

# L'ÉCOLOGIE INDUSTRIELLE, UNE STRATÉGIE DE DÉVELOPPEMENT

Suren Erkman

Gallimard | Le Débat

2001/1 - n° 113 pages 106 à 121

ISSN 0246-2346

Distribution électronique Cairn.info pour Gallimard.

© Gallimard. Tous droits réservés pour tous pays.

La reproduction ou représentation de cet article, notamment par photocopie, n'est autorisée que dans les limites des conditions générales d'utilisation du site ou, le cas échéant, des conditions générales de la licence souscrite par votre établissement. Toute autre reproduction ou représentation, en tout ou partie, sous quelque forme et de quelque manière que ce soit, est interdite sauf accord préalable et écrit de l'éditeur, en dehors des cas prévus par la législation en vigueur en France. Il est précisé que son stockage dans une base de données est également interdit.

#### Suren Erkman

# L'écologie industrielle, une stratégie de développement

Kalundborg, à une centaine de kilomètres à l'ouest de Copenhague, c'est un peu le bout du monde. Sur les derniers kilomètres, la liaison ferroviaire sillonnant la rase campagne danoise ne comporte qu'une seule voie. Pourtant, depuis quelques années, des représentants de services de promotion économique, de ministères de l'environnement et de l'industrie, ainsi que de grandes entreprises se rendent dans cette petite ville portuaire de vingt mille habitants pour y visiter la désormais fameuse « Symbiose industrielle ». Depuis 1996, année de fondation de l'Institut de la symbiose (créé pour répondre à l'afflux des demandes d'information), plusieurs dizaines de délégations officielles, en provenance principalement des États-Unis et d'Asie, ont ainsi fait le pèlerinage de Kalundborg.

Pour comprendre l'origine de cet engouement, il faut remonter à l'automne 1989. Chaque année, au mois de septembre, le mensuel de vulgarisation *Scientific American* (*Pour la science*, en version française) publie un numéro théma-

tique. 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 simpliste par un

modèle plus intégré : un écosystème industriel  $[\ldots].$ 

« 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<sup>1</sup>. »

Ces lignes semblent avoir joué un rôle de catalyseur, comme si elles avaient cristallisé une intuition latente chez bon nombre de gens à la recherche d'un nouveau modèle de développement économique. 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. Mais, quelles que soient les définitions, tous les auteurs s'accordent pour reconnaître au moins trois éléments principaux dans le concept d'écologie industrielle:

- a) C'est une vision globale, intégrée, de tous les composants du système industriel et de leurs relations avec la biosphère.
- b) 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.
- c) 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.

La méthodologie de base de l'écologie industrielle se nomme « métabolisme industriel ». Cette méthodologie, 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 ressources jusqu'à leur retour inévitable, tôt ou tard, dans les grands cycles de la biosphère. En pratique, une étude de métabolisme industriel consiste à établir des bilans de masse et d'énergie. Les études de métabolisme industriel peuvent se faire à l'échelle d'une ville, d'une région, d'un pays, mais aussi d'un produit, d'un service, ou d'une filière<sup>2</sup>.

L'écologie industrielle entend franchir une étape supplémentaire : en s'inspirant des connaissances sur les écosystèmes et la biosphère, on tente de déterminer les transformations suscep-

1. Robert A. Frosch et Nicholas E. Gallopoulos, « Des 1. Robert A. Frosch et Nicholas E. Gallopoulos, « Des stratégies industrielles viables », *Pour la science*, n° 145, novembre 1989, pp. 106-115. Article original: Robert A. Frosch et Nicholas E. Gallopoulos, « Strategies for Manufacturing », *Scientific American*, vol. 261, n° 3, septembre 1989, pp. 94-102 (numéro spécial: « Managing Planet Earth »).

2. 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.

phere, Berlin, Springer Verlag, 1991.

Sur les études de flux de matière, le principal centre de recherche en Europe est l'Institut Wuppertal, près de Bonn (http://www.wupperinst.org/). L'Institut Wuppertal héberge également le site web de ConAccount, le réseau européen pour les études de flux de matière : http://www2.wupperinst.org/Projekte/ConAccount.

Aux Etats-Unis, plusieurs ministères ont créé l'Inter-

Adx Edas-Olls, plusterial infinisters officer i interagency Workgroup on Material and Energy Flows. Site Web: http://www.mattec.nist.gov/img.htm. Voir en particulier la publication Materials – A Report of the U.S. Interagency Working Group on Industrial Ecology, Material and Energy Flows, disponible sur le web à l'adresse suivante: http://www.oit.doe.gov/mining/materials.

tibles de rendre le système industriel compatible avec un fonctionnement « normal » des écosystèmes biologiques. Une bonne compréhension du métabolisme industriel constitue donc un préalable indispensable à l'écologie industrielle.

#### Une alternative à l'approche end of pipe

L'écologie industrielle diffère profondément de la conception traditionnelle, qui considère le système industriel et la biosphère comme séparés : d'un côté, les usines, les villes ; de l'autre, la nature, l'« environnement ». L'intuition de base de l'écologie industrielle explore l'hypothèse inverse : le système industriel peut être considéré comme une forme particulière d'écosystème. Après tout, les processus de fabrication et de consommation des biens et des services consistent en des flux de matière, d'énergie et d'information, tout comme dans les écosystèmes naturels. L'enjeu est de faire évoluer l'ensemble du système industriel vers un mode de fonctionnement viable, à l'image de la biosphère actuelle, elle-même fruit d'une longue évolution. 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.

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 sys-

tème industriel venait à imiter les meilleurs aspects de son analogue biologique<sup>3</sup>. »

Traditionnellement, 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 (ce que l'on désigne habituellement par l'expression anglaise end of pipe). Historiquement, l'approche end of pipe s'est développée selon une stratégie administrative sectorielle. 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.

Toutefois, il faut bien réaliser que la « solution » d'un problème aux yeux d'un département peut 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

<sup>3.</sup> Robert A. Frosch et Nicholas E. Gallopoulos, « Towards An Industrial Ecology », *in* A.D. Bradshow *et al.* (éd.), *The Treatment and Handling of Wastes*, Londres, Chapman & Hall, 1992, pp. 269-292.

filtres. Ces derniers se chargent de substances solides qu'il convient, à leur tour, d'éliminer.

Par conséquent, bien que l'approche end of pipe ait rendu d'indéniables services ces dernières décennies, il est clair qu'à terme une telle stratégie sectorielle ne suffit pas. Par ailleurs, les pays industrialisés se trouvent confrontés à un phénomène croissant, face auquel la stratégie end of pipe est inopérante : les émissions polluantes deviennent, proportionnellement, de plus en plus diffuses et donc difficiles à contrôler. Par exemple, en novembre 1986, l'incendie d'une halle de stockage de l'entreprise Sandoz, à Schweizerhalle (Bâle), entraîna le déversement de trente-trois tonnes de substances toxiques dans le Rhin. Cet accident provoqua une émotion considérable. Pourtant, à la même époque, le Rhin charriait chaque jour environ vingt-sept 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, s'en émeuve outre mesure! Cette pollution silencieuse ne résulte pas d'événements spectaculaires et ponctuels, mais de l'effet additionné d'innombrables agents économiques. Lors de leurs activités de routine, sans le vouloir, ils disséminent de manière diffuse des substances dans l'environnement (engrais, médicaments, carburants, produits de nettoyage, etc.)<sup>4</sup>.

Au premier abord, le concept d'écologie industrielle apparaît simple et séduisant; il semble offrir une alternative bienvenue aux impasses de l'approche *end of pipe*. Mais a-t-il la moindre chance de dépasser le stade d'une belle idée abstraite? Telle est la question qui se posait au début des années 1990, lors des premières réflexions issues de l'article de Frosch et Gallopoulos. C'est alors qu'intervint la « découverte » de la symbiose de Kalundborg (jusqu'alors pratiquement inconnue), preuve de l'existence

réelle d'un écosystème industriel en vraie grandeur, fonctionnant sur des bases économiques solides.

### La symbiose de Kalundborg

Située au bord de la mer du Nord, la ville de 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 1950, avec l'implantation d'une centrale électrique puis 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 à différents degrés de pureté), ainsi que divers sous-produits. À la fin des années 1980, 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 pipe-lines ad hoc:

4. William M. Stigliani et Stefan Anderberg, « Industrial metabolism at the regional level: the Rhine Basin», in R. U. Ayres et U. E. Simonis (éd.), Industrial Metabolism, op. cit., pp. 119-162.

William M. Stigliani, « The integral river basin approach

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 et T. Hamers (éd.), Integrated Soil and Sediment Research: a Basis for Proper Protection, Dordrecht, Kluwer, 1993.

- Asnaesvaerket, la plus grande centrale électrique du Danemark. D'une capacité de 1 500 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 3 millions de tonnes de pétrole par an et 250 employés.
- 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 1 500 personnes.
- Gyproc, société suédoise dont l'usine de Kalundborg produit des panneaux de construction en gypse, 175 collaboraavec teurs.
- Enfin, la municide toute la ville de la

vapeur vendue par la centrale électrique.

L'eau, sous forme 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

La symbiose industrielle de Kalundborg soufre Kemira (usine d acide sulfurique) Giproc aux de construction) gypse eur excédentaire Chauffage excédentaire distance Lac Tissé Asnaesvaerket chaleur Ferme culture Novo Nordisk (enzymes industriels.etc.) Cendres (ciment

palité de Kalundborg, Fig. 1: Schéma des principaux échanges de déchets entre qui utilise pour le les partenaires de la symbiose industrielle de Kalundborg chauffage à distance (source: The Symbiosis Institute, Kalundborg).

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 cal-Asnaesvaerket cium). produit ainsi plus de deux cent mille tonnes de gypse par an. Transporté par camion jusqu'à l'entreprise voisine, Gyproc, ce gypse est aujourd'hui utilisé comme matière pre-

mière 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.

Il serait fastidieux d'énumérer en détail tous les échanges de déchets qui se sont progressivement mis en place au cours des années (et qui continuent à se développer), d'autant plus qu'il n'existe pas encore d'étude exhaustive sur la symbiose de Kalundborg, à l'exception de quelques publications préliminaires<sup>5</sup>. Sur la base des informations partielles disponibles actuellement, on peut toutefois dresser un bilan estimatif des principaux avantages environnementaux et économiques :

- réduction de la consommation des ressources: 45 000 tonnes par an de pétrole, 15 000 tonnes par an de charbon, et surtout près de 3 millions de m<sup>3</sup> par an d'eau;
- réduction des émissions de gaz à effet de serre et de polluants : 175 000 tonnes par an de gaz carbonique, 10 200 tonnes par an de dioxyde de soufre:
- réutilisation des déchets : 130 000 tonnes par an de cendres (pour la construction routière), 4 500 tonnes par an de soufre (pour la fabrication d'acide sulfurique), 200 000 tonnes par an de gypse, 1 440 tonnes par an d'azote et 600 tonnes par an de phosphore;

Les avantages économiques, qui se trouvent en fait 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 75 millions de dollars. Les revenus cumulés sur cette période, du fait de l'économie en ressources et de la vente des déchets, s'élèveraient à environ 160 millions de dollars. Actuellement, les revenus annuels sont évalués à 15 millions de dollars. Le temps moyen d'amortissement reste inférieur à cinq ans.

#### Parcs et réseaux éco-industriels

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, dans lequel toutes les entreprises 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 un pipe-line et reçoit en échange le sous-produit 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, où la distance sociale et culturelle entre les habitants est réduite. 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 quelques années, l'expérience de

5. John Ehrenfeld et Nicholas Gertler, « Industrial ecology

in practice: the evolution of interdependence at Kalundborg », Journal of Industrial Ecology, vol. 1, n° 1, 1997, pp. 67-79.
En français, on peut lire un récent reportage illustré à Kalundborg: Julie Cailliau et Sabine Jourdain, « Les déchets des uns, matières premières des autres », L'Usine nouvelle, n° 2744, 24 août 2000, pp. 52-56.

On peut consulter également le site web de l'Institut de la Symbiose : http://www.symbiosis.dk.

Kalundborg suscite une attention croissante. Toutefois, il vaut veiller à ne pas trop l'idéaliser. car le système présente aussi certains inconvénients, notamment la rigidité des échanges et le risque de perturbations du système en cas de défection de l'un des partenaires. Malgré ses limitations, la symbiose de Kalundborg a surtout valeur d'exemple : serait-il possible de reproduire ailleurs, voire de généraliser, ce succès ? D'abord, il faut remarquer que l'on 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 symbiose 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.

Lorsque l'on réfléchit au concept d'écosystème industriel, l'une des premières analogies qui vient à l'esprit est celle des « chaînes alimentaires industrielles ». De même que dans les écosystèmes naturels, certaines espèces se nourrissent des déchets ou des organismes d'autres espèces, on pourrait imaginer un processus similaire de valorisation des déchets entre différents agents économiques. C'est ainsi qu'est apparu au début des années 1990 le concept de « parc éco-industriel », fondé sur une généralisation de la symbiose de Kalundborg, qui désigne 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. Pour cette raison, on parle de plus en plus de « réseaux écoindustriels », dont les parcs représentent un cas particulier. L'idée des parcs (ou réseaux) écoindustriels se distingue des traditionnelles pratiques 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 écoindustriels, 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<sup>6</sup>. D'autres projets ont vu le jour à la même époque au Canada (Halifax), en Hollande (port de Rotterdam) et en Autriche (Graz).

Il faut reconnaître que, si l'idée des réseaux éco-industriels, 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 géné-

<sup>6.</sup> President's Council on Sustainable Development (PCSD), *Eco-Industrial Park Workshop Proceedings* (17-18 octobre 1996, Cape Charles, Virginia), Washington, DC, février 1997. Les actes de ce colloque sont disponibles sur le site web suivant: http://www.whitehouse.gov/PCSD/Publications/Eco\_Workshop.html.

ralement rigides, conçus pour des matières premières vierges, répondant à des critères très stricts de pureté, de qualité et de régularité. À l'inverse, la valorisation inter-entreprises de déchets et de sous-produits de qualité variable nécessite des procédés flexibles. Ainsi, 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 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, lorsque l'on commence à 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, prudents devant cette approche nouvelle.

Les réseaux éco-industriels ne vont donc pas surgir et devenir opérationnels du jour au lendemain, mais l'idée fait son chemin. En France, des entreprises comme Gaz de France (qui a cofinancé en 1999-2000 la première étude du genre dans l'Hexagone, avec la municipalité de Grande-Synthe, près de Dunkerque), Électricité de France, Vivendi, Suez Lyonnaise, commencent à s'intéresser de près à l'écologie industrielle<sup>7</sup>.

La raison de cet intérêt se comprend aisément : ces grandes entreprises fournissent déjà l'eau, l'énergie, et offrent des services de nature environnementale (traitement de déchets, etc.). L'étape suivante, en bonne logique, consistera à

proposer aux entreprises et aux collectivités locales des services à forte valeur ajoutée (« multiservices, multi-énergies »): un seul opérateur pour fournir, traiter, valoriser et gérer de manière intégrée, à l'échelle d'une zone industrielle ou d'une ville, les flux de matière et d'énergie, voire d'informations. Cette nouvelle offre de services intégrés peut se concrétiser, entre autres, par le biais de réseaux éco-industriels. Dans un contexte de libéralisation des marchés, les fournisseurs d'énergie, notamment, y voient une manière de fidéliser la clientèle et d'assurer ainsi leur développement, tout en ménageant l'environnement.

Pour les collectivités locales, l'enjeu concerne également la promotion économique : la valorisation de l'ensemble des flux de matière et d'énergie sur un territoire donné peut amener de nouvelles entreprises à venir s'installer pour traiter ou tirer profit de ressources jusqu'alors inutilisées (chaleur perdue, sous-produits divers, etc.).

#### 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 activités industrielles en cherchant à déterminer les « bonnes » associations, les

<sup>7.</sup> Suren Erkman et Jean-Claude Ray, Écologie industrielle à Grande-Synthe. Première expérience française: pré-étude sur la zone industrielle des Deux-Synthe, Ville de Grande-Synthe, Mission pour un développement durable, Rapport final, mai 2000 (Mairie de Grande-Synthe, B.P. 149, 59760 Grande-Synthe. Contact: M. Daniel Truy, tél.: 03 28 62 77 82).

meilleurs panachages, tels que des complexes « pulpe-papier », « engrais-ciments », « aciériesengrais-cimenteries », etc. 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 distillerie et une centrale thermique, afin de valoriser les différents sous-produits. Des exemples partiels et spontanés de tels complexes existent depuis longtemps, mais il faudrait désormais les développer de manière explicite et systématique, y compris dans le domaine agro-industriel<sup>8</sup>.

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, du fait de l'ampleur des flux de matière en jeu et, surtout, en raison de la quantité considérable d'énergie gaspillée. Dans le cas de Kalundborg, par exemple, la centrale brûle environ 4,5 millions de tonnes de charbon par année. Or, les 140 000 tonnes de vapeur consommées par année par la raffinerie Statoil ne représentent que 0,3 % de l'énergie totale produite par la centrale; les 225 000 tonnes de vapeur nécessaires annuellement pour le chauffage résidentiel à distance 0,5 %, et les 215 000 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 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, à l'intention d'industries alimentaires ou chimiques.

# 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, mais on peut déjà faire quelques observations d'ordre général.

- L'idée que le système industriel puisse 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 ».
- Les milieux d'affaires, d'un côté inondés par une pléthore de discours plus ou moins éthérés sur le développement durable, de l'autre submergés par un déluge de théories sur le management environnemental, 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 de la gestion, l'écologie industrielle entraîne deux conséquences ma-

<sup>8.</sup> Nelson L. Nemerow, *Zero Pollution for Industry. Waste Minimization Through Industrial Complexes*, New York, John Wiley & Sons, 1995.

jeures : 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, des formes de collaboration entre entreprises pour assurer une gestion optimale des res-

– 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 moyennes entreprises ont une chance de mettre en pratique l'écologie industrielle, et pas seulement un nombre restreint 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 d'Anova (la holding de l'industriel suisse Stephan Schmidheiny, initiateur du Business Council for Sustainable Development). 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 stra-

tégie 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<sup>9</sup>.

## 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 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.

Les connaissances sur l'évolution de la vie sur Terre offrent ainsi des perspectives intéressantes pour réfléchir au développement du système industriel, qui résulte, tout comme la biosphère, d'une longue histoire évolutive. En effet, la vie a pu assurer les conditions de son épanouissement à long terme grâce à une longue succession d'« inventions » (fermentation anaérobique, puis aérobique, puis photosynthèse), un processus dont la société industrielle pourrait s'inspirer.

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

<sup>9.</sup> Claude Fussler (avec Peter James), *Driving Eco-innovation*. A breakthrough Discipline for Innovation and Sustainability, Londres, Pitman Publishing, 1996.

de matière sont indépendants les uns des autres. Les ressources apparaissent illimitées, et les déchets peuvent aussi être produits de manière illimitée. L'analogie entre cette première étape 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 (aujourd'hui vice-président en charge de l'environnement chez AT & T), a proposé d'appeler ce fonctionnement l'« écologie de type I », où le système se comporte comme si les ressources et les déchets pouvaient exister en quantités illimitées 10.

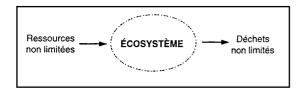


Fig. 2 : Schéma d'un écosystème de type I (source : Braden R. Allenby).

À un stade d'évolution ultérieure, les ressources deviennent limitées. Dans cette situation, les organismes vivants deviennent fortement interdépendants et commencent à former 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 entrants et sortants (les ressources et les déchets) connaissent des

limites imposées par la disponibilité des ressources et la capacité d'accueil des déchets par l'environnement.

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 longue échéance, car les flux sont unidirectionnels : les ressources diminuent et les déchets continuent à augmenter inexorablement.

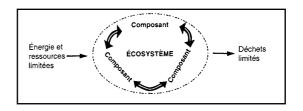


Fig. 3 : Schéma d'un écosystème de type II (source : Braden R. Allenby).

Pour être vraiment viables, les écosystèmes biologiques ont évolué jusqu'à devenir presque entièrement cycliques. Dans ce cas, il se révèle impossible de distinguer entre les ressources et les déchets, car les déchets d'un organisme sont une ressource pour un autre organisme. Seule l'énergie solaire constitue un apport extérieur. Toujours selon la terminologie suggérée par Braden Allenby, on peut alors parler 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 spa-

<sup>10.</sup> 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, pp. 343-354. Thomas E. Graedel, « On the Concept of Industrial Ecology », *Annual Review of Energy and the Environment*, Palo Alto, CA, vol. 21, 1996, pp. 69-98.

tiales très variées. Idéalement, la société industrielle devrait s'approcher autant que possible d'un écosystème de type III.

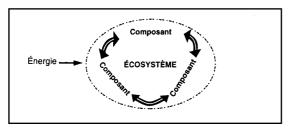


Fig. 4 : Schéma d'un écosystème de type III (source : Braden R. Allenby).

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.

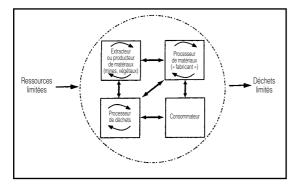


Fig. 5 : Schéma d'un écosystème industriel idéal (source : Braden R. Allenby).

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.

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 un 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).

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. 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 le système de production. À terme, ce savoir sur le fonctionnement des écosystèmes naturels et artificiels pourrait se concrétiser en une « ingénierie du système Terre 11 ».

#### Un quadruple défi

L'enjeu consiste donc à transformer en profondeur le système industriel, ce que l'on nomme parfois l'« éco-restructuration », pour tenter de le faire évoluer vers un mode de fonctionnement viable à long terme, compatible avec la biosphère. Concrètement, dans l'optique de l'écologie industrielle, on cherche à relever un quadruple défi.

- 1) Valoriser systématiquement les déchets : à l'image des chaînes alimentaires dans les écosystèmes naturels, il faut créer des réseaux d'utilisation des ressources et des déchets dans les écosystèmes industriels, de sorte que tout résidu devienne une ressource pour une autre entreprise ou un autre agent économique (par exemple par le biais de réseaux éco-industriels). Le recyclage, au sens courant du terme, ne constitue donc qu'un aspect de cette stratégie de valorisation en cascade des flux de matière.
- 2) Minimiser les pertes par dissipation : aujourd'hui, dans les pays industrialisés, la consommation et l'utilisation pollue souvent plus que la fabrication. Les engrais, les pesticides, les pneus, les vernis, les peintures, les solvants, etc., sont autant de produits totalement ou partiellement dissipés dans l'environnement lors de leur usage

normal. Il faut donc concevoir de nouveaux produits et de nouveaux services minimisant ou rendant inoffensive cette dissipation.

- 3) Décarboniser l'énergie : depuis les débuts de la révolution industrielle, le carbone sous forme d'hydrocarbures d'origine fossile (charbon, pétrole, gaz) représente l'élément principal, la substance vitale irriguant toutes les économies industrielles. Or ce carbone fossile se trouve à la source de nombreux problèmes : intensification de l'effet de serre, smog, marées noires, pluies acides. Il faut donc rendre la consommation d'hydrocarbures moins dommageable (par exemple en récupérant le gaz carbonique issu de la combustion) et favoriser la transition vers une diète énergétique moins riche en carbone fossile (énergies renouvelables, économies d'énergie). En termes abstraits, on cherche à séparer la fonction « énergie » de son substrat « carbone fossile »<sup>12</sup>.
- 4) Dématérialiser l'économie : le but est de minimiser les flux de matière (et d'énergie) tout en assurant un bien-être au moins équivalent. Le progrès technique permet d'obtenir plus de services avec une quantité moindre de matière, en fabriquant des objets plus légers ou en substituant les matériaux (par exemple, quelques kilos de fibre optique transmettent plus de télécommunications qu'une tonne de fil de cuivre). Mais la dématérialisation n'est pas une affaire

11. Braden R. Allenby, « Earth systems engineering : The

<sup>11.</sup> Braden R. Allenby, « Earth systems engineering: The role of industrial ecology in an engineered world », Journal of Industrial Ecology, vol. 2, n° 3, 1998, pp. 73-93.

12. Nebojsa Nakicenovic, « 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, pp. 74-88. Robert Socolow (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 (également disponible sur le web: http://www.princeton.edu:80/~ceesdoe/).

aussi simple qu'elle en a l'air. Des objets moins massifs peuvent se révéler moins solides et avoir une durée de vie réduite, ce qui nécessite d'en fabriquer plus <sup>13</sup>.

Bien que simple à comprendre intuitivement, le concept de dématérialisation souffre d'un certain flou, notamment du fait que les méthodologies de mesure des flux de matière sont encore en cours d'élaboration <sup>14</sup>. Deux stratégies de dématérialisation font actuellement l'objet de débats nourris:

- la dématérialisation relative, qui permet d'obtenir plus de services et de produits pour une quantité donnée de matière (ce que l'on nomme également l'accroissement de la productivité des ressources);
- la dématérialisation absolue, qui cherche à diminuer, en valeur absolue, les flux de matière transitant dans le système industriel (un objectif bien plus difficile à réaliser que la dématérialisation relative) <sup>15</sup>.

La dématérialisation des objets et des services représente, certes, un défi considérable pour les designers et les concepteurs, mais le principal enjeu concerne la dématérialisation des infrastructures et du domaine bâti. C'est là que se trouvent les plus importants flux et stocks de matière (stocks qui, un jour ou l'autre, deviendront des déchets): immeubles, routes, aéroports, chemins de fer, réseaux de distribution d'énergie et d'eau, etc. Une telle « dématérialisation systémique » suppose de nouvelles pratiques de gestion des territoires, favorisant, par exemple, des structures urbaines compactes, par contraste avec le puissant « matérialiseur » que constitue, sous sa forme actuelle, l'habitat dispersé.

Les stratégies de dématérialisation ne concernent donc pas que les industriels, elles intéressent en priorité les pouvoirs publics. Les premières réflexions publiées sur le sujet, notamment en Suède et en Inde, montrent que la connaissance et la gestion des flux et des stocks de matière à l'échelle régionale devraient jouer un rôle crucial pour la mise en œuvre par les collectivités locales de politiques de développement durable <sup>16</sup>.

Le terme de « dématérialisation » a été récemment mis à la mode par les discussions sur l'im-

13. Robert Herman, Siamak A. Ardekani et Jesse H. Ausubel, « Dematerialization », in Jesse H. Ausubel et Hedy E. Sladovich (éd.), Technology and Environment, Washington, DC, National Academy Press, 1989, pp. 50-69, Oliviero Bernardini et Riccardo Galli, « Dematerialization : long-term trends in the intensity of use of materials and energy », Futures, mai 1993, pp. 431-448. Signalons qu'une première thèse en France sur la dématérialisation a été effectuée sous la direction du professeur Sylvie Faucheux (C3ED, université de Versailles, Saint-Quentin-en-Yvelines), par Julia Haake : 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 (novembre 2000).

14. Cutler J. Cleveland et Matthias Ruth, « Indicators of dematerialization and the materials intensity of use », *Journal of Industrial Ecology*, vol. 2, n° 3, 1998, pp. 15-50.

15. Le « Facteur 4 », popularisé par Ernst von Weizsäcker et Amory Lovins, concerne la dématérialisation relative: Ernst von Weizsäcker, Amory B. Lovins, L. Hunter Lovins, Factor Four, Doubling Wealth, Halving Resource Use, Londres, Earthscan Publications Ltd, 1997 (trad. fr., Paris, Éd. Sang de la Terre).

En revanche, le « Club du Factor 10 », lancé en France (notamment par Friedrich Schmidt-Bleek et Robert Ayres) par la Déclaration de Carnoules en 1994, se place dans une optique de dématérialisation absolue. Le texte de la Déclaration de Carnoules est disponible sur Internet : http://www.techfak.uni-bielefeld.de/~walter/f10/

16. Annica Lindqvist-Östblom, Flow-oriented Studies for Environmental Management by Local Authorities — Experiences from a Regional Substance Flow Analysis, Linköping Studies in Science and Technology, thèse n° 825, mai 2000 (Linköping University, Environmental Technique and Management, Department of Physics and Measurement Technology, Suède, Tel.: +46 13 28 58 26). Fredrik Burström, Environment and Municipalities. Towards a Theory on Municipal Environmental Management, Stockholm, Royal Institute of Technology, Division of Industrial Ecology, septembre 2000 (tél.: +46 87 90 91 18).

Les études de métábolisme régional revêtent une importance particulière pour la planification économique dans les pays en développement. Voir Suren Erkman et Ramesh Ramaswamy, *Industrial Ecology as a Tool for Development Planning. Case Studies in India*, New Delhi, Sterling Publishers, et Paris, Ed. Charles Léopold Mayer, à paraître début 2001.

pact des nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC). Les thuriféraires de la « Nouvelle Économie » font ainsi valoir que ces technologies suscitent une croissance favorable à l'environnement, car elles génèrent plus de valeur en consommant proportionnellement moins d'énergie et de matières premières. Il faut d'abord observer que l'on parle, dans ce cas, de dématérialisation relative (une dématérialisation de la valeur ajoutée, pourrait-on dire) et non pas de dématérialisation absolue. En effet, il ne fait guère de doute que les flux totaux de matière, à l'échelle globale, continuent à augmenter de plus belle (ce qui, en dernière analyse, importe le plus pour l'environnement).

Il convient également de tenir compte de phénomènes comme les « effets de rebond ». Ainsi, dans un retentissant article polémique paru en mai 1999, le magazine économique américain Forbes affirmait que la prolifération d'ordinateurs et de dispositifs en tout genre nécessaires au stockage, au transport et au traitement d'un volume croissant de données, allait entraîner une forte augmentation de la consommation d'électricité, et donc de charbon (du moins aux États-Unis). Autre exemple : la vente de produits par le biais de l'Internet devrait en principe induire une diminution des surfaces commerciales. Toutefois, cette forme de vente entraîne une multiplication des transports routiers et aériens pour assurer une livraison rapide des produits. Le quotidien San Francisco Examiner faisait récemment état d'un accroissement des embouteillages à San Francisco, dû aux camions de courrier rapide chargés de livrer les produits commandés en ligne 17. Il semble donc honnête d'admettre que personne ne possède, pour l'instant, de vision claire quant aux impacts environnementaux de la diffusion massive des NTIC.

Mais il ne fait guère de doute que la Nouvelle Économie ne saurait se résumer à d'évanescents flux d'information 18....

On le voit, l'écologie industrielle s'intéresse à l'évolution du système industriel dans sa globalité et à long terme. En tant que domaine explicitement constitué, l'écologie industrielle est jeune, à peine une dizaine d'années. Bien que l'idée en elle-même ne soit pas nouvelle, on peut dire que l'on assiste actuellement à la naissance d'un nouveau champ, à la confluence de l'ingénierie, de l'écologie, de la bioéconomie et de nombreuses autres disciplines (droit, géographie, urbanisme, design, gestion, etc.). Malgré sa jeunesse, l'écologie industrielle jouit déjà d'une reconnaissance académique certaine, comme en témoigne le lancement, au printemps 1997, du Journal of Industrial Ecology (MIT Press), la première revue scientifique consacrée à ce domaine en plein développement 19. Le monde de l'économie n'est pas en reste : des entreprises comme AT & T, General Motors, Xerox ou Dow intègrent désormais l'écologie industrielle dans leur réflexion stratégique, ce que commencent également à faire certains grands groupes français (Gaz de France, Électricité de France, Vivendi, Suez Lyonnaise, Saint-Gobain, Usinor, Lafarge et d'autres) et des P.M.E. comme Yprema (écologie industrielle appliquée aux travaux publics).

Cette convergence d'intérêt entre les cercles

17. Peter Huber et Mark P. Mills, « Dig more coal – the PCs are coming », *Forbes*, 31 mai 1999 (http://forbes.com/forbes/99/0531/6311070a.htm). Ryan Kim, « E-biz's hard drive. Online delivery trucks add to San Franciso street congestion », *San Francisco Examiner*, 21 juin 2000, p. 1.

18. Un réseau de chercheurs créé cette année à l'uni-

18. Un réseau de chercheurs créé cette année à l'université de Berkeley, le « Network for Energy, Environment, Efficiency, and the Information Economy », s'efforce de documenter et d'analyser les impacts de la Nouvelle Économie sur la consommation de ressources. Voir leur site web : http://n4e.lbl.gov.

19. Site web: http://mitpress.mit.edu/JIE.

académiques et les milieux d'affaires (suffisamment rare en ce domaine pour mériter d'être relevée) résulte sans doute du double projet de l'écologie industrielle, qui vise à mener de front une approche à la fois rigoureuse sur le plan théorique (l'écologie scientifique) et opérationnelle (en préconisant des actions concrètes, économiquement viables). Les problèmes d'envi-

ronnement ne constituent donc qu'un aspect, parmi d'autres, de l'écologie industrielle, qui œuvre pour l'avènement d'un système industriel plus élégant, c'est-à-dire capable de créer plus de richesses et de bien-être avec moins d'impacts sur la biosphère.

Suren Erkman.