec la même inconscience et efficacité routinière qui donne au système industriel son visage actuel.

Enfin, rappelons que, selon la théorie du climax, les écosystèmes matures finissent un jour par devenir sénescents, avant de disparaître et laisser le terrain à de nouveaux venus. Pour les écosystèmes industriels de demain, la métaphore de la maturité serait ainsi une manière élégante de reconnaître qu'ils se savent mortels…

6.
Stratégies technologiques

Dans l'approche traditionnelle des problèmes d'environnement, on oppose les technologies «polluantes» aux technologies «propres» ou «vertes». Les discussions sur les stratégies de recherche et développement portent, dans ce contexte, sur la manière de favoriser l'émergence et la diffusion de technologies réputées « respectueuses de l'environnement ».

L'écologie industrielle renverse totalement cette perspective, et conduit à trois assertions principales concernant les questions technologiques :

1. La distinction entre les technologies environnementales et les autres disparaît, car ce sont toutes les technologies qui doivent tendre à devenir de plus en plus «propres» en optimisant les flux de matière et d'énergie. Il ne s'agit donc plus de développer des technologies «vertes», par opposition à d'autres qui resteraient plus ou moins « sales ».

Il en découle une conséquence importante pour la formation, notamment pour les écoles d'ingénieurs : un enseignement sur les principes de l'écologie (biologique et industrielle) devrait être intégré à l'ensemble des cours et des filières, au lieu

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 126

de rester cantonné, comme c'est généralement le cas aujourd'hui, à des cursus spécialisés dans l'environnement.

2. Les choix technologiques doivent se faire dans une perspective systémique. Il ne suffit pas que les entreprises, chacune de leur côté, adoptent des techniques optimales, aussi propres soient-elles : l'infrastructure du système industriel dans son ensemble doit également évoluer dans la direction d'un écosystème mature.

Autrement dit, les choix stratégiques ne portent pas simplement sur des technologies considérées isolément, mais ils interviennent à l'échelle des grands systèmes technologiques (modes de transports, réseaux de distribution d'énergie, urbanisme, réseau routier, aménagement du territoire).

3. Le débat sur les choix technologiques par rapport aux questions d'environnement porte sur l'ensemble des technologies. Cette réflexion concerne donc la politique de la recherche en général, y compris la problématique des technologies « critiques» dans le contexte de la compétition économique internationale[65].

65. Durant les années quatre-vingt, sous les administrations Reagan, puis Bush, les enjeux de sécurité militaire et de compétitivité économique internationale ont dominé la politique technologique américaine. Le National Critical Technologies Review Group a été créé par l'administration Bush, en 1990, sous l'égide du département de la Défense. Depuis 1991, il publie tous les deux ans un rapport, préparé en collaboration avec le National Science and Technology Council. L'administration Clinton a poursuivi cette réflexion sur la sécurité militaire et économique américaine, en portant une attention particulière aux technologies environnementales, comme avait commencé à le faire le World Resources Institute. Voir National Critical Technologies Review Group, « National Critical Technologies Report », Third Biennial Report of the National Critical Technologies Review Group, Springfield, VA, US Department of Commerce, National Technical Information Service, mars1995 ; National Science and Technology Council (NSTC), « Technology for a Sustainable Future. A Framework for Action », Washington, DC, National Science and Technology Council, Report prepared by the Environmental Technology Strategy Staff, White House Office of Science and Technology Policy, juillet 1994 ; National Science and Technology Council (NSTC),

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 127

Trajectoires et grappes technologiques

Les technologies n'apparaissent jamais de manière isolée. Elle se développent, se répandent et évoluent par grappes, par familles interdépendantes, qui suivent des trajectoires technologiques. Ces trajectoires présentent une forte inertie, particulièrement dans le cas des infrastructures, notamment pour les transports. Ces infrastructures ont une durée de vie de l'ordre du siècle et ne peuvent être rapidement renouvelées. De même, il faut plusieurs décennies pour transformer en profondeur les grands systèmes techniques, comme l'extraction minière, les filières du charbon et de l'acier, ou la chimie lourde. Compte tenu de cette inertie, il importe donc d'optimiser le fonctionnement et l'utilisation des infrastructures existantes[66].

Par ailleurs, le facteur crucial concernant l'évolution du système industriel ne réside pas tant dans l'invention de nouvelles technologies que dans leur diffusion, dans le processus de leur « socialisation », c'est-à-dire leur adoption et assimilation à large échelle par les différents acteurs sociaux. Pourtant, l'attention du public se porte presque exclusivement sur la phase initiale de l'invention, laissant dans l'ombre les deux étapes suivantes essentielles, à savoir l'innovation (mise en service d'un prototype de démonstration) et la diffusion (adoption généralisée).

« Bridge to a Sustainable Future.National Environmental Technology Strategy », Washington, DC, National Science and Technology Council, Report prepared by the Interagency Environmental Technologies Office, avril 1995; George Heaton, Robert Repetto et Rodney Sobin, « Transforming Technology : An Agenda for Environmentally Sustainable Growth in the 21st Century », Washington, DC, World Resources Institute, avril 1991; George Heaton, Robert Repetto et Rodney Sobin, « Backs to the Future : US Government Policy Toward Environmentally Critical Technology », Washington, DC, World Resources Institute, juin 1992.

66. Jesse H. Ausubel et H. Dale Langford (éd.), *Technological Trajectories and the Human Environment*, Washington, DC, National Academy of Engineering, National Academy Press, 1997.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 128

D'une manière générale, il existe deux stratégies pour la diffusion des innovations techniques, comme le rappelle Arnulf Grübler[67]. La première promeut des améliorations incrémentales (par petites étapes successives), l'exemple par excellence étant le traitement de la pollution. Les dispositifs *end of pipe* peuvent se répandre rapidement : une douzaine d'années ont suffi pour équiper la plupart des voitures des pays industrialisés d'un catalyseur. Mais ils tendent à renforcer les trajectoires technologiques dominantes, qu'ils améliorent de façon marginale, et contribuent ainsi à empêcher l'adoption d'innovations plus radicales.

L'autre stratégie vise à développer des innovations qui constituent des ruptures par rapport aux systèmes dominants, telles que les piles à combustible ou l'hydrogène comme vecteur énergétique. Mais ces transformations radicales nécessitent du temps, en raison des nombreux changements systémiques en jeu (infrastructures, législations, formation de spécialistes, apprentissage par les usagers).

Le dilemme découle de l'interdépendance structurelle entre les artefacts individuels (voitures, avions, ordinateurs, machines à laver, etc.) et les systèmes qui servent à les produire et permettent de les utiliser. Par exemple, il serait envisageable

67. Sur le problème de la diffusion spatiale et temporelle des technologies, voir les travaux d'Arnulf Grübler, à l'IIASA : Arnulf Grübler, « Time for a change : on the patterns of diffusion of innovation », *in* Jesse H. Ausubel and H. Dale Langford (éd.), *Technological Trajectories and the Human Environment*, p. 14-32, Washington, DC, National Academy Press, 1997 ; Arnulf Grübler, « Industrialization as a Historical Phenomenon », Laxenburg, IIASA Working Paper WP-95-29, mars 1995, 64 p. ; Arnulf Grübler, *The Rise and Fall of Infrastructures. Dynamics of Evolution and Technological Change in Transport* », Heidelberg, Physica Verlag, 1990 ; Arnulf Grübler, « Technology Diffusion in a Long-Wave Context : The Case of the Steel and Coal Industries », *in* T.Vasko, R. Ayres et L. Fontvieille (éd.), *Life Cycles and Long Waves*, Springer-Verlag, 1990, p. 118-146. Sur la notion de trajectoire technologique, voir l'article de base : Giovanni Dosi, « Technological paradigms and technological trajectories. A suggested interpretation of the determinants and directions of technical change », *Research Policy*, vol. 11, 1982, p. 147-162.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 129

de convertir la totalité du parc automobile à l'hydrogène en une trentaine d'années. En pratique, il faudra beaucoup plus de temps, en raison du long délai nécessaire pour la diffusion des installations de production d'hydrogène et des réseaux de distribution, le renouvellement des installations de fabrication des moteurs, ou encore la formation du personnel.

Dans la perspective de l'écologie industrielle, il s'agit de tenter de modifier les trajectoires technologiques existantes et d'en faire apparaître de nouvelles, en fonction des objectifs de l'éco-restructuration. La résolution du dilemme décrit ci-dessus consiste alors à déterminer des étapes intermédiaires économiquement réalisables dans un temps relativement court. Par exemple, dans le cas de l'énergie, en favorisant le passage à une « économie du méthane», comme étape de transition vers une « économie de l'hydrogène ».

Cette stratégie suppose l'orientation du développement technologique en fonction des objectifs désirés. Cette démarche a reçu une attention particulière aux Pays-Bas, sous le nom de Technological Backcasting, qu'on pourrait traduire par le néologisme de « rétrodiction technologique » [68]. Elle consiste à déterminer des objectifs, au terme d'une consultation incluant des spécialistes, l'État, les milieux politiques et les associations de citoyens (par exemple : consommer 25 % de pétrole ou de protéines animales en moins en l'an 2020). Puis on se place dans le futur, comme si ces objectifs étaient atteints. On

68. Trois documents de base sur le programme néerlandais : J. L. A. Jansen et Ph. J. Vergragt, « Sustainable Development : A Challenge to Technology ! », (Proposal for the interdepartemental research programme « Sustainable Technological Development »), Ministry of Housing, Physical Planning and the Environment, The Hague, 10 juin 1992, 81 p. ; R. A. P. M. Weterings et J. B. Opschoor, « The Ecocapacity as a Challenge to Technological Development », Advisory Council for Research on Nature and Environment (RMNO), Rijswijk, The Netherlands, Publication RMNO n° 74a, avril 1992, 43 p. ; Philip J. Vergragt et Leo Jansen, « Sustainable technological development : the making of a Dutch long-term oriented technology programme », *Project Appraisal*, vol. 8, n° 3, septembre 1993, p. 134-140.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 130

«regarde» alors en arrière, pour déterminer le chemin possible pour atteindre ces objectifs. Cette stratégie représente un changement important, pour la politique de la science et de la technologie, par rapport à l'approche traditionnelle non directive, qui consiste principalement à escompter les retombées positives de recherches plus ou moins «fondamentales». La recherche orientée par rétrodiction, du fait qu'elle s'efforce de répondre à des demandes explicitement formulées par les différents acteurs sociaux, se trouve ainsi au cœur du débat sur la maîtrise sociale des dynamiques de production et de diffusion des connaissances scientifiques et technologiques.

L'ingénierie écologique ou écotechnologie

L'ingénierie écologique, ou écotechnologie, constitue un bon exemple d'étape intermédiaire facilitant l'évolution de trajectoires technologiques dans une direction favorable[69]. L'écotechnologie a été explicitement formulée dès le début des années soixante, notamment par l'un des pères fondateurs de l'écologie moderne, l'Américain Howard Odum. Il définit l'écotechnologie comme «la manipulation de l'environnement par l'homme en utilisant de faibles quantités d'énergie supplémentaire pour contrôler des systèmes dans lesquels les principaux flux d'énergie continuent à provenir de sources naturelles» (cité par Mitsch et Jørgensen, 1989, p. 4).

L'écotechnologie repose sur trois concepts principaux:

1. La capacité des écosystèmes naturels à s'auto-organiser (self-designing capacity).

69. William J. Mitsch et Sven Erik Jørgensen (éd.), *Ecological Engineering. An Introduction to Ecotechnology*, John Wiley and Sons, New York, 1989 (Environmental Science and Technology. A Wiley-Interscience Series of Texts and Monographs); William J. Mitsch, «Ecological Engineering. A Cooperative Role with the Planetary Life-Support System», *Environmental Science and Technology*, vol. 27, n° 3, mars 1993, p. 438-445.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 131

2. La conservation des écosystèmes, notamment les écosystèmes apparemment « inutiles », comme les zones humides.

3. L'autosuffisance énergétique (self-sustaining systems) : un écosystème modifié doit fonctionner avec le minimum d'apport énergétique externe, c'est-à-dire autant que possible à partir d'énergie solaire et de ses produits dérivés (biomasse).

L'écotechnologie se préoccupe donc essentiellement de la gestion des écosystèmes naturels tels qu'ils sont modifiés par l'homme, et cela dans une optique très « énergétiste ».

En plus de la gestion, il s'agit également d'utiliser des écosystèmes naturels pour aider à résoudre des problèmes d'origine humaine: par exemple, des zones humides avec une végétation particulière servant à traiter « naturellement » des eaux usées. Les applications principales de l'écotechnologie concernent le contrôle de l'eutrophisation, le traitement des boues d'épuration, le traitement des eaux potables et usées. L'écotechnologie peut également servir à concevoir des systèmes de production intégrés (par exemple l'aquaculture en étang liée à une activité agricole), et, dans cette optique, elle s'apparente à l'écologie industrielle.

Toutefois, l'écotechnologie s'intéresse essentiellement aux écosystèmes naturels plus ou moins modifiés par l'homme. Elle intervient certes dans une optique systémique, mais dans des cas particuliers, localisés, en traitant des problèmes partiels. En revanche, l'écologie industrielle s'intéresse à l'ensemble du système industriel, et cherche à le rendre globalement semblable à un écosystème naturel. L'écologie industrielle et l'écotechnologie présentent donc une certaine complémentarité, surtout dans les problèmes d'interfaces entre des systèmes artificiels et des écosystèmes naturels. L'écotechnologie peut ainsi intervenir dans le cadre d'une stratégie d'écologie industrielle : par exemple en utilisant des marais pour le traitement des eaux usées, etc.

On peut observer que l'écotechnologie s'inscrit dans une très longue tradition chez les ingénieurs d'imitation de la nature,

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 132

particulièrement dans le domaine de la mécanique. De nombreuses inventions techniques s'inspirent de la conformation ou du fonctionnement de certains organes, animaux ou végétaux. Cette démarche se fait généralement dans un souci d'efficacité, voire d'élégance, mais pas nécessairement en rapport avec des problèmes d'environnement. Le « Bio-Design », le design inspiré par les formes organiques, présente un intérêt certain pour réaliser des objets ou élaborer des dispositifs particuliers, mais n'offre aucunement la perspective globale et systémique de l'écologie industrielle[70].

Une trajectoire clé: l'industrie chimique

Parmi les principales trajectoires technologiques, la chimie occupe naturellement l'une des premières places. L'industrie chimique intervient dans la quasi-totalité des produits utilisés dans le système industriel, de l'extraction des ressources minérales aux colorants, en passant par les médicaments et les aliments; elle génère de très grandes quantités de déchets, souvent dangereux, mais elle constitue également l'un des meilleurs potentiels d'utilisation des déchets considérés comme des ressources. Enfin, la biochimie et les biotechnologies peuvent contribuer de manière décisive à son évolution vers ce qu'on pourrait appeler une chimie vraiment fine.

70. Sur le « Bio-Design », voir par exemple: David Wann, *Biologic. Designing with Nature to Protect the Environment*, Johnson Books, Boulder, Colorado, 1994; John Tillman Lyle, *Regenerative Design for Sustainable Development*, New York, John Wiley and Sons, Inc., 1994; Nancy Jack Todd et John Todd, *From Eco-Cities to Living Machines. Principles of Ecological Design*, Berkeley, CA, North Atlantic Books, 1994 (ISBN: 1-55643-150-3); Rutherford H. Platt, Rowan A. Rowntree, Pamela C. Muick (éd.), *The Ecological City. Preserving and Restoring Urban Biodiversity*, Amherst, The University of Massachusetts Press, 1994; Sim van der Ryn et Stuart Cowan, *Ecological Design*, Washington, DC, Island Press, 1996.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 133

L'industrie chimique a une longue histoire de valorisation des déchets, et certains sous-produits ont même donné naissance à des branches entières d'activité. Peter Spitz, dans son ouvrage très documenté sur l'histoire de l'industrie pétrochimique, estime même que le moteur de l'évolution de la chimie organique industrielle a toujours résidé dans la disponibilité de stocks de sous-produits « inutiles », plus que dans le progrès technologique ou les demandes du marché[71]. L'exemple royal du rôle moteur des déchets dans l'histoire de la chimie industrielle reste naturellement le charbon. L'un des déchets les plus abondants au début du XIXe siècle était en effet les résidus de la combustion du charbon, générés en grandes quantités par les usines à gaz produisant du « gaz de ville » pour l'éclairage.

C'est une recherche systématique pour valoriser ces résidus entamée par les chimistes allemands, qui a débouché sur la création de la chimie organique moderne. Les colorants synthétiques à base d'aniline, développés dès 1860, étaient presque tous dérivés de produits chimiques obtenus à partir de goudron de charbon. En 1920, les trois principales sociétés allemandes de la chimie, Bayer, Hoechst et BASF (acronyme de Bayerische Anilin und Soda Fabrik) ont fusionné pour former l'IG Farbenindustrie, le terme « couleurs » (Farben) rappelant leur origine commune.

Autre exemple significatif: dans les années trente, la disponibilité de grandes quantités d'hydrocarbures réactifs issus des raffineries, résultant de l'expansion de l'industrie automobile, a donné naissance en quelques décennies à l'industrie pétrochimique. En fait, jusqu'à récemment, le gaz naturel était considéré comme un simple sous-produit de l'exploitation du pétrole. Bien qu'il ait été utilisé depuis longtemps comme combustible pour le procédé de raffinage et l'éclairage, la plus grande partie était simplement brûlée dans de grandes torchères, une pratique

71. Sur la valorisation des déchets dans l'industrie chimique, voir: Peter H. Spitz, *Petrochemicals – The Rise of an Industry*, John Wiley and Sons, New York, 1988, p. 514.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 134

qui se poursuit dans certaines régions du monde. Le gaz naturel ne connaissait pas d'utilisation chimique significative jusqu'à la Seconde Guerre mondiale, lorsqu'il est devenu la matière de base pour produire l'éthylène, puis le butadiène et le styrène, les principaux ingrédients du caoutchouc synthétique.

On peut déduire de ces exemples historiques qu'une recherche systématique en vue de la valorisation des déchets et de l'optimisation des processus de l'industrie chimique, dans la perspective de l'écologie industrielle, permettrait d'aboutir à une utilisation encore bien plus efficace des énormes flux de matière en jeu. Car, comme l'ont montré Robert Ayres et David Allen pour l'industrie chimique américaine, la proportion et le volume des déchets restent considérables[72].

Leurs études se fondent sur le principe de la conservation de la masse, conformément à l'approche du métabolisme industriel : tous les inputs deviennent nécessairement des outputs, soit sous forme de produits, soit sous forme de déchets. Il faut tenir compte, naturellement, du fait que plusieurs produits chimiques sont utilisés, partiellement ou entièrement, pour synthétiser d'autres produits. Ces produits jouent un rôle crucial, mais généralement méconnu, car ils n'apparaissent jamais sur le marché de la grande consommation.

Selon les estimations de Robert Ayres, la production de substances organiques par l'industrie chimique américaine a atteint 39 millions de tonnes en 1988. Or, les quantités de matières premières utilisées (les inputs) s'élèvent à 59 millions de tonnes. Cette différence trahit une perte de matière considérable: vingt millions de tonnes au moins, soit 35 %. Ce déficit

72. Robert U. Ayres et Leslie W. Ayres, « Aggregate Wastes in the US Chemical Industries », Fontainebleau, INSEAD, Center for the Management of Environmental Resources, Working Paper n° 93/34/EPS, 28 p., mai 1993 ; Robert U. Ayres et Leslie W. Ayres, « Chemical Industry Wastes : A Materials Balance Analysiss », Fontainebleau, INSEAD, Center for the Management of Environmental Resources, Working Paper n° 93/78/EPS, 31 p., novembre 1993 ; David T. Allen et Kirsten Sinclair Rosselot, *Pollution Prevention for Chemical Processes*, New York, John Wiley, 1997.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 135

peut s'expliquer en partie par les différentes étapes, qui n'ont jamais un rendement de 100 % mais, au mieux, de l'ordre de 85-95 %. Il suffit donc de trois à quatre étapes dans la synthèse d'un produit pour que la perte totale dépasse 35 % (cf. références de la note 72).

Les chiffres sont bien plus élevés si l'on considère ce secteur dans son ensemble. La source principale des pertes de l'industrie chimique américaine provient des déchets de concentration des minerais, qui s'ajoutent aux résidus miniers liés à l'extraction. Dans ce domaine, les déchets de loin les plus massifs résultent de la concentration des phosphates: 204 millions de tonnes de déchets solides et 400 millions de tonnes de déchets aqueux aux États-Unis en 1988. Viennent ensuite les déchets de concentration de l'alumine, de l'ordre de 200 millions de tonnes, poids sec.

La deuxième grande catégorie de déchets de l'industrie chimique comprend les matériaux utilisés de manière dissipative durant les processus de fabrication, qui ne se trouvent donc pas incorporés dans les produits. Les principaux exemples sont l'acide sulfurique (trois millions de tonnes sont perdues par an), la soude caustique (5,5 millions de tonnes) et l'acide chlorhydrique (un million de tonnes). En tout, en un an, l'industrie chimique américaine dissipe ainsi quelque 9,5 millions de tonnes de réactifs. Une quantité importante de cette dissipation, mal connue car très difficile à évaluer, consiste en émanations « fugitives », ou émissions volatiles (évaporation, fuites sous forme de gaz, aérosols).

La troisième catégorie de déchets concerne les résidus de processus: les substances n'ayant pas réagi et les résidus de combustion, formant des déchets qui ne sont généralement pas valorisés.

Il existe trois possibilités principales pour diminuer les déchets dans l'industrie chimique :

– améliorer les rendements globaux, notamment en réduisant le nombre d'étapes dans les processus.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 136

– réduire la demande totale de produits chimiques. Cette option découle du constat que la plupart des substances de l'industrie chimique (à l'exception des plastiques structurels) sont inévitablement utilisées de manière dissipative. C'est notamment vrai pour beaucoup de produits intermédiaires, comme les solvants. La seule solution efficace, dans ce cas, consiste à diminuer la consommation de ces produits.

– utiliser les déchets, qui, par définition, n'en sont alors plus. Par exemple, régénérer des solvants ou l'acide sulfurique.

L'industrie chimique, surtout aux États-Unis, a fait grand cas des campagnes de réduction des déchets, lancées au cours des dernières années. En fait, comme le relève David Allen, nous ignorons largement l'efficacité réelle de ces campagnes, car nous ne disposons pas de véritables évaluations cohérentes et indépendantes des performances des entreprises dans ce secteur[73]. Un objectif prioritaire serait donc d'effectuer, de manière aussi indépendante que possible, des études approfondies de métabolisme industriel dans le secteur de l'industrie chimique.

Mieux produire les toxiques

À l'évidence, la production (volontaire ou non) de substances toxiques restera encore longtemps une caractéristique de l'industrie chimique. Dans ces conditions, une première étape serait d'étudier les possibilités de produire ces substances de manière plus intelligente. Or, sur ce plan, les organismes vivants présentent une particularité intéressante. En effet, dans un organisme, les substances toxiques ne sont généralement pas produites en un seul endroit, mais de manière décentralisée, souvent sur le lieu même de leur utilisation. Par exemple, les

73. David T. Allen, «Pollution Prevention: Engineering Design at Macro-, Meso- and Micro Scaless», *Advances in Chemical Engineering*, vol. 19, 1994, p. 251-323.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 137

cytokines, des molécules très puissantes et très toxiques (comme l'interféron), sont synthétisées et sécrétées au lieu et à l'instant où leur action est requise.

On retrouve ce principe de production décentralisée pour un usage immédiat dans une méthode qui connaît depuis peu un regain d'intérêt : la production de substances toxiques à la demande (on-demand) et sur le lieu d'utilisation (on-site). Le concept de base ressemble à celui des armes chimiques binaires : on utilise des précurseurs inoffensifs, dont la réaction génère le produit toxique seulement au moment et à l'endroit voulus. Cette synthèse « à la carte » de produits chimiques toxiques chez l'utilisateur permet de supprimer le stockage et le transport de composés dangereux abondamment utilisés, comme le chlorure de vinyle, le formaldéhyde, le méthylisocyanate, le phosgène et l'hydrazine.

L'entreprise de télécommunications américaine AT & T a développé une telle approche pour la fabrication de l'arsine (AsH_3), une substance gazeuse couramment utilisée dans la fabrication de composants électroniques. Traditionnellement, l'arsine est stockée et transportée dans des cylindres pressurisés. Mais les normes de sécurité concernant ce gaz mortel devenant de plus en plus sévères, le coût des installations de transport et de stockage menaçait de devenir prohibitif. Dans un premier temps, les chercheurs de Bell Labs (AT & T) ont tenté de résoudre le problème en remplaçant l'arsine par des agents peu ou pas toxiques. La recherche de composés moins toxiques ne débouchant sur aucune solution satisfaisante, il fallait envisager une solution plus innovatrice. C'est ainsi qu'AT & T a développé une technique pour produire chez l'utilisateur, à la demande, les quantités d'arsine requises[74].

74. James W. Mitchell, Jorge Luis Valdes et Gardy Cadet, « Benign Precursors for Semiconductor Processings », *AT & T Technical Journal*, vol. 69, n° 6, novembre-décembre 1990, p. 101-112 ; James W. Mitchell, « Alternative starting materials for industrial processess », *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, vol. 89, n° 3, 1er février, 1992, p. 821-826.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 138

La technique est basée sur la synthèse électrochimique du réactif: il s'agit d'une électrode (cathode) d'arsenic métallique, placée dans une cellule électrolytique contenant de l'hydroxyde de potassium. Le dispositif de production à la demande d'arsine a la taille d'un réfrigérateur domestique et se gère comme n'importe quel cabinet de substances toxiques. Il se présente comme une boîte noire: l'utilisateur ne s'occupe de rien, il se contente de l'enclencher lorsqu'il a besoin du produit. À l'intérieur, le précurseur se trouve à l'état solide (en l'occurrence, une électrode d'arsenic), ce qui diminue encore les risques. Il suffit de renouveler l'électrode à intervalles réguliers. Pour l'instant, ce système concerne essentiellement l'industrie des semi-conducteurs: phosphine, hydrure d'antimoine (SbH_3), fluor (F_2), chlore (Cl_2) pour divers types de lasers et de circuits. Mais cette approche vise un champ d'applications beaucoup plus large: on envisage notamment de produire de cette manière de l'eau oxygénée, utilisée pour désinfecter l'eau. On éviterait ainsi de transporter l'eau oxygénée par camion (comme cela se fait actuellement), ce qui éliminerait les risques d'incendie au cas où ce produit très oxydant entrerait par accident en contact avec l'asphalte.

Le procédé utilisé aujourd'hui par AT & T a été développé conjointement avec William Ayers, président de la société Electron Transfer Technology, fondée en 1986 à Princeton (New Jersey). La collaboration a débuté en 1989, et les deux partenaires ont procédé à une licence croisée. William Ayers, qui a travaillé à l'Oak Ridge National Laboratory et à Exxon Research avant de créer sa propre société, a eu l'idée de se lancer dans cette voie à la suite d'une analyse historique. Il avait constaté qu'encore au début de ce siècle, l'industrie chimique était largement décentralisée, disséminée en de nombreuses petites sociétés. Ensuite sont arrivées les grandes compagnies, puis les multinationales, imposant la concentration des moyens de production en des unités de plus en plus grandes, dans le but de réaliser des économies d'échelle.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 139

William Ayers a fait l'hypothèse suivante: avec l'augmentation des coûts entraînés par la réglementation de plus en plus sévère concernant les produits dangereux, la production centralisée finira par devenir trop chère. Il faut donc chercher à la décentraliser, l'idéal étant la production à la demande chez le client[75].

Dans cette optique, l'électrochimie possède de réels atouts: les réactions électrochimiques se déroulent généralement à température et pression ambiantes, ce qui réduit les dangers et diminue les coûts d'infrastructure. Mais cette méthode, du fait des prix relativement élevés de l'électricité, ne convient pas aux grandes usines, qui choisissent de ce fait des techniques de thermochimie nécessitant des températures élevées et des hautes pressions. Pourtant, la thermochimie donne lieu à des réactions moins sélectives, de sorte qu'en produisant le composé C à partir de A et B, on obtient aussi les sous-produits D, E et F (etc.), qu'il faut ensuite séparer, purifier et traiter. En revanche, l'électrochimie est beaucoup plus sélective et produit moins de contaminants.

L'intérêt pour la production électrochimique de substances toxiques dans l'industrie électronique ne date pas d'aujourd'hui, puisque Texas Instruments a déposé le premier brevet concernant cette technique en 1968. Mais il aura fallu attendre qu'apparaissent clairement les limites de l'approche *end of pipe* pour qu'elle amorce un retour en grâce, notamment chez AT & T dans le contexte de l'écologie industrielle. Toutefois, cette évolution remet en cause toute la structure actuelle de l'industrie chimique, de sorte que la dynamique du changement viendra non pas des producteurs traditionnels de composés dangereux, mais des utilisateurs (comme AT & T) soumis à une pression législative et économique croissante.

75. William Ayers, *Arsine Generator System*, Princeton, NJ, Electron Transfer Technologies.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 140

Vers une chimie vraiment fine

Veut-on cesser d'utiliser certains éléments dangereux, comme le chlore? Comment y parvenir, connaissant l'interdépendance des flux de matière? Faut-il renoncer à synthétiser certaines catégories de composés? Comment définir des étapes intermédiaires réalistes pour mettre en œuvre une meilleure chimie? Les tentatives de réponses détaillées à ce genre de questions sont encore balbutiantes, mais il ne fait aucun doute qu'une réflexion approfondie sur le devenir à long terme de l'industrie chimique constitue un volet essentiel de toute réflexion sur l'avenir du système industriel.

L'une des pistes de recherche, qui concerne aussi bien la stratégie de décarbonisation du système énergétique que l'avenir de l'industrie chimique, a trait à l'usage du carbone. Le carbone d'origine fossile (principalement sous forme d'hydrocarbures) est un ingrédient primordial du métabolisme industriel, notamment dans l'important secteur pétrochimique. Si la source d'approvisionnement en carbone se déplaçait en faveur de la biomasse végétale (hydrates de carbone), il en résulterait une évolution majeure de l'industrie chimique vers une meilleure compatibilité avec la Biosphère. Selon Carl Heinrich Krauch, de la société allemande Chemische Huels Werke, l'abondance de combustibles fossiles bon marché a conduit à une chimie «destructive» basée sur des processus de fragmentation (il suffit de songer aux impressionnantes colonnes de distillation des complexes pétrochimiques). En revanche, les sources de carbone basées sur la biomasse conduiraient à une chimie «préservatrice», imitant les conditions dans lesquelles les réactions de synthèse, de transformation et de dégradation se déroulent dans les systèmes biologiques (cf. P. Spitz, op. cit., p. 558-559) [76].

76. Comme indiqué au chapitre précédent, l'Institute for Local Self-Reliance, à Washington, s'est particulièrement intéressé à la filière des hydrates de carbone (voir les références de la note 64, p. 123). Voir une synthèse du Département de l'agriculture américain: Lawrene Glaser et Gregory Gajewski (éd.), «Situation

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 141

Évidemment, de nombreuses autres voies pourront contribuer à l'inflexion des trajectoires technologiques de la chimie dans l'optique de l'écologie industrielle. Un programme lancé aux États-Unis en 1992 par la National Science Foundation et le Council for Chemical Research, Inc., intitulé «Synthèse et procédés chimiques environnementalement bénins», donne une bonne idée de quelques pistes de recherche possibles[77] :

– nouvelles méthodes pour produire à la demande et sur le lieu d'utilisation des intermédiaires toxiques utilisés dans les processus de fabrication actuels (exemple traité plus haut à propos de l'électrochimie dans l'industrie des semi-conducteurs) ;

– nouvelles méthodes pour la synthèse et le traitement chimique à basse température et consommant peu d'énergie (voir ci-après le rôle des biotechnologies) ;

– nouveaux catalyseurs hautement sélectifs pour accroître le rendement des produits et réduire la formation de sous-produits ;

– technologies de séparation consommant peu d'énergie pour la purification et le recyclage des matières premières ;

– membranes et «cages» moléculaires hautement sélectives pour augmenter la spécificité des réactions ;

– voies de synthèse qui court-circuitent les étapes où l'on utilise des matières premières toxiques ainsi que des solvants chlorés et azotés ;

and Outlook Reports», *Industrial Uses of Agricultural Materials*, Premier Issue, United States Department of Agriculture, Economic Research Service, juin 1993.

77. Henry A. McGee Jr., Margaret A. Cavanaugh et Frederick C. Leavitt, «Environmentally Benign Chemical Synthesis and Processing. Research on Pollution. Prevention at its Sources», Prospectus, Washington, DC, National Science Foundation and Coucil for Chemical Research, Inc., 1991, 4 p. La première «Green Chemistry & Engineering Conference» s'est déroulée à Washington, DC, du 23 au 25 juin 1997. Pour un compte rendu de cette conférence, voir Sophie L. Wilkinson, «Green Is Practical, Even Profitables», *Chemical and Engineering News*, 4 août 1997, p. 35-43.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 142

– nouvelles méthodes de traitement des sous-produits, permettant d'éliminer la production d'aérosols de taille micronique, difficiles à capturer ;

– voies de synthèse chimique différentes, qui éliminent ou combinent des étapes des processus actuellement utilisés, aboutissant à une réduction nette des polluants.

Tous ces thèmes se trouvent à la portée directe de la recherche actuelle. À plus long terme, une chimie vraiment fine et subtile reposerait sans doute largement sur des méthodes et des technologies aujourd'hui en gestation, comme l'«économie atomique». L'économie atomique part du constat que des efforts considérables ont été réalisés pour trouver des réactions permettant d'obtenir exactement les produits voulus, mais sans accorder assez d'importance à l'aspect quantitatif. L'accent portait essentiellement sur la sélectivité de la réaction, afin d'aboutir à des produits extrêmement purs. Il s'agit aujourd'hui de franchir le pas suivant : veiller à ce que le plus grand nombre possible d'atomes composant les réactifs de départ se retrouvent sous une forme utile dans les produits finaux de la réaction, prévenant à la source la formation de déchets[78].

Le potentiel des biotechnologies

Les biotechnologies offrent un potentiel important pour rendre le système industriel plus compatible avec la Biosphère. On aurait beaucoup à gagner en s'inspirant du métabolisme des organismes biologiques, qui diffère des processus industriels notamment par le fait que les réactions biochimiques se déroulent à température et à pression ambiantes. Les usages possibles

78. Barry M. Trost, « The Atom Economy – A Search for Synthetic Efficiencys », *Science*, vol. 254, 6 décembre 1991, p. 1471-1477 ; Barry M. Trost, « Atom Economy – A Challenge for Organic Synthesis : Homogenous Catalysis Leads the Ways », *Angewandte Chemie International English Edition*, vol. 34, n° 3, 1995, p. 259-281 ; Maureen Rouhi, « Atom economical reactions help chemists eliminate wastes », *Chemical and Engineering News*, 19 juin, 1995, p. 32-35.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 143

des biotechnologies abondent : catalyses très spécifiques ; séquestration, concentration et dégradation de substances toxiques et de déchets ; production à température et pression ambiantes de matériaux divers[79]. Les biotechnologies pourraient jouer un rôle particulièrement important dans l'industrie minière, pour l'extraction, la concentration et le traitement des minerais à l'aide de micro-organismes[80]. Dans le domaine de l'énergie, on envisage la production d'hydrogène à partir de la biomasse, par dégradation enzymatique des hydrates de carbone. Selon les estimations d'une équipe travaillant sur un tel procédé, on pourrait ainsi générer plus d'un milliard de m^3 d'hydrogène rien qu'à partir des 7,26 millions de tonnes de cellulose contenues dans les vieux papiers mis au rebut aux États-Unis en 1995. Cette quantité d'hydrogène suffirait pour subvenir à la consommation équivalente en gaz naturel d'une trentaine de villes de 25 000 habitants[81].

Le génie génétique permet également d'explorer une approche du plus haut intérêt pour l'écologie industrielle : le « génie métabolique » (metabolic engineering), c'est-à-dire l'optimisation des fonctions métaboliques, notamment chez les micro-organismes, selon les performances recherchées[82]. Sans recourir à des techniques aussi sophistiquées, des micro-organismes naturels, même morts, peuvent également rendre de

79. Stephen M. Edgington, « Industrial Ecology : Biotech's Role in Sustainable Development », *Bio/Technology*, vol. 13, n° 1, janvier 1995, p. 31-34.
80. Alan H. Goldstein, Robert D. Rogers et Gerald Mead, « Mining by Microbe. Separating phosphate from ores via bioprocessing », *Bio/Technology*, vol. 11, n° 11, novembre 1993, p. 1250-1254 ; Anne Simon Moffat, « Microbial Mining Boosts the Environment, Bottom Line », *Science*, vol. 264, 6 mai 1994, p. 778-779 ; Douglas E. Rawlings and Simon Silver, « Mining with Microbes », *Bio/Technology*, vol. 13, n° 8, août 1995, p. 773-778.
81. Jonathan Woodward, Susan M. Mattingly, Michael Danson, David Hough, Nicholas Ward et Michael Adams, « *V*itro hydrogen production by glucose dehydrogenase and hydrogenase », *Nature Biotechnology*, vol. 14, juillet 1996, p. 872-874.
82. James E. Bailey, « Towards a Science of Metabolic Engineering », *Science*, vol. 252, 1991, p. 1668-1675.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 144

grands services : par exemple, le Centre de recherches pour le développement international (Ottawa) finance en Chine le développement d'une méthode de traitement des eaux industrielles par l'adsorption de métaux lourds à la surface de bactéries mortes, elles-mêmes produites comme déchet de fabrication pharmaceutique[83].

Depuis quelques années, l'approche biomimétique, qui vise de manière générale à mettre au point des processus directement inspirés de la biochimie, fait l'objet d'une polémique plus ou moins ouverte dans les milieux de la chimie. Plusieurs industriels ont laissé entendre que la voie biomimétique n'avait guère de chances de dépasser le stade de curiosités de laboratoire. Ces arguments, indépendamment de leur éventuelle validité scientifique, s'expliquent largement par le fait que cette nouvelle approche nécessiterait un remaniement important des industries de transformation et de tout le secteur de la chimie[84].

Les écosystèmes microbiens artificiels

L'un des apports les plus intéressants des biotechnologies à l'écologie industrielle proviendra sans doute des recherches actuelles sur les écosystèmes microbiens artificiels[85]. Les travaux dans ce domaine ont pour origine les problèmes de survie posés par les futures missions spatiales de très longue durée. Depuis

83. Bohumil Volesky, Xao-Ting Yu et Jinhua Wang, «Biosorbents: Use of Waste Product to Clean Up Another», Ottawa, International Development Research Centre, Project n° 92-1008, 16 pages, 1992.
84. Stu Borman, «Chemical Engineering Focuses Increasingly on the Biological», *Chemical and Engineering News*, 11 janvier 1993, p. 26-36; Richard L. Hinman, «A Role for Biotech in Producing Chemicals?», *Bio/Technology*, vol. 9, juin 1991, p. 533-534.
85. Clair E. Folsome et Joe A. Hanson, «The Emergence of Materially-closed-system Ecology», *in* Nicholas E. Polunin (éd.), *Ecosystem Theory and Application*, New York, John Wiley and Sons, 1986, p. 269-288; Jean-Bernard Gros, Christophe Lasseur et Willy Verstraete, «Melissa: écosystème ou unité de recyclage des déchets?», *Biofutur*, septembre 1994, p. 35-39.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 145

longtemps, on sait recycler indéfiniment l'air et l'eau dans les vaisseaux spatiaux, au moyen de techniques physico-chimiques. À long terme, c'est la nourriture qui constitue le véritable facteur limitant.

Pour le comprendre, il suffit de considérer une hypothétique mission vers la Lune avec le lanceur russe Energia, la fusée la plus puissante actuellement. Energia peut certes placer cent tonnes en orbite terrestre, mais elle ne peut acheminer que douze tonnes à la surface de la Lune. Sur ces douze tonnes, il faut en réserver sept, sous forme de carburant, nécessaires pour permettre au module lunaire de repartir vers la Terre. Il reste donc cinq tonnes de charge utile en tout, y compris l'équipage. Or, si l'on compte vingt kilos par jour et par personne en nourriture, eau et oxygène, il faudrait 7,5 tonnes de biens «consommables» pour permettre à un équipage de quatre cosmonautes de séjourner un an sur la Lune, soit plus que la totalité de la charge utile.

Dans ces conditions, les projets de missions spatiales se déroulant sur plusieurs années avec des équipages nombreux semblent sérieusement hypothéqués. Il ne reste donc qu'une solution: produire la nourriture à bord, en recyclant intégralement les résidus du métabolisme de l'équipage. Ces déchets, décomposés par des souches microbiennes soigneusement sélectionnées, serviraient de substrat pour la croissance de bactéries, d'algues unicellulaires, voire de végétaux supérieurs.

Les États-Unis semblent n'avoir jamais sérieusement envisagé une telle approche microbiologique. En revanche, cette voie est explorée depuis longtemps en URSS, notamment par Joseph Gitelson, à l'Institut de biophysique de la branche sibérienne de l'Académie russe des sciences, à Krasnoiarsk. Plus récemment, des travaux ont commencé dans ce domaine au Japon (groupe du Prof. Keiji Nitta, Institute for Environmental Sciences, Aomoriken, Tokyo), et dès 1988 en Europe, d'abord chez Matra, puis au sein de l'Agence spatiale européenne (ESA) par le biais d'un programme nommé Melissa (Micro-

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 146

Ecological Life Support System Alternative). Christophe Lasseur, un ingénieur électronicien, coordonne ce programme depuis le Centre technique ESTEC de l'ESA, à Noordwijk (Hollande). Les installations expérimentales se trouvent à l'Université de Barcelone[86].

Le concept Melissa comporte en tout cinq « compartiments » : le compartiment « consommateur » (V), c'est-à-dire l'habitacle où vit l'équipage, et un système de quatre petits réacteurs biologiques classiques. La figure ci-dessous donne un schéma de principe de Melissa, avec les cinq compartiments.

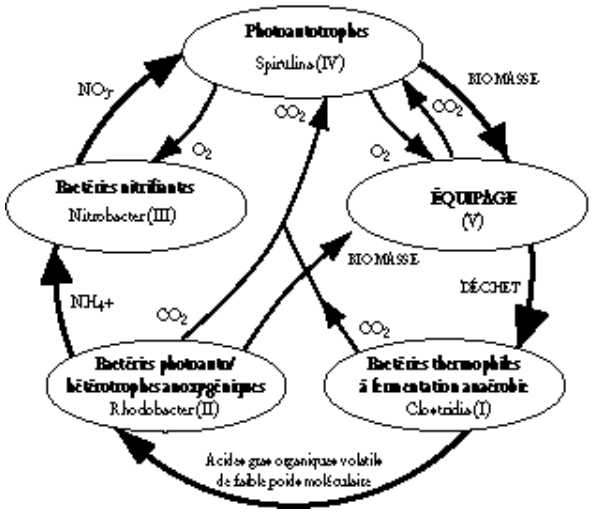

Fig. 6 : Schéma de principe d'un écosystème microbien artificiel (source : Christophe Lasseur, Agence spatiale européenne).

86. Christophe Lasseur, « Melissa – A Model of an Artificial Ecosystem », Preparing for the Future – ESA's Technology Programme, vol. 4, n° 1, mars 1994, p. 12-13 ; Christophe Lasseur (éd.), *Melissa – Final Report for 1995 Activity*, Noordwijk, NL, ESA/EWP-1885, ESA. ESTEC YCV/1907.CHL, avril1996.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 147

Le premier réacteur, nommé « compartiment liquéfacteur » (I), renferme des bactéries strictement anaérobies (absence complète d'oxygène), qui assurent la dégradation des déchets liquides et solides (papier, fèces, urine, etc.).

Ces souches bactériennes scindent les sucres, les protéines et la cellulose, pour donner une « soupe » riche en acides gras volatils, ammoniaque ($NH_4{}^+$), hydrogène, gaz carbonique et minéraux. Le recours à des souches anaréobies strictes dans cette première étape permet d'économiser du précieux oxygène, qui serait sinon gaspillé pour servir au métabolisme des bactéries. Surtout, l'astuce de ce compartiment, grâce à un réglage fin de la température et de l'acidité, consiste à éviter la formation de méthane. En effet, il importe d'éviter de générer du méthane dans un tel écosystème artificiel : il séquestrerait du carbone (qui ne serait plus disponible pour générer de la biomasse), et le brûler reviendrait à consommer inutilement de l'oxygène.

Le mélange passe ensuite dans le deuxième compartiment (II). Celui-ci est «anoxygénique», c'est-à-dire non strictement anaérobique car il tolère une faible teneur en oxygène. Dans ce compartiment, des micro-organismes utilisant également la lumière comme source d'énergie métabolisent les produits de dégradation provenant du premier compartiment: ces derniers sont transformés en protéines microbiennes ayant une valeur nutritive, et qui peuvent donc être utilisées comme une première source d'aliments. Ce second compartiment génère également du gaz carbonique et de l'ammoniaque, utilisés dans les compartiments suivants.

Le troisième réacteur, nommé «compartiment nitrificateur» (III), a pour principale fonction de convertir l'ammoniaque en azote assimilable par des végétaux (nitrates). Dans son principe, ce procédé de nitrification est similaire à celui utilisé dans les stations d'épuration des eaux usées.

La dernière étape du cycle avant le retour aux consommateurs, c'est le « compartiment photosynthétique » (IV), qui assure les deux fonctions les plus cruciales pour l'équipage : la

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 148

production d'oxygène, et la production de nourriture. La nourriture, pour l'instant, consiste en une algue microscopique bien connue, *Spirulina platensis*, mais rien n'interdit d'envisager ultérieurement de cultiver des légumes et d'autres végétaux supérieurs.

Actuellement, le taux de recyclage obtenu par le système expérimental Melissa atteint environ 40 %, ce qui est considéré comme un bon résultat, mais qui devrait encore s'améliorer. Le temps de circulation de la matière dans la boucle Melissa est d'environ une semaine.

On peut tirer trois conclusions principales du programme de recherche Melissa dans la perspective de l'écologie industrielle :

1. Bien que le programme Melissa ait été conçu pour les vols spatiaux habités de longue durée, les applications terrestres apparaissent très prometteuses. De tels écosystèmes artificiels pourraient servir à traiter des déchets organiques de manière décentralisée, tout en produisant de l'eau pure, de l'oxygène et de la nourriture (cette piste est actuellement explorée au Japon pour le traitement de l'eau). À plus grande échelle, des groupes industriels, comme la Compagnie générale des eaux, s'intéressent de près au projet Melissa, surtout dans la mesure où des perfectionnements rendraient possible l'extraction de contaminants en milieu aqueux, tels que des métaux lourds (en ajoutant des compartiments munis de membranes sélectives).

2. Ce système de recyclage constitue une réponse, au moins partielle (et en l'occurrence littérale), à une question posée par Robert Frosch : « Quel serait l'équivalent industriel des organismes décomposeurs ? » En l'espèce, les décomposeurs proviennent de la Biosphère, mais ils sont sélectionnés et cultivés dans des conditions déterminées par l'homme. Le système permet de contrôler exactement les déchets entrants ainsi que les sous-produits et produits sortants, en jouant notamment sur les conditions de température et d'acidité. De plus, grâce au génie génétique, on peut obtenir des souches bactériennes possédant

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 149

des propriétés très particulières, inconnues dans les écosystèmes naturels[87].

3. Pour l'industrie, l'aspect le plus pertinent du programme Melissa réside en fait dans les modèles mathématiques qui décrivent les dynamiques de croissance des bactéries dans les différents compartiments. Le système est tout à fait explicite, ce qui permet de contrôler l'évolution des populations bactériennes en connaissance de cause. Ces modèles mathématiques présentent un intérêt majeur pour les industriels de la biotechnologie, principalement pour optimiser le pilotage des bioréacteurs, en particulier dans le cas de plusieurs bioréacteurs couplés. La partie la plus ardue de la recherche a précisément consisté à établir les équations décrivant le comportement des différentes populations bactériennes, sur la base de multiples expérimentations confrontées à de délicats problèmes d'acquisition des données.

Il est intéressant de noter, à propos de l'expérience Melissa, que l'un des apports les plus intéressants des sciences biolo-

87. Dans les écosystèmes biologiques, la fonction de recyclage s'opère essentiellement grâce aux micro-organismes décomposeurs, dont le métabolisme dégrade les substances jusqu'au niveau élémentaire des atomes et des molécules. Dans leur article initial de 1989, Robert Frosch et Nicholas Gallopoulos se demandent quel serait l'équivalent des décomposeurs dans un écosystème industriel. Les écosystèmes artificiels à base de micro-organismes sélectionnés et modifiés constituent, comme dans le cas de Melissa, une première possibilité. Une solution plus «mécanique» pourrait être l'extraction catalytique par métal fondu. Cette technologie, développée par la société Molten Metal Technologies (MMT), près de Boston, visait au départ principalement le traitement des déchets radioactifs, mais elle peut s'appliquer à tous les types de déchets. Le principe consiste à plonger les substances que l'on veut dégrader dans un réacteur où se trouve un bain de fer fondu, qui joue le rôle de catalyseur. Toute substance introduite dans ce bain métallique à plus de 1500 degrés C se trouve réduite à ses plus simples composants (atomes ou très petites molécules). Les «déchets ultimes» sont ainsi rendus inertes. Surtout, en jouant sur les paramètres de la réaction, il est possible de dégrader et d'extraire sélectivement certaines substances, qui deviennent alors des «matières premières» commercialisables (site Internet: www.mmt.com).

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 150

giques à l'écologie industrielle résulte d'une démarche parfaitement analytique. Ce point mérite d'être relevé, afin d'éviter toute confusion entre l'écologie industrielle et les sempiternelles invocations à une vague « vision holistique » (mêlant allègrement chaos, complexité et fractales, selon la dernière mode new age postmoderne). Car, s'il est vrai que l'écologie industrielle trouve son point de départ dans une vision globale du système industriel, les approches analytiques rigoureuses n'en demeurent pas moins nécessaires.

Nanotechnologies et fabrication moléculaire

Depuis des millénaires, l'humanité fabrique des objets selon un principe qui n'a pas réellement varié : la soustraction. Il s'agit toujours, d'une manière ou d'une autre, de soustraire de la substance, de dégrossir, d'enlever de la matière. On commence par la concentration, le raffinage, la fonte, la distillation des matières premières (minerais, pétrole). Puis il faut limer, fraiser, tourner, polir, etc., pour obtenir finalement des objets manufacturés. La synthèse de produits chimiques ne fait guère mieux : on chauffe, on mélange, on brasse, puis les atomes et les molécules se recombinent au hasard des collisions, et, enfin, on purifie tant bien que mal.

Toutes ces opérations génèrent une proportion importante de déchets, résultant inévitablement de la nature même de la méthodologie soustractive. De plus, nous avons toutes les peines du monde à valoriser ces déchets, notamment parce que nous n'en maîtrisons pas la composition ni les propriétés. Nous opérons à une échelle très grossière, et même ce que nous appelons aujourd'hui la «fabrication de précision» n'est encore, en réalité, que de la manipulation à l'aveuglette de fragments plus ou moins gros de matériaux. Nous manipulons des atomes et des molécules en vrac, sans pouvoir éviter qu'une bonne partie ne se retrouve au mauvais endroit et au mauvais moment : ce

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 151

pourrait être une manière de définir la pollution. Le problème découle donc du fait que nous ne savons pas encore travailler la matière à l'échelle atomique et moléculaire.

À l'inverse, le jour où il sera possible de maîtriser la matière à l'échelle du nanomètre, voire du dixième de nanomètre (celle des molécules et des atomes), la situation changera complètement. Grâce aux nanotechnologies, on pourra fabriquer des objets par addition, c'est-à-dire en ajoutant les uns aux autres les atomes et molécules voulus (et uniquement ceux-ci), et à l'emplacement exactement souhaité. Du coup, la notion même de déchets de fabrication disparaît. Les impacts de la consommation devraient être également moins problématiques : les technologies de fabrication à l'échelle atomique et moléculaire permettront de minimiser considérablement les pertes dissipatives, et de maîtriser la dégradation ou le recyclage des produits en fin de vie.

Nous n'en sommes pas encore là, mais la percée au début des années quatre-vingt des «microscopes à sonde locale» (microscope à effet tunnel, microscope à force atomique), grâce auxquels on peut visualiser et manipuler directement des atomes individuels, permet d'affirmer que les nanotechnologies et la fabrication moléculaire relèvent déjà de la prospective à moyen terme, et non de l'utopie[88].

88. K. Eric Drexler, Chris Peterson et Gayle Pergami, *Unbounding the Future. The Nanotechnology Revolution*, New York, William Morrow, 1991 ; K. Eric Drexler, *Nanosystems : Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation*, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1992 ; K. Eric Drexler, « Testimony before the Subcommittee on Science, Technology, and Space, United States Senate », 26 juin 1992, *in* Albert Gore (éd.), *New Technologies for a Sustainable World*, Washington, DC, US Government Printing Office, 1992, p. 20-27 ; Heinrich Rohrer, « The Nanometer Age : Challenge and Chance », *Il Nuovo Cimento*, vol. 107 A, n° 7, juillet 1994, p. 989-1000 (Paper presented at the « 9th European Physical Society General Conference Trends in Physics », Florence, 14-17 septembre, 1994) ; Max Nelson et Calvin Shipbaugh, *The Potential of Nanotechnology for Molecular Manufacturing*, Santa Monica, CA, RAND, MR-615-RC, 1995 ; Ed. Regis, *Nano. The emerging science of nanotechnology : remaking the world – molecule by molecule*, Boston, Little, Brown and Company, 1995.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 152

Des artefacts autonomes

La faisabilité de la fabrication à l'échelle du nanomètre suppose que nous disposions de « nano-outils », et notamment de « nanorobots », eux-mêmes de taille moléculaire. Étant donné l'impossibilité de fabriquer un à un les trillions de nanorobots nécessaires, il faudra qu'ils se fabriquent eux-mêmes, par un processus d'autoréplication semblable aux organismes vivants. Tel est l'enjeu des recherches actuelles sur les automates autoreproducteurs, commencées avec les travaux de John Von Neumann dans les années quarante, et qui connaissent depuis une dizaine d'années une certaine effervescence sous le nom de « vie artificielle». Ces recherches ne concernent, pour l'instant, que des programmes informatiques capables de se dupliquer, d'apprendre et d'évoluer par eux-mêmes. Mais rien n'interdit de penser que, dans un avenir pas très lointain, ces programmes seront couplés de manière effective à des substrats matériels ad hoc. Nous verrons alors l'émergence de dispositifs physiques autonomes et capables de s'autoreproduire[89].

Parallèlement, des recherches se poursuivent dans le domaine de l'intelligence collective. Dans de nombreuses situations, en effet, il faudra recourir à des populations de robots

89. Pour une introduction à la vie artificielle et aux systèmes autoreproducteurs, voir Ralph C. Merkle, « Self Replicating Systems and Molecular Manufacturing », *Journal of the British Interplanetary Society*, vol. 45, p. 407-413 ; Christopher G. Langton, « Artificial Life », *in* Christopher G. Langton (éd.), *Artificial Life*, Addison-Wesley Publishing Company, 1989, p. 1-47 ; une synthèse en français : Julio Fernandez Ostolaza et Alvaro Moreno Bergareche, *La Vie artificielle*, Paris, éd. du Seuil, 1996. On aurait tort, toutefois, de succomber à la fascination des seuls nanorobots autoreproducteurs. Les nanotechnologies vont également tirer profit de développements en science des matériaux (matériaux doués de propriétés d'auto-assemblage) et en chimie (mise au point de molécules autoréplicatives). Sur les matériaux à auto-assemblage, voir par exemple : S.I. Stupp *et al.*, « Supramolecular Materials : Self-Organized Nanostructures », *Science*, vol. 276, 18 avril 1997, p. 384-389 ; Douglas Philp et J. Fraser Stoddart, « Self-Assembly in Natural and Unnatural Systems », *Angewandte Chemie International English Edition*, vol. 35, 1997, p. 1154-1196.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 153

mobiles: par exemple pour le nettoyage de vastes surfaces, mais surtout lors des opérations d'extraction et de tri dans les décharges ou dans divers flux ou stocks de déchets hétérogènes. Or, le tri et la séparation des déchets ne pourront se faire de façon économique, vraiment fiable et à grande échelle, que de manière automatisée.

Pour être réellement efficaces, ces robots devront se comporter de manière collectivement intelligente: en communiquant par radio (ou par infrarouge, etc.), ils rationaliseront leur travail, par exemple en se regroupant selon les besoins et l'état d'avancement des tâches imparties. Autrement dit, des populations de robots agissant collectivement seront capables d'accomplir des tâches bien plus complexes que celles que des robots peuvent effectuer isolément, à l'image de ce que l'on constate dans les sociétés animales et humaines. D'où l'idée, activement poursuivie actuellement, de s'inspirer de l'étude des insectes sociaux pour mettre au point des robots individuellement «simples», mais s'intégrant dans des systèmes capables de réaliser collectivement des tâches complexes, sans qu'il soit nécessaire ni pertinent de s'engager dans des voies de recherche trop ardues, comme l'imitation directe de l'intelligence humaine[90].

On ne saurait trop insister sur l'importance de l'enjeu que représente actuellement la convergence des domaines des nanotechnologies et de la vie artificielle. L'avènement prévisible, dans un avenir relativement proche, de dispositifs

90. David McFarland, «Towards Robot Cooperation», *in* Dave Cliff, Philip Husbands, Jean-Arcady Meyer et Stewart W. Wilson (éd.), *From animals to animats 3*, Proceedings of the Third International Conference on Simulation of Adaptative Behavior, Cambridge, MA, The MIT Press, 1994, p. 440-444; Jean-Louis Deneubourg, Paul-Louis Clip et S. Scott Camazine, «Ants, Buses and Robots. Self-Organization of Transportation Systems», *in* P. Gaussier et J.-D. Nicoud (éd.), *From Perception to Action*, IEEE Computer Society Press, 1994, p. 12-23; Hajime Asama, «Operation of Cooperative Multiple Robots Using Communication in a Decentralized Robotic System», *in* P. Gaussier et J.-D. Nicoud (éd.), *From Perception to Action*, IEEE Computer Society Press, 1994, p. 36-46.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 154

physiques bien réels, autonomes, autoreproducteurs et «intelligents» constituerait une révolution radicale.

En un sens, une telle révolution s'inscrirait fort bien dans la perspective de l'écologie industrielle, car la vie peut elle-même être considérée comme une sorte de nanotechnologie, dans la mesure où les processus vivants se déroulent à l'échelle atomique et moléculaire. Le système industriel, vu comme une excroissance évolutive de la Biosphère, ne ferait qu'acquérir l'une des propriétés fondamentales de la matière vivante (la capacité d'autoréplication). De plus, en opérant de manière contrôlée à l'échelle des atomes et molécules, les activités industrielles seraient alors commensurables aux processus fondamentaux qui régissent le fonctionnement des organismes vivants et de la Biosphère.

La diffusion à grande échelle d'artefacts autoreproducteurs marquerait ainsi le début d'une nouvelle phase de la coévolution de la Biosphère et de l'espèce humaine. Il serait urgent de tenter d'en évaluer dès aujourd'hui les conséquences économiques, politiques, militaires et sociales[91].

Toutefois l'évocation de trajectoires technologiques, comme la chimie, les biotechnologies ou les nanotechnologies, ne devrait pas conforter une vision sectorielle et segmentée du développement technologique. Dans la perspective de l'écologie industrielle, on gagnerait à raisonner en termes de fonctions (ou «fonctionnalités»), au lieu d'élaborer sans fin diverses listes de technologies « critiques », « vertes » et « propres ».

Les trajectoires technologiques prioritaires (pas nécessairement « high tech ») seraient ainsi celles optimisant quelques fonctions cruciales: le design, la réutilisation, la remise en état,

91. BC Crandall et James Lewis (éd.), *Nanotechnology. Research and Perspectives*, Cambridge, MA, The MIT Press, 1992; BC Crandall (éd.), *Nanotechnology. Molecular Speculations on Global Abundance*, Cambridge, MA, The MIT Press, 1996; Kevin Kelly, *Out of Control. The New Biology of Machines*, London, Fouth Estate Ltd., 1994.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 155

le tri sélectif, bref, toutes les options technologiques permettant de minimiser les pertes dissipatives, de ralentir et de boucler autant que possible les flux de matière, de décarboniser l'énergie. Cette approche suppose une réflexion sur l'évolution à long terme du système industriel, telle qu'elle se poursuit aujourd'hui de manière particulièrement systématique au Japon[92].

92. Hiroyuki Yoshikawa, «Manufacturing and the 21st Century – Intelligent Manufacturing Systems and the Renaissance of the Manufacturing Industry», *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 49, n° 2, juin 1995, p. 195-213 [Special Issue: Japan Confronts the 21st Century]; Yumi Akimoto, «A New Perspective on the Eco-Industry», *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 49, n° 2, juin 1995, p. 165-173 [Special Issue: Japan Confronts the 21st Century]; Hiedo Inoue, «Ecofactory. Concept and R and D Themes», *New Technology Japan*, Special Issue. Tokyo, Japan External Trade Organization (JETRO), Machinery and Technology Division, 1992.

7.
La richesse d'utilisation

Depuis deux siècles, le système industriel ne cesse de se perfectionner, dans le but d'optimiser la production: toujours plus de matériaux, toujours plus d'objets, toujours plus de produits.

Aujourd'hui, le moment semble venu de perfectionner le système industriel, non plus principalement pour la production et la vente d'objets neufs, mais pour la fourniture de prestations de qualité, c'est-à-dire pour une véritable société de services, où l'utilisation optimale des ressources et des biens serait génératrice de richesse. L'écologie industrielle se doit de prendre en compte ce renversement de perspective, sinon elle risque de rester prisonnière du paradigme productiviste traditionnel.

Un exemple concret, celui de Xerox, permet de saisir immédiatement ce dont il s'agit. Xerox a renoncé à produire des photocopieurs «neufs», au profit d'une stratégie de «refabrication» (*remanufacturing*), qui optimise la vente d'un service (des photocopies de qualité) plutôt que la production de machines à photocopier.

Les photocopieurs Xerox en service sont contrôlés, au cours de visites d'entretien régulières chez les clients, par des agents techniques polyvalents, qui peuvent effectuer sur place les petites interventions nécessaires (nettoyage, etc.). Le cas

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 158

échéant, les composants sont emmenés dans l'atelier le plus proche, puis réparés et remis dans un photocopieur, mais pas nécessairement celui dont ils provenaient. Au fur et à mesure de l'évolution technologique, on remplace certains éléments devenus obsolètes par des composants à la pointe de la technique, sans pour autant modifier le reste de l'appareil. Mais, en règle générale, on expédie les machines entières dans un centre de désassemblage et de refabrication.

Autrement dit, la notion de « photocopieur » en tant que produit monolithique s'estompe : elle fait place à un système fonctionnel résultant de l'assemblage de différents composants, où la durabilité et l'intensité d'utilisation de chacun est optimisée. Il n'existe donc plus de machine neuve à proprement parler. En fait, le concept même de « produit neuf » disparaît.

Depuis quatre ans, Xerox met ainsi en pratique cette approche, dans laquelle le point de départ du processus économique n'est pas la production de matériel neuf, qui ne représente plus qu'un appoint occasionnel, mais l'entretien des appareils déjà en service. Le plus intéressant, c'est que cette méthode s'avère rentable : aux États-Unis, Xerox a reconnu avoir économisé 50 millions de dollars la première année (1992) sur les achats de matières premières, frais de logistique et d'inventaire; et l'économie s'élèverait à 100 millions de dollars pour 1993. Xerox a également commencé à tester cette stratégie en Europe, où elle est coordonnée par son usine de Venray, dans le sud de la Hollande. D'abord installé en 1993 dans un hangar provisoire, le « Rank Xerox Asset Recovery Centre » de Venray a emménagé deux ans plus tard dans un grand centre de désassemblage et de refabrication. Il approvisionne l'usine d'assemblage voisine, où l'on utilise aussi bien des pièces neuves que des composants « refabriqués » (nettoyés, réparés, ré-usinés, etc.) pour fabriquer des photocopieurs.

À l'usine de Venray, cela coûte de 50 à 100 dollars (suivant le modèle) pour fabriquer une cartouche neuve de photocopieur laser, pour un temps de fabrication de douze minutes.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 159

Mais pour «refabriquer» une telle cartouche, cela coûte nettement moins: de 25 à 50 dollars; en revanche, le temps nécessaire à l'opération atteint vingt minutes. Autrement dit, le coût diminue mais la quantité de travail augmente. On se trouve ici dans un cas de figure idéal: la consommation de matière diminue (ainsi que les coûts induits par les stocks de composants neufs, les transports, etc.), mais le nombre d'emplois qualifiés se maintient, voire s'accroît.

L'exemple de Xerox conduit à des considérations plus générales sur ce que l'on peut appeler la «société d'utilisation» (en anglais *functional economy*). On peut énoncer la thèse fondamentale de la société d'utilisation de la manière suivante: il est possible de dissocier l'augmentation de la richesse et l'accroissement de la production. Pour réaliser cet objectif, la stratégie de base consiste à optimiser l'utilisation à long terme des biens, au lieu de maximiser la production et la vente de produits à courte durée de vie.

Le système économique actuel repose sur un dogme productiviste, partagé par la gauche comme par la droite : la richesse dépend directement de l'augmentation de la production. Tout le système industriel est organisé pour accroître la productivité. Exprimé dans le langage des économistes, le problème central réside dans la rigidité de l'offre. L'un des premiers auteurs à avoir exploré les implications de la remise en cause du dogme productiviste est un consultant suisse, Walter Stahel, architecte de formation, qui a développé ces idées durant les années soixante-dix, avant de créer l'Institut de la durée, à Genève[93].

93. O. Giarini et W. R. Stahel, *The Limits to Certainty. Facing Risks in the New Service Economy*, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1993 (2e édition); W. R. Stahel et G. Reday-Mulvey, *Jobs for Tomorrow. The Potential for Substituting Manpower for Energy*, New York, Vantage Press, 1981; Walter Stahel, «The Product-Life Factor», *in* Susan Grinton Orr (éd.), *An Inquiry into the Nature of Sustainable Societies: The Role of the Private Sector*, Houston Advanced Research Center, The Woodlands, TX, 1984, p. 72-104. D'autres publications sont disponibles auprès de l'Institut de la durée – Product-Life Institute, 18-20 chemin Rieu, CH-1208 Genève.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 160

Ces idées connaissent depuis peu un net regain d'intérêt, par exemple à l'Institut Wuppertal[94].

Dans la conception productiviste du système économique, la notion centrale est celle de valeur d'échange. Il s'agit désormais de donner la primauté à une autre notion : la valeur d'utilisation. Au lieu de vendre des produits, il faut vendre des services. Autrement dit, il faut vendre l'usage des biens matériels, et non les biens eux-mêmes. L'utilisateur devient alors l'agent économique central, au lieu de l'acheteur-consommateur. L'utilisateur n'a pas besoin d'acheter et de posséder les objets, il ne paie que les services dans un système organisé pour sa satisfaction, c'est-à-dire optimisé pour assurer la qualité des services. Il s'agit donc de passer à une véritable économie de services.

Concrètement, l'utilisation optimale des ressources repose sur deux stratégies :

1. La durabilité, qui permet de diminuer la vitesse des flux de ressources.

2. L'utilisation intensive des biens, qui permet de réduire le volume des flux de ressources.

L'objectif de cette double stratégie peut également s'exprimer de la manière suivante : il s'agit d'obtenir un service avec le moins de ressources possible par « unité d'utilisation ». L'unité d'utilisation, ce peut être un cycle de lavage pour une machine à laver le linge ou la vaisselle, le nombre de kilomètres parcourus pour un véhicule, la durée de vie utile exprimée en minutes, heures ou années selon l'objet utilisé. Friedrich Schmidt-Bleek et ses collaborateurs de l'Institut Wuppertal tentent d'exprimer cette idée par la notion de *Material Inputs per Unit Service*

94. Pour une synthèse récente en français, voir Julia Haake, « Le rôle des entreprises industrielles dans le changement structurel écologique : dématérialisation, innovation et compétitivité », Mémoire de D.E.A. de Sciences économiques sous la direction du Prof. Sylvie Faucheux, Université de Versailles, Saint-Quentin-en-Yvelines, DEA DESTIN, 126 p., juillet 1997. Voir également : Julia Haake, « Langlebige Produkte für eine zukunftsfähige Entwicklung. Eine ökonomische Analyse », *Wuppertal Papers* n° 62, octobre 1996 (ISSN : 0949-5266).

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 161

(MIPS), qu'on pourrait traduire par «quantité de matière utilisée par unité de service rendu» [95].

Stratégie de la durabilité

La stratégie de la durabilité consiste à prolonger la durée de vie des biens, ce qui permet de réduire la vitesse des flux de ressources. Si l'on double la durée de vie des biens, on diminue de moitié les déchets correspondants. Par exemple, on pourrait facilement doubler, voire tripler, la période d'utilisation des voitures, dont la durée de vie ne dépasse guère dix ans dans les pays industrialisés.

Après des décennies de conditionnement par le marketing consumériste, la notion de durabilité évoque naturellement des images d'objets vieux, tristes, démodés et dépassés technologiquement. À ces clichés s'ajoute une connotation misérabiliste d'usure excessive et de récupération motivée par la pauvreté. La durabilité dont il est question ici n'a rien à voir avec ces préjugés. En effet, la stratégie de la durabilité ne préconise pas de renoncer au confort, ni au progrès technique, ni même aux plaisirs de la mode. Concrètement, la stratégie de la durabilité repose sur au moins quatre piliers :

1. La prévention, qui consiste à concevoir les produits, dès le départ, pour durer longtemps. On prend ainsi le contre-pied de l'approche en vigueur dans le paradigme productiviste, où l'usure et l'obsolescence rapides des produits sont programmées. Parmi les outils préventifs, on peut mentionner la construction

95. F. Korte (éd.), «Project «Material Intensity per Unit Service» (MIPS), Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH. Special Issue of *Fresenius Environmental Bulletin*, vol. 2, n° 8, août 1993, p. 407-490, dédié au Dr. Wilhelm Fresenius à l'occasion de son 80e anniversaire, Basel, Birkhäuser Verlag (ISSN : 1018-4619). Voir également l'ouvrage de référence de Friedrich Schmidt-Bleek, *Wieviel Umwelt braucht der Mensch ? MIPS – Das Maß für ökologisches Wirtschaften, Basel, Birkhaüser Verlag, 1994 (ISBN : 3-7643-2529-9).*

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 162

modulaire d'un produit: au lieu de jeter l'appareil entier, on ne remplace que la partie usée ou dépassée technologiquement. Cette philosophie modulaire s'accompagne d'une standardisation des composants et de leur compatibilité avec d'autres appareils: par exemple des imprimantes et des ordinateurs vraiment compatibles tout en étant de marques différentes, de sorte qu'en changeant l'un il reste possible d'utiliser l'autre. On voit donc que loin d'être rustique, la durabilité fait appel aux technologies et au design les plus avancés.

2. L'entretien, qui permet de prolonger la durée d'utilisation. Mais il s'agit ici d'un véritable système d'entretien, sans commune mesure avec les services de réparation actuels, qui tentent généralement de convaincre le client d'acheter du neuf, puis effectuent la réparation à contrecœur, dans des délais et à des prix souvent prohibitifs.

3. L'utilisation « en cascade », où l'on réutilise des biens usagés pour des fonctions moins exigeantes. Par exemple, une ancienne locomotive de train express peut servir à remorquer des convois de marchandises, puis finir sa vie comme locomotive de manœuvres.

4. Pour prolonger la durée de vie des biens et des ressources, les entreprises (tout comme les collectivités publiques) peuvent aussi mettre sur pied des « services de revente ». Ces services seraient chargés de revendre le matériel dont l'entreprise n'a plus besoin, au lieu de l'envoyer à la casse, comme c'est généralement le cas aujourd'hui. Ces opérations de revente s'effectueraient avec autant de soin que le service des achats en met à acquérir au meilleur prix les matériaux, les biens et les services nécessaires à l'activité productive de l'entreprise.

L'utilisation intensive

L'utilisation intensive des ressources constitue l'une des meilleures stratégies de dématérialisation : on pourrait

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 163

construire des voitures nettement plus légères, consommant moins de métaux et de plastiques, et donc moins de carburant, tout en offrant un confort et une sécurité identiques. L'utilisation intensive des biens concerne également le temps et l'espace. Les voitures, par exemple, ne roulent que très exceptionnellement, en moyenne une heure par jour, et restent immobilisées dans les garages et les parkings le reste du temps. Un même véhicule peut donc fort bien être utilisé par plusieurs conducteurs, soit par la location commerciale traditionnelle, soit selon la formule non lucrative des « coopératives de partage» (car sharing) qui commencent à se développer. Dans la même logique, et pour diminuer leurs frais immobiliers, des entreprises commencent à renoncer au bureau traditionnel (souvent inutilisé), au profit d'un usage en temps partagé par les employés, qui se voient attribuer un local uniquement en cas de besoin. Cette utilisation intensive des biens à l'échelle des infrastructures permet une dématérialisation systémique, par opposition à la simple dématérialisation des objets.

L'intensification de l'utilisation des biens implique des stratégies inédites de la part des entreprises, en termes de garantie, de qualité et de conception de ce qu'est un « produit ». D'une manière générale, il s'agit autant que possible de vendre le service, la satisfaction, l'utilisation, plutôt que le bien lui-même. Le consommateur n'achète pas un avion, mais un trajet aérien ; pas un ascenseur, mais de la mobilité verticale; pas un autobus, mais un certain trajet ; pas un photocopieur, mais la fonction « photocopie», etc. Cette tendance existe déjà dans l'économie actuelle, mais il faudrait la systématiser, notamment par une généralisation de la location.

L'intensification consiste également à concevoir des objets multifonctionnels : par exemple, des machines intégrant les fonctions fax/photocopieur/scanner, pour autant que chacune de ces fonctions conserve des performances au moins équivalentes à celles fournies par des appareils traditionnels à vocation unique, ce qui n'est généralement pas le cas actuellement.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 164

Naturellement, la rentabilité de l'utilisation intensive dépend du fonctionnement optimal des systèmes. Par exemple, la rentabilité du réseau téléphonique dépend directement de son bon fonctionnement durant de longues périodes de temps. D'où la nécessité d'une bonne maintenance, par ailleurs génératrice d'emplois stables.

Dans l'économie de consommation sous sa forme actuelle, la prévention, qui vise notamment à éviter les pannes, est considérée comme un coût additionnel indésirable, car l'objectif principal est d'accroître les ventes de produits neufs. À l'inverse, lorsqu'on cherche à optimiser l'utilisation des ressources, la prévention devient une stratégie hautement rentable et désirable, car le prestataire de service fera tout pour assurer la satisfaction du client au moindre coût.

Au cœur de la philosophie de la durabilité et de l'utilisation intensive des ressources, on trouve donc la notion d'entretien. La stratégie de l'entretien des biens comprend quatre cycles, ou boucles principales :

– la réutilisation du produit (après contrôle de son état) ;
– la réparation du produit (de ses composants) ;
– la remise en état et la mise à jour technologique ;
– le recyclage des matériaux.

Comme le montre Walter Stahel, qui a élaboré le schéma ci-dessous, cette stratégie d'entretien en quatre boucles mérite un examen détaillé, car elle implique une vision nouvelle du cycle économique[96].

96. Walter R. Stahel, « Product Design and Waste Minimization », *in* William S. Forester and John H. Skinner (éd.), *Waste Minimization and Clean Technology : Waste Management Strategies for the Future*, Academic Press, London, 1992, p. 91-97 ; Walter R. Stahel et Tim Jackson, « Optimal Utilisation and Durability – towards a new definition of the service economy », *in* Tim Jackson (éd.), *Clean Production Strategies (Developing Preventive Environmental Management in the Industrial Economy)*, Boca Raton, Floride, Lewis Publishers, 1993, p. 261-291 ; Walter R. Stahel, « La stratégie de la durabilité : Gérer la richesse énergétique dans le temps », *Stratégies énergétiques*,

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 165

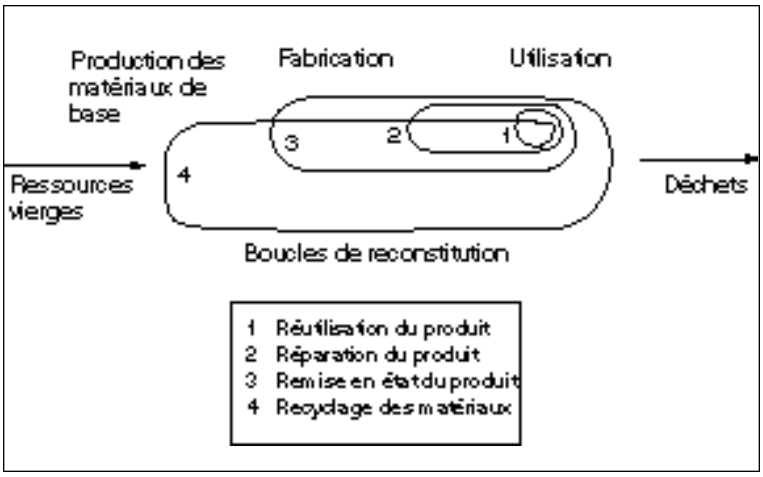

Fig. 7 : Les quatre boucles de la stratégie de la durabilité (source : Walter Stahel, Institut de la durée).

Selon la perspective traditionnelle, le point de départ du processus industriel réside dans les inputs de matériaux vierges, pour aboutir au produit, puis à sa mise au rebut. La stratégie d'entretien inverse entièrement cette manière de concevoir le cycle économique: elle part du stock des machines et des produits déjà en fonctionnement chez les usagers, et considère comme secondaires les inputs de matériaux vierges et la production de composants ou de produits neufs.

Or, la rentabilité de ces cycles est proportionnelle à leur taille: plus une boucle est petite, plus elle est économiquement intéressante. Pour des raisons liées aux coûts des transports naturellement, mais aussi parce que la valeur intrinsèque d'un produit diminue avec la longueur des boucles. Il est économiquement (et environnementalement) plus avantageux de laver

Biosphère et Société, n° 1/2, 1991, p. 33-39 ; Walter R. Stahel, « The Utilization-Focused Service Economy : Resource Efficiency and Product-Life Extension », *in* Braden R. Allenby and Deanna J. Richards (éd.), *The Greening of Industrial Ecosystems*, National Academy Press, Washington, DC, 1994, p. 178-190.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 166

et de réutiliser une bouteille que de la piler pour en refabriquer une nouvelle. Par conséquent, le recyclage des matériaux n'intervient qu'en dernière instance, comme solution ultime, lorsque toutes les boucles précédentes ont été effectuées.

Il faut bien voir, en effet, que le recyclage ne ralentit pas les flux de matière. Il peut les accélérer et même, par un effet pervers, les accroître. Et en réalité, l'engouement actuel des entreprises pour le recyclage s'explique, non pas par le désir de faire des bénéfices, ni par la volonté première de protéger l'environnement, mais par la nécessité de satisfaire aux nouvelles exigences légales tout en effectuant une opération de marketing « vert ».

Conséquences pour l'environnement et l'emploi

L'effet principal sur l'environnement des stratégies de durabilité et d'utilisation intensive se traduit par une forte diminution de la consommation de matière et d'énergie dans le domaine de la production et des transports (moins de distribution), puisque l'on conserve plus longtemps l'investissement énergétique et matériel de départ.

Par exemple, le rechapage d'un pneu usé économise 66 % de l'énergie nécessaire à la fabrication d'un pneu neuf. La rénovation totale d'un bâtiment permet d'économiser jusqu'à 80 % de l'énergie qu'il faudrait investir pour en construire un nouveau. Il en résulte également une réduction des infrastructures nécessaires aux activités de production, notamment des infrastructures pour le transport des marchandises. Les effets négatifs sur l'environnement résultant de l'utilisation et de l'entretien de ces infrastructures se trouveront diminués d'autant.

En revanche, on constatera une certaine augmentation de la consommation des ressources pour les activités de réparation et de maintenance. Toutefois, ces activités sont beaucoup moins gourmandes en énergie, en matériaux et en infrastructures

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 167

parce qu'elles utilisent surtout des ressources déjà investies dans les systèmes, les infrastructures et les biens existants.

Dans les marchés saturés, comme ceux des pays hautement industrialisés, l'achat d'un nouveau produit entraîne en général la mise au rebut d'un produit préexistant. Or, comme indiqué précédemment, si l'on double la durée d'utilisation moyenne des produits, la quantité de déchets correspondants diminue de moitié. Les nuisances liées à la fabrication de produits neufs, à leur transport et à leur élimination diminuent également en proportion. De plus, cette stratégie est économiquement avantageuse : un pneu rechapé, un moteur d'échange révisé ou la rénovation d'un bâtiment coûtent environ 40 % moins cher qu'un produit neuf.

La conséquence principale des stratégies de durabilité se manifeste par un effet de substitution : on substitue des activités liées à la production, à la distribution de produits neufs et à la gestion de déchets par des activités de maintenance et de réparation. Cette substitution entraîne une forte demande pour des technologies et des équipements de pointe, nécessaires à l'entretien et à la maintenance.

La stratégie de la durabilité et de l'utilisation intensive des ressources entraînerait une augmentation du nombre et de la qualification des emplois. Il en résulterait également une mobilité accrue des emplois, désormais moins liés aux lieux de production. Ces effets découlent directement de la substitution de l'énergie et de la matière par de la main-d'œuvre, un phénomène inhérent aux activités liées au prolongement de la durée d'utilisation et à l'optimisation de l'utilisation.

Dans le cas de Xerox cité plus haut, la charge de travail a naturellement baissé dans le secteur de la production, mais cette diminution a été intégralement compensée par les nouveaux besoins liés aux opérations d'entretien : il y a donc eu transfert de postes de la production vers les activités d'entretien, et ces emplois peuvent être considérés comme plus stables,

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 168

car ils dépendent beaucoup moins des fluctuations de la demande.

L'utilisation optimale des ressources exige une nouvelle conception de la « productivité » des emplois. Contrairement au travail productif de l'économie industrielle traditionnelle, un service ne peut pas être stocké, ce qui provoque une augmentation du volume du travail. En effet, un service efficace doit de plus en plus pouvoir être fourni 24 heures sur 24, et d'une façon décentralisée, c'est-à-dire sur le lieu même de sa consommation, ce qui génère de nombreux emplois.

Dans un système basé sur l'optimisation de l'utilisation, les stocks de biens disséminés chez les utilisateurs (concentrés dans les grands centres urbains) constituent les « nouveaux gisements» d'activité économique. Par conséquent, la décentralisation des opérations d'entretien devient une nécessité économique : il est évidemment avantageux de se rapprocher des nouvelles ressources, disséminées dans le marché. Cette décentralisation sera grandement facilitée si l'on a recours à des techniques d'entretien moins mécanisées que les procédés actuels de production, car les humains restent mieux adaptés que les robots pour des opérations de maintenance et des volumes de (re) fabrication réduits.

Tous ces avantages sont estimés de manière théorique, étant donné qu'il serait très difficile de les chiffrer de manière précise. En effet, compte tenu des différences importantes entre une vraie société de services et le système économique actuel, il n'est pas possible de comparer directement la rentabilité de la production classique avec la rentabilité de la réutilisation, de la refabrication et de l'utilisation intensive en général.

Vers une relocalisation de l'économie

Le facteur crucial dans une stratégie d'utilisation optimale réside dans le design, dans la conception des biens et des

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 169

services. Les recherches se focaliseraient sur le perfectionnement de fonctions et de composants représentant un réel progrès, c'est-à-dire une véritable amélioration du service. Cette approche entraînerait un ralentissement de la vitesse de développement de nouveaux produits et une amélioration permanente des biens en usage, plutôt qu'une substitution incessante de produits imparfaits par de nouveaux produits imparfaits. On remplacerait ainsi des vagues de nouveaux produits par des vagues d'amélioration de produits existants. Naturellement, cela n'empêcherait pas de mettre au point des produits entièrement nouveaux, pour tirer profit d'éventuels progrès technologiques majeurs.

Dans une société d'utilisation, nous l'avons vu, il ne s'agit plus de vendre le produit lui-même, mais le service qu'il peut fournir. De ce fait, le fabricant du produit en demeure le propriétaire et l'exploitant. Il en assume toutes les responsabilités, non seulement «du berceau à la tombe» (from cradle to grave), mais durant la totalité du cycle de vie, « du berceau au berceau» (from cradle to cradle). On élimine ainsi les querelles en cas de défaut, de panne et d'élimination en fin de vie. Tous les coûts des imperfections sont désormais internalisés par l'exploitant du bien. Ce dernier, en effet, cherchera à minimiser ces coûts par des mesures de prévention. Autrement dit, le fabricant, tout comme le prestataire de service, a tout intérêt à mener une politique de qualité et de fiabilité.

L'optimisation de l'utilisation a également des conséquences importantes en ce qui concerne la garantie : celle-ci devient indépendante de l'âge du bien ou de ses composants. Aujourd'hui, la législation demande au fabricant de certifier que le produit est constitué de pièces neuves, et d'offrir une garantie contre les défauts de fabrication seulement pour quelques mois, voire quelques années. À l'inverse, une véritable économie de services exige une garantie portant sur la qualité de l'utilisation pendant toute la durée de vie du produit. Dans

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 170

ce cas, le critère pertinent n'est plus l'âge des composants ou de l'objet, mais son bon fonctionnement.

Dans une économie organisée selon des boucles de réutilisation des biens, des composants et des matériaux, la compétitivité internationale ne dépend plus principalement d'une main-d'œuvre bon marché ou de grands volumes de fabrication. En effet, les coûts de fabrication sont abaissés, grâce à une consommation moindre de matériaux et d'énergie, et la ressource critique devient le savoir-faire, l'expérience et le jugement d'un personnel qualifié, polyvalent et motivé. De plus, les frais de gestion des stocks se trouvent eux aussi fortement réduits par une standardisation modulaire.

Une véritable économie de services serait donc essentiellement régionale. Cette tendance à la relocalisation pourrait offrir un contrepoids à la logique actuelle des délocalisations. Par ailleurs, cette nouvelle organisation du système industriel aurait pour effet de déplacer le centre de gravité du pouvoir économique, qui glisserait de la production vers la gestion et la maintenance optimale des parcs d'équipements et de biens. Il en découlerait une transformation des rapports de force entre les différents types d'entreprises, l'État, et les citoyens, qui pourrait notamment aboutir à une « déconcentration » du pouvoir économique.

Épilogue
L'élégance industrielle

La Biosphère n'a pas toujours existé sous sa forme actuelle. Elle est le fruit d'une longue évolution, rythmée par plusieurs innovations radicales. L'apparition de la respiration et de la photosynthèse, notamment, a permis à des espèces évoluées de tirer profit de déchets comme le gaz carbonique et l'oxygène, générés par les organismes primitifs.

De manière similaire, le système industriel, qui n'est qu'un très récent sous-système de la Biosphère, poursuit son évolution et s'apprête à franchir une étape cruciale: le contrôle des interactions entre les flux de matière induits par l'homme et les grands cycles biogéochimiques, en particulier en valorisant les déchets au sein de réseaux trophiques artificiels.

Ainsi, un jour peut-être, l'écologie industrielle apparaîtra-t-elle comme l'une des nombreuses inventions de la vie sur Terre, comme une étape qui aura rendu le système industriel compatible avec la Biosphère, tout en satisfaisant les besoins d'une population humaine en augmentation, avec des aspirations économiques croissantes.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 172

L'écologie industrielle vient de naître. En tant que domaine explicitement constitué, elle a moins d'une dizaine d'années. L'écologie industrielle est donc jeune, très jeune, au point qu'il serait prématuré de la considérer comme une science. En priorité, il incombera aux écologistes scientifiques et aux épistémologues d'explorer de manière approfondie la pertinence, la fécondité et les limites de l'analogie entre le système industriel et les écosystèmes biologiques. Cette démarche se révèle d'autant plus nécessaire qu'elle contribuera à tempérer les dérives de l'écologisme politique, toujours prompt à propager des semi-vérités, séduisantes mais trompeuses, issues d'une vision idéalisée de la nature (« dans la nature, il n'y a pas de déchets », « les écosystèmes naturels sont stables », etc.) [97].

L'agenda de la recherche en écologie industrielle, pour les sciences de l'ingénieur et les sciences naturelles, commence à peine à s'élaborer. Tout, ou presque, reste à faire[98]. La reconceptualisation du système industriel en termes d'écosystèmes aura également d'importantes conséquences pour bien d'autres disciplines : l'économie[99], la gestion, le droit, la géographie, sans oublier la philosophie[100].

On reprochera peut-être à l'écologie industrielle un manque d'intérêt à l'égard des aspects sociaux du développement durable. Mais, rétorquera-t-on, ce qui importe, en premier lieu,

97. Pour une première tentative dans ce sens, voir Thomas E. Graedel, « On the concept of industrial ecology », *Annual Review of Energy and the Environment*, vol. 21, p. 69-98, 1996.

98. Iddo K. Wernick et Jesse Ausubel, with the Vishnu Group, *Industrial Ecology : Some Directions for Research*, Office of Energy and Environmental Systems, Lawrence Livermore National Laboratory, 1997 (ISBN : 0-9646419-0-7).

99. Sur la pertinence de l'écologie industrielle pour l'économie, voir l'introduction par Jacques Grinevald et Ivo Rens au recueil d'essais de Nicholas Georgescu-Roegen, *La décroissance. Entropie-Ecologie-Economie*, Paris, Sang de la terre, 1995.

100. Parmi les philosophes qui s'intéressent à l'écologie industrielle, mentionnons, en Italie, Silvia Pizzocaro, « Theoretical approaches to industrial ecology : Status and perspectives », *in* Scenari della sostenibilità, Workshop Proceedings,

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 173

pour la pérennité du système industriel, c'est le fonctionnement de son substrat biophysique et ses interactions matérielles avec la Biosphère. L'attention donnée en priorité aux flux de matière et d'énergie – qui continueront à former la base du système industriel, quoi qu'en disent les mystagogues de la soi-disant « société post-industrielle» – est donc volontaire, mais n'a rien d'exclusif. Cette approche présente l'avantage de clarifier la discussion, en faisant la part des aspects matériels et des enjeux sociaux et culturels. Elle tente de comprendre le système industriel et de favoriser sa maturation, sans porter de jugements de nature morale sur la société industrielle. Cela dit, il ne s'agit naturellement pas de prétendre que l'écologie industrielle est « neutre». En fait, vue sous l'angle de l'histoire des idées, elle incarne l'un des avatars modernes de la question de l'efficience, concept de haute lignée théologique et politique. À ce titre, l'écologie industrielle constitue un enjeu anthropologique majeur pour l'Occident industrialiste[101].

On se souviendra également que l'écologie industrielle, avant même de chercher à se constituer en science, a une visée bien concrète. Elle est issue d'un groupe d'ingénieurs de l'industrie, conscients des insuffisances de l'approche traditionnelle des problèmes d'environnement et soucieux de donner un contenu opérationnel à la notion de développement durable. En pratique, le métabolisme socio-industriel ne devrait pas

Dipartimento di programmazione e produzione edilizia, Politecnico di Milano, Milano, 28-29 avril 1994. En Norvège, Martina Maria Keitsch, « A Philosophical Approach towards Industrial Ecology», Centre for Environment and Development, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, article disponible sur le site Internet:
www. smu. ntnu. no/smu/ansatte/martina/). En France, Dominique Bourg, *Nature et technique. Essai sur l'idée de progrès*. Paris, Hatier, 1997.

101. Sur l'histoire de l'efficience en milieu industriel, voir Samuel P. Hays, *Conservation and The Gospel of Efficiency*, Cambridge, MA, Harvard University Press, 1959. Pour les aspects anthropologiques, l'œuvre de Pierre Legendre fait référence. Voir, notamment, Pierre Legendre, *Le Désir politique de Dieu. Étude sur les montages de l'État et du Droit*, Paris, Fayard, 1988.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 174

tarder à s'imposer comme un outil indispensable à tout projet de développement durable, à l'échelle locale ou régionale[102]. Pour les entreprises, l'écologie industrielle présente un attrait très terre à terre, dans la mesure où l'optimisation des flux et des stocks de matière et d'énergie entraînera une compétitivité accrue.

Finalement, la motivation la plus forte en faveur de l'écologie industrielle, qui assurera peut-être son succès, pourrait bien être de nature… esthétique. Une théorie scientifique expliquant un grand nombre de phénomènes à partir d'un noyau restreint d'hypothèses est considérée comme le parangon de l'élégance conceptuelle. De même, un système industriel générant plus de richesses et de bien-être avec moins de ressources et moins d'impacts sur la Biosphère serait incontestablement plus élégant. Un terme qui, précisément, se rencontre à plusieurs reprises sous la plume des premiers écologistes industriels, comme Jesse Ausubel: «Le but de l'écologie industrielle est un ensemble plus élégant de processus industriels» [103].

Un système industriel plus élégant, une économie plus intelligente: voilà un défi que les ingénieurs, et avec eux bien des acteurs politiques et économiques, et tout simplement de nombreux citoyens, auront sans doute à cœur de relever.

102. Pour une synthèse récente concernant le rôle du métabolisme industriel dans le développement durable, voir l'article de Stefan Anderberg, «Material Flow Analysis and Sustainable Development», *Journal of Social Sciences*, vol. 1, n° 3, p. 187-200, 1997 (publié par Kamla-Raj, New Delhi). Pour une analyse historique du métabolisme industriel, voir Marina Fischer-Kowalski, *Society's Metabolism. On the Development of an operational Concept for the interactions between society and its environment*, Vienna University, IFF-Social Ecology, 1997.

103. Jesse H. Ausubel, «Directions for Environmental Technologies», *Technology in Society*, vol. 16, n° 2, p. 139-154, 1994. Citation originale: «The goal of industrial ecology is a more elegant, less wasteful network of industrial processes».

Addendum

Tendances et enjeux de l'écologie industrielle

Encore confidentielle au début des années 1990, l'écologie industrielle suscite depuis peu un intérêt croissant au sein de milieux très divers (académiques, politiques, économiques). Cette reconnaissance se traduit également par un processus d'institutionnalisation, comme en atteste la création, en 2001, de l'International Society for Industrial Ecology. Il semble donc bien que l'écologie industrielle, au-delà des intérêts d'opportunité et des effets de mode, constitue un mouvement de fond appelé à durer et à évoluer, contribuant à offrir un cadre de réflexion global et des pistes concrètes pour tenter d'orienter le système industriel sur une trajectoire viable.

Quinze ans après la parution de l'article initial de Robert Frosch et Nicholas Gallopoulos, en 1989, on dispose d'un recul suffisant pour tenter d'esquisser une synthèse des tendances de l'écologie industrielle, telles qu'elles apparaissent aujourd'hui. Par commodité, on peut distinguer des tendances «actuelles», « émergentes » et « en souffrance » [1] :

NDLE : Les notes de l'addendum se trouvent en page 198.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 176

Les tendances actuelles

Quatre tendances principales se sont imposées au cours de la décennie écoulée :

Parcs éco-industriels

L'idée de relier entre elles les entreprises dans les zones industrielles a été explorée systématiquement dès le début des années 1990, les déchets des uns devenant des ressources pour d'autres, à l'image des chaînes alimentaires dans les écosystèmes naturels. La priorité donnée à cette première application pratique de l'écologie industrielle semble justifiée, dans la mesure où les parcs industriels représentent aujourd'hui le mode privilégié d'industrialisation, notamment en Asie. Le mouvement est parti des États-Unis et du Canada (sur le modèle de la Symbiose industrielle de Kalundborg, au Danemark), puis s'est répandu en Europe. Il apparaît aujourd'hui particulièrement dynamique en Asie, où un réseau se consacre au développement éco-industriel dans la plupart des pays de la région. Dans des pays comme les Philippines, la Thaïlande, la Chine, la réalisation de zones éco-industrielles est explicitement présentée, indépendamment des avantages environnementaux, comme un atout supplémentaire pour attirer des entreprises étrangères.

Les bilans préliminaires de ces tentatives font clairement ressortir que les nouvelles pratiques de valorisation collective des ressources doivent être suscitées, accompagnées, évaluées, entretenues et relancées régulièrement, car, en règle générale, elles n'apparaissent et ne se maintiennent pas spontanément. En l'état actuel, des conditions techniques et économiques favorables ne suffisent pas à faire émerger des réseaux éco-industriels, il faut également un contexte incitatif sur les plans législatif, managérial, organisationnel, social et politique. Cela suppose une évolution profonde de la notion de parc industriel : de simple terrain équipé en infrastructures de base accueillant des entreprises en quête d'implantation, le parc se mue en un

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 177

système intégré, incorporant dans sa conception, sa planification et son modèle de gestion, les principes favorisant la valorisation mutuelle des ressources[2].

Symbioses et synergies intersectorielles

En élargissant la perspective au-delà des zones industrielles, il s'agit de développer des stratégies inter-entreprises pour valoriser mutuellement des ressources, à l'échelle d'un territoire donné (une communauté urbaine, une région, une vallée, etc.). Dans cette optique, EDF, par exemple, a commencé à analyser de manière systématique les flux de ressources consommés et rejetés par différents secteurs d'activité. Cette recherche vise à élaborer une base de données permettant de détecter et de réaliser de nouvelles synergies entre divers agents économiques, qui généralement s'ignorent. La détection et la mise en œuvre de telles synergies inter-sectorielles n'a rien de trivial, même si elles peuvent paraître évidentes a posteriori[3].

Économie de fonctionnalité

Depuis peu, des recherches explorent en détail les enjeux de la vente de la fonction (ou du service) au lieu de l'objet en tant que tel. Il s'agit, par exemple, de vendre le service « confort thermique » dans une habitation, au lieu de vendre des chaudières. Le client, au lieu d'acheter une chaudière, ne paie que pour la prestation effectivement reçue (une certaine température dans ses locaux). L'entreprise fournissant ce service reste propriétaire de la chaudière; elle a donc tout intérêt à ce que son installation consomme le moins d'énergie possible, tombe en panne le moins souvent possible, ait une durée de vie aussi longue que possible, etc. Toutefois, les ramifications sociales, politiques et économiques de cette idée, simple dans son principe, se révèlent très complexes, et il s'agit maintenant de déterminer et de tester, de manière précise, les modalités concrètes de viabilité de l'économie de fonctionnalité, dans la perspective de sa mise en œuvre à grande échelle[4].

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 178

Métabolisme des activités économiques

La méthodologie du métabolisme industriel est sans conteste la tendance qui a connu le plus fort développement durant la dernière décennie. L'expression «métabolisme des activités économiques» tend à remplacer celle de «métabolisme industriel» qui donne lieu à de fréquents malentendus (le terme «industriel» ayant un sens très restreint en français). On parle aussi de «métabolisme territorial», lorsque l'on s'intéresse à une région donnée, délimitée géographiquement ou politiquement.

En pratique, la méthodologie du métabolisme consiste à établir des bilans de masse et d'énergie, en mesurant des flux et des stocks de matière et d'énergie: il s'agit donc d'une comptabilité physique, mettant à jour le substrat matériel indispensable à toute activité économique. Mais les études de métabolisme, aussi intéressantes soient-elle, ne doivent pas devenir une fin en soi. Elles visent un objectif bien défini: servir de méthodologie de base pour améliorer le métabolisme de la société industrielle, en remplissant trois fonctions principales: 1) outil de diagnostic (compréhension du système); 2) instrument d'aide à la décision (pour guider les politiques publiques et les stratégies d'entreprises) ; 3) méthode d'évaluation et de suivi permettant de mesurer les progrès réalisés (ou leur absence !).

L'étude du métabolisme (notamment territorial) se présente également comme un atout pour le développement et la promotion économique, à double titre: en faisant apparaître de nouvelles opportunités (détection de ressources valorisables, identification de synergies nouvelles), et en contribuant à renforcer l'attractivité et la compétitivité d'un territoire[5].

Pour atteindre pleinement son objectif, le métabolisme des activités économiques doit encore évoluer sur plusieurs points, pas uniquement scientifiques, mais également politiques. En effet, si l'on entend disposer d'un instrument pertinent pour contribuer à rendre le système industriel viable, il faudra présenter ces notions techniques (métabolisme, flux et stocks de matière et d'énergie, etc.) de manière compréhensible par un

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 179

large public. En particulier, la démarche, les résultats et les implications des études de métabolisme devront être clairement explicités à l'intention des responsables politiques, administratifs, économiques – et des citoyens d'une manière générale. Sinon, les belles études de métabolisme ont peu de chance de se traduire en mesures concrètes. Cela suppose également que les experts du métabolisme parviennent à élaborer, sur la base de leurs études, des options et des propositions précises, utilisables pour élaborer de nouvelles lois, de nouveaux règlements, de nouvelles politiques publiques, voire de nouvelles stratégies d'entreprises[6].

Enfin, la méthodologie du métabolisme, encore principalement confinée au monde académique, doit poursuivre un processus d'institutionnalisation au sein des organismes officiels de statistiques et de politique économique. À terme, la comptabilité physique des ressources, reflétant le substrat matériel de toute activité économique, devrait faire partie intégrante des comptabilités publiques (« Les Comptes physiques de la Nation»), en complément aux comptabilités financières traditionnelles[7].

Les tendances émergentes

Plus récemment, depuis le début des années 2000, un certain nombre de directions de recherche et de stratégies de mise en œuvre de l'écologie industrielle prennent forme. Les principales me paraissent être les suivantes :

Contextes législatifs

Les cadres législatifs jouent naturellement un rôle crucial pour freiner ou favoriser la concrétisation de l'écologie industrielle. Deux aspects commencent à être explorés sur ce plan. D'une part, identifier (et si possible adapter) les législations actuelles, qui constituent souvent des obstacles : par exemple, des lois empêchant la réutilisation des déchets, ou celles restrei-

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 180

gnant l'utilisation de matériaux recyclés dans certains produits. D'autre part, élaborer une nouvelle génération de lois et de politiques environnementales qui inciteraient à valoriser systématiquement l'ensemble des ressources, dépassant ainsi le cadre étroit du contrôle de la pollution. À cet égard, l'introduction explicite de l'écologie industrielle dans des textes législatifs constitue un atout décisif, comme on peut le constater dans le cas de l'Agenda 21 du Canton de Genève, ou, à l'échelle nationale, au Japon et en Chine[8].

Innovation, risques

Il existe un lien, qui commence à peine à être exploré, entre l'écologie industrielle et les théories de l'innovation. En effet, on peut considérer l'écologie industrielle comme une stratégie d'innovation à l'échelle du système industriel dans son ensemble (innovation technique, mais aussi sociale, politique, organisationnelle). Toutefois, à la différence du processus d'innovation aujourd'hui dominant, asservi à une logique du « sans limites » et du « toujours plus », l'écologie industrielle s'efforce de susciter un autre type d'innovations, principalement celles permettant d'utiliser les ressources de manière beaucoup plus efficace et intelligente, voire de diminuer leur consommation, dans une logique du « moins vaut mieux ».

Par ailleurs, la question de la diffusion des innovations joue un rôle central dans toute stratégie de développement durable et d'écologie industrielle. En effet, il ne suffit pas de mettre au point de «bonnes» innovations (les énergies renouvelables, par exemple) et d'en rester au stade des prototypes, comme on le constate trop souvent. Il faut s'assurer que ces innovations aient des chances de diffuser à grande échelle, afin d'exercer un impact positif sur l'ensemble du système industriel.

Enfin, il faut tenir compte du fait que toute innovation peut générer des dangers nouveaux. Certes, l'écologie industrielle a pour objectif de réduire les nuisances liées aux activités humaines. Toutefois, si l'on réorganise la circulation des res-

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 181

sources dans le système industriel (par exemple en créant des réseaux éco-industriels valorisant certains déchets), il faut rester attentif à la possibilité de faire apparaître des risques inédits. À ce double titre (atténuatrice et génératrice de risques), l'écologie industrielle intéresse directement les milieux actuariels et financiers[9].

Responsabilité, investissement, gouvernance

D'une manière générale, l'écologie industrielle implique un usage responsable des ressources, à l'égard de la Biosphère comme de la santé humaine. La connaissance du métabolisme, qui décrit les circuits des ressources durant la totalité de leur cycle de vie (depuis leur extraction initiale jusqu'à leur fin de vie), met en lumière les responsabilités de l'ensemble des agents économiques, producteurs et consommateurs. Dans cette optique, on peut considérer que l'écologie industrielle fait partie intégrante de la responsabilité sociale des entreprises – tout comme de la responsabilité sociale et politique des collectivités publiques et des citoyens.

Cette vision étendue de la responsabilité des agents économiques suppose que les agences de notation et les établissements financiers se réclamant du développement durable élargissent et adaptent leurs critères d'évaluation et de sélection en conséquence (par exemple, il ne suffit pas qu'un projet soit qualifié d'«écologique» au sens courant, encore faut-il estimer l'ensemble de ses impacts sur le métabolisme économique et territorial).

Potentiellement, l'écologie industrielle implique des modifications des rapports de force et d'influence entre les différents acteurs économiques et sociaux, résultants de nouvelles manières d'utiliser les ressources. Au sein des entreprises, cela devrait se traduire par une redistribution des rôles qui ne se fera pas sans certaines résistances (influence accrue des responsables environnement, notamment). Autre exemple, à l'échelle internationale : si les pays industrialisés réalisaient une politique

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 182

effective de dématérialisation et de décarbonisation, il en résulterait une forte diminution de la demande en matières premières provenant généralement de pays en développement (minerais, pétrole, etc.). C'est du reste précisément pour rendre son économie moins vulnérable aux aléas de l'approvisionnement en pétrole que le Japon a entamé, dès le début des années soixante-dix, une réflexion stratégique dans l'optique de l'écologie industrielle. De nombreux pays en développement, qui ont été incités à bâtir leur économie sur l'exportation de matières premières, seraient touchés de plein fouet. Les enjeux de pouvoir et les questions de gouvernance sont donc inhérents à l'écologie industrielle, à différentes échelles: entreprises, municipalités, États, organisations internationales, Biosphère (gouvernance du cycle global du carbone, par exemple) [10].

Politiques du territoire, domaine bâti

Du fait de la recherche de nouvelles synergies entre l'ensemble des acteurs économiques et sociaux, l'écologie industrielle remet en cause le dogme traditionnel du zonage, basé sur la séparation des activités (production, habitation, loisirs, etc.). Par ailleurs, une stratégie comme la dématérialisation suppose de repenser la forme des agglomérations urbaines pour minimiser les stocks d'infrastructures (routes, parkings, etc.). Il s'agit également de diminuer les consommations de ressources induites par la structure et l'étalement du tissu urbain (carburants pour les transports, réseaux d'eau et d'énergie en habitat dispersé). Enfin, d'une manière générale, le défi majeur posé par l'écologie industrielle à l'urbanisme et à l'aménagement du territoire réside dans l'objectif de parvenir, à terme, à rendre l'« écosystème urbs » aussi compact et auto-suffisant que possible (en eau, énergie, matériaux de constructions, aliments, etc.).

Les matériaux de construction constituent les principaux flux de matière solide dans la société industrielle moderne, et également les principaux stocks de ressources, immobilisées dans les

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 183

bâtiments, les routes, les grandes infrastructures (aéroports, gares, entrepôts, etc.). Dans cette perspective, il ne s'agit pas seulement de construire des bâtiments « écologiques », mais également, et surtout, de concevoir et mettre en œuvre une politique globale de gestion intégrée de l'ensemble des matériaux de construction, de leur extraction initiale à leur fin de vie ultime[11].

Société de l'information (économie basée sur les connaissances)

À en croire ses volubiles thuriféraires, la société de l'information serait par définition favorable à l'environnement, car la croissance d'une économie du savoir résulterait d'activités immatérielles (Internet, télétravail, informatique, consulting, etc.). Dans une telle économie basée sur les connaissances, la richesse proviendrait essentiellement de produits et de services à haute valeur ajoutée sur d'évanescents flux d'information. Ces activités immatérielles étant présumées frugales en énergie et en matières premières, on en déduit que les impacts sur la Biosphère ne peuvent qu'être bénéfiques.

Cette vision simpliste n'a guère de rapport avec la réalité. Car, jusqu'à preuve du contraire, la production de valeur immatérielle nécessite des infrastructures matérielles considérables et complexes : réseaux de télécommunications, ordinateurs, téléphones portables, antennes et relais de téléphonie mobile, serveurs, etc. La production de ces infrastructures occasionne souvent des pollutions, et leur durée de vie très courte (du fait du progrès technique et plus encore des stratégies de vente) constitue un gaspillage de ressources caractérisé, se traduisant par des volumes considérables de déchets électroniques parfois toxiques. Surtout, la prolifération de ces équipements, dont la plupart restent branchés en permanence, induit une consommation croissante d'électricité. Il convient également de tenir compte des «effets de rebond». Par exemple, la vente de produits par le biais de l'Internet n'a pas fait disparaître les centres commerciaux (comme cela avait été annoncé par certains pro-

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 184

phètes de la Nouvelle Économie); en revanche, elle a entraîné une multiplication des transports routiers et aériens pour assurer une livraison rapide des produits chez les clients.

Naturellement, il ne s'agit pas de négliger le potentiel positif pour l'environnement des nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC). Ces technologies se révéleront certainement très utiles pour optimiser la gestion des ressources au sein des entreprises, des ménages, et surtout à l'échelle des systèmes urbains. Mais l'écologie industrielle attire l'attention sur la nécessité d'aborder la problématique des NTIC dans une perspective d'ensemble, prenant pleinement en compte les bases matérielles de la société de l'information[12].

Les tendances «en souffrance»

Enfin, on peut mentionner des tendances encore à l'état embryonnaire, dont il conviendrait de favoriser l'émergence. Notamment :

Pensée économique

En rappelant l'importance des ressources matérielles, substrat indispensable au métabolisme de toute société humaine, la perspective de l'écologie industrielle diffère profondément de la vision monétariste, immatérielle, désincarnée, de l'économie classique. Par le biais du métabolisme, la pensée économique se voit arrimée au monde des choses et des corps, elle retrouve ainsi un référent concret non réductible à un discours abstrait. Plus fondamentalement, l'écologie industrielle place au cœur de sa réflexion des éléments difficilement pris en compte par la pensée économique courante : la réalité matérielle des échanges, les interactions avec la Biosphère, le long terme, la nature relationnelle des activités économiques et sociales. En effet, par opposition à *l'homo oeconomicus* insulaire de l'économie classique, «rationnellement» égoïste, l'écologie industrielle considère la personne, insérée dans un réseau de relations[13].

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 185

Les théories traditionnelles de la croissance se trouvent également remises en cause, non pas sur la base d'arguments idéologiques de principe, mais simplement en vertu du fait que la notion même d'écosystème, comme tout système vivant, implique des limites à l'utilisation de ressources matérielles et énergétiques. Autre point de divergence par rapport aux zélateurs de la circulation généralisée des biens sur l'ensemble de la planète: l'amélioration du métabolisme industriel suppose de favoriser autant que possible une relocalisation des activités économiques. Les implications de l'écologie industrielle pour la pensée économique sont donc profondes, et mériteraient d'être explorées systématiquement, y compris dans des perspectives débordant le cadre de l'économie «officielle», comme l'économie informelle, les échanges non-marchands, ou encore l'économie solidaire[14].

Modèle d'affaires, gestion

Les écoles de commerce et de gestion (Business Schools) ont à peine commencé à évaluer sérieusement les implications de l'écologie industrielle pour les différents «modèles d'affaires». Elles sont pourtant nombreuses et importantes, et mériteraient un examen approfondi: élargissement par rapport à la perspective financière habituelle, coopération entre entreprises de secteurs différents, passage d'une politique de traitement des déchets à une stratégie intégrée d'usage des ressources, prise en compte des flux et stocks de ressources matérielles lors des fusions et acquisitions, etc. L'un des apports cruciaux des spécialistes en gestion serait de déterminer les modèles d'affaires et d'organisation pertinents pour assurer la viabilité économique des pratiques d'écologie industrielle[15].

Dans ce contexte, il convient peut-être d'insister sur une caractéristique majeure de l'écologie industrielle: cette stratégie suppose nécessairement une coopération à grande échelle entre acteurs économiques et sociaux, à la différence du modèle actuellement hégémonique, où les agents économiques se font

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 186

concurrence ou s'ignorent. L'écologie industrielle se distingue ainsi de la plupart des approches du développement durable, qui restent focalisées sur l'accroissement de l'efficacité des entreprises individuelles, au moyen d'outils variés comme l'éco-efficacité, les normes ISO, les labels verts, les indices de responsabilité sociale, etc. Ces outils tendent certes à renforcer la compétitivité des entreprises (en termes d'image, d'environnement, de rentabilité), mais n'agissent pas véritablement à l'échelle collective, systémique, pertinente du point de vue de l'écologie industrielle – et de la Biosphère! Des modèles et des stratégies pour la gestion collective et coopérative à grande échelle restent donc à inventer. La tâche s'annonce ardue, tant domine aujourd'hui l'obsession de la compétitivité individuelle[16].

Écologie scientifique

Curieusement, il semble que les écologues scientifiques ne s'intéressent guère au système industriel en tant que tel, sinon pour en étudier et dénoncer les nuisances. De ce fait, presque tout reste encore à faire pour approfondir les liens entre l'écologie scientifique et l'écologie industrielle. Pourtant, le savoir considérable développé par l'écologie scientifique sur le fonctionnement et la régulation des écosystèmes comporte de nombreux éléments qui pourraient se révéler pertinents pour orienter le système industriel vers une trajectoire viable à long terme, compatible avec le fonctionnement de la Biosphère. En retour, l'étude du système industriel comme cas particulier d'écosystème pourrait contribuer à enrichir l'écologie scientifique elle-même. Ces interactions pourraient faciliter la constitution, très attendue, d'une science globale du « Système Terre », intégrant notamment l'écologie (naturelle et industrielle) et l'ensemble des sciences de la Terre[17].

Épistémologie, philosophie

La recherche sur la nature, la validité, la pertinence et les limites de l'analogie entre écosystèmes industriels et écosys-

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 187

tèmes biologiques ne fait que commencer. Cette réflexion épistémologique ne pourra du reste se développer véritablement que lorsque l'écologie industrielle aura consolidé ses propres fondements. Sur ce plan, les apports de l'écologie scientifique seraient d'autant plus utiles qu'ils contribueraient à enrichir les fondements conceptuels de l'écologie industrielle. Ces fondements restent encore, il faut bien le reconnaître, très sommaires. Des notions de base, comme celles de «consommation» ou de «valorisation» des ressources, utilisées aujourd'hui de manière assez vague, devraient être définies de manière beaucoup plus précise et scientifique, notamment par le biais de concepts issus de la thermodynamique[18].

Quant aux implications philosophiques, éthiques et culturelles de l'écologie industrielle, terrain à peine défriché pour l'instant, elles concernent l'essence même de l'aventure occidentale moderne. En effet, cette dernière considère la croissance économique, l'expansion industrielle et les avancées technologique comme illimitées. Or, ainsi que l'a relevé Dominique Bourg, l'écologie industrielle offre rien moins qu'un nouvel horizon à notre imaginaire technologique: elle implique de poser des bornes à l'artificialisation de la nature, sans pour autant stériliser le processus d'invention technique et scientifique, mais en le stimulant dans un cadre nouveau, tenant pleinement compte des contraintes biosphériques et des limites anthropologiques[19].

Dynamiques technologiques

En contraste avec la rhétorique exubérante de l'innovation, omniprésente dans le discours économiciste courant, la littérature consacrée au développement durable et à l'écologie industrielle fait preuve d'un conservatisme technologique frappant. Dans l'ensemble, on y trouve des recettes (normes, lois, labels, etc.) pour améliorer le fonctionnement de l'économie actuelle, en tenant compte de quelques changements techniques, certes, mais comme s'il ne s'agissait finalement que d'adapter aux

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 188

marges un système évoluant de manière linéaire et prévisible. Ainsi, la recherche d'améliorations environnementales tend à se concentrer sur des dispositifs existants (par exemple rendre le moteur à essence moins polluant), alors qu'il faudrait accorder au moins autant d'attention et de moyens (sinon plus) pour élaborer des alternatives crédibles (telles que le moteur électrique), voire pour explorer des approches totalement nouvelles (repenser la mobilité et l'accessibilité) [20].

S'il importe de prendre en compte la possibilité de changements radicaux et de solutions inédites, c'est que les discontinuités, les ruptures, les surprises parfois, sont inhérentes à la dynamique du système industriel. Les réflexions sur le développement durable, tout particulièrement dans le cadre de l'écologie industrielle, devraient donc bien mieux intégrer cette caractéristique majeure de l'évolution technologique. Cela, d'autant plus que la problématique des dynamiques technologiques prend un relief particulier dans la situation actuelle. Il y a en effet de bonnes raisons de penser que les effets conjugués d'un certain nombre de technologies émergentes pourraient prochainement bouleverser en profondeur l'ensemble du système industriel, bien plus encore que ne l'a fait, par exemple, l'informatique au cours des dernières décennies.

De la «Convergence NBIC» aux artefacts autonomes

Quatre «grappes» scientifiques et technologiques retiennent en priorité l'attention aujourd'hui: les sciences et techniques de la matière vivante (génétique, biotechnologies, etc.), les technologies de l'information (informatique, intelligence artificielle, télécommunications), les nanotechnologies (maîtrise de la matière à l'échelle moléculaire et atomique), et les sciences de la cognition (neuropsychologie, linguistique, sciences du comportement, etc.). À des titres divers, ces technologies présentent des risques et des avantages potentiels pour l'environnement et la société. Mais il ne suffit pas de les envisager isolément, en extrapolant séparément les potentialités de cha-

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 189

cune, comme si les choses pouvaient rester inchangées par ailleurs. Le point crucial réside dans les effets possibles de leur convergence. C'est ce que l'on appelle, aux États-Unis, la « Convergence NBIC» (N pour nanosciences, B pour biotechnologies, I pour informatique, et C pour cognition). Dans l'optique du développement durable, et de l'évolution du système industriel en général, il s'agit alors, dans la mesure du possible, de tenter d'évaluer leurs influences potentielles et d'orienter leurs impacts prévisibles[21].

L'exemple de la nanomédecine permet de se faire une idée de la complexité du problème. La convergence des nano- et des bio-technologies laisse envisager l'avènement d'une «nanomédecine», avec des diagnostics et des thérapies considérablement plus précis et efficaces qu'aujourd'hui. Les enjeux sociaux et politiques s'annoncent scabreux (qui accèdera à ces nouveaux soins de pointe?), mais ils ne le seront pas moins du point de vue de l'environnement. Car, en théorie, la nanomédecine devrait permettre à une population planétaire plus nombreuse (du moins à sa partie la plus riche, celle qui consomme déjà beaucoup de ressources) de vivre nettement plus longtemps qu'aujourd'hui, qui plus est en bonne santé, c'est-à-dire en situation de consommer encore plus de ressources. L'écologie industrielle aura donc fort à faire pour restructurer le système industriel en conséquence… [22]

Mais les choses ne vont vraisemblablement pas en rester à la seule convergence NBIC, car on peut envisager l'éventualité d'une disruption technologique encore plus radicale, résultant des avancées de la science de l'auto-réplication. Cette théorie (dite des «automates auto-reproducteurs»), dont les bases ont été élaborées par le mathématicien John von Neumann dans les années cinquante, étudie, de manière abstraite, à quelles conditions un système artificiel peut se reproduire lui-même. Jusqu'à récemment, les travaux sur l'auto-réplication ont porté sur des entités non matérielles, essentiellement des programmes informatiques (certains «virus» informatiques, par exemple). Or, on

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 190

observe une convergence entre les technologies NBIC et les théories de l'auto-réplication, qui pourrait déboucher, dans un avenir non prévisible (mais potentiellement proche), sur l'apparition d'objets matériels doués d'autonomie, c'est-à-dire capables d'apprendre, de se réparer, et surtout de se dupliquer eux-mêmes[23].

Les impacts sur l'ensemble du système industriel et de la Biosphère seraient naturellement considérables. Admettons, à titre d'exemple spéculatif, que l'on parvienne à mettre au point un mécanisme de photosynthèse articifielle, à base de minuscules robots autonomes, accomplissant une fonction semblable à celles des chloroplastes (ces organelles responsables de la photosynthèse biologique dans les cellules végétales). Ces «nanorobots carbophages», qui absorberaient le carbone en excès dans l'atmosphère, devraient se multiplier eux-mêmes, car il en faudrait un très grand nombre, impossible à fabriquer de manière traditionnelle en un temps raisonnable. Au lieu de synthétiser des molécules hautement complexes comme les sucres végétaux, ils produiraient des matériaux carbonés plus simples, mais néanmoins fort utiles: par exemple des fibres de carbone ou du diamant artificiel, utilisables pour la construction de bâtiments, de routes, de ponts, etc. Cette technique de photosynthèse artificielle diminuerait la teneur atmosphérique en carbone d'origine fossile (réduisant en principe les risques de changements climatiques), tout en valorisant à grande échelle ce carbone comme ressource. Mais on imagine aussi l'ampleur des risques pour la Biosphère, si de tels nanorobots venaient à échapper au contrôle humain. Toutefois, les difficultés les plus redoutables ne seraient probablement pas «simplement» techniques et environnementales, mais sociales et politiques (à qui appartient le stock de carbone fossile de l'atmosphère? qui serait habilité à l'exploiter et selon quelles modalités? comment répartir les revenus résultant de cette richesse carbonée?, etc.)[24].

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 191

Là encore, on voit qu'il ne suffit pas de focaliser l'attention séparément sur tel ou tel aspect technique, mais de veiller aux enjeux globaux d'un faisceau de technologies cruciales, tout en restant attentif à leurs impacts (négatifs ou bénéfiques) sur deux registres : au niveau matériel (impacts sur l'environnement, l'économie, etc.) et sur le plan que l'on peut appeler anthropologique ou symbolique, en ce qu'il touche à la constitution même de l'humain et de son image. La nanomédecine, par exemple, pourrait générer non seulement des risques sociaux, environnementaux, etc., mais elle comporte aussi un risque anthropologique majeur, en l'occurrence celui d'exacerber encore plus le désir individuel de toute-puissance technologique, au point d'inciter à prendre au pied de la lettre le fantasme de déni de la mort[25].

Compte tenu de l'importance prévisible des dynamiques technologiques en cours (convergence NBIC, émergence possible d'artefacts autonomes), les stratégies de transformation du système industriel dans la perspective du développement durable devraient d'urgence les prendre pleinement en compte. Cela impliquerait, entre autres choses, de redéfinir les politiques de soutien à la recherche scientifique et technologique.

Politiques scientifiques

Bien que le thème du développement durable fasse couler beaucoup d'encre, y compris dans les milieux académiques, il faut reconnaître qu'il n'existe pas aujourd'hui, à une échelle significative, de politiques scientifiques (publiques ou privées) véritablement inspirées par cette perspective. L'octroi de quelques moyens supplémentaires aux sciences de l'environnement, par exemple, va certes dans le bon sens, mais ces efforts demeurent parcellaires et largement symboliques. Car, au plan mondial, les grandes orientations de la recherche scientifique et technologique restent, plus que jamais, conditionnées en priorité par des impératifs de compétition commerciale et de

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 192

puissance militaire dans une dynamique de guerre économique généralisée.

La prise en compte sérieuse de la durabilité dans les politiques de recherche supposerait une redéfinition fondamentale des finalités, des objectifs, et par conséquent des arbitrages budgétaires. Indépendamment des questions financières, il faudrait également parvenir à surmonter la résistance traditionnelle des milieux académiques à l'encontre des approches pluridisciplinaires (résistance qui freine, par exemple, l'émergence de domaines nouveaux comme une science du «Système Terre»). Ainsi, faute de volonté politique et de réflexion suffisante, nous ne disposons pas encore de vision globale et cohérente sur ce que pourraient être des choix scientifiques et technologiques favorisant le développement durable. Mais tôt ou tard, il faudra bien affronter les échéances que nous imposera la Biosphère, et en tirer les conséquences pour la recherche scientifique. L'écologie industrielle, qui offre plusieurs pistes concrètes pour orienter l'évolution du système industriel, pourrait alors contribuer de manière significative à l'élaboration d'une telle vision[26].

Ce survol, non exhaustif, des tendances de l'écologie industrielle avait pour but de donner une idée de la richesse et des potentialités de ce domaine en émergence. Reste, pour conclure, à tenter d'éclaircir quelques ambiguïtés ou malentendus persistants sur l'écologie industrielle.

Un traitement des déchets sophistiqué ?

Une première méprise fréquente consiste à ne voir dans l'écologie industrielle guère plus qu'une nouvelle tentative sophistiquée pour tenter de résoudre le problème des déchets. En préconisant de réintégrer dans les circuits économiques les résidus comme matières premières secondaires, l'écologie industrielle représenterait, en quelque sorte, l'étape ultime du traitement des déchets, dans le prolongement de la traditionnelle philosophie *end of pipe* (traitement en fin de processus).

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 193

En réalité, l'idée de valoriser les déchets comme des ressources secondaires est très ancienne, au moins autant que le système industriel lui-même. Et, compte tenu de l'urgence du problème des déchets, il était normal que l'écologie industrielle s'attache en priorité à montrer l'utilité d'une nouvelle approche dans ce domaine. Mais il faut bien voir que l'écologie industrielle propose une perspective allant bien au-delà de la seule valorisation des déchets, l'objectif visé étant d'améliorer l'ensemble du métabolisme des activités humaines, et ceci dans un cadre conceptuel bien précis, celui de l'écologie scientifique. C'est donc une vision très large, qui s'intéresse à l'évolution du système industriel dans sa globalité[27].

Un luxe pour pays riches ?

Un autre préjugé voit dans l'écologie industrielle une stratégie certes séduisante mais réservée aux pays riches : eux seuls pourraient se permettre le luxe de s'adonner à des activités apparemment non rentables à court terme, comme effectuer des études de métabolisme ou échafauder des symbioses industrielles. Cette assertion paraît peu convaincante, et on peut avancer au moins trois arguments principaux conduisant à penser que l'écologie industrielle devrait, au contraire, être considérée comme une stratégie pertinente et prioritaire pour les pays dits en développement :

– La globalisation de l'économie rend anecdotique toute tentative de transformation confinée aux pays riches, alors que ces derniers ont déjà transféré dans des pays en développement une bonne partie de leur activités industrielles (surtout celles nécessitant beaucoup de matières premières et d'énergie) ;

– La majeure partie de la population mondiale se trouve dans les pays en développement, et son poids démographique va encore s'accroître. De plus, le pouvoir d'achat de cette population augmente en moyenne, et surtout, son style de vie devient de plus en plus consumériste. Le problème des déchets et des

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 194

ressources se pose donc de manière encore plus aiguë dans ces pays ;

– La trajectoire d'industrialisation des pays en développement diffère profondément de celle des pays riches. En Europe et aux États-Unis, le processus d'industrialisation s'est fait progressivement, laissant tant bien que mal la possibilité de corriger a posteriori les problèmes principaux. Les pays actuellement en voie d'industrialisation et d'intégration dans l'économie globalisée connaissent un processus beaucoup plus rapide. Il en découle que les approches préventives, telles que l'écologie industrielle, deviennent des priorités urgentes, alors que le traitement traditionnel des déchets selon la philosophie end pipe apparaît comme un luxe peu efficace.

Étant issue à l'origine, aux États-Unis et en Europe, de quelques cercles d'ingénieurs et de responsables d'entreprise, l'écologie industrielle a pu donner l'impression de ne concerner que les pays industrialisés. Mais il n'a pas échappé à un certain nombre de pays en développement, notamment en Asie, que l'écologie industrielle était non seulement l'une des meilleures stratégies pour modérer les impacts négatifs de l'industrialisation, mais aussi un atout non négligeable pour accroître la compétitivité de leurs économies[28].

Un écran de fumée verte ?

Alors que l'écologie industrielle rencontre généralement un accueil favorable dans les milieux de l'économie et de l'ingénierie, elle suscite souvent la méfiance dans les cercles de l'écologie politique et au sein des associations de protection de l'environnement. Cette méfiance s'explique par le fait que ces organisations entretiennent un a priori négatif à l'encontre du terme « industriel » (qui désigne pourtant ici l'ensemble des activités humaines dans la société technologique moderne), surtout lorsqu'il se trouve accolé au mot «écologie». Elles soupçonnent une expression comme « écologie industrielle » de

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 195

servir de paravent aux pratiques plus ou moins avouables de certaines entreprises.

Ainsi, un doute plane sur l'écologie industrielle : et s'il ne s'agissait au fond que d'une habile opération de relations publiques, destinée à faire croire que toutes les activités industrielles ne seraient finalement que d'inoffensives occupations « naturelles » ? Un tel soupçon semble parfois justifié. Mais le point essentiel, c'est évidemment que le recours opportuniste à une imagerie écologisante n'enlève rien à la validité du concept d'écologie industrielle en tant que tel.

Il serait naïf de ne pas prendre acte du fait que certains acteurs économiques et politiques tentent d'utiliser le discours de l'écologie industrielle pour reverdir leur blason (comme cela se fait depuis longtemps avec le développement durable) – après tout, libre à eux de procéder ainsi. Mais les entreprises ou les collectivités publiques tentées par cette stratégie d'image auraient intérêt à y réfléchir à deux fois avant de s'engager sur une telle voie. Car l'écologie industrielle, de par sa dimension opérationnelle concrète, expose ceux qui en abuseraient à se voir demander de rendre des comptes précis, à commencer par leur bilan métabolique, avec lequel il n'est guère possible de tricher. Car, contrairement à la comptabilité financière qui semble n'avoir pour limite que l'ingéniosité de certains virtuoses des chiffres, le principe de conservation de la masse et de l'énergie rend pratiquement impossible toute tricherie systématique avec la comptabilité physique des ressources matérielles.

Par ailleurs, les entreprises sincères qui, de bonne foi, affirment pratiquer l'écologie industrielle en arguant du seul fait qu'elles recyclent des déchets, auraient tout intérêt à y regarder de plus près. Car l'écologie industrielle ne consiste pas simplement à réutiliser des déchets pour le principe, mais bien plutôt à valoriser l'ensemble des ressources de manière compatible avec le fonctionnement de la Biosphère, ce qui suppose également d'engager des stratégies de dématérialisation, de décarbonisation, etc.[29].

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 196

Un autre point d'achoppement tourne autour de la question de la croissance. Là encore, les milieux environnementalistes perçoivent la rhétorique du développement durable (et, par extension, de l'écologie industrielle) comme une manœuvre ne visant qu'à justifier la poursuite d'une croissance économique et d'un développement destructeurs à leurs yeux. Souvent, la notion de développement durable, ambiguë sur ce point, est effectivement interprétée comme synonyme pur et simple de «croissance durable». Mais pour ce qui est de l'écologie industrielle, à y regarder de près, l'idée de limites à la croissance, voire de décroissance des flux de certaines ressources, se révèle inhérente au concept même d'écosystème. Non pas pour des raisons idéologiques de principe, mais simplement parce qu'aucune organisation vivante, dans un système limité tel que la Biosphère, ne peut croître indéfiniment, du moins sur le plan matériel[30].

Une vision purement technicienne ?

Il faut le reconnaître: de prime abord, l'écologie industrielle donne l'impression d'une approche très technocratique. On y parle de flux et de stocks de matière et d'énergie, de réseaux éco-industriels, d'usage optimal des ressources physiques, de dématérialisation, de décarbonisation. Certes, l'écologie industrielle va bénéficier progressivement de l'apport des sciences sociales et humaines. Mais il ne s'agit pas simplement de glâner un supplément d'humanité par ce biais. Le malaise est plus profond, et vaut du reste tout autant, si ce n'est plus, pour le discours du développement durable, moins technique mais plus bureaucratique et insaisissable (de ce point de vue, l'écologie industrielle, référée à la matérialité du métabolisme des êtres vivants, présente l'avantage de rester soumise au principe de réalité). Il manque donc quelque chose – peut-être bien l'essentiel, comme le suggère si justement l'écrivain Jaime Semprun : «… quand le citoyen-écologiste prétend poser la question la plus dérangeante en demandant : "Quel monde allons-nous

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 197

laisser à nos enfants?", il évite de poser cette autre question, réellement inquiétante: "À quels enfants allons-nous laisser le monde?"» [31].

Cette formulation condensée jette une lumière crue sur l'ambivalence fondamentale du discours du développement durable (du moins sous sa forme la plus répandue). La rhétorique du développement durable tend à véhiculer l'idéologie d'une société parfaite qui contribue, en toute bonne conscience, à accroître la détresse subjective et la confusion culturelle dans la mesure où la question de la justice intra- et intergénérationnelle se voit réduite à une simple problématique organisationnelle et gestionnaire (protection des milieux naturels, allocation des ressources matérielles et financières, démocratie participative, nouvelles régulations économiques, etc.). Ainsi, ce discours ne s'adresse qu'au consommateur-citoyen, dépourvu de profondeur existentielle, occultant du même coup le caractère par certains côtés humainement intenable de la société industrielle (en premier lieu, la propagande du Sujet-roi omnipotent soumis aux injonctions de la jouissance sans limites). Soyons clair: la préservation du climat et de la biodiversité, la répartition équitable des ressources et la bonne gouvernance sont évidemment utiles et nécessaires. Mais il importe – c'est ce dont il s'agit ici – de rester attentif aux effets induits par la rhétorique qui les promeut[32].

Si l'écologie industrielle entend jouer un rôle véritablement fécond, de concert avec d'autres approches (car elle ne constitue pas une fin en soi et ne saurait prétendre à aucune exclusivité ou préséance), elle devra donc, en plus de tous les développements conceptuels décrits précédemment, intégrer pleinement ces dimensions non techniques. Ce qui suppose de commencer par reconnaître le caractère inévitablement artificiel et hautement culturel de l'idée même d'écosystème, aussi bien «naturel» qu'«industriel», puisque les humains accèdent au monde par le langage et la représentation[33]. Cela implique également d'endosser la responsabilité qui découle de cette

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 198

prise de conscience: compte tenu des aberrations (parfois meurtrières) auxquelles ont donné lieu les us et abus de l'idée de Nature, les écologues industriels se doivent de redoubler de prudence quant aux effets culturels induits par le recours à des analogies et métaphores se référant au monde naturel ou biologique. Autrement dit, l'écologie industrielle ne prône pas benoîtement une nouvelle variante du «retour à la Nature», mais offre des pistes pour tenter de poursuivre l'aventure humaine en bonne intelligence avec la Biosphère, c'est-à-dire en s'inspirant de ce que nous croyons en comprendre, et en tenant compte des limites qu'elle nous impose.

De ce point de vue, l'apport le plus précieux d'une perspective telle que l'écologie industrielle, à la jonction des registres matériel et symbolique, réside peut-être dans sa capacité de nous aider à nous déprendre des fantasmes de toute puissance, à accepter les limitations et les imperfections de toute existence et de toute société, ouvrant ainsi la voie aux dimensions humaines et spirituelles d'un développement durable digne de ce nom[34].

Notes

1. Robert A. Frosch et Nicholas E. Gallopolous: «Des stratégies industrielles viables», *Pour La Science*, n° 145, novembre 1989, p. 106-115. On trouvera une bibliographie sur l'écologie industrielle dans l'Annexe 2, à la fin de l'ouvrage.

2. Le réseau «Eco-Industrial Estates Asia Network», fondé en 2001, est coordonné par un secrétariat basé à Manille (http://www.eieasia.org). Plusieurs expériences de parcs éco-industriels ont fait l'objet d'une évaluation par Benoît Duret, *Premiers retours d'expérience en écologie industrielle: études de cas en Europe et en Amérique du Nord*, étude effectuée avec le soutien d'EDF, ICAST, CREIDD (UTT) et Auxilia, 2004 (à paraître).

3. La démarche d'EDF est présentée dans l'article de Cyril Adoué, Arnaud Ansart et Frédérique Vincent: «Recherche de synergies matières/énergie entre secteurs industriels. Réflexions et perspectives», *Déchets Sciences & Techniques, Revue francophone d'Écologie Industrielle*, n° 28, 2002, p. 3-7.

4. L'exemple du chauffage provient de l'organisation Swisscontracting (http://www.swisscontracting.ch). Les recherches les plus approfondies sur le thème de l'économie de fonctionnalité se déroulent actuellement en Scandinavie, notamment Oksana Mont, *Functional Thinking – The role of*

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 199

functional sales and product service systems for a function-based society, Swedish Environmental Protection Agency, Report 5233, Stockholm, July 2002. En France, l'Ademe soutient en 2003/2004 une série de séminaires exploratoires sur ce thème, organisés par le CREIDD (www.utt.fr/labos/CREIDD).

5. Stefan Bringezu, responsable des études de flux de matière (Material Flow Analysis, MFA) à l'Institut Wuppertal, coordonne le réseau ConAccount (www.conaccount.net), regroupant la plupart des institutions et des chercheurs actifs dans le domaine. Le premier manuel méthodologique détaillé en anglais sur le métabolisme est dû à Paul H. Brunner et Helmut Rechberger: *Practical Handbook of Material Flow Analysis*, Boca Raton (FL), Lewis Publishers, CRC Press, 2004.

6. En plus de ces efforts destinés à rendre les études de métabolisme utilisables par des non spécialistes, la méthodologie du métabolisme des activités économiques nécessite encore plusieurs développement sur le plan scientifique et technique, en particulier les cinq suivants: 1) les mesures purement quantitatives sous forme de bilans de masse ne suffisent pas, il faut dans un deuxième temps évaluer les impacts potentiels sur la santé humaine et l'environnement des différents flux et stocks de ressources (une tonne de chlore présente un risque très différent d'une tonne de sable, par exemple). Il faut donc coupler les études de métabolisme avec la méthodologie de l'ACV (analyse du cycle de vie, en anglais Life Cycle Analysis, LCA), qui permet d'évaluer et de pondérer, de manière quantitative et qualitative, les impacts durant tout le cycle de vie du produit ou du service considéré; 2) la dimension économique (en termes financiers) des flux de ressources doit également apparaître dans les études de métabolisme. Il s'agit ainsi de coupler les études de métabolisme avec la méthodologie du Life Cycle Costing (LCC), qui indique les coûts à chaque étape du cycle de vie d'un produit, d'un service, d'une ressource; 3) dans la réalité, les ressources ne sont pas consommées selon des moyennes statistiques, mais généralement de manière intermittente et localisée. Il conviendrait donc d'affiner l'analyse des flux et des stocks avec des outils comme les systèmes d'information géographique (SIG) permettant de localiser des ressources données sur un territoire; il conviendrait également de déterminer des courbes de charge temporelles, reflétant des modes de consommation très variables selon l'heure de la journée, la saison, etc.; 4) l'étude et l'analyse systématique du métabolisme à l'échelle de territoires géographiques (ville, municipalité, zone industrielle, exploitation agricole, etc.) va générer d'énormes quantités de données. Il faudra donc développer des outils informatiques pour collecter, organiser, interpréter et utiliser à bon escient ces déluges d'informations (un ingénieur genevois, François Suter, a créé une entreprise dans ce but, la SOFIAE, Software for Industry and Ecology, www.sofiae.com); 5) il convient également de développer une méthodologie de métabolisme adaptée aux pays en développement. L'absence de données fiables, notamment du fait de l'importance considérable d'une économie dite «informelle», nécessite de développer des outils méthodologiques appropriés pour évaluer et interpréter les flux de ressources dans les contextes des pays en

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 200

développement.

7. Ce processus est déjà bien lancé au sein de la Commission européenne, l'agence Eurostat ayant publié en 2000 un premier guide méthodologique destiné à harmoniser les études de métabolisme dans les différents pays de l'Union : Eurostat Task Force on Material Flow Accounting, *Economy-wide material flow accounts and derived indicators. A methodological guide*, European Commission, Eurostat, Luxembourg, 2000 (ISBN : 92-894-0459-0). Pour les États-Unis, les enjeux de politique publique sont explicités dans l'ouvrage préparé par le Board on Earth Sciences and Resources (éd.), *Materials Count : The Case for Material Flows Analysis*, Committee on Material Flows Accounting of Natural Resources, Products, and Residuals, National Research Council, Washington (DC), The National Academies Press, 2004.

8. Le 23 mars 2001, le Grand Conseil (parlement) de la République et Canton de Genève a adopté une «Loi sur l'action publique en vue d'un développement durable (Agenda 21)». Cette loi, entrée en vigueur le 19 mai 2001 (révisée en novembre 2002), donne les bases juridiques pour la réalisation d'un Agenda 21 cantonal. Son Article 12, nommé «Écosite», directement inspiré de la notion d'écosystème industriel, stipule que «l'État favorise la prise en compte des synergies possibles entre activités économiques, en vue de minimiser leur impact sur l'environnement». (Le texte de cette loi est disponible sur le site de l'État de Genève :
www.geneve.ch/agenda21/objectifs_2006/welcome. html.
Sur cette base, fin 2001, l'administration cantonale a mis sur pied un groupe de travail «Écosite» comprenant des représentants de plusieurs départements de l'administration cantonale, ayant pour but de mettre en œuvre cet Article 12, dans le cadre du processus de l'Agenda 21 cantonal genevois. La première étape a consisté, en bonne logique, à effectuer une étude générale de métabolisme du canton de Genève, afin d'avoir une vue d'ensemble permettant d'identifier les actions à engager en priorité. L'étude a été réalisée par Mireille Faist Emmenegger *et al.*, «Métabolisme des activités économiques du canton de Genève – Phase 1», Rapport final pour le groupe de travail Écosite, République et Canton de Genève, Uster (ZH), ESU-services, décembre 2003, 47 p. + annexes (rapport disponible auprès du Service cantonal de gestion des déchets, Département de l'intérieur, de l'agriculture, de l'environnement et de l'énergie (DIAEE), Case postale 206, CH — 1211 Genève 8, Suisse).
Des réflexions similaires sont en cours au sein de la Commission européenne. En dehors de l'Europe, certains pays ont également entamé des démarches législatives favorisant un usage quasi circulaire des ressources. Au Japon, le Cabinet (gouvernement) a formulé, le 14 mars 2003 un plan d'action sur la base de l'Article 15 d'une loi, promulguée en mai 2000, promouvant l'avènement d'une «Recycling-Based Society». Voir Yuichi Moriguchi, «Recent experiences in national numerical targeting of material flow indicators and methodological progress to better meet the policy demands», Plenary presentation at «Quo vadis MFA ?» ConAccount Worskhop at Wuppertal, 9-10 octobre 2003.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 201

Site Internet :
www.wupperinst.org/Sites/Projects/material-flow-analysis/u43.html.

En Chine, l'écologie industrielle rencontre depuis plusieurs années un vif intérêt (elle y est également perçue comme un atout de compétitivité économique). À l'initiative de Gustavo Marin, de la Fondation Charles Léopold Mayer pour le progrès de l'Homme, la première édition du présent ouvrage a vu le jour en version chinoise dès 1999 (Beijing, Economic Daily Press, 1999). En 2002, le ministre de l'Environnement lui-même, M. XIE Zhenhua, a dirigé la publication d'un livre sur ce thème. Une loi est actuellement en discussion sur « l'économie circulaire », directement inspirée de l'écologie industrielle. Pour en savoir plus sur la notion d'économie circulaire en Chine : CCICED (éd.), « Strategy and Mechanism Study for Promotion of Circular Economy and Cleaner Production in China », Working Report of China Council for International Cooperation on Environment and Development (CCICED), Task Force on Circular Economy & Cleaner Production, Beijing, 18 septembre 2003, 50 p. (www.harbour.sfu.ca/dlam/Taskforce/circular.html). Également, Jaqueline A. Larderel et Wei Zhao, «From Pollution Prevention to Environmentally and Socially Sound Economic Development. A global perspective of circular economy in China», Working Paper, UNEP-DTIE, Paris, octobre 2003, 11 p.

9. Une première synthèse sur l'écologie industrielle dans la perspective des études sur l'innovation: Ken Green et Sally Randles: «Industrial Ecology and Spaces of Innovation », paper presented at a workshop on «Industrial Ecology and Spaces of Innovation », organised by the Centre for Innovation and Competition (CRIC), Institute of Innovation Research, University of Manchester, Manchester, UK, 17-18 June 2003. Site Internet :
http://les1.man.ac.uk/cric/sally_randles/.

10. Pour un survol de ces questions, voir Suren Erkman, Colin Francis et Ramesh Ramaswamy, *Industrial Ecology : An Agenda for the Long-term Evolution of the Industrial System*, Proposal booklet for the 21st century, préparé par la Fondation Charles Léopold Mayer en contribution à l'Alliance pour un monde responsable, pluriel et solidaire, Paris, octobre 2001 (disponible sur www.alliance21.org, où l'on trouvera également de nombreux autres documents sur la gouvernance).

11. Sur le métabolisme urbain, voir la synthèse de Franz Oswald et Peter Baccini, *Netzstadt. Designing the Urban*, Basel, Birkhäuser Verlag, 2003. Dans une optique très proche, le Centre de compétences en urbistique, à Martigny (Valais), teste et développe depuis une vingtaine d'années des stratégies de gestion intelligente des écosystèmes urbains en grandeur nature (la ville de Martigny servant de laboratoire : www.crem.ch/).

12. Un petit groupe de chercheurs s'est efforcé, non sans peine, d'introduire la problématique environnementale dans l'agenda du Sommet mondial sur la société de l'information (Genève, décembre 2003 et Tunis en 2005). Thomas Ruddy (EMPA, Zurich) anime un site de référence sur le sujet (www.wsis.ethz.ch/). Dès le printemps 2000, on pouvait observer un accrois-

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 202

sement des embouteillages à San Francisco, dû à la prolifération de camions de courrier rapide chargés de livrer les produits commandés en ligne: Ryan Kim: «E-biz's hard drive. Online delivery trucks add to San Franciso street congestion», *San Francisco Examiner*, 21 juin 2000, p. 1. La Silicon Valley Toxics Coalition (www.svtc.org), à San Jose (CA), documente les nombreux problèmes de pollution occasionnés par l'industrie électronique et coordonne une campagne internationale pour une industrie high tech environnementalement et socialement responsable.

13. «L'écologie industrielle interroge fondamentalement la pensée économique standard», note Nathalie Lacombe, observant que «les principes de l'écologie industrielle font écho non pas à la notion d'individu, mais à la notion de personne.» Voir son article: «L'écologie industrielle: un défi pour la pensée économique», *Préventique Sécurité*, n° 71, septembre-octobre 2003, p. 9-12.

14. Il serait intéressant d'explorer les idées de l'écologie industrielle selon le point de vue de l'économie solidaire et, plus généralement, dans une perspective anti-utilitariste, exposée notamment par Alain Caillé: *Anthropologie du don* (Paris, Desclée de Brouwer, 2000), et dans les divers numéros de la *Revue du MAUSS* (Paris, La Découverte). À propos du don, voir également l'ouvrage de Jacques T. Godbout, *Le don, la dette et l'identité. Homo donator vs homo œconomicus* (Paris, La Découverte, 2000), ainsi que l'essai original de Bruno Viard, *Les Trois Neveux, ou l'altruisme et l'égoïsme réconciliés* (Paris, PUF, 2002), qui note, p. 99: «La fragilité de la Biosphère fait de l'homme un donateur chaque fois qu'un de ses gestes réduit consommation et pollution. La succession des générations et la dette envers la Biosphère constituent la plus incontestable des réalités, celle qui peut et doit ranimer l'esprit du don au XXIe siècle, sous peine de disparition de l'espèce humanité.»

15. Dans le cas des parcs éco-industriels, par exemple, on ne dispose pas encore d'un modèle managérial et économique satisfaisant permettant de systématiser un «comanagement de la production» (selon l'expression de Christophe Blavot, cofondateur du cabinet Écologie industrielle conseil, à Paris). Sur l'enjeu de compétitivité pour les entreprises, voir Daniel C. Esty et Michael E. Porter, «Industrial Ecology and Competitiveness. Strategic Implications for the Firm», *Journal of Industrial Ecology*, vol. 2, n° 1, 1998, p. 35-43. Dans le domaine de la gestion d'entreprise, voir également: Olivier Boiral et Gérard Croteau, «Du développement durable à l'écologie industrielle, ou les métamorphoses d'un «concept-caméléon»», *in Actes de la Xe Conférence de l'Association Internationale de Management Stratégiqu*e, Québec, Université Laval, 13-15 juin 2001, 24 p. (Actes disponibles sur CD-ROM).

16. Sur la nécessité de remettre en cause le modèle traditionnel de compétition aboutissant à la «guerre de tous contre tous», voir les analyses de Jean-Claude Michéa dans *Impasse Adam Smith* (Castelnau-le-Lez, Éditions Climats, 2002) et *Orwell éducateur* (même éditeur, 2003).

17. Certains écologues scientifiques font exception, tel Robert Barbault, en France, dont la dernière édition de son manuel de référence (*Écologie générale*.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 203

Structure et fonctionnement de la biosphère, Paris, Dunod, 2000, 5e édition), comporte un chapitre sur l'écologie industrielle.

18. Une tentative dans ce sens, celle de Lloyd Connelly et Catherine P. Koshland, «Exergy and industrial ecology – Part 1: An exergy-based definition of consumption and a thermodynamic interpretation of ecosystem evolution», *Exergy, an International Journal*, vol. 1, n° 3, 2001, p. 146-165.

19. Dominique Bourg, «Industrial Ecology: Philosophical and political meanings», *in* Dominique Bourg et Suren Erkman (éd.), *Perspectives on Industrial Ecology* (préface du président Jacques Chirac), Sheffield (UK), Greenleaf, 2003, p. 58-61. On trouvera une synthèse des enjeux philosophiques, éthiques et culturels de l'écologie industrielle dans: Ralf Isenmann, «Further Efforts to Clarify Industrial Ecology's Hidden Philosophy of Nature», *Journal of Industrial Ecology*, vol. 6, n° 3-4, 2003, p. 27-48; et dans Martina M. Keitsch, « A Philosophical Approach towards Industrial Ecology», NTNU IndEcol Paper, Trondheim, 2000, 13 p. Site Internet : www.indecol.ntnu.no/indecolwebnew/staff/martina.htm.

20. En dehors de la problématique de l'environnement, on connaît de nombreux cas où tous les efforts se concentrent sur l'amélioration d'un système existant (par exemple le tube à vide) alors que la «solution», comme on le réalise généralement après coup, réside dans un changement de système technique (le circuit intégré sur silicium). Ce phénomène a été étudié en détail par Arnulf Grübler, *Technology and Global Change*, Cambridge University Press, 1998. Naturellement, il ne faut pas pour autant sous-estimer l'inertie inhérente à certains systèmes techniques à longue durée de vie, comme les infrastructures de transport, phénomène également étudié par Arnulf Grübler, *The Rise and Fall of Infrastructures. Dynamics of Evolution and Technological Change in Transport*, Heidelberg, Physica Verlag, 1990.

21. La convergence NBIC fait l'objet depuis plusieurs années d'une réflexion officielle de grande ampleur aux États-Unis. On peut relever que le processus national de consultation sur ce thème est financé non seulement par la National Science Foundation, mais aussi par le Département du commerce, indiquant bien la perception stratégique des enjeux. Voir le rapport de synthèse de Mihail C. Roco et William Sims Bainbridge (éd.), « Converging Technologies for Improving Human Performance. Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science», Report sponsored by the National Science Foundation and The Department of Commerce, prepared by the World Technology Evaluation Center (WTEC), Inc., Arlington (VA), juin 2002, 468 p. (disponible sur Internet : wtec.org/ConvergingTechnologies/). Les enjeux sociaux des nanotechnologies ont également fait l'objet d'une vaste étude sous l'égide de la Fondation nationale des sciences : Mihail C. Roco et William Sims Bainbridge (éd.), *Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology*, Arlington (VA), National Science Foundation, mars 2001). Site Internet : http://itri.loyola.edu/nano/societalimpact/nanosi.pdf.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 204

Il convient de distinguer entre la notion de convergence NBIC, apparue à la fin des années quatre-vingt-dix, et celle de «Singularité», proposée dès 1993 par le mathématicien et auteur de science-fiction californien Vernor Vinge. Le terme de «Singularité» désigne ici le point de l'évolution technologique à partir duquel les capacités de calcul et de cognition des machines surpassent celles des humains. À ce stade, les humains ne peuvent plus contrôler le système technique, et il devient impossible de prédire ce qui pourrait advenir (d'où l'idée d'un «point singulier»). Il existe une littérature considérable sur la singularité, disponible principalement sur Internet (voir par exemple : www.singularity.org). La grande majorité des scientifiques travaillant sur les nanotechnologies et d'autres domaines de pointe dans les institutions officielles jugent ces craintes sans fondement et ces spéculations sans grand intérêt. À l'inverse, parmi les chercheurs qui réfléchissent sur ces questions avec une certaine distance, souvent en dehors des organismes officiels, une majorité semble estimer qu'il faudrait dès aujourd'hui agir comme si le pire était certain. Sur ce point, voir l'ouvrage de Jean-Pierre Dupuy, *Pour un catastrophisme éclairé. Quand l'impossible est certain*, Paris, Éditions du Seuil, 2002.

22. Le premier ouvrage entièrement consacré à la nanomédecine a été écrit par Robert A. Freitas, Jr., *Nanomedicine, Volume I: Basic Capabilities*, Austin (TX), Landes Bioscience, 1999 (www.landesbioscience.com). Voir également l'éditorial de Kelly Morris: «Macrodoctor, come meet the nanodoctors», *The Lancet*, vol. 357, 10 mars 2001, p. 778.

23. L'ouvrage de référence sur les machines auto-réplicantes : Robert A. Freitas, Jr. et Ralph C. Merkle, *Kinematic Self-Replicating Machines*, Georgetown (TX), Landes Bioscience, 2004. Robert Freitas avait également rédigé la première synthèse sur le sujet au début des années quatre-vingt : Robert A. Freitas, Jr. et William P. Gilbreath (éd.), *Advanced Automation for Space Missions*, Proceedings of the 1980 NASA/ASEE Summer Study, Santa Clara (CA), 23 juin-29 août 1980, Washington (DC), NASA Conference Publications 2255, 1982, 386 p. À noter que cette école d'été de la NASA sur les concepts futuristes en exploration spatiale avait été organisée à la demande de Robert Frosch (l'auteur du fameux article sur l'écologie industrielle paru dans *Scientific American* en septembre 1989), alors qu'il était administrateur de la NASA. Voir également : Daniel Mange, Moshe Sipper, André Stauffer et Gianluca Tempesti, *Toward Self-Repairing and Self-Replicating Hardware : The Embryonics Approach*, Proceedings of the Second NASA/DoD Workshop on Evolvable Hardware (Silicon Valley, CA, 13-15 juillet 2000), IEEE Computer Society, Los Alamitos (CA), 2000, p.205-214.

24. La valorisation du carbone fossile dans des infrastructures urbaines présenterait l'avantage de pouvoir absorber aisément une quantité équivalente à celle qui s'ajoute chaque année dans l'atmosphère du fait des activités humaines (de l'ordre de trois milliards de tonnes d'équivalent carbone, soit, *grosso modo*, un tiers de la consommation mondiale de matériaux de construction, estimée à une dizaine de milliards de tonnes par an). Mais répétons qu'il

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 205

ne s'agit ici que d'un exemple spéculatif destiné à stimuler la réflexion, étant entendu, naturellement, que la priorité devrait aller à la décarbonisation massive du système énergétique par le biais d'économies d'énergie et de promotion d'énergies dites « renouvelables » (dont on aura tout de même pris soin, au préalable, d'évaluer le métabolisme complet). Il semble néanmoins raisonnable d'envisager d'autres options au cas où cette décarbonisation ne se ferait pas, ou trop lentement et à trop petite échelle, ce qui semble malheureusement être le cas pour l'instant. À tout prendre, l'idée de valoriser le carbone présent dans l'atmosphère par une sorte de photosynthèse artificielle (à l'image des écosystèmes biologiques) n'est pas moins intéressante que celle, très en vogue aujourd'hui (pour des raisons financières faciles à imaginer), qui consiste à capter le gaz carbonique à la sortie de certaines sources concentrées (les centrales électriques à charbon et au fuel, notamment), pour l'emprisonner durant des siècles dans des structures géologiques (en espérant qu'il n'aura pas l'idée inconvenante d'en ressortir prématurément), ce qui ressemble fort à une stratégie *end of pipe* poussée à l'extrême… (sur les efforts substantiels consacrés à la séquestration du gaz carbonique, voir le site Internet : www.co2sequestration.info/).
Une synthèse sur ces enjeux: Suren Erkman, «Global Carbon Wealth: écologie industrielle, nanotechnologies et gouvernance du cycle du carbone », Note conceptuelle ICAST, Genève, juin 2000, 12 p. Pour une évaluation technique préliminaire : David Rochat et Thomas Tscharner, « Les nanorobots carbophages: cas d'application des nanotechnologies à l'écologie industrielle», Rapport de projet « Sciences, Techniques et Société », Lausanne, EPFL, Section Sciences et ingénierie de l'environnement, juin 2002, 31 p. Les risques de prolifération incontrôlée des nanorobots sont abordés par Robert Freitas, Jr., *Some Limits to Global Ecophagy by Biovorous Nanoreplicators, with Public Policy Recommendations*, Richardson (TX), Zyvex LLC, avril 2000, 33 p. Site Internet :
www.foresight.org/NanoRev/Ecophagy.html.
On trouvera un aperçu des enjeux pour la législation environnementale dans Glenn Harland Reynolds, « Environmental Regulation of Nanotechnology : Some Preliminary Observations», *Environment Law Reporter*, Environmental Law Institute, Washington (DC), 2001 (www.eli.org).

25. Un bon exemple de ce déni: Wesley M. Du Charme, *Becoming Immortal. Nanotechnology, You and the Demise of Death*, Evergreen (CO), Blue Creek Ventures, 1995. Voir également le film : *Nanotechnologies: la mort de la Mort ?*, réalisé par Suren Erkman et Steven Artels, Genève, Télévision suisse romande, 26 minutes, 1993. Pierre Legendre, qui a étudié en profondeur la problématique des risques anthropologiques parle de «désymbolisation», par exemple, *La 901e conclusion. Étude sur le théâtre de la Raison*, Leçons I, Paris, Fayard, 1998, p. 214 et p. 248. Dans une optique similaire, Dominique Bourg parle de risque symbolique, « à savoir un risque dont la menace correspondante ne saurait être appréhendée en termes physiques ou économiques, mais qui renvoie à une altération profonde de représentations fondamentales, sous-jacentes à des institutions ou à des comportements majeurs » (D. Bourg :

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 206

«L'homme comme nature ou comme autofabrication», *Diogène*, n° 195, juillet-septembre 2001, p. 21). Pour une approche littéraire, voir Ollivier Dyens, *Chair et métal. Évolution de l'homme : la technologie prend le relais*, Montréal, vlb éditeur, 2000.

26. Parmi les rares projets de recherche en cours sur ce que pourrait être une «science de la durabilité», le plus systématique semble être le programme «Sustainability Science» dirigé par William C. Clark, à la Kennedy School of Government de l'Université de Harvard (http://sust.harvard.edu/index.html). Pour une première synthèse de ces travaux, voir William C. Clark et Nancy M. Dickson, *Sustainability science: The emerging research program*, Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA (PNAS), vol. 100, n° 14, 8 juillet, 2003, p. 8059-8061. Rappelons que William Clark était responsable du numéro spécial de *Scientific American* de septembre 1989 consacré au développement durable, où fut publié l'article initial de Frosch et Gallopoulos. Au passage, signalons une tentative de réflexion originale sur ce thème: André Gsponer, *L'Arme et le gadget. Essai sur l'irénoversion de la société industrielle*, Paris, Fondation pour le progrès de l'homme, Documents de travail n° 35, août 1993, 149 p.

27. On trouve sans peine des ouvrages anciens consacrés à l'analyse et à la valorisation de déchets industriels, par exemple: Frederick A. Talbot, *Millions from Waste*, Philadelphia (PA), J. B. Lippincott Company, et London, T. Fischer Unwin Ltd., 1920, et surtout le rapport final de la grande enquête menée au début des années 1920 par la Fédération des sociétés d'ingénieurs américaines : Committee on Elimination of Waste in Industry of the Federated American Engineering Societies, *Waste in Industry*, publié par les Federated American Engineering Societes, Washington, DC, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York (NY), 1921. Certains auteurs y voient une préfiguration de l'écologie industrielle, mais cette interprétation ne convainc guère (le concept d'écosystème n'ayant été formulé explicitement que dans les années 1930), sauf à réduire l'écologie industrielle à une simple stratégie de valorisation des déchets, ce que précisément, nous semble-t-il, elle n'est pas. (Voir par exemple: Pierre Desrochers, «Industrial Ecology and the rediscovery of inter-firm recycling linkages: historical evidence and policy implications», *Industrial and Corporate Change*, vol. 11, n° 5, p. 1031-1057.)

28. Pour une argumentation détaillée concernant la pertinence de l'écologie industrielle dans le contexte des pays en voie de développement, voir Suren Erkman et Ramesh Ramaswamy, *Applied Industrial Ecology. A New Platform for Planning Sustainable Societies (Focus on Developing Countries with Case Studies from India)*, Bangalore, Aicra Publishers, 2003. Site Internet: (www.aicra.com/industrial-ecology.html). Pour une première tentative en Amérique latine (Colombie), voir Claudia Binder, «The Early Recognition of Environmental Impacts of Human Activities in Developing Countries», Ph.D. Thesis, Diss. ETH Nr. 11748, Federal Institute of Technology Zurich (ETHZ), Switzerland, 1996 (www.uns.umnw.ethz.ch/pers/binder). Concernant l'Afrique, voir les analyses d'Alpha Oumar Dramé, «Industrie

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 207

d'aluminium, écologie industrielle et développement durable. L'Industrie de bauxite et d'alumine de Guinée face aux défis de l'environnement», thèse de doctorat, institut universitaire d'études du développement, université de Genève, décembre 2001, et l'étude de Marc Schmidlin, « Perspectives concrètes pour l'écologie industrielle en Afrique. L'exemple du Cameroun», Rapport d'une mission de prospection, janvier à mai 1999, ICAST, Genève, 2000.

29. Indépendamment des critiques que l'on peut adresser à la notion de développement durable sur son contenu et ses usages (sincères ou opportunistes), l'usure de cette expression, qui résonne de plus en plus comme vide de sens, atteste d'un phénomène plus fondamental et préoccupant, celui d'une exténuation accélérée du langage, d'une dévaluation toujours plus rapide des mots, accompagnée d'une tendance croissante à dire pour ne pas faire (comme le montre la prolifération de grandes déclarations sur l'environnement, la réduction de la pauvreté, etc., sans suites concrètes). Pour une analyse pénétrante de la rhétorique des organisations internationales sur le développement durable, voir l'essai de Marie-Dominique Perrot, *Mondialiser le non-sens*, Paris, L'Âge d'Homme, 2001.

30. Dans l'aire francophone, on doit au travail érudit et pionnier de Jacques Grinevald l'introduction de la notion de décroissance dès la fin des années soixante-dix. Voir son « Introduction à la deuxième édition », *in* Nicholas Georgescu-Roegen, *La Décroissance. Entropie – Écologie – Économie*, présentation et traduction de Jacques Grinevald et Ivo Rens, Paris, Sang de la terre, 1995, p. 9-42. En France, les publications récentes sur le thème de la décroissance, qui témoignent d'un certain effet de mode, gagneraient à s'inspirer de la rigueur conceptuelle d'auteurs comme Georgescu-Roegen et Grinevald. Pour un point de vue liant la thématique de la décroissance à la perspective du métabolisme industriel, voir néanmoins : François Schneider : « Point d'efficacité sans sobriété », *in* Michel Bernard, Vincent Cheynet, Bruno Clémentin (sous la coordination de), *Objectif décroissance. Vers une société harmonieuse*, Paris, L'Aventurine, 2003, p. 34-43.

31. Jaime Semprun, *L'Abîme se repeuple*, Paris, Éditions de l'Encyclopédie des nuisances, 1997, p. 20.

32. Pour illustrer ce point, considérons la problématique des déchets et de leur rôle symbolique en tant que Déchet (thème traité de manière très complète dans l'ouvrage collectif publié sous la direction de Jean-Claude Baune, *Le Déchet, le Rebut, le Rien*, Seyssel, Éditions Champ Vallon, 1999). L'écologie industrielle, en s'inspirant des processus observés dans les écosystèmes naturels, invite à poser un regard différent sur les déchets, considérés non plus comme des rebuts dont il faut se débarrasser, mais comme des ressources valorisables. Ainsi, l'utilisation des déchets en tant que « matières premières secondaires » au sein de « réseaux trophiques industriels » (réseaux d'entreprises, systèmes d'échanges régionaux, etc.), conjuguée aux avancées technologiques, pourrait considérablement diminuer leur quantité. En principe, il est donc désormais plausible d'envisager à terme la disparition des déchets. À

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 208

bien des égards, ce serait évidemment un progrès fort réjouissant. Mais une interrogation demeure : une société sans Déchet serait-elle humainement vivable? La question peut surprendre. Pour en mesurer la portée, il faut souligner qu'en toute société les déchets jouent un rôle anthropologique primordial, puisqu'ils servent de support symbolique au Rebut, à l'Inutile, au Reste ; puisqu'ils incarnent l'Échec, le Reste, le Délaissé, le Négatif, le Sacrifié. Le Déchet, en tant que représentation culturellement instituée, est l'une des principales figures de cette dimension de négativité et d'imperfection, inhérente à toute vie et toute société humaine.

Or, une fois les déchets disparus, que peut-il advenir du Déchet? La figuration de la négativité étant une nécessité vitale, il en découle que celle-ci se déplace vers des substituts aptes à l'incarner de façon symboliquement crédible. À cet égard on peut craindre qu'elle ne se reporte, en toute ingénuité, sur certaines catégories d'humains, comme en attestent les figures du « Tiers-monde » et du « Quart-monde » et plus récemment de « l'Exclu », dernier avatar postmoderne du Déchet hyperindustriel. Pire encore, ce sont les générations à venir, celles précisément dont le développement durable entend préserver les conditions de survie matérielle, qui risquent de se trouver sous statut symbolique de Déchet.

De ce point de vue, on peut penser que l'acharnement avec lequel certains zélateurs du développement durable (notamment de sa version anglo-américaine, aujourd'hui dominante) prétendent vouloir éliminer les déchets relève, consciemment ou non, d'une stratégie qui dépasse le légitime souci de protection de l'environnement. Armé d'un inattaquable mot d'ordre (« Sauvez la planète ! »), l'Occident hyperindustrialiste entend plus que jamais imposer au monde entier sa religion de l'efficacité et du management intégral, bien entendu pour le plus grand bien présumé de tous. Une religion laïque, qui milite inlassablement pour l'irrésistible avènement d'un monde nouveau, géré de façon totalement efficace, sans gaspillages, sans déchets, sans ratés. Une religion intégriste à sa manière, qui promeut l'idéal d'une société affranchie des enjeux de pouvoir (démocratique, conviviale, auto-organisée en réseaux), équilibrée, sans failles, transparente, apaisée, comblée, heureuse, bref, parfaite, enfin libérée du tourment de la négativité et du sacrifice – et, par là même, humainement invivable.

Un jour, peut-être, la société industrielle parviendra à s'affranchir du problème des déchets. Mais elle n'en sera pas quitte pour autant avec les inépuisables tourments de la négativité, du tragique, du sacrifice, figurés, entre autres, par le Déchet ou ses substituts. On voit mal comment la société industrielle, aussi exemplaire soit-elle sur le plan du développement durable, pourrait faire l'impasse sur ces indéracinables questions anthropologiques. N'en déplaise aux planificateurs de la société parfaite, il se trouvera toujours des gens pour en témoigner, au premier rang desquels des artistes et des poètes, ou tout simplement des représentants d'autres cultures.

33. Comme le rappelle Pierre Legendre, « l'environnement pour l'homme est le produit d'une théâtralisation du monde, qui a pour préalable logique la

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 209

scène intérieure (sue et insue) construisant la relation à soi comme dialectique de l'altérité. L'écologique est d'abord l'intrapsychique […] », *in De la Société comme Texte. Linéaments d'une Anthropologie dogmatique*, Paris, Fayard, 2001, p. 218. Sur les enjeux anthropologiques de la société industrielle, l'œuvre de Pierre Legendre fait référence (voir notamment les volumes des « Leçons», parus aux Éditions Fayard). Dans une optique similaire et complémentaire, voir les analyses de Monette Vacquin, *Main basse sur les vivants* (Postface de Catherine Labrusse-Riou, Paris, Fayard, 1999), de Pierre Musso, *Critique des réseaux* (Paris, PUF, 2003) ou encore de Jean-Pierre Le Goff, *La Barbarie douce* (Paris, La Découverte, 1999, rééd. 2003).

34. En 1979, dix ans exactement avant la parution de l'article de Frosch et Gallopoulos qui allait marquer l'essor de l'écologie industrielle, Christopher Lasch avait parfaitement pressenti les enjeux d'une telle vision: «En termes psychologiques, le rêve de maîtriser la nature est la solution régressive qu'adopte notre culture pour résoudre le problème posé par le narcissisme – régressive parce qu'elle cherche à retrouver l'illusion primale de l'omnipotence et refuse d'accepter les limites de notre autonomie collective. En termes religieux, la révolte contre la nature est aussi une révolte contre Dieu – c'est-à-dire contre la réalité de notre dépendance face à des forces qui nous sont extérieures. La science de l'écologie – exemple d'une attitude «exploratrice» envers la nature, opposée à l'attitude faustienne – ne nous laisse aucun doute sur l'impossibilité dans laquelle nous sommes d'échapper à cette dépendance. L'écologie nous montre que la vie humaine fait partie d'un organisme plus vaste et que l'intervention humaine dans les processsus naturels a des conséquences à long terme qui resteront toujours plus ou moins inquantifiables.» *in* Christopher Lasch, *La Culture du Narcissisme*, Castelnau-le-Lez, Éditions Climats, 2000 (traduit par Michel L. Landa, préfacé par Jean-Claude Michéa ; 1979 pour l'édition originale américaine), p. 302. Pour une introduction de haute tenue à la dimension spirituelle des questions d'environnement, on peut lire l'essai d'Annick de Souzenelle, *Manifeste pour une mutation intérieure*, Gordes, Éditions Le Relié, 2003, écrit en écho à l'ouvrage de Mikhaïl Gorbatchev, *Mon manifeste pour la Terre* (même éditeur).

Annexe 1
L'écologie industrielle en France

Alors que l'écologie industrielle a connu un essor rapide dès le début des années quatre-vingt-dix aux États-Unis, au Canada, au Japon et en Europe du Nord, l'intérêt pour ce nouveau domaine, en France, s'est d'abord caractérisé par une assez longue période de latence. Toutefois, ce décalage semble devoir diminuer rapidement, compte tenu de l'attention croissante que rencontre actuellement l'écologie industrielle dans divers milieux économiques, politiques et administratifs, de l'Hexagone[1].

En France, à l'instar des autres pays industrialisés, plusieurs chercheurs ont commencé à défricher le terrain dès les années cinquante-soixante, en premier lieu dans le monde académique[2]. Mis à part ces travaux précurseurs, force est de constater que l'intérêt pour l'écologie industrielle est, en règle générale, resté marginal en France jusqu'à la fin des années quatre-vingt-dix. La «Conférence internationale sur l'écologie industrielle et la durabilité», organisée à l'Université de technologie de Troyes (UTT) en septembre 1999, à l'initiative du philosophe Dominique Bourg, a marqué un tournant dans la visibilité et la dynamique de l'écologie industrielle en France.

NDLR. Les notes de l'annexe 1 sont en page 213.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 212

Depuis 2001, le Centre de recherches et d'études interdisciplinaires sur le développement durable (CREIDD) de l'UTT propose un DESS « Écologie industrielle ». Le CREIDD héberge également la première Chaire d'écologie industrielle en France, créée en 2004 grâce au soutien de partenaires industriels[3].

Dans la foulée de la conférence de Troyes, de grands groupes industriels, comme Électricité de France (EDF), Gaz de France (GDF), Vivendi Environnement (aujourd'hui Veolia), Suez, Lafarge, Ciments Calcia, Dagris (coton), parmi d'autres, ont accentué leur veille et intensifié leur engagement en écologie industrielle. Début 2000, Gaz de France, en partenariat avec la municipalité de Grande-Synthe (près de Dunkerque) a lancé une étude pilote sur une zone industrielle. À la suite de cette démarche, plusieurs entreprises implantées dans la région ont créé l'Association Ecopal, qui promeut les pratiques de développement durable à l'échelle de la Communauté urbaine de Dunkerque et au-delà[4].

À peu près au même moment, à l'été 2000, EDF confiait à Arnaud Ansart (à la Direction des Études et Recherches) une mission de prospection, qui a débouché sur le lancement formel d'un programme d'écologie industrielle au sein du groupe. Dans ce cadre, EDF explore notamment la possibilité d'élaborer de nouveaux services à haute valeur ajoutée, par exemple la conception et la réalisation de synergies (échanges de matières et d'énergie) entre diverses entreprises sur un territoire donné. EDF a également soutenu le lancement, fin 2001, de l'Association Auxilia, qui accompagne les collectivités locales dans leurs démarches de développement durable à l'échelle territoriale. En novembre 2003, sous l'égide d'Auxilia, l'Association des Juniors de l'écologie industrielle (Association SynerJIE) a été créée pour servir de plate-forme d'informations et d'échanges à l'intention des personnes souhaitant orienter leurs activités professionnelles vers ce nouveau domaine[5].

En ce qui concerne la gestion environnementale des zones d'activités, terrain de prédilection pour la valorisation et la

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 213

mutualisation des ressources entre entreprises, l'Association Orée, sous l'impulsion notamment de Philippe Marzolf et Jean-François Vallès, a dès le début des années quatre-vingt-dix favorisé la mise en œuvre de pratiques relevant de l'écologie industrielle dans les zones d'activités[6].

Enfin, le projet d'une « Cité des Matières », près du Havre, constitue sans doute l'une des initiatives les plus ambitieuses en France à l'heure actuelle. Bénéficiant d'un site exceptionnel (l'Abbaye du Valasse, à Lillebonne), soutenu par de nombreux partenaires publics et privés de Haute Normandie, le projet de Cité des Matières ambitionne de devenir un pôle de référence dans le domaine de l'écologie industrielle et du développement durable, aussi bien pour le grand public (par le biais d'expositions), que pour les professionnels, dans la perspective de la valorisation et de l'émergence de nouveaux savoir-faire dans la région[7].

Les conditions semblent donc réunies pour que la France comble son retard sur le terrain de l'écologie industrielle. Retard somme toute très relatif et, surtout, secondaire par rapport à la question de fond, à laquelle tous les pays, chacun à leur manière, se trouvent plus que jamais confrontés: comment passer des déclarations d'intention à leur mise en œuvre concrète et viable ?

Notes

1. À signaler, en France, une exception notable: la Fondation Charles Léopold Mayer pour le progrès de l'homme (FPH), à Paris. Dès 1993, la FPH a engagé une recherche prospective sur le sujet, puis soutenu le lancement, en 1995, d'un réseau international, le premier du genre, dédié à la dissémination et à la mise en œuvre de l'écologie industrielle à l'échelle globale. L'un des tous premiers projets de ce réseau, nommé Industrial Ecology Praxis (IEP), a été la création, en 1996, de l'Institut de la Symbiose, à Kalundborg, au Danemark (www.symbiosis.dk). Le réseau IEP organise notamment des conférences internationales sur l'écologie industrielle avec des partenaires variés (Kalundborg, 1996; Ahmedabad, 1999; Troyes, 1999; Alger, 2000; Manille 2001). En 2004, la conférence se déroule en Thaïlande (www.eieasia.org).

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 214

C'est également à l'initiative de la FPH que la première étude française de métabolisme territorial en domaine rural (Domaine de la Bergerie, dans le Vexin) a été effectuée par le cabinet Écologie industrielle conseil sarl (EIC), à Paris (eic@ecologie-industrielle.com).
Le soutien de la FPH à ces activités s'inscrit dans le cadre d'une initiative globale, l'Alliance pour un monde responsable, pluriel et solidaire (www.alliance21.org). Le contexte et les enjeux de cette initiative sont explicités dans l'ouvrage de Pierre Calame, *La démocratie en miettes. Pour une révolution de la gouvernance*, Paris, Éditions Charles Léopold Mayer/Descartes & Cie, 2003.

2. Sans prétendre à l'exhaustivité, ont peut ainsi mentionner les travaux de Jacques Vigneron, à l'université de Cergy-Pontoise. Les spécialistes de la rudologie (science des déchets) ont également reconnu depuis longtemps les potentialités d'une valorisation systématique des détritus à l'image des écosystèmes naturels, comme en témoignent les recherches interdisciplinaires conduites, par exemple, par Alain Navarro et Pierre Moskowicz (INSA-Lyon), Gérard Bertolini et Cyrille Harpet (Université de Lyon). L'écologie industrielle intéresse également depuis un certain temps des économistes comme Sylvie Faucheux (université de Versailles), Nathalie Lacombe (ESSCA), et Léo Dayan (université de Paris I).
Les références à des publications de ces auteurs, ainsi qu'à d'autres documents en français sur l'écologie industrielle, sont regroupées dans la seconde partie de la sélection bibliographique (Annexe 2).

3. Les Actes de cette conférence sont disponibles sous forme de CD-ROM: Dominique Bourg et Suren Erkman (éd.), *Proceedings of the Conference on Industrial Ecology and Sustainability*, Troyes, 22-25 septembre 1999, publié par UTT et ICAST, Troyes et Genève, septembre 2000 (CD-ROM, disponible auprès du CREIDD: www.utt.fr/labos/CREIDD). Certaines contributions à cette conférence, mises à jour, ont été regroupées sous forme de livre: Dominique Bourg et Suren Erkman (éd.), *Perspectives on Industrial Ecology* (préface du président Jacques Chirac), Sheffield (UK), Greenleaf, 2003.
Pour le DESS «Écologie industrielle» de l'UTT, voir www.utt.fr/dess-ei/. Plusieurs formations postgrades dans le domaine de l'environnement comportent aujourd'hui un module sur ce thème: université de Corse (DESS Ingénierie de l'écologie: http://ingeco.fr.st/); ISTIA-Angers (DESS Ingénierie et management des projets et processus: www.univ-angers.fr/) ; ISIGE- École des Mines de Paris; École des Mines d'Alès; université de Mulhouse, École supérieure de commerce de La Rochelle, etc.

4. Sur l'expérience pilote de Grande-Synthe on peut consulter le rapport de Suren Erkman et Jean-Claude Ray, «Écologie industrielle à Grande-Synthe: préétude sur la zone industrielle des Deux-Synthe», Ville de Grande-Synthe, Mission pour un développement durable, Rapport final, mai 2000 (mairie de Grande-Synthe, BP 149, 59760 Grande-Synthe. Contact: M. Daniel Truy).
Pour en savoir plus sur l'Association Ecopal, voir son site: www.ecopal.org.
Suivant une démarche similaire, un Club aubois d'écologie industrielle s'est

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 215

récemment formé à Troyes, en partenariat avec le CREIDD (UTT). À noter que l'écologie industrielle n'est pas l'apanage des seuls grands groupes, pour preuve l'engagement de PME comme Dislaub (sucrerie-distillerie, Troyes) ou Yprema, qui tente d'appliquer ces principes dans les travaux publics (www.yprema.fr). Enfin, dans le prolongement de l'étude pilote de Grande-Synthe, le premier cabinet de conseil français en écologie industrielle, «Écologie industrielle conseil Sarl» a été créé en 2001 à Paris, à l'initiative de Christophe Blavot et Jean-Claude Ray.

5. Association Auxilia:/www.auxilia.asso.fr.
Association SynerJIE: www.synerjie.net.

6. Association Orée (/www.orée.org). On peut également mentionner: l'Association APREIS (/www.apreis.org), la fondation « Écosite et Développement durable » (/www.ecosites.org), le Comité 21 (www.comite21.fr), l'Association d'écologie industrielle, à Versailles (www.gemme.fr/aei/), et le programme européen Masurin, pour la revitalisation des sites industriels urbains (coordonné en France par l'INERIS: www.ineris.fr/masurin/masurin.htm).

7. Association pour la promotion de la Cité des Matières (APCM): www.lacitedesmatieres.com. Début 2004, l'association Auxilia et l'APCM ont lancé conjointement la première plate-forme française consacrée à l'écologie industrielle sur Internet : http://France-ecologieindustrielle.org. Rappelons également le site francophone de référence sur le développement durable, sous la direction de Christian Brodhag : www.agora21. org.

Annexe 2
Sélection bibliographique

Depuis la première édition de cette ouvrage, en 1998, la littérature consacrée à l'écologie industrielle a considérablement augmenté. Cette annexe présente une bibliographie enrichie (mais non exhaustive) et mise à jour avec des références en anglais, puis en français.

I. Publications en anglais

Pour faciliter l'orientation du lecteur, les références sont regroupées en cinq sections :
1. Écologie industrielle: généralités
(Écologie industrielle, écologie scientifique, politiques publiques, management)
2. Métabolisme des activités économiques
(Analyse des flux de matières, métabolisme industriel, métabolisme territorial)
3. Parcs et réseaux éco-industriels
(Zones, parcs, réseaux éco-industriels, symbioses industrielles, Kalundborg)
4. Stratégies de l'éco-restructuration
(Dématérialisation, décarbonisation, économie de fonctionnalité, design pour l'environnement, société de l'information)
5. Innovation, dynamiques technologiques, politiques scientifiques
(Convergence NBIC, nanotechnologies, systèmes auto-reproducteurs)

Plusieurs revues académiques et scientifiques publient régulièrement des articles en rapport avec l'écologie industrielle :
Le *Journal of Industrial Ecology*, publié depuis 1997 par les MIT Press, constitue la principale source d'informations sur le domaine: mitpress. mit. edu/JIE.
Le *Journal of Cleaner Production* publie régulièrement des articles consacrés à l'écologie industrielle: www.elsevier.nl/locate/jclepro.
Le magazine *UNEP Industry and Environment*, publié par la Division «Technologie, Industrie et Économie» du Programme des Nations unies pour l'environnement propose également des articles sur ce thème: www.un eptie. org/
Le *Journal of Ecological Economics*, publié par The International Society for Ecological Economics (www.sciencedirect.com/science/journal/09218009).

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 218

Mentionnons encore une revue à paraître dès 2004, *Progress in Industrial Ecology, An International Journal* : www.inderscience.com/catalogue/p/pie/indexpie.html.
NB. Les adresses des sites Internet ont été validées au 15 mai 2004.

1. Écologie industrielle: généralités

Allen, David T. et Nasrin Behmanesh: «Wastes as Raw Materials», *in* Braden R. Allenby et Deanna J. Richards (éd.), *The Greening of Industrial Ecosystems*, National Academy of Engineering, Washington (DC), National Academy Press, 1994, p. 69-89.

Allen, David T. et Kirsten Sinclair Rosselot, *Pollution Prevention for Chemical Processes*, New York (NY), John Wiley & Sons, Inc., 1997.

Allen, Thimothy F. H. et Thomas W. Hoekstra, *Toward a Unified Ecology*, New York (NY), Columbia University Press, 1992.

Allenby, Braden R., *Industrial Ecology. Policy Framework and Implementation*, Englewood Cliffs (NJ), Prenctice Hall, 1999.

Allenby, BradenR., «Earth Systems Engineering: The Role of Industrial Ecology in an Engineered World», *Journal of Industrial Ecology*, vol. 2, n° 3, 1998, p. 73-93.

Allenby, Braden R., «Industrial ecology: governance, laws et regulations», *in* Robert U. Ayres et Leslie W. Ayres (éd.), *A Hetbook of Industrial Ecology*, Cheltenham, UK, Edward Elgar, 2002, p. 60-69.

Allenby, Braden R. et William E. Cooper, «Understanding Industrial Ecology from a Biological Systems Perspective», *Total Quality Environmental Management*, vol. 3, n° 3, printemps 1994, p. 343-354.

Allenby, Braden R. et Deanna J. Richards (éd.), *The Greening of Industrial Ecosystems*, Washington (DC), National Academy Press, 1994.

Andrews, ClintonJ., «Putting industrial ecology into place. Evolving role for planners», *Journal of the American Planning Association*, vol. 65, 1999, p. 364-375.

Arena, Alejandro Pablo, «Are Industrial Ecology Concepts and Tools Suitable for Developing Countries'Reality? A Case Study of Life Cycle Assessment *in* Argentina», *International Journal of Ecology and Environmental Sciences*, International Scientific Publications, New Delhi, vol. 28, 2002, p. 35-41 (numéro spécial: Industrial Ecology, édité par Kanduri Krrishnamohan et Braden R. Allenby).

Axelrod, Robert, *The Complexity of Cooperation. Agent-Based Models of Competition and Collaboration*, Princeton (NJ), Princeton University Press, 1997.

Ayres, Robert U., «On industrial ecosystems», *in* Robert U. Ayres et Leslie W. Ayres (éd.), *A Handbook of Industrial Ecology*, Cheltenham (UK), Edward Elgar, 2002, p. 44-59.

Ayres, Robert U. et Leslie W. Ayres, *Industrial Ecology. Towards Closing the Materials Cycle*, Cheltenham (UK), Edward Elgar, 1996.

Ayres, Robert U. et Leslie W. Ayres (éd.), *A Handbook of Industrial Ecology*, Edward Elgar, Cheltenham (UK), 2002.

Bey, Christoph, «Quo vadis industrial ecology – realigning the discipline with its roots», *Greener Management International*, vol. 34, 2002, p. 35-42.

Bey, Christoph, «Changing economies of scale – synergies between an ecological tax reform and the development of industrial ecosystems», *Business Strategy and the Environment*, vol. 6, 2001, p. 383-393.

Bey, Christoph, «Sustainable Production, Allocation and Consumption: Creating Steady-state Economic Structures in Industrial Ecology», PhD Thesis, université d'Édinbourg, 2001.

Biermann, Frank, «From intergovernmental environmental policy to earth system governance», *Politics and the Life Sciences*, vol. 21, n° 2, septembre 2002, p. 72-77.

Billen, Gilles, «From ecology to natural systems to industrial ecology: the need for an extension of the scope of ecology», *in* Dominique Bourg et Suren Erkman (éd.), *Perspectives on Industrial Ecology*, Sheffield (UK), Greenleaf, 2003, p. 324-337.

Bourg, Dominique et Erkman, Suren (éd.): *Perspectives on Industrial Ecology* (préface du président Jacques Chirac), Sheffield (UK), Greenleaf, 2003.

Bourg, Dominique, «Industrial Ecology: Philosophical and political meanings», *in* Dominique Bourg et Suren Erkman (éd.), *Perspectives on Industrial Ecology* (préface du président Jacques Chirac), Sheffield (UK), Greenleaf, 2003, p. 58-61.

Bourg, Dominique et Erkman, Suren (éd.), *Proceedings of the Conference on Industrial Ecology and Sustainability*, Troyes, 22-25 septembre 1999, publié par UTT et ICAST, Troyes et Genève, septembre 2000 (CD-ROM).

Bradshaw, A. D., Richard Southwood et Frederick Warner (éd.), *The Treatment and Handling of Wastes*, Londres, publische publié par Chapman & Hall for The Royal Society, «Technology in the Third Millenium», n° 1, 1992.

Brandenburger, Adam M. et Barry J. Nalebuff, *Co-opetition, A revolutionary mindset that combines competition and cooperation*, New York (NY), Currency Doubleday, 1996.

Brattebø, Helge, «The impact of industrial ecology on university curricula», *in* Dominique Bourg et Suren Erkman (éd.), *Perspectives on Industrial Ecology*, Sheffield (UK), Greenleaf, 2003, p. 315-323.

Brown, James, *Macroecology*, Chicago (IL), The University of Chicago Press, 1995.

Burström, Fredrik et Jouni Korhonen, «Municipalities and Industrial Ecology: a promising marriage?», *in Proceedings of the Helsinki Symposium on Industrial Ecology and Material Flows*, 30 août-3 septembre 2000, CD-ROM, Jyväskylä University, School of Business and Economics, Jyväskylä, Finland, 2000 (ISBN: 951-39-0783-X). (www.jyu.fi/economics/)

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 220

CCICED (éd.), «Strategy and Mechanism Study for Promotion of Circular Economy and Cleaner Production in China», Working Report of China Council for International Cooperation on Environment and Development (CCICED), Task Force on Circular Economy & Cleaner Production, Beijing, September 18, 2003, 50 pages. (www.harbour.sfu.ca/dlam/Taskforce/circular.html)

Chertow, Marian et Daniel C. Esty (éd.), *Thinking Ecologically. The Next Generation of Environmental Policy*, New Haven (CT), Yale University Press, 1995.

Chiu, Anthony, «Ecology, Systems and Networking. Walking the Talk *in* Asia», *Journal of Industrial Ecology*, Vol, 5, n° 2, 2002, p.5-8.

Chokkakula, Srinivas, «Industrial Ecology for Regional Planning and Environmental Management», Individual Study Project, Institute for Development Policy and Management, University of Manchester, 2000, 20 pages. (svas@satyam.net.*in*)

Cole, D. J. A. et Brander, G. C. (éd.), *Bioindustrial Ecosystems*, Amsterdam, Elsevier, Ecosystems of the World 21, 1986.

Connelly, Lloyd etKoshland, CatherineP., «Exergy and industrial ecology – Part 1: An exergy-based definition of consumption and a thermodynamic interpretation of ecosystem evolution», *Exergy, an International Journal*, vol. 1, n° 3, 2001, p. 146-165.

Connelly, Lloyd et Koshland, Catherine P., «Exergy and industrial ecology – Part 2: A non dimensional analysis of means to reduce resource depletion», *Exergy, an International Journal*, vol. 1, n°4, 2001, p. 234-255.

Desrochers, Pierre, «Industrial Ecology and the rediscovery of inter-firm recycling linkages: historical evidence and policy implications», *Industrial and Corporate Change*, vol.11, n° 5, p. 1031-1057.

Ehrenfeld, John R., «Industrial Ecology: A framework for product and process design», *Journal of Cleaner Production*, vol. 5, n° 1/2, 1997, p.87-95.

Ehrenfeld, John R., «Industrial Ecology: Paradigm or Normal Science?», *American Behavioral Scientist*, vol. 44, n° 2, 2000, p.229-244.

Erkman, Suren, «The recent history of industrial ecology», *in* Robert U.Ayres et Leslie W. Ayres (éd.), *A Handbook of Industrial Ecology*, Cheltenham (UK), Edward Elgar, 2002, p.27-35.

Erkman, Suren, «Industrial Ecology: A New strategy for optimal use and sharing and resources», *inProceedings of a Conference on Natural Resources and Politics in Central Asia*, Almaty, Kazakhstan, 15-16 juin 2002, Genève, CIMERA Conference Proceedings n° 2, 2003, p.105-121 (www.cimera.org).

Erkman, Suren et Ramaswamy, Ramesh, *Applied Industrial Ecology. A New Platform for Planning Sustainable Societies. Focus on Developing Countries with Case Studies from India*, Bangalore, Aicra Publishers, 2003 (www.aicra.com/industrial-ecology.html).

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 221

Erkman, Suren et Ramaswamy, Ramesh, «Industrial ecology: a new Cleaner Production strategy», *UNEP Industry and Environment*, vol. 24, n° 1-2, janvier-juin 2001, UNEP-DTIE, Paris, p. 64-67.

Erkman, Suren et Ramaswamy, Ramesh, «Industrial Ecology: Applicability in South Asia», CDEP Occasional Paper n° 1, Centre for Development and Environment Policy (CEDP), Indian Institute of Management, Calcutta, 2003 (www.iimcal.ac.*in*/centers/cdep/).

Esty, Daniel C. et Porter, Michael E., «Industrial Ecology and Competitiveness. Strategic Implications for the Firm», *Journal of Industrial Ecology*, vol. 2, n° 1, 1998, p. 35-43.

Francis, Colin, «The chemical industry from and industrial ecology perspective», *in* Dominique Bourg et Suren Erkman (éd.), *Perspectives on Industrial Ecology*, Sheffield (UK), Greenleaf, 2003, p.120-134.

Frosch, Robert A.: «Industrial Ecology: A philosophical introduction», in *Proceeedings of the National Academy of Sciences of the USA*, vol. 89, n°3, 1er février 1992, p.800-803.

Frosch, Robert A., «Sustainable Development and Industrial Ecology», *The Bridge*, National Academy of Engineering, vol. 23, n° 2, été 1993, p. 2.

Frosch, Robert A., «Industrial Ecology: Minimizing the Impact of Industrial Waste», *Physics Today*, vol. 47, n° 11, novembre 1994, p. 63-68.

Frosch, Robert A., «The Industrial Ecology of the 21st Century», *Scientific American*, vol. 273, n° 3, septembre 1995, p. 144-147.

Frosch, Robert A., «Toward the End of Waste: Reflections on a New Ecology of Industry», *Daedalus, Journal of the American Academy of Arts and Sciences*, vol. 125, n° 3, 1996, p. 199-212.

Frosch, Robert A., «Industrial Ecology: Closing the Loop on Waste Materials», *in* Deanna J. Richards (éd.), *The Industrial Green Game. Implications for Environmental Design and Management*, National Academy of Engineering, Washington, DC, National Academy Press, 1997, p. 37-47.

Frosch, Robert A.et Nicholas E.Gallopoulos, «Strategies for Manufacturing», *Scientific American*, vol. 261, n°3, septembre1989, p.94-102, numéro spécial: «Managing Planet Earth».

Frosch, Robert A. et Nicholas E.Gallopoulos, «Towards An Industrial Ecology», *in* A. D. Bradshow *et al*. (éd.), *The Treatment and Handling of Wastes*, Chapman & Hall, London, 1992, p. 269-292.

Fussler, Claude et James, Peter, *Driving Eco-innovation. A breakthrough discipline for innovation and sustainability*, Londres, Pitman Publishing, 1996.

Geisser, Kenneth, *Materials Matter. Toward a Sustainable Materials Policy*, préface de Barry Commoner, Cambridge (MA), The MIT Press, 2001.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 222

Glenck, Emmanuel, «Integrated Waste Management in Selected Industrial Production Sectors: Theory and Practice», *in* P.Pangotra, S.Erkman et H.Singh (éd.), *Industry and Environment*, Proceedings of a Workshop held at Indian Institute of Management, Ahmedabad, India, 5-6 février 1999, p.117-131 (www.icast.org).

Golley, Frank Benjamin, *A History of the Ecosystem Concept in Ecology*, New Haven (CT), Yale University Press, 1993.

Graedel, Thomas E., «On the Concept of Industrial Ecology», *Annual Review of Energy and the Environment*, Palo Alto (CA), 1996, vol. 21, p. 69-98.

Graedel, Thomas E. et Allenby, Braden R., *Industrial Ecology*, Englewood Cliffs (NJ), Prenctice Hall, Inc., 1994.

Graedel, Thomas E. et Allenby, Braden R., *Industrial Ecology and the Automobile*, Englewood Cliffs (NJ), Prenctice Hall, 1998.

Hall, Charles A. S. (éd.), *Maximum Power. The Ideas and Applications of H. T. Odum*, Niwot (CO), University Press of Colorado, 1995.

Hall, CharlesS.,Cleveland, Cutler J.et Kaufmann, Robert, *Energy and Resource Quality: The Ecology of the Economic Process*, Niwot, Colorado, University Press of Colorado, 1992. [Première édition en 1986 par John Wiley.]

Han Shi, Yuichi Moriguichi et Jianxin Yang, «Industrial Ecology in China, Part I: Research», *Journal of Industrial Ecology*, vol. 6, n°3-4, 2003, p. 7-11.

Han Shi, Yuichi Moriguichi et Jianxin Yang, «Industrial Ecology in China, Part II: Education», *Journal of Industrial Ecology*, vol. 7, n° 1, 2003, p. 5-8.

Hardy, Catherine et Graedel, Thomas E., «Industrial Ecosystems as Food Webs», *Journal of Industrial Ecology*, vol. 6, n°1, 2002, p. 29-38.

Hawken, Paul, *The Ecology of Commerce. A Declaration of Sustainability*, New York (NY), Harper Business, 1993.

Hill, Stuart B., «Redesign as Deep Industrial Ecology: Lessons from Ecological Agriculture and Social Ecology», article présenté au séminaire «Industrial Ecology and Spaces of Innovation», organisé par le Centre for Innovation and Competition (CRIC), Institute of Innovation Research, University of Manchester, Manchester, UK, 17-18 juin 2003 (http://les1.man.ac.uk/cric/sally_randles/). À paraître dans R. Côte, J. Tansey et A. Dale (éd.), *Industrial Ecology: A Question of Design*?, Vancouver (BC), University of British Columbia Press, 2004.

Huber, J., «Towards Industrial Ecology: Sustainable development as a concept of ecological modernization», *Journal of Environmental Policy and Planning*, vol. 2, n° 4, 2000, p. 269-285.

Isenmann, Ralf, «Further Efforts to Clarify Industrial Ecology's Hidden Philosophy of Nature», *Journal of Industrial Ecology*, vol. 6, n° 3-4, 2003, p. 27-48.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 223

Jones, C. G., Lawton J. H.et Shachak, M., «Organisms as ecosystem engineers», *Oikos*, vol. 69, n° 3, 1994, p.373-386.

Jørgensen, Sven E.et Mitsch, William, «Ecological Engineering», *in* Sven E. Jørgensen (éd.), *A Systems Approach to the Environmental Analysis of Pollution Minimization*, Boca Raton (FL), CRC Press, 2000, p. 225-239.

Keitsch, Martina M., « A Philosophical Approach towards Industrial Ecology », NTNU IndEcol Paper, Trondheim, 2000, 13 p. Site Internet : www.indecol.ntnu.no/indecolwebnew/staff/martina.htm.

Keitsch, MartinaM., « Ethical Consequences of Systems Thinking in Industrial Ecology and their Relation to Environmental Philosophy », NTNU IndEcol Paper, Trondheim, 2001, 10 p. (www.indecol.ntnu.no/indecolwebnew/staff/martina.htm).

Keitsch, Martina, M., « Industrial Ecology and its philosophy: A new approach towards sustainable development», *in* Dominique Bourg et Suren Erkman (éd.), CD-ROM *Proceedings of the Conference on Industrial Ecology and Sustainability*, Troyes, 22-25 septembre 1999, publié par UTT et ICAST, Troyes et Genève, septembre 2000.

Keller, David R. et Golley, Frank B. (éd.), *The Philosophy of Ecology. From Science to Synthesis*, Athens (GA), The University of Georgia Press, 2000.

Keoleian, Gregory A. et Menerey, Dan, «Sustainable Development by Design: Review of Life Cycle Design and Related Approaches», *Air & Waste*, vol. 44, mai1994, p.645-668.

Korhonen, Jouni, *Industrial Ecosystem. Using Material and Energy Flow Model of an Ecosystem in an Industrial System*, Jyväskylä Studies in Business and Economics, n° 5, Jyväskylä University, Jyväskylä (Finlande), 2000 (ISBN: 951-39-0826-7).

Korhonen, Jouni, «Four ecosystem principles for an industrial ecosystem», *Journal of Cleaner Production*, vol. 9, 2001, p. 253-259.

Krrishnamohan Kanduri, « Urban Metabolism as an Industrial Ecology Tool for Sustainable Development of Human Settlements – A Viewpoint», *International Journal of Ecology and Environmental Sciences*, International Scientific Publications, New Delhi, vol. 28, 2002, p. 63-70 (numéro spécial: Industrial Ecology, édité par Kanduri Krrishnamohan et Braden R Allenby).

Larderel, Jacqueline A. et Wei Zhao, «From Pollution Prevention to Environmentally and Socially Sound Economic Economic Development. A global perspective of circular economy in China», Working Paper, UNEP-DTIE, Paris, octobre2003, 11 pages.

Lifset, Reid et Graedel, Thomas E., «Industrial ecology: goals and definitions», *in* Robert U.Ayres et Leslie W.Ayres (éd.), *A Handbook of Industrial Ecology*, Cheltenham, UK, Edward Elgar, 2002, p. 3-15.

Lowe, Ernest A., Warren, John L. et Moran, Stephen R., *Discovering Industrial Ecology. An Executive Briefing and Sourcebook*, Battelle Press, Columbus (OH), 1997 (ISBN: 1-57477-034-9).

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 224

Lowe, Ernest A., «Industrial Ecology – An Organizing Framework for Environmental Management», *Total Quality Environmental Management*, vol. 3, n° 1, automne 1993, p. 73-85.

Manahan, Stanley E., *Industrial Ecology. Environmental Chemistry and Hazardous Waste*, Boca Raton (FL), Lweis Publishers, CRC Press, 1999.

McPherson, Guy R. et Stephen DeStefano, *Applied Ecology and Natural Resource Management*, Cambridge (MA), Cambridge University Press, 2003.

Mebratu, Desta, «Strategy Framework for Sustainable Industrial Development in sub-Saharan Africa. A systems-evolutionary approach », Doctoral Dissertation, The International Institute for Industrial Environmental Economics (IIIEE), Lund University, Lund, Suède (ISBN: 91-88902-12-9).

Nemerow, Nelson L., *Zero Pollution for Industry. Waste Minimization Through Industrial Complexes*, New York (NY), John Wiley & Sons, 1995.

NTVA (éd.), *Industrial Ecology and Sustainable Design*, Proceedings of the Second Industrial Ecology Workshop and Seminar, Norwegian Academy of Technlogical Sciences (NTVA), Lerchendal gård, Trondheim, février 1-2, 1996 (ISBN 82-7719-021-2).

NTVA (éd.), *Industrial Ecology and Curriculum*, Proceedings of the Thirdrd Industrial Ecology Workshop and Seminar, Norwegian Academy of Technlogical Sciences (NTVA), Lerchendal gård, Trondheim, 15-16 octobre 1998 (ISBN 82-7719-033-6) (www.ntva.no/)

Nyati, Kalyan P., «Relevance and Scope of Industrial Ecology in Indian Industry » *in* Prem Pangotra, Suren Erkman et Himanshu Sing (éd.), *Industry and Environment*, Proceedings of a Workshop held at Indian Institute of Management, Ahmedabad, 5-6 février 1999, p.17-20 (www.icast.org).

O'Rourke, Dara, Connelly, Lloyd et P. Koshland, Catherine, «Industrial ecology: a critical review», *International Journal of Environment and Pollution*, vol. 6, n°2/3, p.89-112, 1996.

Oswald, Franz et Peter Baccini, *Netzstadt. Designing the Urban*, Basel, Birkhäuser Verlag, 2003.

Pangotra, Prem, Erkman, Suren et Singh, Himanshu (éd.), *Industry and Environment*, Proceedings of a Workshop held at Indian Institute of Management, Ahmedabad, 5-6 février 1999 (www.icast.org).

Patel, C.Kumar N. (éd.), «Industrial Ecology, Proceedings of a colloquium held May 20 and 21, 1991, at the National Academy of Sciences of the USA», Washington (DC), *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, vol. 89, n° 3, 1er février 1992, p. 793-878.

Paturi, Felix R., *Nature, Mother of Invention (The Engineering of Plant Life)*, Londres, Penguin Books, Pelican Book, 1978.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 225

Polunin, Nicholas et John Burnett (éd.), *Surviving with the Biosphere*, Proceedings of the Fourth International Conference on Environmental Future held in Budapest, Hungary, 22-27 April 1990, Edinburgh, Edinburgh University Press, 1993.

Ramaswamy, Ramesh, «The relevance of industrial ecology indeveloping countries», *in* Dominique Bourg et Suren Erkman (éd.), *Perspectives on Industrial Ecology*, Sheffield (UK), Greenleaf, 2003, p.306-314.

Ravetz, Joe, «Integrated Assessment for Sustainability Appraisal in Cities & Regions», *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 20, 2000, p. 31-64.

Ravetz Joe, *City-Region 2020: integrated planning for a sustainable environment*, Londres, Earthscan, 2000.

Ravetz, Joe, «Regional industrial ecology and resource productivity – new approaches to analysis and communication», paper presented at a Workshop organised by the Centre for Innovation and Competition, Institute of Innovation Research, University of Manchester, Manchester, UK, 17-18 juin 2003. Site Internet : www.art.man.ac.uk/PLANNING/cure/.

Reiners, William A. et Driese, Kenneth L., «Transport of Energy, Information, and Material through the Biosphere», *Annual Review of Environment and Resources*, vol. 28, 2003, p. 107-135.

Rejeski, David, «Mars, Materials and Three Morality Plays: Materials Flows and Environmental Policy», *Journal of Industrial Ecology*, vol. 1, n° 4, 1998, p. 13-18.

Richards, Deanna J. (éd.), *The Industrial Green Game. Implications for Environmental Design and Management*, National Academy of Engineering, Washington, DC, National Academy Press, 1997.

Richards, Deanna J. et Frosch, Robert A. (éd.), *Corporate Environmental Practices. Climbing the Learning Curve*, Washington (DC), National Academy Press, 1994.

Richards, Deanna J. et Fullerton, Ann B. (éd.), *Industrial Ecology : U.S.-Japan Perspectives*, Washington (DC), National Academy Press, 1994.

Richards, Deanna J. et Pearson, Greg (éd.), *The Ecology of Industry. Sectors and Linkages*, National Academy of Engineering, Washington, DC, National Academy Press, 1998.

Robbins, Harvey et Finley, Michael, *TransCompetition. Moving Beyond Competition and Collaboration*, New York (NY), McGraw Hill, Bussiness Week Books, 1998.

Røine, Kjetil, *Does Industrial Ecology provide any new Perspectives?*, NTNU IndEcol Report n° 3, 2000, Industrial Ecology Programme, NTNU, Trondheim (ISBN 1501-6153). Site Internet : www.indecol.ntnu.no/indecolwebnew/publications/publications.htm.

Sapp, Jan, *Evolution by Association. A History of Symbiosis*, Oxford, Oxford University Press, 1994.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 226

Schandl, Heinz et Niels Schulz, «Industrial ecology: the UK», *in* Robert U. Ayres et Leslie W.Ayres (éd.), *A Handbook of Industrial Ecology*, Cheltenham, UK, Edward Elgar, 2002, p.323-333.

Schneider, Stephen H., «Earth systems engineering and management», *Nature*, vol. 409, 18janvier 2001, p. 417-421.

Schulze, Peter (éd., *Engineering Within Ecological Constraints*, Washington, DC, National Academy Press, 1996.

Schwab, Jim, «The Challenge of Industrial Ecology», *Zoning News (American Planning Association)*, juin 1998, p. 1-2.

Schwartzman, David, *Life, Temperature, and the Earth. The Self-organizing Biosphere*, New York (NY), Columbia University Press, 1999.

Seager, T.P., et Theis, T.L., «A uniform definition and quantitative basis for industrial ecology», *Journal of Cleaner Production*, vol. 10, n° 3, juin2002, p. 225-235.

Slobodkin, Lawrence B., «On the inconsistancy of ecological efficiency and the form of ecological theories», *in* E. S.Deevey (éd.), *Growth by Intussusception, Ecological Essays in Honor of G.Evelyn Hutchinson*, New Haven (CT), publié par le Connecticut Academy of Arts and Sciences, vol. 44, décembre 1972, p. 291-305.

Socolow, Robert, Andrews, Clinton, Berkhout, Frans et Thomas, Valerie (éd.), *Industrial Ecology and Global Change*, Cambridge University Press, 1994.

Spiegelman, Jonah, «Industrial Ecology. Putting Sustainable Development to Work», SDRI Working Paper, n° 23, October 2000. Site Internet : www.basinfutures.net/pdfs/JS_Industrial_Ecology. pdf.

Spiegelman, Jonah, «Beyond the Food Web. Connections to a Deeper Industrial Ecology», *Journal of Industrial Ecology*, vol. 7, n°1, 2003, p. 17-23.

Stokes, KennethM., *Man and the Biosphere. Toward A Coevolutionary Political Economy*, Armonk (NY), M. E. Sharpe, 1994.

Taylor, Theodor B.et Humpstone, Charles, *The Restoration of the Earth*, New York (NY), Harper & Row, 1972.

Tibbs, Hardin, *Industrial Ecology. An Environmental Agenda for Industry*, Global Business Network, Emeryville (CA), 1993 (www.gbn.org).

Van der Ryn, Sim et Cowan, Stuart, *Ecological Design*, Washington (DC), Island Press, 1996.

Vogel, Steven, *Life's Devices. The physical world of animals and plants*, Pinceton (NJ), Princeton University Press, 1988.

Volk, Tyler, *Gaia's Body. Toward a Physiology of the Earth*, New York (NY), Copernicus/Springer Verlag, 1998.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 227

Waage, Sissel (éd), *Ants, Galileo, & Gandhi. Designing the Future of Business through Nature, Genius, and Compassion. With an Introduction by Ray Anderson*, Sheffield (UK), Greenleaf, 2003.

Wallner, Heinz Peter et Narodoslawsky, Michael, «The Concept of Sustainable Islands – Cleaner Production, Industrial Ecology, and the network paradigm as preconditions for regional sustainable development» *Journal of Cleaner Production*, vol. 2, n° 3-4, p. 167-171, 1995.

Warin, R. H., «Ecosystems: fluxes of matter and energy», *in* Cherett, J.M. (éd.), *Ecological Concepts (The Contribution of Ecology to an Understanding of the Natural World)*, Oxford, Blackwell Scientific Publications, 1989, p. 17-41.

Watanabe, Chihiro, *Industry-Ecology: Introduction of Ecology into Industrial Policy*, Ministry of International Trade and Industry (MITI), Tokyo, 1972, 12 p.

Weibel, Ewald R., *Symmorphosis. On Form and Function in Shaping Life*, Cambridge (MA), Harvard University Press, 2000.

Wernick, Iddo K., «Industrial Ecology», *in Managing Human-Dominated Ecosystems*, Proceedings of the Symposium at the Missouri Botanical Garden, St. Louis (MI), 26-29 mars 1998, St. Louis (MI), Monographs in Systematic Botany from the Missouri Botanical Garden, vol. 84, 2001 (ISBN 0-915279-85-1).

Woodfield, Judith, *Ecosystems and Human Activity*, London, Collins Landmark Geography, 2000.

2. Métabolisme des activités économiques (métabolisme industriel, territorial)

Adriaanse, Albert *et al.*, *Resource Flows, The Material Basis of Industrial Economies*, Washington, DC, World Resources Institute, 1997.

Anderberg, Stefan, «Material Flow Analysis and Sustainable Development», *Journal of Social Sciences*, New Delhi, vol. 1, n° 3, 1997, p. 187-200.

Anderberg, Stefan, «Industrial metabolism and the linkages between the Ethics, Economy and the Environment», *Ecological Economics*, vol. 24, 1998, p. 211-220.

Anderberg, Stefan, «Sustainable development, industrial metabolism and the process landscape. Reflections on regional material-flow studies», *in* T. Granfelt (éd.), *Managing the Globalized Environment*, Londres, Intermediate Technology Publishers, 1999, p. 133-149.

Anderberg, Stefan, Bergbäck, Bo et Lohm, Ulrik, «Flow and Distribution of Chromium *in* the Swedish Environment: A New Approach to Studying Environmental Pollution», *Ambio*, vol. 18, n° 4, 1989, p. 216-220.

Anderberg, Stefan, Prieler, Sylvia, Olendrzynski, Krzysztof et de Bruyn, Sander, *Old Sins. Industrial Metabolism, Heavy Metal Pollution, and Environmental Transition in Central Europe*, Tokyo, UNU and IIASA, United Nations University Press, 2000.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 228

Ayres, Robert U., «Industrial Metabolism and Global Change», *International Social Science Journal*, n° 121, août 1989, p.363-373.

Ayres, Robert U., «Industrial Metabolism», *in* Jesse H. Ausubel et Hedy E. Sladovich (éd.), *Technology and Environment*, National Academy of Engineering, National Academy Press, Washington, DC, 1989, p.23-49.

Ayres, RobertU., «Industrial metabolism – closing the materials cycle», *in* Tim Jackson (éd.), *Clean Production Strategies (Developing Preventive Environmental Management in the Industrial Economy)*, Lewis Publishers, Boca Raton (FL), 1993, p. 165-188.

Ayres, Robert U., «Industrial Metabolism: Theory and Policy», *in* Braden R. Allenby et Deanna J. Richards (éd.), *The Greening of Industrial Ecosystems*, National Academy Press, Washington (DC), 1994, p. 23-37.

Ayres, Robert U. et Allen V. Kneese, *Production, Consumption, and Externalities*, Resources for the Future, Inc., Washington (DC), 1969 (réédition n° 76, *American Economic Review*, juillet 1969, p.282-297.)

Ayres, RobertU., Schlesinger, William H.et Socolow, Robert H., «Human Impacts on the Carbon and Nitrogen Cycles», *in* Robert H. Socolow, Clinton Andrews, Frans Berkhout et Valerie Thomas (éd.), *Industrial Ecology and Global Change*, Cambridge University Press, 1994, p. 121-155.

Ayres, Robert U. et Udo E. Simonis (éd.), *Industrial Metabolism. Restructuring for Sustainable Development*, Tokyo, New York, United Nations University Press, 1994.

Baccini, Peter et Brunner, Paul, *Metabolism of the Anthroposphere*, Springer Verlag, Berlin, 1991.

Bailey, Robert Reid, «Input-Output Modeling of Material Flows in Industry», PhD Thesis, Georgia Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering, juillet 2000 (www.srl.gatech.edu/~reid/rb_phd. html).

Barret, John, «A Regionalist Approach to Material flow Analysis and Ecological Footprints», Stockholm Environment Institute, York, UK, 2002. Site internet: www.york.ac.uk/inst/sei/staff/jbarrett.html.

Barret, John et Scott, Anthony, *An Ecological Footprint of Liverpool: Developing Sustainable Scenarios. A Detailed Examination of Ecological Sustainability*, Stockholm Environment Institute – York, and Sustainable Steps Environmental Consultants, York, UK, février 2001 (www.york.ac.uk/inst/sei/staff/jbarrett.html).

Bauer, G. *et al.*, «Identification of Material Flow Systems», *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 4, n° 2, 1997, p. 105-112.

Board on Earth Sciences and Resources (éd.), *Materials Count, The Case for Material Flows Analysis*, Committee on Material Flows Accounting of Natural Resources, Products, and Residuals, National Research Council, Washington, DC, The National Academies Press, 2004.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 229

Binder, Claudia, «The Early Recognition of Environmental Impacts of Human Activities in Developing Countries», Ph.D. Thesis, Diss. ETH Nr. 11748, Federal Institute of Technology Zurich (ETHZ), Switzerland, 1996. Site internet : www.uns.umnw.ethz.ch/pers/binder.

Binder, Claudia, Schertenleib, R., Diaz, J., Bader, Hans-Peter et Baccini, Peter, «Regional water balance as a tool for water management *in* developing countries», *Water Resources Development*, vol. 13, n° 1, 1997, p. 5-20.

Binder, Claudia et Patzel, Nikola, «Preserving tropical soil organic matter at watershed level. A possible contribution of urban organic wastes», *Nutrient cycling in Agroecosystems*, vol. 61, 2001, p. 171-181.

Binder, Claudia, Bader, Hans-Peter, Scheidegger, Ruth et Baccini, Peter, «Dynamic models for managing durables using a stratified approach: the case of Tunja, Colombia», *Ecological Economics*, vol. 38, 2001, p. 191-207.

Binder Claudia, «Research in Partnership with Developing Countries: Application of the Method of Material Flux Analysis *in* Tunja/Colombia», *in* Fred Moavenzadeh, Kaisuke Hanaki, Peter Baccini (éd.), *Future Cities : Dynamics and Sustainability*, Dordrecht, Kluwer Publishers, 2002.

Bringezu, Stefan *et al*. (éd.), *Regional and national material flow accounting: From paradigm to practice of sustainability*, Proceedings of the ConAccount Workshop, 21-23 janvier 1997, Leiden, Pays-£Bas, Wuppertal Special 4, Wuppertal, Allemagne, 1997 (main Internet resource on industrial metabolism: www.conaccount.net).

Bringezu, Stefan, «Material Flow Analysis», *in* Robert U. Ayres et Leslie W. Ayres (éd.), *A Handbook of Industrial Ecology*, Cheltenham (UK), Edward Elgar, 2002, p. 79-90.

Bringezu, Stefan, «Industrial Ecology and Material Flow Analysis. Basic concepts, policy relevance and some case studies», *in* Dominique Bourg et Suren Erkman (éd.), *Perspectives on Industrial Ecology*, Sheffield (UK), Greenleaf, 2003, p. 20-34.

Brunner, Paul H., «Beyond Materials Flow Analysis», *Journal of Industrial Ecology*, vol. 6, n° 1, 2002, p. 8-10.

Brunner, Paul H., «Materials Flow Analysis: Vision and Reality», *Journal of Industrial Ecology*, vol. 5, n° 2, 2002, p.3-5.

Brunner, Paul H. et Baccini, Peter, «Regional Material Management and Environmental Protection», *Waste Management & Research*, vol. 10, 1992, p. 203-212.

Brunner, Paul H., Daxbeck, Hans et Baccini, Peter, «Industrial Metabolism at the regional and local level: A case study on a Swiss region», *in* Robert U. Ayres et Udo E.Simonis (éd.), *Industrial Metabolism. Restructuring for Sustainable Development*, Tokyo, New York, United Nations University Press, 1994, p. 163-193.

Brunner, Paul H. et Rechberger, Helmut, *Practical Handbook of Material Flow Analysis*, Boca Raton (FL), Lweis Publishers, CRC Press, 2004.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 230

Burström Fredrik, *Environment and Municipalities. Towards a Theory on Municipal Environmental Management*, Royal Institute of Technology, Division of Industrial Ecology, Stockholm, septembre 2000 (www.ima.kth.se/).

Chelsea Center for Recycling and Economic Development (CCFRED), *Assessing the Flow of Materials in a Region: Lessons learned from Three Massachussets Communities*, CCFRED, Chelsea, MA, 2001 (www.chelseacenter.org).

Daniels, PeterL., «Approaches for Quantifying the Metabolism of Physical Economies: A Comparative Survey, Part II: Review of Individual Approaches», *Journal of Industrial Ecology*, vol. 6, n° 1, 2002, p.65-88.

Daniels, Peter L. et Moore, Stephen, «Approaches for Quantifying the Metabolism of Physical Economices: A Comparative Survey, Part I: Methodological Overview», *Journal of Industrial Ecology*, vol. 5, n°4, 2002, p. 69-93.

Decker, Ethan *et al.*, «Energy and Material Flow through the Urban Ecosystem», *Annual Review of Energy and the Environment*, vol. 25, 2000, p. 685-740.

Eurostat Task Force on Material Flow Accounting, *Economy-wide material flow accounts and derived indicators. A methodological guide*, European Commission, Eurostat, Luxembourg, 2000 (ISBN: 92-894-0459-0).

Faist, Mireille, Kytzia, Susanne et Baccini, Peter, «The impact of household food consumption on resource and energy management», *International Journal of Environment and Pollution*, vol. 15, n° 2, 2001, p. 183-199.

Fischer-Kowalski, Marina, «Society's Metabolism. The Intellectual History of Materials Flow Analysis, Part I, 1860-1970», *Journal of Industrial Ecology*, vol. 2, n°1, 1998, p.61-78.

Fischer-Kowalski, Marina, «Society's Metabolism. The Intellectual History of Materials Flow Analysis, Part II, 1970-1998», *Journal of Industrial Ecology*, vol. 2, n° 4, 1999, p. 107-136.

Ginley, DouglasM., «Material flows in the transport industry. An example of industrial metabolism», *Resources Policy*, vol. 20, n°3, 1994, p. 169-181.

Gleiss, A. *et al.*, «Identification of Material Flow Systems – Extensions and Case Study», *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 5, n° 4, 1998, p.245-258.

Glenck, Emmanuel et Wall, J., *State of the art computer programs for materials accounting*, Workshop final report, Institute for Water Quality and Waste Management, Vienna University of Technology, Vienne, Autriche, 1996 (www.iwa.tuwien.ac.at/).

Grünbühel, Clemens M., Haberl, Helmut, Schandl, Heinz et Miniwarter, Verena, «Socioeconomic Metabolism and Colonization of Natural Processes in SangSaeng Village: Material and Energy Flows, Land Use, and Cultural Change in Northeast Thailand», *Human Ecology*, vol. 31, n° 1, mars2003, p. 53-87.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 231

Hay, William W. (éd.), *Material Fluxes on the Surface of the Earth*, National Academy Press, Studies inGeophysics, Washington (DC), 1994.

Jones, Peter (éd.), «The Electricity Generation Mass Balance», report prepared by C-Tech Innovation for Biffaward Programme on Sustainable Resource Use, Londres, 2003, 78 p. (www.massbalance.org and www.capenhurst.com).

Jonsson, Arne, *The Trace of Metals Use, Emissions and Sediment Load of Urban Heavy Metals*, Linköping University, Department of Water and Environmental Studies, Linköping Studies in Arts and Science n° 221, Linköping, Sweden, 2000 (ISBN: 91-7219-880-X).

Kleijn, R. *et al*. (éd.), *Ecologizing Societal Metabolism. Designing Scenarios for Sustainable Materials Management*, Proceedings of the ConAccount Workshop, 21 novembre 1998, Amsterdam, CML Report n° 148, Centre of Environmental Sciences, Leiden University, Leiden, Pays-Bas, 1999 (ISBN: 90-5191-124-6).

Kytzia, Susanne, «Material Flux Analysis as a Tool for Sustainable Management of Infrastructures», *in* CD-Rom *Proceedings of the Conference on Critical Infrastructures*, La Haye, 27-29 juin 2001 (www.irl.ethz.ch/).

Lindqvist-Östblom, Annica, «Flow-oriented studies for environmental management by local authorities – experiences from a regional substance flow analysis», Linköping Studies in Science and Technology, Licentiate Thesis n° 825, mai 2000. (Linköping University, Environmental Technique and Management, Department of Physics and Measurement Technology, Sweden, Tel.: +4613285826).

Lindstead, Conor, Gervais, Caroline et Ekins, Paul, «Mass Balance. An Essential Tool for Understanding Resrouce Flows», A Report on the Biffaward Programme of Mass Balance Projects, Londres, Forum for the Future and Biffaward, 2003, 76 p. (www.massbalance.org and www.forumforthefuture.org.uk).

Lohm, Ulrik, Anderberg, Stefan et Bergbäck, Bo, «Industrial metabolism at the national level: A case-study on chromium and lead pollution inSweden, 1880-1980», *in* Robert U. Ayres et Udo E. Simonis (éd.), *Industrial Metabolism. Restructuring for Sustainable Development*, Tokyo, United Nations University Press, 1994, p. 103-118.

MacTemPo, *Materials Accounting as a Tool for Decision Making in Environmental Policy*, Institute for Water Quality and Waste Management, Vienna of Technology, Vienne, Autriche, 1998 (www.iwa.tuwien.ac.at/).

Matos, Grecia, «Consumption of Materials in the United Sates, 1900-1995», *Annual Review of Energy and the Environment*, vol. 23, 1998, p. 107-122.

Matthews, Emily *et al.*, *The Weight of Nations. Material Outflows from Industrial Economies*, Washington, DC, World Resources Institute, 2000.

Rebitzer, Gerald, Loerencick, Yves et Jolliet, Olivier, «Input-Ouput LCA: From Theory to Applications», *International Journal of Life Cycle Analysis*, vol. 7, n° 3, 2002, p. 174-176.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 232

Schandl, Heinz et Niels Schulz, «Changes inthe United Kingdom's natural relations in terms of society's metabolism and land-use from 1850 to the present day», *Ecological Economics*, vol. 41, 2002, p. 203-221.

Schrøder, Hans, «A Method in Environmental Management», *in* Sven E. Jørgensen (éd.), *A Systems Approach to the Environmental Analysis of Pollution Minimization*, Boca Raton (FL), CRC Press, 2000, p. 101-129.

Singh, Simron Jit, Grünbühel, Clemens M., Schandl, Heinz, Schulz, Niels, «Social Metabolism and Labour in a Local Context: Changing Environmental Relations on Trinket Island», *Population and Environment: A Journal of Interdisciplinary Studies*, vol. 23, n° 1, septembre 2001, p. 71-104.

Steenhout Anne, «A health approach to urban areas in difficulties: focus on heavy metals», *inNeighborhoods in Crisis and Sustainable Development*, Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE) and Royal Academy of Sciences, Literature and Fine Arts of Belgium (Eds), Brussels, VUB University Press, 2001.

Stigliani, William et Anderberg, Stefan, *Industrial metabolism at the regional level: The Rhine Basin*, *in* R. U.Ayres et U. E.Simonis (éd.), *Industrial metabolism: Restructuring for sustainable development*, Tokyo, United Nations University Press, 1994, p. 119-162.

van der Voet, Ester, «Substance flow analysis methodology», *in* Robert U. Ayres et Leslie W. Ayres (éd.), *A Handbook of Industrial Ecology*, Cheltenham (UK), Edward Elgar, 2002, p. 91-101.

van de Voet, Ester, van Egmond, Lipkjen, Kleijn, René et Huppes, Gjalt, «Cadmium in the European Community: A Policy-oriented Analysis», *Waste Management & Research*, vol. 12, 1994, p. 507-526.

Wackernagel, Mathis *et al.*, «Tracking the ecological overshoot of the human economy», *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, vol. 99, n° 14, 9 juillet 2002, p.9266-9271.

Wackernagel, Mathis & William Rees, *Our Ecological Footprint*. *Reducing Human Impact on the Earth*, Philadelphia (PA), New Society Publishers, 1996.

Wernick, Iddo K. et Ausubel Jesse H., «National Material Metrics for Industrial Ecology», *Resources Policy*, vol. 21, n°3, 1995, p. 189-198.

Wirsenius, Stefan, «The Biomass Metabolism of the Food System. A Model-Based Survey of the Global and Regional Turnover of Food Biomass», *Journal of Industrial Ecology*, vol. 7, n° 1, 2003, p.47-80.

3. Parcs et réseaux éco-industriels, symbioses industrielles

Balkau, Fritz, «Industrial estates as model ecosystems», *in* Robert U. Ayres et Leslie W. Ayres (éd.), *A Handbook of Industrial Ecology*, Cheltenham (UK), Edward Elgar, 2002, p. 488-496.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 233

Chertow, Marian R., «The Eco-industrial Park Model Reconsidered», *Journal of Industrial Ecology*, vol. 2, n°3, 1999, p. 8-10.

Chertow, Marian R., «Industrial Symbiosis: Literature and Taxonomy», *Annual Review of Energy and the Environment*, vol. 25, 2000, p. 313-337.

Chertow, Marian R. (éd), *Developing Industrial Ecosystems: Approaches, Cases and Tools*, Yale School of Forestry and Environmental Studies, Bulletin Series n° 106, Yale University, New Haven (CT), 2002 (ISSN: 0361-4425).

Chiu, Anthony, «Eco-Industrial Development Rapidly Implemented In Asia Pacific… How Far to Real Success?», *The Eco-Industrial Advantage*, Newsletter of the Canadian Eco-Industrial Network, vol. 3, n° 1, mars 2003, p. 11-12 (www.cein.ca).

Christensen, Jørgen, «Industrial Symbiosis: A Profitable Potential for Environmental Benefits», *in* P. Pangotra, S. Erkman et H. Singh (éd.), *Proceedings of the Workshop on Industry and Environment*, held at Indian Institute of Management, Ahmedabad, Inde, 5-6 février 1999, p. 56-77.

Christensen, Valdemar, Industrial Symbiosis in Ukraine, Final report – status 25 juillet 2003, Kalundborg, Denmark, The Symbiosis Institute, 22 p. (www.symbiosis.dk).

Christensen, Valdemar, Gnesin, Jurij et Lindgaard, Lars, *Introduction of industrial symbiosis in Ukraine*, Kalundborg, Denmark, The Symbiosis Institute, January 2004, 6 p. + fig.

Côté, Raymond P., Ellison, Robert, Grant, Jill, Hall, Jeremy, Klynstra, Peter, Martin, Michael, Wade, Peter, «Designing and Operating Industrial Parks as Ecosystems», Report of the project «The Industrial Park as an Ecosystem», Dalhousie University, School for Resource and Environmental Studies, août 1994. Sites Internet : www.mgmt.dal.ca/sres/research/et www.mgmt.dal.ca/sres/eco-burnside/index.htm.

Côté, Raymond P. et Cohen-Rosenthal, Ed, «Designing eco-industrial parks: A synthesis of some experiences», *Journal of Cleaner Production*, vol. 6, n°3/4, p. 181-188.

Ehrenfeld, John et Gertler, Nicholas, «Industrial Ecology in practice: The Evolution of Interdependence at Kalundborg», *Journal of Industrial Ecology*, vol. 1, n° 1, 1997, p.67-79.

Ehrenfeld, John et Chertow, Marian, «Industrial symbiosis: the legacy of Kalundborg», *in* Robert U. Ayres et Leslie W. Ayres (éd.), *A Handbook of Industrial Ecology*, Edward Elgar, Cheltenham, UK, 2002, p. 334-348.

Environmental Planning Institute (EPI), «Environmental Management in Industrial Estate in China», Background Paper prepared by Environmental Planning Institute, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, for United Nations Environment Programme, Division of Technology, Industry and Economics (UNEP – DTIE) and China State Environmental Protection Administration (SEPA), 2001 (ISBN: 92-807-1991-1).

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 234

Fleig, Anja-Katrin, «Eco-Industrial Parks. A Strategy towards Industrial Ecology in Developing and Newly Industrialised Countries», Working Paper, prepared for GTZ (German Technical Cooperation Agency), Pilot Project «Strengthening Environmental Technological Capability in Developing Countries (etc-11)», GTZ, Eschborn, 2000.

Geng, Yong, Wu Chunyou et Zhu Qinghua, «Designing and operating industrial complexes as ecosystems by employing industrial ecology in China – A Policy Framework Context», *in Proceedings of the Helsinki Symposium on Industrial Ecology and Material Flows, 30 ozût-3septembre 2000*, CD-ROM, Jyväskylä University, School of Business and Economics, Jyväskylä, Finlande, 2000 (ISBN: 951-39-0783-X) (www.jyu.fi/economics/).

Grann, Henning, «The Industrial Symbiosis at Kalundborg, Denmark», *in* Deanna J. Richards (éd.), *The Industrial Green Game. Implications for Environmental Design and Management*, National Academy of Engineering, Washington, DC, National Academy Press, 1997, p. 117-123.

Hileman, Bette, «Eco-Industrial Parks Offer Economic And Environmental Advantages», *Chemical & Engineering News*, 29 mai 1995, p. 34.

Kane, Gareth, Talens-Piero, Laura, Street, Graham, «Industrial Symbiosis: A Sustainable Way Forward for Industry?», International Sustainable Development Research Conference, University of Nottingham, 24-25 mars 2003, 10 p. Site Internet: http://sst.tees.ac.uk/clemance.

Kincaid, Judy, «Metropolitan industrial ecosystem development», *in* Dominique Bourg et Suren Erkman (éd.), *Perspectives on Industrial Ecology*, Sheffield (UK), Greenleaf, 2003, p.95-100.

Korhonen, Jouni et Snäkin, J.-P., «Industrial ecosystem evolution of North Karelia heating energy system», *Regional Environmental Change*, vol. 4, 2003, p. 1-12.

Korhonen, Jouni, Niemeläinen, Heikki et Pulliainen, Kyösti, «Regional industrial recycling network in energy supply – the case of Joensuu City, Finland», *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, vol. 9, 2002, p.170-185.

Korhonen, Jouni, Wihersaari, M. et Savolainen, I., «Industrial ecology of a regional energy supply system: the case of Jyväskylä region, Finland», *Greener Management International: The Journal of Corporate Environmental Strategy and Practice*, vol. 26, p.57-67.

Krrishnamohan Kanduri, «Eco-industrial parks for sustainable industrial development: Initiatives in developed and developing countries», *International Journal of Ecology and Environmental Sciences*, International Scientific Publications, New Delhi, vol. 27, 2001, p. 137-146.

Lowe, Ernest, *Eco-Industrial Park Handbook for Asian Developing Countries*, prepared for Asian Development Bank, 2001 (www.indigodev.com/ADBHBdownloads.html).

Lowe, ErnestA., R. Moran, Stephen et Holmes, DouglasB., *Fieldbook for the development of Eco-industrial Parks*, Washington, DC, 1996 (www.indigodev.com).

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 235

Pauli, Gunter, «Industrial Clusters of the Twenty-first Century», *in* F.Capra et G.Pauli (éd.), *Steering Business Toward Sustainability*, Tokyo, United Nations University Press, 1995, p. 145-162 (www.zeri.org).

Peck, Steven, «When is an Eco-Industrial Park not an Eco-Industrial Park?», *Journal of Industrial Ecology*, vol. 5, n°2, 2002, p.3-5.

Phuong, Phung Thuy, «Ecological Modernisation of Industrial Estates in Vietnam», PhD Thesis, Wageningen University (The Netherlands), 2002 (ISBN: 90-5808-668-2).

President's Council On Sustainable Development (PCSD, *Eco-Industrial Park Workshop Proceedings*, 17-18 octobre 1996, Cape Charles, VA, PCSD, Washington, DC, février1997.

PRIME Project (éd.), *New Strategies for Industrial Development. Learning from Pioneer Experiences in Eco-Industrial Networking in Asia*, CD-ROM Proceedings of an International Conference and Workshop on Industrial Park Management, 3-6 avril 2001, Manila, Philippines, 2002 (www.eieasia.org/).

Schwarz, Erich J. et Steininger, K. W., «Implementing nature's lesson: the industrial recycling network enhancing regional development», *Journal of Cleaner Production*, vol. 5, 1997, p. 47-56.

Sterr, Thomas, «Inter-industrial Materials Flow Management – the Rhine-Neckar-Experience (South Germany)», *in Proceedings of the Helsinki Symposium on Industrial Ecology and Material Flows*, 30 août-3 septembre 2000, CD-ROM, Jyväskylä University, School of Business and Economics, Jyväskylä, Finlande, 2000 (ISBN: 951-39-0783-X). (www.jyu.fi/economics/)

Strebel, Heinz, «Industrial Recycling Networks: Redesign of Industrial Systems», *inProceedings of the Helsinki Symposium on Industrial Ecology and Material Flows*, 30 août-3 septembre 2000 2000, CD-ROM, Jyväskylä University, School of Business and Economics, Jyväskylä, Finlande, 2000 (ISBN: 951-39-0783-X) (www.jyu.fi/economics/).

Thoresen, Johan, «Productivity 2005» Industrial Ecology. Implementation and Maintenance of Ecopark Co-operation, NTNU IndEcol Report n° 1, 2001, Industrial Ecology Programme, NTNU, Trondheim (ISBN 82-7948-010-2). Site Internet: www.indecol.ntnu.no/indecolwebnew/publications/publications.htm.

United Nations Environment Programme, Industry and Environment (UNEP-IE), «The Environmental Management of Industrial Estates», Technical Report n° 39, Paris, UNEP Industry and Environment, 1997 (United Nations Publication: 92-807-1652-2).

United Nations Environment Programme, Division of Technology, Industry and Economics (UNEP-DTIE), *Environmental Management for Industrial Estates. Information and Training Resources*, préparé par ICAST (Colin Francis et Suren Erkman) pour l'UNEP – DTIE, Paris, 2001 (United Nations Publication, ISBN: 92-807-2078-3, disponile sur le site Internet: www.uneptie.org/pc/ind-estates/home.htm.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 236

United Nations Environment Programme (UNEP) and China State Environmental Protection Administration (SEPA), «Final Project Workshop on Environmental Management of Industrial Estates and Zones», Workshop Report, UNEP/SEPA, 2002. (www.uneptie.org)

Vallès, Jean-François, «Eco-industrial sites and networks», *in* Dominique Bourg et Suren Erkman (éd.), *Perspectives on Industrial Ecology*, Sheffield, UK, Greenleaf, 2003, p. 91-94.

Wilderer, Martin, «Eco-Industrial Parks and Economic Growth: Analysis of a Case Study inIndia», *International Journal of Ecology and Environmental Sciences*, International Scientific Publications, New Delhi, vol. 28, 2002, p. 17-26 (numéro spécial: Industrial Ecology, édité par Kanduri Krrishnamohan et Braden R Allenby).

Wilderer, Martin, *Economic Growth, Environment and Development. The Significance of the Eco-Industrial Park Concept in India and Indonesia*, New Delhi, Manak Publications Pvt. Ltd, 2003 (ISBN: 81-7827-068-4).

Wilderer, Martin, «Applying the Eco-Industrial Park Concept: Methodological Considerations based on Case Studies *in* India and Indonesia», *Journal of Cleaner Production*, numéro spécial: Applications of Industrial Ecology, 2004 (forthcoming).

4. Stratégies de l'éco-restructuration

Aebischer, Bernard *et al.*, *Energy- and eco-efficiency of Data Centres*, Study commissioned by the Canton of Geneva, Genève, 5 janvier 2003, 90 p. Site Internet: www.cepe.ethz.ch/staff/bernard.htm.

Aebischer, Bernard, Varone, Frédéric, «The Internet: the most important driver for future electricity demand *in* households», *in Proceedings of the 2001 ECEEE Summer Study «Further than ever from Kyoto: Rethinking energy efficiency can get us there»*, vol. 1, Paris, ADEME, 2001, p.394-403 (www.cepe.ethz.ch/staff/bernard.htm).

Agri, Jan, Andersson, Elisabeth, Ashkin, Alena, Söderström, John, «Selling Functions. A study of environmental and economic effects of selling functions,» CPM Report n° 6, Center for Environmental Assessment of Product and Material Systems (CPM), Chalmers University of Technology, Göteborg, Suède, 25 février 1999. (www.cpm.chalmers.se/)

Berkhout, Frans et Hertin, Julia, *Impacts of Information and Communication Technologies on Environmental Sustainability: speculations and evidence*, Report to the OECD, Science and Technology Policy Research Unit (SPRU), University of Sussex, Brighton, UK, 25 mai 2001. (www.sussex.ac.uk/spru/)

Bernardini, Oliviero et Galli, Riccardo, «Dematerialization: Long-Term Trends *in* the Intensity of use of Materials and Energy», *Futures*, mai 1993, p. 431-448.

Bertoldi, P. *et al.*, «Standby Power Use: How Big is the Problem? What Policies and Technical Solutions Can Address It?», *inProceedings of the ACEEE 2002 Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*, 18-23 août 2002, Pacific Grove (CA), 2002. (www.cepe.ethz.ch/staff/bernard.htm)

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 237

Birkeland, Janis, *Design for Sustainability. A Sourcebook of Integrated Eco-logical Solutions*, London, Earthscan, 2002.

Board on Energy and Environmental Systems (éd.), «Novel Approaches to Carbon Management: Separation, Capture, Sequestration, and Conversion to Useful Products», Workshop Report, Committee on Novel Approaches to the Management of Greenhouse Gases from Energy Systems, National Resarch Council, Washington, DC, The National Academies Press, 2003 (www.nap.edu/catalog/10699.html).

Cleveland, Cutler J. et Ruth, Matthias, «Indicators of Dematerialization and the Materials Intensity of Use», *Journal of Industrial Ecology*, vol. 2, n° 3, 1998, p.15-50.

Fischer, Kurt et Schot, Johan (éd.), *Environmental Strategies for Industry. International Perspectives on Research Needs and Policy Implications*, Covelo (CA), Island Press, 1993.

Giarini, Orio et Stahel, WalterR., *The Limits to Certainty. Facing Risks in the New Service Economy*, Dordrecht,Kluwer Academic Publishers, International Studies inthe Service Economy, vol. 4, 2e édition révisée, 1993 (ISBN: 0-7923-2167-7).

Global e-Sustainability Initiative (GeSI), «Information and Communications Technology», report released by Global e-Sustainbility Initiative and United Nations Environment Programme, Division of Technology, Industry and Economics, 2002. (http://gesi.org)

Hawken, Paul, Lovins, Amory, Lovins, L. Hunter, *Natural Capitalism. Creating the Next Industrial Revolution*, Boston (MA), Little, Brown and Company, 1999.

Henstock, Michael E, *Design for Recyclability*, publié par l'Institute of Metals on behalf of the Materials Forum, Londres, 1988 (ISBN: 0 901462 46). [Disponible auprès de The Institute of Materials, 1 Carlton House Terrace, London SW1Y 5DB.]

Herman, Robert, Ardekani, Siamak A. et Ausubel, Jesse H., «Dematerialization», *in* Jesse H. Ausubel et Hedy E. Sladovich (éd.), *Technology and Environment*, Washington (DC), National Academy Press, 1989, p. 50-69.

Jackson, Tim (éd., *Clean Production Strategies (Developing Preventive Environmental Management in the Industrial Economy)*, Boca Raton (FL), Lewis Publishers, 1993.

Jacobsson, Nicholas, «Emerging Product Strategies. Selling services of remanufactured products», IIIEE Dissertation 2000:6, The International Institute for Industrial Environmental Economics (IIIEE), Lund University, Lund, Suède, 2000 (ISBN: 91-88902-17-X).

Kerr, Wendy, «Remanufacturing and eco-efficiency: A case study of photocopier remanufacturing at Fuji Xerox Australia», M. Sc. Thesis, septembre 1999, IIIEE Communications 2000:5, The International Institute for Industrial Environmental Economics (IIIEE), Lund University, Lund, Suède, 2000 (ISSN: 1401-0798).

Kibert, Charles J., «Deconstruction: the start of a sustainable materials strategy for the built environment», *UNEP Industry and Environment*, vol. 26, n° 2-3, avril-septembre 2003, p. 84-88.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 238

Kuhndt, M. *et al*., « Virtual dematerialisation: ebusiness and factor X », Final Report, Project «Digital Europe: ebusiness and sustainable development» funded by the European Community, March 2003 (www.digital-eu.org).

Lave, L. B., «Life Cycle/Sustainability Implications of nanotechnology», *in* Mihail C. Roco et William Sims Bainbridge (éd.), *Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology*, National Science Foundation, Arlington (Virginie), mars 2001, p. 162.168. Site Internet :
http://itri.loyola.edu/nano/societalimpact/nanosi.pdf.

Marteel, Anne E. *et al*., «Green Chemistry and Engineering: Drivers, Metrics, and Reduction to Practice», *Annual Review of Environment and Resources*, vol. 28, 2003, p. 401-428.

McDonough et Michael Braungart, «Towards a sustaining architecture for the 21st century: the promise of cradle-to-cradle design», *UNEP Industry and Environment*, vol. 26, n°2-3, avril-septembre 2003, p. 13-16.

Mitsch, William J., «Ecological Engineering. A Cooperative Role with the Planetary Life-Support System», *Environmental Science & Technology*, vol. 27, n° 3, mars 1993, p. 438-445.

Mitsch, William J. et Jørgensen, Sven Erik (éd.), *Ecological Engineering. An Introduction to Ecotechnology*, John Wiley & Sons, New York, 1989 (Environmental Science and Technology. A Wiley-Interscience Series of Texts and Monographs).

Mont, Oksana, «Product-Service Systems. Shifting corporate focus from selling products to selling product-services: a new approach to sustainable development», AFR-report n°288, report for the Swedish Waste Research Council, Stockholm, février2000.

Mont, Oksana, «Reaching Sustainable Consumption through the concept of a Product-Service System (PSS)», Report submitted inNovember 2000 to the the Nordic Council of Ministers, TemaNord 2001:526, 2001.

Mont, Oksana, «Introducing and developing a Product-Service System (PSS) concept in Sweden », IIIEE Reports 2001:6, The International Institute for Industrial Environmental Economics (IIIEE), Lund University, Lund, Sweden. Report of a reseach project sponsored by the Swedish National Board for Industrial and Technical Development NUTEK (ISSN: 1650-1675).

Mont, Oksana, «Functional Thinking – The role of functional sales and product service systems for a function-based society», Swedish Environmental Protection Agency, Report 5233, Stockholm, juillet 2002.

Mont, Oksana, «Clarifying the concept of product-service system», *Journal of Cleaner Production*, vol. 10, n° 3, juin2002, p. 237-245.

Nakicenovic, Nebosja, «Freeing Energy from Carbon», *in* Jesse H. Ausubel et H. Dale Langford (éd.), *Technological Trajectories and the Human Environment*, Washington, DC, National Academy Press, 1997, p. 74-88.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 239

Schandl, Heinz, Hüttler, Walter et Payer, Harald, «Delinking of Economic Growth and Materials Turnover», *Innovation*, vol. 12, n°1, 1999, p. 31-45.

Schmidt-Bleek, Friedrich (éd.), *The International Factor 10 Club's Statement to Government and Business Leaders. A ten-fold leap in energy and resource efficiency*, Carnoules (France), Factor 10 Institute, 1997 (www.factor10-institute.org).

Simonis, Udo E., «Ecological modernization of industrial society: three strategic elements», *International Social Science Journal*, n°121, août 1989, p. 347-361.

Socolow, Robert (éd.), *Fuels Decarbonization and Carbon Sequestration: Report of a Workshop*, Princeton, NJ, The Center for Energy and Environmental Studies, Princeton University, PU/CEES Report n° 302, septembre 1997.

Stahel, Walter R., «The Product-Life Factor», *in* Susan Grinton Orr (éd.), *An Inquiry into the Nature of Sustainable Societies: The Role of the Private Sector*, Houston Advanced Research Center, The Woodlands (TX), 1984, p. 72-104.

Stahel, Walter R., «The Functional Economy: Cultural and Organizational Change», *in* Deanna J. Richards (éd.), *The Industrial Green Game. Implications for Environmental Design and Management*, National Academy of Engineering, Washington, DC, National Academy Press, 1997, p. 91-100.

Stahel, WalterR., «The functional society: the service economy», *in* Dominique Bourg et Suren Erkman (éd.), *Perspectives on Industrial Ecology*, Sheffield (UK), Greenleaf, 2003, p. 264-282.

Stahel, Walter R.et Jackson, Tim, «Optimal Utilisation and Durability – towards a new definition of the service economy», *in* T. Jackson (éd.), *Clean Production Strategies. (Developing Preventive Environmental Management in the Industrial Economy*), Boca Raton (FL), Lewis Publishers, 1993, p. 261-291.

Stahel, Walter R. et Reday-Mulvey, Geneviève, *Jobs for Tomorrow. The Potential for Substituting Manpower for Energy*, New York (NY), Vantage Press, 1981 (ISBN: 533-04799-4).

Todd, Nancy Todd, Jack et John, *From Eco-Cities to Living Machines. Principles of Ecological Design*, Berkeley (CA), North Atlantic Books, 1994 (ISBN: 1-55643-150-3).

von Weizsäcker, Ernst, Lovins, Amory B., Lovins, L. Hunter, *Factor Four. Doubling Wealth, Halving Resource Use*, Londres, Earthscan Publications Ltd, 1997.

Waddell, Lorna M. et Labys, Walter C., «Transmaterialization: Technology and materials demand cycles», *Materials and Society*, vol. 12, n° 1, 1988, p. 59-86.

Wernick, Iddo, «Dematerialization and Secondary Materials Recovery», *Journal of the Minerals, Metals, and Materials Society*, vol. 46, n° 4, 1994, p. 39-42.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 240

5.Innovation, dynamiques technologiques, politiques scientifiques

Akimoto, Yumi, «A New Perspective on the Eco-Industry», *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 49, n° 2, juin1995, p. 165-173.

Ausubel, JesseH., «Directions for Environmental Technologies», *Technology in Society*, vol. 16, n° 2, 1994, p.139-154.

Ausubel, Jesse H., «Can Technology Spare the Earth?», *American Scientist*, vol. 84, mars-avril1996, p. 166-178.

Ausubel, Jesse H., «The Liberation of the Environment», *Daedalus, Journal of the American Academy of Arts and Sciences*, vol. 125, n° 3, 1996, p.1-17.

Ausubel, Jesse H. et Langford, H. Dale (éd.), *Technological Trajectories and the Human Environment*, Washington, DC, National Academy Press, 1996.

Ausubel, Jesse H. et Hedy E. Sladovich (éd.): *Technology and Environment*, National Academy of Engineering, Washington, DC, National Academy Press, 1989.

Ayres, Robert U., «Self-Organization and Technological Change in the Economic System,» *in* Marcelo Alonso (éd.), *Organization and Change in Complex Systems*, New York (NY), Paragon House, An Icus Book, 1990, p. 204-224.

Ayres, RobertU., «Toward a non-linear dynamics of technological progress», *Journal of Economic Behavior and Organization*, vol. 24, 1994, p. 35-69.

Beder, Sharon, «The Role of Technology in Sustainable Development», *IEEE Technology and Society Magazine*, hiver 1994, p.14-19.

Benyus, Janine M., *Biomimicry. Innovation inspired by Nature*, New York (NY), William Morrow, 1997.

Board on Chemical Sciences and Technology (éd.), «Carbon Management: Implications for R & D in the Chemical Sciences and Technology», Workshop Report to the Chemical Sciences Roundtable, National Research Council, Washington, DC, National Academy Press, 2000.

Brooks, Harvey, «Sustainability and Technology», *in* IIASA (éd.), *Science and Sustainability* (articles sélectionnés pour le 20e anniversaire de IIASA), IIASA, Laxenburg, 1992, p. 29-60.

Cash, David W. *et al.*, «Knowledge systems for sustainable development», *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA (PNAS)*, vol. 100, n° 14, 8 juillet 2003, p. 8086-8091.

Chertow, Marian R., «The IPAT Equation and Its Variants: Changing Views of Technology and Environmental Impact», *Journal of Industrial Ecology*, vol. 4, n°4, 2001, p. 13-29.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 241

Chittick, David R., «Technology's Impact on the Environment: Both Problem and Solution», *AT & T Technical Journal*, vol. 71, n°2, mars-avril 1992, p.2-4.

Clark, William C. et Munn, R. E. (éd.), *Sustainable Development of the Biosphere*, Laxenburg, IIASA, and Cambridge University Press, 1986.

Clark, William C. et Dickson, Nancy M., «Sustainability science: The emerging research program», *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA (PNAS)*, vol. 100, n° 14, 8 juillet 2003, p.8059-8061.

Coates, JosephF., John B.Mahaffie, Andy Hines, *2025 Scenarios of US and Global Society Reshaped by Science and Technology*, Greensboro (NC), Published for Coates & Jarratt, Inc., by Oakhill Press, février 1997.

Dosi, Giovanni, «Technological paradigms and technological trajectories», *Research Policy*, vol. 11, 1982, p. 147-162.

Erkman, Suren, «Industrial ecology: a new perspective on the future of the industrial system», *Swiss Medical Weekly*, n°131, 2001, p. 531-538.

Erkman, Suren, Francis, Colin et Ramaswamy, Ramesh, «Industrial Ecology: An Agenda for the Long-term Evolution of the Industrial System», Cahier de propositions pour le XXIe siècle, préparé par la Fondation Charles Léopold Mayer en contribution à l'Alliance pour un monde responsable, pluriel et solidaire, Paris, octobre 2001 (sera édité en 2004; disponible sur le site Internet: www.alliance21.org.

Freitas, Robert A. Jr., *Some Limits to Global Ecophagy by Biovorous Nanoreplicators, with Public Policy Recommendations*, Richardson (TX), Zyvex LLC, avril 2000, 33 p. (www.foresight.org/NanoRev/Ecophagy.html)

Freitas, Robert A. Jr., *Nanomedicine, Volume I: Basic Capabilities*, Austin (TX), Landes Bioscience, 1999 (www.landesbioscience.com).

Freitas, Robert A. Jr., «Respirocytes in Nanomedicine: The Remarkable Story of One of the First Medical Nanorobots Ever Conceived», *Graft (Official Journal of the Transplantation Society)*, Future Issue, mai-juin2000, vol. 3, p. 148-154.

Freitas, Robert A. Jr. et Merkle, Ralph C., *Kinematic Self-Replicating Machines*, Gerogetown (TX), Landes Bioscience, 2004.

Freitas, Robert A., Jr. et Gilbreath, William P. (éd.), *Advanced Automation for Space Missions*, Proceedings of the 1980 NASA/ASEE Summer Study, Santa Clara (CA), 23 juin-29 août 1980, Washington, DC, NASA Conference Publications 2255, 1982, 386 p.

Georgescu-Roegen, Nicholas, «General Reflections on the Theme of Innovations», *Proceedings of the International Colloquium on Economic Effects of Space and Other Advanced Technologies, Strasbourg*, 28-30 avril 1980, European Space Agency ESA SP-151, septembre 1980, p. 47-51.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 242

Georgescu-Roegen, Nicholas, «Feasible Recipes Versus Viable Technologies», *Atlantic Economic Journal*, mrs 1984, vol. XII, n° 1, p.21-31.

Gore, Albert (éd.), *New Technologies for a Sustainable World*, Hearing before the Subcommittee on Science, Technology, and Space, United States Senate, 26juin 1992, U.S. Government Printing Office, Washington, DC, 1993, 62 p.
(ISBN: 0-16-039898-3).

Gray, Paul E., «The Paradox of Technological Development» *in* Jesse H. Ausubel et Hedy E. Sladovich (éd.), *Technology and Environment*, Washington, DC, National Academy of Engineering, National Academy Press, 1989, p. 192-204.

Green, Ken et Sally Randles, «Industrial Ecology and Spaces of Innovation», article présenté au séminaire «Industrial Ecology and Spaces of Innovation», organisé par le Centre for Innovation and Competition (CRIC), Institute of Innovation Research, University of Manchester, Manchester, UK, 17-18 juin 2003. Site Internet:
http://les1.man.ac.uk/cric/sally_randles/.

Grübler, Arnulf, *The Rise and Fall of Infrastructures. Dynamics of Evolution and Technological Change in Transport*, Heidelberg, Physica Verlag, 1990.

Grübler Arnulf, «Technology Diffusion in a Long-Wave Context: The Case of the Steel and Coal Industries», T. Vasko, R. Ayres et L. Fontvieille (éd.), *Life Cycles and Long Waves*, New York, Springer-Verlag, 1990, p. 118-146.

Grübler, Arnulf, «Diffusion. Long-Term Patterns and Discontinuities», *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 39, 1991, p. 159-180.

Grübler, Arnulf, «Industrialization as a Historical Phenomenon», *in* Socolow, Robert, Clinton Andrews, Frans Berkhout et Valerie Thomas (éd.), *Industrial Ecology and Global Change*, Cambridge University Press, 1994, p. 43-68.

Grübler, Arnulf, *Technology and Global Change*, Cambridge University Press, 1998.

Harman, WillisW., «Global Dilemmas and the Plausibility of Whole-System Change», *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 49, n° 1, mai1995, p. 1-12.

Heaton, George, Repetto, Robert et Sobin, Rodney, *Transforming Technology: An Agenda for Environmentally Sustainable Growth in the 21st Century*, Washingont, DC, World Resources Institute, avril 1991 (ISBN: 0-915825-69-4).

Heaton, George, Repetto, Robert et Sobin, Rodney, *Backs to the Future: U.S. Government Policy Toward Environmentally Critical Technology*, Washington, DC, World Resources Institute, juin 1992, 34 p. (ISBN: 0-915825-75-9).

Kates, Robert W. et Parris, Thomas M., «Long term trends and a sustainability transition», *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA (PNAS)*, vol. 100, n°14, 8 juillet 2003, p. 8062-8067.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 243

Kube, C. Ronald et Zhang Hong, «Collective Robotic Intelligence», *in* Jean-Arcady Meyer, Herbert L. Roitblat et Stewart W. Wilson (éd.), *From Animals to Animats 2, Proceedings of the Second International Conference on Simulation of Adaptative Behavior*, Cambridge (MA), MIT Press, 1993, p. 460-468.

Huesemann, Michael H., « The limits of technological solutions to sustainable developments», *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 5, 2003, p. 21-34.

Jansen, J. L. A. et P. J. Vergragt, Ph. J., «Sustainable Development: A Challenge to Technology ! » (Proposal for the interdepartemental research programme «Sustainable Technological Development»), La Haye, Ministry of Housing, Physical Planning and the Environment, 10 juin 1992, 81 p.

McFarland, David, «Towards Robot Cooperation», *in* Dave Cliff, Philip Husbands, Jean-Arcady Meyer et Stewart W. Wilson (éd.), *From animals to animats 3, Proceedings of the Third International Conference on Simulation of Adaptative Behavior*, Cambridge (MA), The MIT Press, 1994, p. 440-444.

Marchetti, Cesare, « Infrastructures for Movement : Past and Future », *in* Jesse H. Ausubel et Robert Herman (éd.), *Cities and their Vital Systems. Infrastructure. Past, Present and Future*, Washington, DC, National Academy of Engineering, Series on Technology and Social Priorities, National Academy Press, 1988, p. 146-174.

Joan Martin-Brown, «Rethinking Technology *in* the Future», *Environmental Science & Technology*, vol. 26, n°6, juin 1992, p.1110-1102.

Masciangioli, Tina et Wei-Xian Zhang, « Environmental Technologies at the Nanoscale », *Environmental Science & Technology*, 1er mars, 2003, p. 102A-108A.

Minsky, Marvin, «Will Robots Inherit the Earth ? », *Scientific American*, vol. 271, n° 4, p. 87-91.

Molella, Arthur et Bedi, Joyce (éd.), *Inventing for the Environment*, Cambridge (MA), The MIT Press, 2003.

Moore, Curtis et Miller, Alan, *Green Gold. Japan, Germany, the United States, and the Race for Environmental Technology*, Boston (MA), Beacon Press, 1994.

Parris, Thomas M. et Kates, Robert W., «Characterizing a sustainability transition : Goals, targets, trends and driving forces», *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA (PNAS)*, vol. 100, n° 14, 8 juillet 2003, p. 8068-8073.

Patel, Martin Kumar, «Closing Carbon Cycles. Carbon Use for Materials in the Context of Resrouce Efficiency and Climate Change», PhD Thesis, Utrecht University, Faculty of Chemistry, Utrecht, Pays-Bas, 1999. Site Internet : www.library.uu.nl/digiarchief/dip/diss/1894529/inhoud.htm.

Pizzocaro, Silvia, «A darwinian metaphor. Objects, artificial systems and technological mutations in an evolutionary perspective», *Disseny Comunicacio Cultura*, n° 10, septembre 1994, Barcelone, p. 80-92.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 244

Rejeski, David, «Metrics, Systems, and Technological Choices», *in* Deanna J. Richards (éd.), *The Industrial Green Game. Implications for Environmental Design and Management*, National Academy of Engineering, Washington, DC, National Academy Press, 1997, p. 48-72.

Reynolds, Glenn Harland, *Environmental Regulation of Nanotechnology: Some Preliminary Observations*, Environment Law Reporter, Environmental Law Institute, Washington, DC, 2001 (www.eli.org).

Roco, Mihail C.et Bainbridge, William Sims (éd.), *Converging Technologies for Improving Human Performance. Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science*, Report sponsored by the National Science Foundation and The Department of Commerce, prepared by the World Technology Evaluation Ceter (WTEC), Inc., Arlington (VA), juin 2002, 468 p. (http://wtec.org/ConvergingTechnologies/).

Roco, Mihail C. et Bainbridge, William Sims (éd.), *Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology*, National Science Foundation, Arlington (Virginia), National Science Foundation, mars 2001, 272 p. Site Internet: http://itri.loyola.edu/nano/societalimpact/nanosi.pdf.

Rogers, Everett M., *Diffusion of Innovations*, NewYork (NY), The Free Press, 1995 (4e édition).

Sass, Stephen L., *The Substance of Civilization. Materials and Human History from the Stone Age to the Age of Silicon*, New York (NY), Arcade Publishing, 1998.

Schot, Johan W., «Constructive Technology Assessment and Technology Dynamics: The Case of Clean Technologies», *Science, Technology, & Human Values*, vol. 17, n° 1, hiver 1992, p. 36-56.

Schot Johan W., Remco Hoogma et Boelie Elzen, «Strategies for shifting technological systems. The case of the automobile system», *Futures*, vol. 26, n° 10, décembre 1994, p. 1060-1076.

Silicon Valley Toxics Coalition (éd.), *Forum on Building a Sustainable High-Tech Industry*, Conference Report, International Campaign for Responsible Technology (ICRT), San Jose (CA), Silicon Valley Toxics Coalition (SVTC), novembre 2002 (www.svtc.org).

Stahel, Walter R., «R & D in a sustainable society», *Science and Public Policy*, vol. 13, n° 4, août 1986, p.196-203.

Stupp, S., «Nanotechnology in Medicine», *in* Mihail C. Roco et William Sims Bainbridge (éd.), *Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology*, National Science Foundation, Arlington (Virginia), mars 2001, p. 161. Site Internet: http://itri.loyola.edu/nano/societalimpact/nanosi.pdf.

Tenner, Edward, *Why Things Bite Back. Technology and the Revenge of Unintended Consequences*, New York (NY), Alfred A. Knopf, 1996.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 245

Thomas, Valerie *et al.*, «Industrial Ecology: Policy Potential and Research Needs», *Environmental Engineering Science*, vol. 20, n° 1, 2003, p.1-9.

Watanabe, Chihiro, Santoso, Irawan, Widayanti, Tjahya, *The Inducing Power of Japanese Technological Innovation*, Londres, Pinter Publishers, 1991.

Watanabe, Chihiro, « The Feedback Loop between Technology and Economic Development: An Examination of Japanese Industry», *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 49, n°2, juin1995, p.127-145 ([numéro spécial: Japan Confronts the 21st Century).

Weaver, Paul *et al.*, *Sustainable Technology Development*, Sheffield (UK), Greenleaf, 2000.

Weterings, R.A.P.M. et Opschoor, J. B., *The Ecocapacity as a Challenge to Technological Development*, Advisory Council for Research on Nature and Environment (RMNO), Rijswijk, Pays-Bas, Publication RMNO n° 74a, avril 1992, 43 p.

World Resources Institute and U.S. Environmental Protection Agency, «Innovative Technologies, Environmental Futures Project», Focus Group Report, 24 p., World Resources Institute & U.S. Environmental Protection Agency, Office of Strategic Planning & Environmental Data, Future Studies, Washington, DC, 1992.

Yoshikawa, Hiroyuki, « Manufacturing and the 21st Century – Intelligent Manufacturing Systems and the Renaissance of the Manufacturing Industry, *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 49, n° 2, juin1995, p.195-213 (numéro spécial: Japan Confronts the 21st Century).

II. Publications en français

Le lecteur francophone dispose aujourd'hui d'un certain nombre de publications traitant explicitement d'écologie industrielle :
La revue *Déchets Sciences & Techniques, Revue francophone d'écologie industrielle* (rédacteur en chef Pierre Moszkowicz, INSA de Lyon), s'impose comme le périodique scientifique de référence en français. (www.pro-environnement.com).

D'autres publications francophones suivent également l'actualité en écologie industrielle, notamment *Environnement Magazine* (www.environnement-online.com), *Hexagone Environnement* (www.hexagone-environnement.com), *Alternatives économiques* (www.alternatives-economiques.fr/) et la lettre électronique d'information hebdomadaire d'Utopies, agence de conseil en développement durable
(www.utopies.fr).

Adoué, Cyril, Ansart, Arnaud, Vincent, Frédérique, « Recherche de synergies matières/énergie entre secteurs industriels. Réflexions et perspectives», *Déchets Sciences & Techniques, Revue francophone d'Écologie Industrielle*, n° 28, 2002, p. 3-7.

Adoué Cyril et Ansart, Arnaud, «L'essor de l'écologie industrielle: une avancée vers le développement durable», *Futuribles*, n°291, novembre 2003, pp 51-67.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 246

Auxilia, *Écologie industrielle – Mode d'emploi*, Paris, Association Auxilia, 2004 (à paraître) (www.auxilia.asso.fr).

Barbault, Robert, *Écologie générale. Structure et fonctionnement de la biosphère*, Paris, Dunod, 2000 (5e édition) [Chapitre 22, p. 311-316: L'écologie industrielle].

Bertolini, Gérard, *Déchet mode d'emploi*, Préface de Jacques Vigneron, Paris, Economica, Collection «Environnement et écologie industriels», 1996.

Billen, Gilles, Toussaint, Francine, Peeters, Philippe, Sapir, Marc, Steenhout, Anne et Vanderborght, Jean-Pierre, *L'écosystème Belgique. Essai d'écologie industrielle*, Bruxelles, Centre de recherche et d'information socio-politique – CRISP, 1983 (ISBN: 2-87075-006-5).

Boiral, Olivier et Croteau, Gérard, «Du développement durable à l'écologie industrielle, ou les métamorphoses d'un «concept-caméléon», *in Actes de la xe Conférence de l'Association Internationale de Management Stratégiqu*e, Québec, Université Laval, 13-15 juin 2001, 24 p. (Actes disponibles sur CD-ROM).

Boiral, Olivier et Croteau, Gérard, «Développement durable et synergie des sous-produits: quelques exemples au Québec», *Nouvelles tendances en management*, vol. 3, n° 2, 2001, p.A1-A2.

Bouillon-Duparc, Hélène, « Qu'est-ce que l'écologie industrielle ? », *Hexagone Environnement*, n° 63, automne 2002, p.56-59.

Bourg, Dominique, *Le nouvel âge de l'écologie*, Paris, Éditions Descartes, 2003.

Chirac, Jacques, « Avant-propos », *in* Dominique Bourg et Suren Erkman (éd.), *Perspectives on Industrial Ecology*, Sheffield (UK), Greenleaf, 2003, p. 9-10. (Préface disponible sur le site de Greenleaf: www.greenleaf-publishing.com/catalogue/indecol.htm.

Da Cunha, Antonio et Ruegg, Jean (sous la direction de), *Développement durable et aménagement du territoire*, Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2003.

DATAR, Caisse des Dépôts et Consignations, OCDE (sous la direction de), «Écologie industrielle», *in Actes des Entretiens internationaux de l'aménagement et du développement du territoire*, 28-30 janvier 2002, Paris, DATAR, 2002, p. 178-188.

Dayan, Léo, «Les liaisons éco-industrielles. Expériences internationales», Rapport pour le ministère de l'Environnement, ADEME, DRIRE, Paris, 2002 (www.apreis.org).

Dramé, Alpha Oumar, «Industrie d'aluminium, écologie industrielle et développement durable. L'Industrie de bauxite et d'alumine de Guinée face aux défis de l'environnement», thèse de doctorat, institut universitaire d'études du développement, université de Genève, décembre 2001.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 247

Duret, Ben, *Premiers retours d'expérience en écologie industrielle: études de cas en Europe et en Amérique du Nord*, étude effectuée avec le soutien de EDF, ICAST, CREIDD (UTT), et Auxilia, 2004 (à paraître).

Duval, Guillaume, «Vive l'écologie industrielle!», *Alternatives économiques*, n° 219, novembre 2003, p.84.

EIC, *Domaine de la Bergerie (Vexin): Première étude française de métabolisme territorial dans le secteur rural*, étude réalisée par Écologie industrielle conseil – EIC (Richard Jullian, Jean-Claude Ray, Christophe Blavot, Suren Erkman), pour le compte de la Fondation Charles Léopold Mayer pour le progrès de l'homme, synthèse (37 p.) + annexes (60 p.), Paris, 2003.

Erkman, Suren, *Écologie industrielle, métabolisme industriel et société d'utilisation*, étude effectuée pour la Fondation Charles Léopold Mayer pour le progrès de l'homme, Genève, octobre 1994, 276p.

Erkman, Suren, «Global Carbon Wealth: écologie industrielle, nanotechnologies et gouvernance du cycle du carbone», Note conceptuelle ICAST, Genève, juin 2000, 12 p. (www.icast.org).

Erkman, Suren, «L'écologie industrielle, une stratégie de développement», *in* Antonio Da Cunha et Jean Ruegg (sous la direction de), *Développement durable et aménagement du territoire*, Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2003, p. 263-281.

Erkman, Suren et Ray, Jean-Claude, *Écologie industrielle à Grande-Synthe: préétude sur la zone industrielle des Deux-Synthe*, Ville de Grande-Synthe, Mission pour un Développement durable, Rapport final, mai 2000 (mairie de Grande-Synthe, BP 149, 59760 Grande-Synthe. Contact: M. Daniel Truy).

Esquissaud, Philippe, *Écologie industrielle*, Paris, Hermann, 1991.

Faist Emmenegger, Mireille *et al*., «Métabolisme des activités économiques du canton de Genève – Phase 1», Rapport final pour le groupe de travail Ecosite, République et canton de Genève, Uster (ZH), ESU-services, décembre 2003, 47 p. + annexes (www.esu-services.ch).

Frontier, Serge, *Les écosystèmes*, Paris, PUF, «Que sais-je» n°3483, 1999, p. 112-127.

Frosch, Robert A. et Gallopolous, Nicholas E., «Des stratégies industrielles viables», *Pour La Science*, n°145, novembre 1989, p.106-115.

Grinevald, Jacques, «Introduction à la deuxième édition», *in* Nicholas Georgescu-Roegen, *La Décroissance. Entropie – Écologie – Économie*, présentation et traduction de Jacques Grinevald et Ivo Rens, Paris, Sang de la terre, 1995, p. 9-42.

Gsponer, André, *L'Arme et le gadget. Essai sur l'irénoversion de la société industrielle*, Paris, Fondation pour le progrès de l'homme, Document de travail n° 35, août1993, 149 p.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 248

Haake, Julia, «Les stratégies des entreprises pour une utilisation des matières plus respectueuses de l'environnement: une application du concept de dématérialisation à la gestion environnementale des entreprises industrielles», thèse de doctorat sous la direction du Prof. Sylvie Faucheux (C3ED), université de Versailles, Saint-Quentin-en-Yvelines, novembre2000, 357 p.

Hamel, Jacques (coordonnateur), *Écologie industrielle: une stratégie de développement*, Actes de la Conférence internationale, 15-17 juin 1998, Sorel-Tracy (Québec), 1998, 275 p.

Harpet, Cyrille, *Du déchet: philosophie des immondices, corps, ville, industrie*, Paris, L'Harmattan, 1998.

Jourdain, Sabine, «Étude du métabolisme industriel: expérimentation en cours», *Environnement & Technique*, n° 203, janvier-février 2001, p. 36-38.

Kaoula, Adel et Erkman, Suren (sous la direction de), *Actes du Séminaire international sur l'écologie industrielle, Alger, 20-21 novembre 2000*, publiés dans un numéro spécial de *Symbiose – Trimestriel de l'Environnement*, n°11, octobre-décembre 2002, p. 27-80 (1, rue Bachir Attar, Maison de la Presse, 16016 Alger).

Kazazian, Thierry (sous la direction de), *Il y aura l'âge des choses légères. Design et développement durable*, Paris, Victoires-Éditions, 2003.

Lacombe, Nathalie, «L'écologie industrielle: un défi pour la pensée économique», *Préventique Sécurité*, n°71, septembre-octobre 2003, p. 9-12 (www.preventique.org).

Laville, Elisabeth, *L'entreprise verte. Le développement durable change l'entreprise pour changer le monde*, Paris, Village mondial, 2002.

Moszkowicz, Pierre, «L'écologie industrielle en action: quelles perspectives?», *Déchets Sciences & Techniques, Revue francophone d'écologie industrielle*, n° 31, 3e trimestre 2003, p. 2.

Nahapetian, Naïri, «L'écologie industrielle, exercice pratique», *Alternatives Économiques*, n° 208, novembre 2002, p.94-97.

Navarro, Alain, «Le déchet fatal», *in* Jean-Claude Beaune (sous la direction de), *Le déchet, le rebut, le rien*, Seyssel, Champ Vallon, 1999.

Novethic, «Le lent cheminement de l'écologie industrielle», dossier réalisé par Laurent Campagnole pour le site novethic. fr, Paris, mis en ligne le 17 septembre 2003 (www.novethic.fr/novethic/site/dossier/index.jsp?id=65033)

Orée, *Guide de management environnemental des zones d'activités*, Association Orée, Paris, Victoires-Éditions, 2002 (www.oree.org).

Pommier, Paulette, *Les systèmes productifs locaux*, Paris, DATAR, La Documentation française, 2002.

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 249

Rochat, David et Tscharner, Thomas, «Les nanorobots carbophages: cas d'application des nanotechnologies à l'écologie industrielle», Rapport de projet «Sciences, Techniques et Société», Lausanne, EPFL, Section «Sciences et ingénierie de l'environnement», juin 2002, 31p.

Schmidlin, Marc, «Perspectives concrètes pour l'écologie industrielle en Afrique. L'exemple du Cameroun», Rapport d'une mission de prospection, janvier à mai 1999, ICAST, Genève, 2000 (www.icast.org).

Schneider, François, «Analyse de Cycle de Vie (LCA), Analyse de Flux de Substance (SFA) et de matière (MFA) pour l'analyse du recyclage et du réemploi», thèse de doctorat sous la direction du Prof. Alain Navarro, INSA de Lyon (Institut national des sciences appliquées), 1996.

Schneider, François, «Point d'efficacité sans sobriété», *in* Michel Bernard, Vincent Cheynet, Bruno Clémentin (sous la coordination de), *Objectif décroissance*. *Vers une société harmonieuse*, Paris, L'Aventurine, 2003, p. 34-43.

Steenhout, Anne, «Étude toxicologique de la circulation et de l'accumulation du Pb chez l'homme et dans son environnement», thèse de Doctorat en Sciences, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, 2 volumes, 1986, 398 p.

Tubiana, Fabian, «Quand l'écologie devient industrielle», *Environnement Magazine*, n° 1617, mai2003, p. 54.

Vallès, Jean-François, «L'approche collective: de nouvelles solutions pour les PME», *UNEP Industry and Environment*, vol. 26, n° 4, octobre-décembre 2003, p. 13-19.

Vallès, Jean-François, «États-Unis: le management environnemental des parcs d'activités», *Environnement Magazine*, n° 1609, juillet-août 2002, p.26-27 (www.ecolindus.net/).

Vallès, Jean-François, «Le Japon prône le zéro émission», *Environnement Magazine*, n° 1607, mai 2002, p. 34-35.

Vallès, Jean-François, «Écologie industrielle: sur le fond, les entreprises françaises et étrangères rencontrent les mêmes problèmes», *Le Courrier de l'environnement*, n° 404 17 avril 2001, p. 8.

Vallès, Jean-François, «Le management environnemental des zones d'activités», *Urbanissimo*, janvier 1999, p. 21.

Vigneron, Jacques, «Écologie et écosystème industriel», *in* Philippe Esquissaud, *Écologie industrielle*, Paris, Hermann, 1990, p.1-26.

Vigneron, Jacques et Burstein, Claude (sous la direction de), *Ecoproduit*. *concepts et méthodologies*, Paris, Economica, 1993.

Vigneron, Jacques et Lacam, M., *Innovations des éco-industries*, Paris, Economica, 2002.

Vigneron, Jacques et Patingre, Jean-François, *Eco-concevoir*, Paris, Economica, 2003.

Table des matières

Introduction à la deuxième édition 8

Prologue 11

1. L'industrie hors nature 15

Critique de l'approche «end of pipe» 16

2. L'écologie industrielle 25

La symbiose de Kalundborg 28
Les enseignements de Kalundborg 32
Les parcs éco-industriels 34
Les biocénoses industrielles 38
Conséquences pour les entreprises 39
L'évolution du système industriel 41

3. Perspectives historiques 49

«L'écosystème Belgique» 54
La vision japonaise 59
Un nouveau départ avec Scientific American 62

4. Le métabolisme industriel 67

Le cadmium dans le bassin du Rhin 71
Bannir le cadmium? Pas si simple… 74
Cadmium et politique agricole 75
Métabolisme industriel du jus d'orange 77
Métabolisme des ménages urbains 81
La pollution électronique 86
Métabolisme industriel du soufre 88
L'importance des translocations 91
La perturbation des cycles biogéochimiques 93
Une gestion optimale des ressources 95

5. La maturation du système industriel 99

Les déchets comme ressources 101
Fermer les cycles matériels et minimiser
les usages dissipatifs 102
Défis techniques du recyclage 103

FPH DDE 137écologie 11/10/04 18:15 Page 252

Freiner la dissipation 106
Dématérialiser les produits et les services 110
Les limites de la dématérialisation 113
Trois conclusions sur la dématérialisation 116
Décarboniser la diète énergétique 117
L'alternative des hydrates de carbone 122
Les nouveaux métiers de l'éco-restructuration 123

6. Stratégies technologiques 125

Trajectoires et grappes technologiques 127
L'ingénierie écologique ou écotechnologie 130
Une trajectoire clé: l'industrie chimique 132
Mieux produire les toxiques 136
Vers une chimie vraiment fine 140
Le potentiel des biotechnologies 142
Les écosystèmes microbiens artificiels 144
Nanotechnologies et fabrication moléculaire 150
Des artefacts autonomes 152

7. La richesse d'utilisation 157

Stratégie de la durabilité 161
L'utilisation intensive 162
Conséquences pour l'environnement et l'emploi 166
Vers une relocalisation de l'économie 168

Épilogue. L'élégance industrielle 171

Addendum: Tendances et enjeux de l'écologie industrielle . . . 175

Les tendances actuelles 176
Les tendances émergentes 179
Les tendances «en souffrance» 184

Annexe 1. L'écologie industrielle en France 211

Annexe 2. Sélection bibliographique 217

La Fondation Charles Léopold Mayer pour le progrès de l'Homme (FPH) est une fondation de droit suisse, créée en 1982 et présidée par Françoise Astier. Son action et sa réflexion sont centrées sur les liens entre l'accumulation des savoirs et le progrès de l'humanité dans les domaines suivants: environnement et avenir de la planète ; rencontre des cultures ; sciences, techniques et société ; rapports entre État et Société; agricultures paysannes; lutte contre l'exclusion sociale; construction de la paix. Avec des partenaires d'origines très diverses (associations, administrations, entreprises, chercheurs, journalistes…), la FPH anime un débat sur les conditions de production et de mobilisation des connaissances au service de ceux qui y ont le moins accès. Elle suscite des rencontres et des programmes de travail en commun, un système normalisé d'échange d'informations, soutient des travaux de capitalisation d'expérience et publie ou copublie des ouvrages ou des dossiers.

« Éditions-Diffusion Charles Léopold Mayer » est une association constituée selon la loi de 1901, dont l'objectif est d'aider à l'échange et à la diffusion des idées et des expériences de la Fondation et de ses partenaires. Cette association édite des dossiers et des documents de travail et assure leur vente et leur distribution, sur place et par correspondance, ainsi que celle des ouvrages coédités par la Fondation avec des maisons d'édition commerciales.

Vous pouvez vous procurer les ouvrages des Éditions Charles Léopold Mayer, ainsi que les autres publications ou copublications de la Fondation Charles Léopold Mayer pour le progrès de l'Homme (FPH) en librairie ou à défaut aux :

Éditions-Diffusion Charles Léopold Mayer
38 rue Saint-Sabin
75011 PARIS (France)
Tél./Fax: 0148064886
Mél: diffusion@fph.fr

Accueil : du mardi au vendredi: 9h30-12h30 – 14h30-17h30

Le catalogue propose environ 300 titres sur les thèmes suivants :

Économie, Solidarité, Emploi
Gouvernance
Relations sciences et société
Agricultures et organisations paysannes
Dialogue interculturel
Communication citoyenne
Construction de la paix
Écologie, environnement
Prospective, valeurs, mondialisation
Histoires de vie
Méthodologies pour l'action

Pour obtenir le catalogue des éditions et coproductions Charles Léopold Mayer, envoyez vos coordonnées à :

Éditions-Diffusion Charles Léopold Mayer
38 rue Saint-Sabin
75011 PARIS (France)

Veuillez me faire parvenir le catalogue des éditions et coproductions Charles Léopold Mayer.

Nom . . . . . Prénom . . . . . .

Société . . . . . .

Adresse . . . . . .

. . . . . .

Code postal . . . . . Ville . . . . . .

Pays . . . . . .