

## L'écologie industrielle : Retour sur le mythe de l'innovation

Diemer Arnaud  
PHARE Paris I, OMI Reims

Depuis le rapport Brundtland, la notion de développement durable est généralement associée au fait qu'il s'agit de « *répondre aux besoins présents sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire les leurs* ». Comme le soulignent Andrée Kartchevsky et Muriel Maillefert (2009, p. 27), cette définition associe étroitement « *équité intergénérationnelle et contraintes technologiques* », qui plus est, elle renvoie à une dimension, bien connue des économistes, celle des besoins humains. Il n'en fallait donc pas plus pour que ces derniers se saisissent de la question et apportent à leur manière, un éclairage sur ce concept (Vivien, 2003).

Très vite, un grand nombre d'économistes se sont écartés des débats médiatiques et de l'approche tridimensionnelle (environnement, social, économie) du concept, approche qui faisait une large place à la transdisciplinarité, afin de placer le développement durable au cœur des théories de la croissance et du développement. Dans le cas des théories de la croissance, la contrainte environnementale est posée comme une limite, celle de l'épuisement des ressources rares. Il convient dès lors de poser les bases d'un modèle (irréversibilité du temps, approche mécaniste, hypothèse de substitution des facteurs de production, marchandisation de l'environnement, introduction du progrès technique...) qui permette aux hommes de s'émanciper des lois de la nature. Les théories du développement ont quant à elles suivies de multiples voies : (i) celle de la dénonciation de l'impérialisme, le centre, ici les pays développés, exploite la périphérie, les pays sous développés, pour leur extirper notamment les ressources naturelles (Emmanuel, 1969) ; (ii) celle de l'étude de la pauvreté absolue dans les pays du Tiers monde (Sauvy, 1952) ; (iii) celle de la nécessité de mettre en place une planification et une intervention étatique dans des pays qui ont des conditions de vie très difficiles (Myrdal, 1963).

Cette position des économistes nous apparaît préjudiciable à plus d'un titre. En transposant le développement durable dans le débat croissance – développement, nous ne faisons qu'accroître la confusion entre ces deux concepts (Schumpeter, 1926 ; Georgescu-Roegen, 1995). Toute personne s'intéressant aux questions environnementales et économiques ne peut que sortir perplexe à la lecture d'un tel discours. En refusant l'approche transdisciplinaire, les économistes se sont une nouvelle fois coupés des débats et des enjeux du moment pour mieux se retrancher dans leurs chapelles dorées. Ce dernier point nous apparaît d'autant plus incompréhensible qu'il existe, à la croisée des chemins de l'écologie et de l'économie, une vaste littérature qui donne une réelle portée au concept de développement durable. Nous souhaiterions revenir dans ce qui suit, sur l'une de ces pistes de

réflexion, initiée par les tenants de l'écologie industrielle. Cette dernière n'a été véritablement reconnue et institutionnalisée qu'à la suite du colloque de Washington (mai 1991), parrainé par la National Academy of Science, et la publication dès 1997 d'une revue spécialisée intitulée *the Journal of Industrial Ecology* (Lifset, 1997). Pourtant, dès 1989, certains travaux d'ingénierie précisaient déjà que l'écologie industrielle pouvait être pensée comme une réponse « pragmatique » à la question du développement durable. Ehrenberg (2004) parle de « *science of sustainability* ».

L'objet de cet article est de clarifier le concept de développement durable en l'examinant plus particulièrement sous l'angle de l'écologie industrielle et de ses relations à l'innovation. Nous montrerons dans un premier temps que l'écologie industrielle se propose de donner un contenu opérationnel à la notion de développement durable (Ayres, 1993, Graedel, 1996). Robert Frosch (1995, p. 148) associe l'écologie industrielle à « *l'ensemble des pratiques destinées à réduire la pollution industrielle* ». Suren Erkman (1998) a matérialisé cette idée par un sous-titre évocateur « *mettre en pratique le développement durable dans une société hyper-industrielle* ». L'écologie industrielle peut être ainsi présentée comme une nouvelle pratique du management environnemental. Elle répond aux besoins des entreprises, qui sous la pression des lois, des règlements, des normes et de la concurrence, cherchent à intégrer l'environnement à leurs stratégies. Nouvelle pratique soit, mais qui doit être initiée par les ingénieurs. En effet, l'écologie industrielle repose sur une démarche et un ensemble de principes. De nature interdisciplinaire, elle cherche à donner une vision globale et systémique des interactions entre la société industrielle et la biosphère. Elle s'appuie principalement sur les notions d'écosystème et de métabolisme (analyse des flux de matières, bilans matière-énergie, matrice input-output, évaluation du cycle de vie...) tout en restant sous la contrainte des lois énergétiques du monde physique. Nous préciserons dans un second temps, que l'écologie industrielle place la technologie au cœur du développement durable. L'ingénierie écologique ou l'écotechnologie (Mitsch, Jorgensen, 1989) recommande aux industriels de procéder à un ensemble d'opérations de rationalisation de la production (optimisation des consommations énergétiques et matérielles, minimisation des déchets à la source, réutilisation des rejets pour servir de matières premières à d'autres processus de production). Dans le cas du recyclage des déchets, l'innovation technologique peut être associée à une innovation organisationnelle (c'est la fameuse symbiose industrielle de Kalundborg). Si l'innovation constitue une réponse à la contrainte environnementale, elle atteint cependant vite ses limites. Le processus de dématérialisation initié par les NTIC montre que les effets rebond ont été largement sous-estimés, et que l'ère de l'ordinateur se matérialise non pas par plus de productivité (Solow), mais bien par un gaspillage inexorable des ressources naturelles. Au final, l'une des clefs du développement durable serait la combinaison d'innovations technologiques et organisationnelles et de changements dans les modes de vie. 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. L'écologie industrielle doit finalement fusionner avec l'écologie politique afin de proposer un modèle de sortie de crise !

## 1/ L'écologie industrielle, une réponse des ingénieurs à la question du développement durable

La notion « *d'écologie industrielle* » a été définie en 1989, dans un numéro spécial de la revue « *Scientific American* » (*Pour la Science* en français) consacrée à la « gestion de la planète Terre ». Dans un article intitulé « *Des stratégies industrielles viables* », Robert Frosch et Nicolas Gallopoulos, tous deux responsables de la Recherche chez General Motors<sup>1</sup>, développent l'idée selon laquelle il devient nécessaire de recycler les biens usagés, d'économiser les ressources et de rechercher des matières premières de remplacement<sup>2</sup>. Dans son ouvrage « *Vers une écologie industrielle* », Suren Erkman (1998, p. 22) souligne que l'article de Frosch et Gallopoulos a joué « *le rôle de catalyseur* ». Un véritable courant de pensée (Schulze, Frosch, Risser, 1996, Lifset, 1998, Ehrenfeld, 2004, Erkman, 2006...) a ainsi vu le jour, conduisant ces auteurs à préciser le contenu et la substance de l'écologie industrielle. Les trois points suivants semblent bien refléter l'état des connaissances actuelles : (A) la place du concept d'écosystème ; (B) la mobilisation de toutes les sciences, même si celles de l'ingénieur constituent le cœur de la réflexion ; (C) l'analyse des flux de matières et d'informations par l'intermédiaire du concept de métabolisme industriel.

### **A. L'écosystème biologique, un idéal type**

Dans leur article « *Des stratégies industriellement viables* », Frosch et Gallopoulos insistent que le fait que l'accumulation des déchets et la pollution générée par le progrès technique les avaient conduit à remettre en cause le modèle de développement des économies industrielles et à formuler la notion d'écosystème industriel : « *Ainsi dans un 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* » (1989, p. 106).

L'écosystème industriel pourrait fonctionner comme un écosystème biologique. Un écosystème biologique « *is biotic assemblage of plants, animals, and microbes, taken together with their physico-chemical environment* » (Kormondv, 1969, p. 7). Au sein d'un écosystème, des êtres différents (des producteurs, des consommateurs et des décomposeurs) ont des relations entre eux et avec le milieu minéral (cycles biochimiques). Les végétaux autotrophes assimilent, par photosynthèse ou chimiosynthèse, des éléments du monde minéral qui se trouvent ainsi intégrés sous une forme réduite dans des molécules organiques ; de l'énergie est investie dans ces composés. Les animaux et les végétaux hétérotrophes sont tributaires des précédents et constituent des chaînes trophiques où, de mangeur en mangé, on assiste à un transfert de matière et d'énergie dans le monde vivant. Ce sont ces interactions incessantes qui feront lentement évoluer l'écosystème jusqu'à ce qu'un équilibre

---

<sup>1</sup> De part ses relations avec le monde industriel et plus particulièrement l'industrie automobile (Tukker et Cohen [2004] ont analysé le concept d'écologie industrielle chez Ford), F.D Vivien (2006, p. 9) considère que l'écologie industrielle peut être porteuse « *d'un néo-taylorisme ou d'un néo-fordisme* ».

<sup>2</sup> L'écologie industrielle ne se limite pas au secteur automobile. Elle touche toute la communauté des ingénieurs. On peut ainsi citer l'ouvrage de Graedel et Allenby (1995), *Industrial Ecology*. L'un est « *membre distingué* » du staff technique, l'autre est vice-président de la recherche « *Technology and Environment* » de la société AT & T Bell Laboratories.

stable puisse être atteint entre les divers constituants (Odum, 1976). Pour réussir un tel pari, l'écosystème industriel devait passer par trois phases : « (1) *locating sources and sinks of potential materials for exchange or upgrading*; (2) *filtering feasible exchanges, the exchange candidates, and locations for new infrastructure*; and (3) *generating optimal configurations for the industrial ecosystem based on the objective of maximizing the system benefit, defined in the particular case study as the revenue that is generated by the system* » (Ozyurt et Realff, 1998, p. 13)

Si un système industriel peut fonctionner comme un écosystème biologique, il ne faut pas prendre cette analogie « *au pied de la lettre* ». Frosch et Gallopoulos (1989, p. 106) ont ainsi souligné que « *l'on ne parviendra jamais à établir un écosystème industriel parfait*<sup>3</sup> ». En effet, Ayres (1995) rappelle qu'il existe des différences importantes entre les organismes biologiques et les unités élémentaires du système industriel, en l'occurrence les entreprises. Si les organismes biologiques sont capables de se reproduire, les firmes ne produisent que des produits ou des services, elles ne peuvent pas produire d'autres entreprises. Par ailleurs, contrairement aux organismes vivants qui évoluent selon un processus temporel long et lent, les entreprises peuvent modifier rapidement leur activité ou/et leurs produits. De son côté, Levine (2003, p. 33) note une différence fondamentale entre le système biologique et le système industriel : « *Products, that is, goods and services exchanged for something of value, are characteristic of industrial systems, but relatively rare in the ecological system* ».

Ainsi pour reprendre les termes de Suren Erkman (1998, p. 9), 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 systèmes biologiques* ». Il est ainsi possible d'explorer le champ de l'écologie industrielle en s'appuyant sur les connaissances propres à l'évolution de la vie sur Terre. Braden Allenby (1994) a proposé une terminologie renvoyant à la présence d'écosystèmes de type I, II et III. L'écosystème de type I s'appuie sur un processus linéaire dans lequel les matières premières et les déchets sont illimités. Il n'y a aucune activité de recyclage. Les produits industriels sont utilisés de façon frivole, puis rejetés dans l'environnement. Dans l'écosystème de type II, les organismes vivants sont interdépendants et forment des réseaux d'interactions complexes. Cet écosystème est plus efficace que celui du type I, cependant il n'est pas viable à long terme : la diminution des ressources (matières premières) contraste avec l'augmentation inexorable des déchets (Jelinski et alii, 1992). L'écosystème de type III a évolué jusqu'à fonctionner de manière entièrement cyclique. Seule l'énergie solaire constitue un intrant. La société industrielle « *devrait s'approcher autant que possible d'un écosystème de type III* » (Erkman, 1998, p. 36).

---

<sup>3</sup> Dans un écosystème parfait, le seul input est l'énergie solaire. Toutes les autres matières sont recyclées biologiquement dans le sens où les déchets de chaque espèce sont la nourriture d'une autre espèce.

## B. L'écologie industrielle, une approche scientifique

L'écologie industrielle fait appel en priorité à l'écologie scientifique, aux sciences naturelles (le monde biophysique) et aux sciences de l'ingénieur (Schulze, 1996)<sup>4</sup>, ce qui ne l'empêche pas de chercher à mobiliser toutes les sciences.

Par écologie scientifique, Suren Erkman (1998, p. 10) entend opposer la démarche du chercheur à la contestation politique : « *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 symétrie inverse, l'optimisme technologique à outrance* ». L'écologie serait devenue une véritable science suite à la progression de la thermodynamique<sup>5</sup> des phénomènes irréversibles de Prigogine (1968), à l'évocation de lois<sup>6</sup> « scientifiquement » vérifiées par Kenneth Watt (1973) et à la présentation d'une typologie<sup>7</sup> des écosystèmes par Eugène Odum (1983).

L'écologie industrielle renvoie à la notion d'écosystème humain - c'est-à-dire à un écosystème où le rôle de l'homme est dominant – cependant ce dernier n'échappe pas aux lois énergétiques du monde physique. La thermodynamique nous enseigne que, dans le processus de production, la quantité d'énergie est conservée (premier principe de la thermodynamique), mais sa forme, - et donc sa disponibilité - a changé. De l'énergie libre (ou énergie utilisable) s'est transformée en énergie liée (ou énergie inutilisable). Il s'agit du deuxième principe de la thermodynamique, principe dit de Carnot-Clausius, encore appelé loi d'entropie. Pour le dire autrement, le processus économique serait nécessairement entropique<sup>8</sup>, transformant de l'énergie (basse entropie) en déchets et rejets (haute entropie). Entendant pourfendre les références analytiques à la mécanique qui sont monnaie courante en économie, Georgescu-Roegen (1971) a beaucoup fait pour la reconnaissance de la loi d'entropie. Cela l'a amené à intervenir directement dans les controverses scientifiques qui entourent cette loi. Alors que celle-ci concerne habituellement l'énergie, Georgescu-Roegen (1978, p. 361) a étendu cette loi à la matière, édictant ainsi une quatrième loi de la thermodynamique qui stipule que « *dans un système clos, l'entropie de la matière tend continuellement vers un maximum* ». L'entropie serait donc une loi à laquelle on ne

---

<sup>4</sup> Tilley (2003) distingue deux disciplines qu'il nomme « *Industrial ecology* » et « *Ecological Engineering* ».

<sup>5</sup> Les deux principes de la thermodynamique (échange et transformation de l'énergie et de la matière) ont joué un rôle fondamental dans la construction de l'écologie.

<sup>6</sup> Les écosystèmes sont soumis à 40 principes. Le principe 0 correspond à une description, une analyse et une gestion possible des écosystèmes en fonction des paramètres ressources (dans une vision classique, le fonctionnement est assuré par la matière, l'énergie, l'espace, le temps, la diversité). Les principes I et II sont rattachés aux deux lois de la thermodynamique...

<sup>7</sup> Ce qui caractérise la typologie des écosystèmes d'Eugène Odum, c'est l'alternative entre l'énergie solaire et l'énergie d'origine humaine. On distingue les écosystèmes naturels « non subventionnés » alimentés par l'énergie solaire ; les écosystèmes alimentés par l'énergie solaire et « subventionnés » par d'autres écosystèmes ; les écosystèmes alimentés par l'énergie solaire mais subventionnés par l'homme (exemple des agro-écosystèmes) ; les écosystèmes urbano-industriels alimentés par les combustibles.

<sup>8</sup> Selon Nicholas Georgescu-Roegen ([1978], p 353), la thermodynamique devient un des éléments de la constitution de la valeur économique : « *la thermodynamique .../.../est au fond une physique de la valeur économique, c'est à dire une science qui étudie les qualités physiques qui confèrent en général à certaines choses une valeur pour l'homme* ».

peut échapper, d'où l'insistance de Georgescu-Roegen (1995) sur le caractère irrévocable de cette évolution<sup>9</sup>. Tous les êtres vivants luttent en effet contre l'entropie. La biologie souligne que l'homme - comme toutes les espèces naturelles - a toujours utilisé ses organes biologiques afin de puiser la basse entropie de l'environnement. De tels organes propres à chaque espèce vivante sont, selon la terminologie d'Alfred Lotka (1945, 1956), *les organes endosomatiques*. Mais progressivement, les êtres humains se sont distingués de la plupart des animaux en faisant appel à d'autres instruments qualifiés *d'exosomatiques*. Avec ces organes détachables, principalement des outils et des équipements techniques « énergétivores », l'espèce humaine serait parvenue à accomplir de nombreuses réalisations. Les organes exosomatiques seraient même devenus aussi vitaux que les organes endosomatiques (les hommes en sont largement dépendants). Dans ces conditions, le processus économique apparaît bien comme une extension de l'évolution endosomatique, en d'autres termes, comme la continuation de l'évolution biologique (Dannequin, Diemer, 1999a).

A ce stade de l'analyse, Nicholas Georgescu-Roegen (1971, 1986) considèrera que la seule voie pour l'humanité consiste à réorienter son développement exosomatique en intégrant les générations futures (Dannequin, Diemer, 1999b). La prise en compte des générations présentes et futures doit se traduire par la mise en place d'un *programme bioéconomique minimal* (NGR, 1975, 1978), symbolisant la montée des valeurs sociétales et de l'éthique (Dannequin, Diemer, 2004). Tous les espoirs sont ainsi contenus dans la fusion de l'économie et de l'écologie (c'est toutefois l'économie qui devra être absorbée par l'écologie) : « *L'un des principaux problèmes écologiques posé à l'humanité est celui des rapports entre la qualité de la vie d'une génération à l'autre et plus particulièrement celui de la répartition de la dot de l'humanité entre toutes les générations. La science économique ne peut même pas songer à traiter ce problème. Son objet, comme cela a souvent été expliqué, est l'administration des ressources rares; mais pour être plus exact, nous devrions ajouter que cette administration ne concerne qu'une seule génération* » (NGR, 1979, p. 95).

Les sciences de l'ingénieur précisent quant à elles que si le mot écosystème apparaît pour la première fois dans les travaux du botaniste A.G Tanley (1935), son émergence est due au succès de différentes théories : la cybernétique de Wiener (1948), la théorie de l'information de Shannon (1949), l'analyse systémique<sup>10</sup> de Forrester (1965)... L'art de l'ingénieur consiste « *to produce a solution that works in the real world, with all the constraints that task entails. Such constraints may be competitive, ergonomic, regulatory, economic and temporal* » (Allenby, Allen, Davidson, 2007, p. 8). Il s'agit de résoudre des problèmes environnementaux en mettant en place des procédés industriels optimisés : la transformation des dérivés du pétrole en matériaux polymères, la transformation du minerai de fer en acier, le raffinage des métaux de la famille du platine (Frosch, Gallopoulos, 1989). Depuis quelques années, la réponse des ingénieurs aux défis environnementaux a pris le nom d'éco-efficience et d'éco-technologie<sup>11</sup>. Cette dernière recouvre à la fois « *les techniques intégrées qui*

---

<sup>9</sup> « La loi de l'entropie est la racine de la rareté économique. Si cette loi n'existait pas, nous pourrions réutiliser l'énergie d'un morceau de charbon à volonté, en le transformant en chaleur, cette chaleur en travail, et ce travail à nouveau en chaleur » (NGR, 1995, p 51).

<sup>10</sup> Le rapport « Halte à la croissance » (1973) s'appuiera sur l'approche systémique.

<sup>11</sup> Aux Etats-Unis, l'écologie industrielle et l'écotechnologie font désormais partie du prestigieux MIT.

évitent la formation de polluants durant les procédés de production, et les techniques en bout de chaîne qui réduisent les rejets dans l'environnement de toute substance polluante générée. Elle peut également englober les nouveaux matériaux, les procédés de fabrication économes en énergie et en ressources, ainsi que le savoir faire écologique et les nouvelles méthodes de travail » (COM, 2002, p. 5). La contribution de l'éco-technologie au développement durable s'appuie aujourd'hui sur les éco-industries. Selon l'OCDE et Eurostat (1999), les éco-industries concernent « toutes les activités qui produisent des biens et services visant à mesurer, prévenir, limiter ou corriger les atteintes à l'environnement touchant l'eau, l'air ou le sol, et les problèmes en rapport avec les déchets, le bruit et les écosystèmes ». Elles englobent plus précisément trois catégories d'activités : la gestion de la pollution de nature préventive et curative ; les techniques intégrées et les produits peu polluants (c'est-à-dire les activités qui améliorent, réduisent ou éliminent de façon continue les incidences des techniques sur l'environnement) ; la gestion des ressources (notamment les énergies renouvelables telles que l'éolien, le solaire et la biomasse).

Les tenants de l'écologie industrielle insistent aujourd'hui sur le fait que cette dernière doit être capable de mobiliser toutes les disciplines, telles que les sciences économiques, juridiques et sociales. Boons et Roome (2000) insistent sur le fait que l'écologie industrielle étant devenue un phénomène culturel, elle ne peut plus se contenter d'un discours scientifique (l'objectivité du chercheur et de l'ingénieur), elle doit prendre des positions normatives. Ils proposent ainsi « *an agenda of research on the cultural and ideological aspects of industrial ecology* » (2000, p. 49). De son côté, Isenmann (2002) part du principe que l'écologie industrielle est une philosophie qui prend la nature comme modèle. Il conclut que « *a set of arguments drawing on the philosophy of science and on Kantian epistemology and philosophical anthropology is provided to gain greater conceptual clarity and to contribute to laying a solid foundation for industrial ecology's stimulating role in achieving sustainability at large* » (2002, p. 27). Enfin, Wells et Orsato (2005) avancent qu'en dépit de ses fondations scientifiques, l'écologie industrielle peine encore à cerner les conditions sociales, environnementales et économiques du développement durable. Un moyen d'enrichir le concept d'écologie industrielle consisterait à se tourner vers les sciences de gestion (la logique de réseaux et la mise en place d'une supply chain posent la question des liens, des relations, des mécanismes de coordination et de la compétitivité<sup>12</sup>) ; les sciences économiques<sup>13</sup> (les économies d'échelle et la localisation redéfinissent les termes de la concurrence) et les sciences sociales. Wells et Orsato (2005, p. 16) insistent notamment sur le concept de champ organisationnel - « *Organizational field*<sup>14</sup> » - contexte dans lequel les organisations sont socialement imbriquées (l'encastrement de Granovetter, 2000).

---

<sup>12</sup> Esty et Porter considèrent que « *the systems perspective that industrial ecology promotes can help companies find ways to add value or reduce costs both within their own production processes and up and down the supply chain* » (1998, p. 35). L'écologie industrielle propose ainsi une approche collective et systémique qui va à l'encontre des schémas traditionnels (agents économiques individualistes, logique concurrentielle).

<sup>13</sup> Andrew (2000) cherche à construire les fondements micro de l'écologie industrielle.

<sup>14</sup> DiMaggio et Powell définissent le champ organisationnel « *as a recognized area of institutional life : key suppliers, resource and product consumers, regulatory agencies, and other organisations that produce similar services and products* » (1983, p. 148).

### C. Le métabolisme industriel, une quantification des flux

Si l'écologie industrielle cherche à s'approcher le plus possible d'un écosystème « viable » à long terme, il devient nécessaire de cerner quantitativement et qualitativement la dimension physique des activités économiques, à savoir les flux et les stocks de matières inhérents à toute activité industrielle (Daniels<sup>15</sup>, 2001, 2002). Cette démarche renvoie à une approche apparue à la fin des années 80 : l'étude du métabolisme industriel (Ayres, 1989). Le concept de « métabolisme » s'applique généralement à une plante ou un animal<sup>16</sup>. Ayres et Simonis (1995, p. 1) le définissent comme *“the totality of internal processes - both physical and chemical - that supply the energy and nutrients required by an organism as the conditions of life itself”*. Ces processus peuvent être décrits en termes de transformations d'inputs (énergie solaire, énergie chimique, eau, air) en biomasse (la substance de l'organisme vivant) et en déchets. Par analogie, le métabolisme industriel<sup>17</sup> est *« l'étude des ensembles 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 liées aux activités humaines, depuis l'extraction et la production des ressources jusqu'à leur retour inévitable, tôt ou tard, dans les processus biogéochimiques »* (Erkman, 1998, p. 10). En d'autres termes, c'est tout simplement l'ensemble des transformations physico-chimiques qui permettent de passer des matières premières (biomasse, minéraux, métaux, pétrole) aux biens manufacturés et aux déchets (Lynd, Wang, 2004). Les économistes parlent de processus de production. La transformation des biens en services introduit cependant un second terme économique, la consommation. De là, le métabolisme industriel comprend tous les flux de matière et d'énergie qui permettent au système économique de fonctionner, c'est-à-dire de produire et de consommer (Hertwich, 2005).

Vu sous cet angle, le système économique humain occuperait une place à part à l'intérieur du système naturel de la Terre. L'anthroposphère est seulement une partie de la biosphère, elle-même en équilibre dynamique avec le soleil, l'air (l'atmosphère), les océans (l'hydrosphère) et la croûte terrestre (lithosphère). Durant l'ère préindustrielle, l'anthroposphère était plus ou moins en équilibre avec la biosphère et les autres éléments du système terrestre (Husar, 1995). Les humains faisaient partie d'un écosystème naturel, les animaux étaient chassés pour la nourriture et leur peau. Les déchets étaient recyclés par un processus naturel. Même les minerais et les métaux utilisés pour confectionner des armes, des outils ou des pièces, ont été recyclés pendant des millénaires. La révolution industrielle du XVIII<sup>e</sup> siècle et l'arrivée des machines à vapeur auraient changé radicalement cette situation.

---

<sup>15</sup> Daniels (2001, 2002) a comparé les dimensions physiques de neuf systèmes économiques afin de quantifier les flux et les stocks de matière associés à l'activité humaine.

<sup>16</sup> Fischer-Kowalski, Hüttler (1998, p. 107) ont proposé une classification du métabolisme en retenant trois niveaux : le modèle de référence (écosystème biologique, écosystème socio-économique), le niveau du système (global, national, régional, fonctionnel, temporel) et les types de flux (matières, énergies, substances).

<sup>17</sup> Moll, Norman, Kok et alii (2005) ont analysé le concept de « *Household metabolism* » en l'introduisant dans des modèles de consommation. L'analyse des différents types de ménages (citadins européens), à partir des besoins (directs et indirects) d'énergie, permettrait de définir un modèle de consommation plus 'soutenable'.



L'exploitation intensive des énergies fossiles et la non prise en compte des contraintes environnementales seraient devenus les moteurs de l'évolution des sociétés humaines. Ayres (1995) précise qu'il existe trois niveaux d'abstraction du concept de métabolisme industriel. A un premier niveau, le métabolisme industriel est un ensemble de processus physiques qui transforment les matières premières et l'énergie, plus le travail en produits finis et en déchets. L'offre n'est pas autorégulée. Le contrôle du système est réalisé par la composante humaine. Elle peut exercer un contrôle direct (à travers l'input travail, facteur de production) ou indirect (en tant que consommateur d'output). Le système économique est ainsi stabilisé, au moins dans une structure de marché concurrentielle et décentralisée, lorsque l'offre et la demande de produits (et de travail) sont égalisées selon un mécanisme de prix. De là, le système économique est, par essence, un « *metabolic regulatory mechanism* » (Ayres, 1995, p. 6). A un second niveau, le concept de « métabolisme industriel » renvoie à l'unité élémentaire de l'organisation industrielle, la firme ou l'entreprise manufacturière. Cette dernière est ainsi présentée comme l'unité standard dans la théorie économique. Dès lors, un système économique est « *a collection of firms, together with regulatory institutions and worker-consumers, using a common currency and governed by a common political structure* » (ibid.). Enfin, à un troisième niveau, le métabolisme industriel focalise son attention sur le cycle de vie des matières et des produits. Or, si la nature est caractérisée par les cycles fermés du carbone, de l'oxygène et de l'hydrogène (Ayres et alii, 1996) dans lesquels les processus biologiques jouent un rôle majeur, les firmes font partie d'un système industriel ouvert qui transforme des matières premières et de l'énergie fossile en produits finis et en déchets (Ayres, 1999).

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 » (Erkman, 1998, p. 56). Au sein même des entreprises, cette comptabilisation est réalisée sous la forme d'une matrice input-output (Leontief, 1936) et d'une analyse de cycle de vie. Ces « bilans environnementaux » permettent de contrôler les échanges, de connaître le niveau auquel ils se produisent, de savoir comment ils se structurent et comment ils déstructurent l'environnement (Esquissaud, 1990). Même si la difficulté de l'étude réside dans la diversité des modalités d'émission des rejets (illustration des pratiques agricoles, Moolenaar, 1998, 1999) et la prise en compte des effets de synergie (interactions entre diverses sources de pollution), les bilans environnementaux peuvent s'appuyer sur trois rubriques (Vigneron, 1990, p. 18) : (1) une forme descriptive de l'activité industrielle incluant les procédés de fabrication et leurs caractéristiques ; (2) une quantification à l'aide d'un inventaire des éléments non monétaires (quantités d'effluents émises, nuisances dans l'air, le sol et l'eau...) et des éléments monétaires (flux de matières premières, quantités produites, investissements, patrimoine bâti et non bâti de l'entreprise...) ; (3) à partir de ces données, une analyse des contraintes législatives, techniques, financières, économiques et commerciales qui expliquent l'attitude de l'entreprise face à la

question de l'environnement. Si un nombre suffisant d'entreprises<sup>18</sup> s'attachent à publier un tel bilan, il sera alors possible d'établir un diagnostic précis de l'état de l'environnement et de surveiller, quantitativement et qualitativement, un élément dont la dégradation est difficilement réversible (Haberl, 2001).

Le métabolisme industriel pourrait ainsi devenir un outil indispensable pour les responsables politiques, administratifs et économiques, concernés par une gestion optimale des ressources et du territoire, et la planification d'un « *développement socio-économique viable* » (Erkman, 1998, p. 78). Il permettrait non seulement d'optimiser les ressources existantes mais également de détecter des ressources sous utilisées (ou non utilisées) pouvant générer de nouvelles activités. Dans cette perspective, l'écologie industrielle peut se définir comme « *une approche intégrée d'analyse et de réduction des flux de matière et d'énergie visant à améliorer l'éco-efficience des métabolismes industriels par la promotion de technologies, de valeurs et de pratiques destinées à assurer la protection, la durabilité ainsi que le renouvellement des ressources nécessaires au développement* » (Boiral, Croteau, 2001, p. 17).

## 2/ L'innovation au cœur du développement durable

En redonnant un contenu opérationnel à la notion de développement durable, les tenants de l'écologie industrielle ont initié une nouvelle pratique, celle du management environnemental. L'écologie industrielle doit relever un quadruple défi : valoriser les déchets (passer des bads aux goods) ; boucler les cycles en minimisant les rejets ; dématérialiser les produits (accroître la productivité des ressources) et procéder à la décarbonisation de l'énergie (évolution vers un système industriel moins gourmand en énergie fossile). C'est dans ce nouveau contexte que les sciences de l'ingénieur sont mobilisées. La technologie doit non plus libérer les hommes des lois de la nature (logique de l'émancipation et de la croissance infinie) mais faire en sorte que ces derniers continuent à améliorer leur bien être dans le strict respect de ces lois. Ce système d'équations à plusieurs inconnues soulève plusieurs interrogations :

- L'écologie industrielle (Frosch, Gallopoulos [1989], Erkman [1998]) recommande aux industriels de procéder à un ensemble d'opérations de rationalisation de la production (optimisation des consommations énergétiques et matérielles, minimisation des déchets à la source, réutilisation des rejets pour servir de matières premières à d'autres processus de production). Si le recyclage des déchets est un point de passage incontournable, il ne peut constituer une fin en soi. Le développement durable doit passer désormais par une valorisation collective et coordonnées des déchets (valeur d'échange, valeur d'utilisation...). La symbiose industrielle de Kalundborg et le développement des parcs éco-industriels nous incitent à penser le développement durable dans le cadre de l'innovation organisationnelle.

- Si la technologie doit être mise au service des générations futures, il convient de dissocier le mythe de la véritable révolution environnementale. La dématérialisation du capitalisme, suggérée par les NTIC, illustre un tel dilemme. Les économies tant

---

<sup>18</sup> En France, c'est la *Loi sur les Nouvelles Régulations Economiques* (LNRE) de 2001 qui impose aux entreprises de publier un bilan annuellement environnemental (1<sup>ère</sup> publication intervenue en 2006).

attendues des innovations technologiques ont souvent été annihilées par les effets rebond de ces mêmes innovations (exemple de la consommation de papier suite à l'utilisation des ordinateurs). La croissance verte pourrait être ainsi un faux ami, une manière de stimuler la croissance économique et l'emploi, sans remettre en cause notre vision de la vie en société.

- Frosch et Gallopoulos (1989, p. 114) ont rappelé par deux fois qu'un écosystème industriel efficace ne s'établira que « *si les réformes de la production s'accompagnent de modifications des habitudes de consommation et des traitements des produits consommés (exemple du tri des ordures bien présent dans des pays comme le Japon, la Suède et la Suisse)* ». 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 (Tukker, Cohen et alii, 2006, insistent sur la notion de « *sustainable consumption* »). L'écologie industrielle entend s'employer à cette tâche et trouver « *des principes et des modèles applicables à la gestion des entreprises et aux processus de production en s'inspirant de l'étude des écosystèmes* » (Vivien, 2002, p. 5). L'innovation doit être pensée en termes de production et de consommation.

### **A. Du traitement des bads à la symbiose industrielle de Kalundborg**

Depuis quelques années, le traitement et le recyclage des déchets constituent un enjeu important. Il s'agit à la fois d'économiser de la matière première (et donc de préserver des ressources naturelles) et de réduire le volume de nos rejets (poubelles ménagères, déchetteries...). L'Union européenne s'est saisie de ce dossier dans le milieu des années 90. La stratégie communautaire pour la gestion des déchets (30/07/1996) insiste à la fois sur la responsabilité du producteur (Gillet, 2002) et la nécessité de couvrir l'ensemble du cycle de vie des produits. Les principes 24, 25 et 26 précisent que :

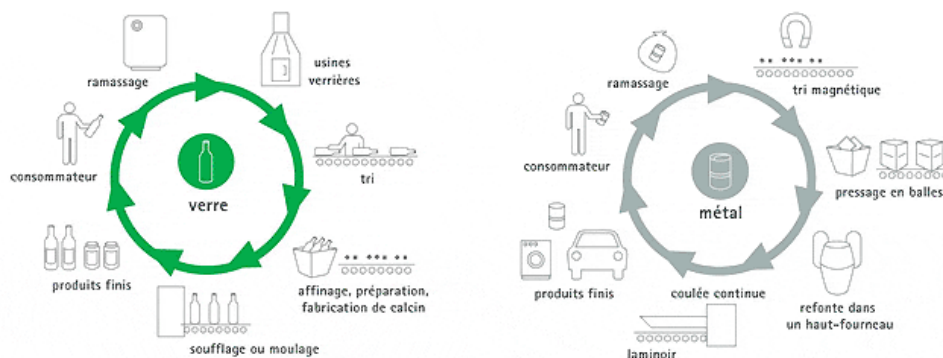
24. Une politique préventive visant à éviter la production des déchets doit commencer par le produit et son procédé de fabrication. La problématique de la gestion des déchets doit être pleinement prise en compte dès le stade du développement ou de la conception du produit. Pour qu'une action soit efficace, il faut qu'elle porte sur l'ensemble du cycle de vie du produit, de la production à l'élimination finale, en passant par la collecte, la réutilisation et le recyclage.

25. Par le passé, les coûts et la responsabilité des produits une fois qu'ils étaient devenus des déchets étaient traditionnellement supportés soit par l'environnement, soit par le contribuable. Or, cette approche n'est pas compatible avec les principes établis par l'article 130R du traité CE, et notamment les principes de précaution et d'action préventive, le principe pollueur-payeur et le principe de la correction, par priorité à la source, des atteintes à l'environnement.

26. Ces principes essentiels doivent permettre de couvrir l'ensemble du cycle de vie des substances, composants et produits, de leur production à leur mise au rebut et pendant toute leur durée de vie utile. Cet objectif ne peut être atteint que si la responsabilité incombe aux acteurs économiques qui peuvent apporter la plus grande contribution à la protection, à la sauvegarde et à l'amélioration de la qualité de l'environnement.

Les pressions croissantes des autorités européennes et nationales mais également des associations ont amené les entreprises à privilégier des politiques d'optimisation de l'utilisation des ressources naturelles en circuit fermé. Tel un écosystème naturel, la société humaine cherche à recycler les déchets ou à donner une seconde vie aux

produits finis. Dans le cas de l'aluminium<sup>19</sup> (les emballages ménagers en aluminium sont estimés en France à 45 000 tonnes par an), le recyclage permet d'économiser les ressources naturelles et jusqu'à 95% de l'énergie nécessaire à la production d'aluminium brut. Comme le verre, ce matériau conserve sa valeur après usage. Il peut être recyclé à l'infini.



Ainsi, en plus de réduire la production de déchets, l'utilisation de matières premières résiduelles comme intrants dans les procédés industriels constitue une source significative d'avantages comparatifs (Esty, Porter, 1998). Cette logique d'écologie industrielle s'appuie cependant sur un double processus : *une innovation technologique* (le tri par machine à courants de Foucault<sup>20</sup> ou par détecteur-éjecteur<sup>21</sup> permet de conditionner l'aluminium par balles et de l'envoyer ensuite dans les usines de recyclage où il sera broyé, puis fondu) et *une innovation organisationnelle* (on entend par là, la mobilisation d'un certain savoir, de compétences ; la mise en place d'une démarche collective visant à maximiser l'usage des matières résiduelles...). En effet, l'innovation ne se limite pas à un simple défi technologique (logique de création – destruction), elle doit être replacée dans des conditions concrètes d'application. Le défi organisationnel, souvent ignoré, soulève la question de la mise en œuvre des innovations (qu'elles soient majeures ou incrémentales) : « Les connaissances et les changements qui ont permis à une entreprise... de diminuer les pertes et le gaspillage associés aux déchets ne sauraient se réduire à des mesures d'ingénierie environnementale placées sous la seule responsabilité de services techniques. L'ampleur des changements réalisés montre, au contraire, le développement d'une véritable logique

<sup>19</sup> L'aluminium est présent dans un grand nombre de produits : boîtes de conserves, emballages de café, gâteaux et chocolat, barquettes de surgelés, aérosols, cosmétiques. Il a une position stratégique dans les industries aéronautiques (fusée Ariane, Airbus...), automobiles, ferroviaires....

<sup>20</sup> Il s'agit d'une roue polarisée qui tourne à 2600tr/mn, à côté du tapis sur lequel circulent les déchets. La roue polaire composée en périphérie de pôles d'aimant nord et sud alternés, crée par sa rotation un champ magnétique alternatif. Ce champ magnétique alternatif induit un courant alternatif dans les emballages aluminium passant à proximité. L'opposition de phase entre le champ magnétique alternatif de la roue polaire et le champ magnétique résultant du courant alternatif induit dans l'aluminium provoque l'éjection des nodules d'aluminium. Selon leur poids, les déchets d'aluminium sont éjectés à l'horizontale (c'est le cas des bricks de lait qui comportent une feuille d'aluminium) ou selon une parabole (les boîtes de boisson). Ils tombent dans des bacs distincts pour être recyclés de manière différente.

<sup>21</sup> Ce capteur se présente sous la forme d'un tiroir placé sous la bande de convoyage. Dans ce tiroir est placée une matrice magnétique permettant de localiser un ou plusieurs objets, grâce à une électronique performante et un calculateur ultra rapide qui permet de faire face à des flux très élevés. Dans le cas de l'aluminium, ce capteur est capable de spécifier s'il s'agit d'un produit rigide ou semi-rigide (boîte de conserve, barquette, aérosol...) ou d'un produit souple (briques de lait...)

*d'apprentissage s'articulant autour d'une redéfinition des compétences-clés, de l'entreprise et reposant sur une large participation des employés* » (Boiral, Kabongo, 2004, p. 176).

Les tenants de l'écologie industrielle l'ont bien compris, ils ont rapidement placé l'innovation organisationnelle au centre de leur approche, fascinés qu'ils étaient, par la symbiose de Kalundborg (Lifset, 2006, p. 6). La symbiose de Kalundborg illustre la nécessaire interdépendance entre plusieurs processus de production de différentes firmes et le bouclage des flux de matière et d'énergie à mettre en œuvre à l'intérieur d'une zone d'activité industrielle (Vivien, 2002). Chertow (2004, p. 2) en donne une définition<sup>22</sup> explicite : « *Industrial symbiosis engages traditionally separate industries in a collective approach to competitive advantage involving physical exchanges of materials, energy, water, and/or by products. The keys to industrial symbiosis are collaboration and the synergistic possibilities offered by geographic proximity* ».

La symbiose industrielle de Kalundborg comprend six partenaires industriels et un acteur public, distants les uns des autres de quelques centaines de mètres seulement, et reliés entre eux par un réseau de pipelines ad hoc (Christensen, 2006). La Centrale électrique Asnaes est la plus puissante du Danemark. D'une capacité de 1500 MW, elle est alimentée au mazout puis au charbon (après le 1<sup>er</sup> choc pétrolier). Elle emploie près de 250 personnes. Statoil est la plus grande raffinerie de pétrole du Danemark. Elle a une capacité supérieure à trois millions de tonnes de pétrole par an et emploie 350 salariés. Novo Nordisk est la plus grande société danoise de biotechnologies, l'un des principaux producteurs d'enzymes industriels et d'insuline. Elle emploie près de 3500 personnes. Gyproc est une société suédoise dont l'usine de Kalundborg produit des panneaux de construction en gypse (14 millions de m<sup>2</sup> par an). Elle emploie 165 personnes. Soilrem est une usine de retraitement des sols pollués par les métaux lourds et les hydrocarbures. Elle emploie 65 personnes. Noveren est la propriété de 9 municipalités. Elle traite près de 126 000 tonnes/an de déchets. Enfin, la Municipalité de Kalundborg est un acteur public qui participe activement au projet industriel. Le fonctionnement de l'écosystème Kalundborg peut être présenté de la manière suivante (Nahapétian, 2002 ; Christensen, 2006 ; Diemer, Labrune, 2007). L'eau, sous forme liquide ou de vapeur, constitue le déchet valorisé de la manière la plus systématique (Keckler, Allen (1998). Elle provient soit directement du lac Tisso, distant d'une quinzaine de kilomètres, soit du réseau de la municipalité de Kalundborg. La raffinerie de Statoil fournit de l'eau usée pour refroidir la centrale électrique Anaesvaerket. Cette dernière vend de la vapeur à la raffinerie Statoil, à Novo Nordisk (pour ses tours de fermentation), à Gyproc ainsi qu'à la municipalité de Kalundborg pour son réseau de chauffage urbain à distance. La centrale électrique vend même de l'eau chaude à une ferme d'aquaculture qui élève des turbots.

La symbiose de Kalundborg a permis de tirer les trois enseignements suivants. Il s'agit avant tout d'un processus spontané, qui s'est progressivement (de 1961 à 2007) mis en place sur des bases commerciales qui satisfont toutes les entreprises. Suren Erkman note que « *les échanges obéissent aux lois du marché* », 1998, p. 26). Chaque livraison de « déchets » entre les partenaires fait l'objet d'une négociation séparée et

---

<sup>22</sup> Christensen (2006, p. 2) parle de « *Collaboration between different industries for mutual economic and environmental Benefit* ».

confidentielle. La symbiose industrielle de Kalundborg apparaît sous la forme d'un « *réseau environnemental* » de plus de 20 accords commerciaux bilatéraux entre 6 firmes et une municipalité. Trois types de projets ont vu le jour : le recyclage de l'eau (12 projets), l'échange d'énergie (6 projets) et le retraitement des déchets (7 projets). Depuis 1996, le « *Symbiosis Institute* » constitue la mémoire vivante de cette réussite industrielle.

Ensuite, le succès du système repose sur une bonne communication entre les partenaires : « *Communication is more important than technology* » (Christensen, 2006, p. 48). Trois facteurs sont ici essentiels : la confiance mutuelle « *Participants must fit, but be different* », la proximité géographique « *There has to be a short physical distance between the participants* », le style de management (partage de certaines valeurs), « *There has to be a short mental distance between the participants* » (ibid).

Enfin, pour devenir opérationnel, ce système doit être intégré dans l'organisation structurelle des entreprises. Dans le domaine du management, l'écologie industrielle entraîne des conséquences majeures. D'une part, elle remet en cause la focalisation de l'entreprise sur le produit. En effet, il s'agit de donner autant d'importance à la valorisation des déchets. D'autre part, les entreprises doivent établir une sorte de Management « *over the fence* », c'est-à-dire une chaîne collaborative pour assurer une gestion optimale des ressources. Le fait d'optimiser tous les flux de matière et d'énergie mobilisés par les entreprises (de la matière première jusqu'au produit fini) se traduit « *tôt ou tard par une performance et une compétitivité accrue* » (Erkman (1998, p. 33). Pour améliorer l'efficacité d'un tel système, il sera cependant nécessaire de favoriser certains panachages industriels (ceci renvoie aux *biocénoses industrielles*) propices aux échanges de déchets et de ressources (Brings Jacobsen, Anderberg, 2004) et de mobiliser des savoirs (scientifiques, techniques, juridiques, commerciaux) destinés à repenser l'activité en fonction des possibilités de valorisation interne ou externe des résidus. Cet apprentissage organisationnel doit être compris en tant que processus d'acquisition, de production et de diffusion des connaissances (d'où l'importance des apports transversaux et interdisciplinaires<sup>23</sup>) permettant à une organisation de s'adapter collectivement aux changements de son environnement et de mettre en place de nouvelles pratiques.

A la suite du succès de Kalundborg, de nombreux travaux (Cherow, 2007, Zhu and ali, 2007, Beers et alii, 2007) ont cherché à cerner la nature et les caractéristiques de la symbiose afin de la reproduire<sup>24</sup> ailleurs. Une série d'initiatives et de projets ont vu le jour (Diemer, Labrune, 2007). Le concept de « *parc éco-industriel* » a été conçu dans les années 90. Il s'agit d'une zone dans laquelle les entreprises coopèrent pour

---

<sup>23</sup> Il s'agit de maîtriser à la fois les procédés technologiques (expérimentation de nouveaux procédés), la variabilité des flux de matières résiduelles (la non standardisation des entrants nécessite une adaptation continue), les ajustements en matière de gestion des ressources humaines (efforts en matière de formation, programmes individualisés), des enjeux environnementaux (gestion et réglementation des déchets), des enjeux commerciaux (valorisation des déchets...), des enjeux juridiques (la mise en place d'une chaîne collaborative peut faire apparaître des ententes, ne respectant pas le principe de concurrence).

<sup>24</sup> Chertow (2007, p. 13) a identifié ce que l'on pourrait appeler des pré-conditions à la symbiose (collaboration, effets de synergie offerts par la proximité géographique), il s'agit notamment de répertorier les externalités positives (partage d'une ressource ou d'une matière, solution technique...).

optimiser systématiquement l'usage des ressources et la valorisation des déchets (Chertow, 1999, Peck, 2001). L'échelle appropriée du parc dépend du contexte économique, politique et culturel du territoire (Brullot, 2006) mais également des effets de synergie (une entreprise, située à une grande distance du complexe industriel, peut être intégrée au parc, si elle est la seule à maîtriser une technologie ou à recycler un déchet dangereux). Suren Erkman (2004, p. 5) préfère parler de « *réseaux éco-industriels* » (dont les parcs représenteraient un cas particulier) toutefois on pourrait également rapprocher les parcs du concept de « *Districts industriels* », une forme d'organisation industrielle et territoriale, chère à Marshall (1919) et à Becattini (2003, 2004).

## **B. L'innovation et la dématérialisation**

Dans son ouvrage intitulé *Vers une écologie industrielle*, Suren Erkman (1998, p. 88) note que « *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* ». D'un point de vue pratique, le scénario de dématérialisation implique la mise en place de stratégies (industrielles mais aussi politiques) visant à réduire les flux de matières et d'énergie (Schandl, Turner, 2009).

Trois arguments sont ici mobilisés par les tenants de l'écologie industrielle (Dannequin, Diemer, 2009). (1) Il est possible, grâce à l'innovation et au progrès technique, d'utiliser proportionnellement moins de flux de matière et d'énergie, « *l'industrie des télécommunications offre un exemple spectaculaire de substitution technologique : 25 kg de fibre de verre suffisent pour fournir des services équivalents à une tonne de cuivre* » (erkman, 1998, p. 88). (2) Les années 90 ont vu l'émergence et la consolidation de stratégies proactives qui s'inscrivent dans une nouvelle économie de services, dite *économie de la fonctionnalité*. Les entreprises visent ainsi à privilégier la vente de l'usage des fonctionnalités associées à un bien plutôt que le bien lui-même (Rifkin, 2000 ; Lauriol, 2005). Dans cette perspective, elles sont amenées à optimiser l'utilisation des biens et services producteurs de richesses, en créant la valeur d'usage la plus élevée et la plus durable possible, tout en minimisant l'utilisation des ressources et d'énergie engagée dans cette production (logique de recyclage). (3) Le métabolisme industriel donne une cartographie de l'ensemble des composants biophysiques du système industriel. En pratique, il consiste à établir des bilans de masse décrivant le substrat matériel et immatériel de toute activité socio-économique et ses interactions avec l'environnement. L'analyse du cycle de vie des produits (*Life Cycle Analysis*) est généralement couplée avec celle du coût du cycle de vie (*Life Cycle Costing*), laquelle consiste à mesurer les coûts à chaque étape du cycle de vie d'un produit ou d'un service. Ainsi l'ingénieur aurait en sa possession un outil lui permettant de choisir la combinaison la plus efficiente (du point de vue technique, environnemental et économique).

Si la dématérialisation est présentée comme une solution viable en matière de développement durable, elle soulève dans le même temps, quelques interrogations, en particulier lorsqu'il s'agit d'évaluer les réels bénéfices de l'innovation.

La première interrogation renvoie au mythe de l'innovation sans limite. Le développement des activités humaines nous a longtemps laissé croire que la solution résidait dans l'amélioration des techniques. Or celles-ci se réduisent souvent à un gain de productivité, elles ne répondent pas à la question de la croissance « exponentielle » de la consommation des ressources naturelles. L'histoire économique (notamment les différentes révolutions industrielles) tend à montrer que tous les grands bonds du progrès technologique ont été déclenchés par la découverte et la maîtrise d'une nouvelle source d'énergie et que les innovations ont été suivies d'un accroissement substantiel de la consommation de cette énergie. Heimz Schandl et Graham Turner (2009, p. 865) notent à ce sujet que « *Historical research has shown that for many industrial economies, carbon intensity has been continuously decreasing for more than a century... At the same time, overall carbon emissions have grown exponentially* ». Le phénomène plus connu sous le nom « d'effet rebond » ou de « paradoxe de Jevons » (Schipper, 2000 ; Huesemann, 2003), rappelle ainsi que toutes les innovations technologiques entraînent une augmentation de la consommation globale. Ainsi, les gains potentiels dus aux perfectionnements techniques seraient plus que compensés par l'accroissement des quantités consommées. Dans le secteur informatique, « *les ordinateurs étaient censés reléguer le papier au rang de curiosité historique...c'est exactement l'inverse qui s'est produit : aux Etats-Unis, la consommation annuelle de papier à écrire et à imprimer est passée de 7 à 22 millions de tonnes entre 1956 et 1986* » (Erkman, 1998, p. 90). Ce constat est partagé par Dominique Bourg (2010, p. 1) qui rappelle que « *les ordinateurs consomment moins qu'il y a 10 ou 15 ans, mais le nombre d'utilisateurs a considérablement augmenté, et les appareils sont plus puissants ; leur usage s'est transformé et démultiplié. On s'attend ainsi à ce que la consommation d'électricité relative à l'informatique triple d'ici à 30 ans à l'échelle de la planète* ». La dématérialisation impliquerait donc une réflexion sur les moyens de rendre les services plus frugaux en matière et en énergie.

La deuxième interrogation concerne la place et l'ambivalence des services dans nos sociétés. Si la dématérialisation doit passer par une tertiairisation de l'économie, il convient de noter que l'économie des services pose d'importantes limites à la réduction des flux de matières et d'énergies. D'une part, il semblerait qu'elle ait adopté les mêmes logiques productivistes et les mêmes objectifs de performance que l'économie industrielle. Ce qui fait dire à Josée Landrieu (2007, p. 9) que « *l'économie des services a plutôt tendance à ignorer les attentes humaines, à s'émanciper du soubassement sociétal...pour s'aligner sur les logiques de marchés et de l'économie mondialisée* ». D'autre part, on constate que les NTIC, véritable incarnation technologique des services, sont plus gourmands en inputs et en intrants matériels qu'il n'y paraît. Une étude intitulée « *Computers and the Environment* », réalisée par Ruediger Kuehr et Eric Williams (2003) pour le compte de l'ONU, a révélé que les composants électroniques assemblés dans les ordinateurs étaient un danger avéré pour l'environnement. Ces chercheurs ont établi que pour produire un ordinateur de bureau avec un écran de 17 pouces, soit 24 kg de matière utilisée, il fallait l'équivalent de près de deux tonnes de ressources naturelles : soit 240 kg de combustible, 22 kg de produits chimiques et



près de 1,5 tonne d'eau claire<sup>25</sup>. La fabrication d'une puce mémoire de 32MB DRAM en silicium de 2 grammes, pièce qui permet de transformer l'information au sein de chaque ordinateur, nécessite 1,2 kg de matières fossiles, 72 grammes de produits chimiques et 32 litres d'eau pure. La quantité de matière et d'énergie nécessaire pour produire une puce est ainsi disproportionnée par rapport à la taille du produit (équivalent de 600 fois son poids). Par comparaison, les combustibles fossiles nécessaires à la production d'une automobile ne représentent qu'une à deux fois son poids (Grégoriades, 2007). Cette soif de matière et d'énergie<sup>26</sup> génère également des problèmes de toxicité (plomb dans les tubes cathodiques des écrans, cadmium pour les revêtements de protection, mercure et lithium dans les batteries, aluminium dans les disques durs...) et de recyclage des produits (plus de 150 millions d'ordinateurs sont aujourd'hui vendus dans le monde).

La troisième interrogation concerne l'articulation entre dématérialisation et durabilité. Il est en effet possible que la dématérialisation du produit s'accompagne d'une matérialisation de sa consommation. Ceci est notamment le cas lorsque l'on achète de plus en plus de biens fragiles et difficilement réparables dans l'espoir de faire des économies de matière et d'énergie. Il convient dès lors de penser les économies de flux à la fois en termes de production et de consommation. L'analyse du cycle de vie des produits (entrant – produit – recyclage) devrait être un paramètre important dans les futurs « business plan ».

### **C. La modification des modes de production et de consommation**

L'écologie industrielle en appelle à de profonds changements dans les modes de production et de consommation. Il s'agit d'initier un schéma de « *sustainable Production and Consumption* » (Tukker, Cohen, Hubacek, Mont, 2010). Les économies d'énergie et le recyclage figurent aujourd'hui au premier plan. Il faut néanmoins aller plus loin. Des changements radicaux doivent être introduits. Le modèle qui veut qu'une entreprise grossisse aussi vite que possible, pour tirer les fruits du système capitaliste (rentabilité à court terme) doit être remis en cause. Il convient de réinventer les conditions d'émergence et de mise en place de l'innovation (il faut ainsi analyser dans quelles conditions, elle peut être techniquement, socialement et économiquement viable). La mise en œuvre de nouveaux équipements et la mise au point de nouveaux produits (éco-innovation) doivent prendre en compte l'ensemble des valeurs sociétales dont la préservation de l'environnement fait partie.

Le réel challenge consiste à donner une certaine cohérence à un ensemble d'actions et de pratiques. L'éco-innovation doit engendrer des modèles de consommation de nouveaux produits et de services qui ont un faible impact sur l'environnement (Kaenzig, Wüstenhagen, 2009). L'éco-efficience doit initier un véritable déplacement sémantique, de la coopération et de la compétition vers de la coopétition, c'est-à-dire

---

<sup>25</sup> Précisons que ces calculs ne prennent pas en compte le bilan carbone lié aux différents transports de ces équipements (logique de délocalisation et d'externalisation) jusqu'au client final et la consommation électrique nécessaire pour les faire fonctionner.

<sup>26</sup> D'après le rapport « *Mobile Toxic Waste* » du Basel Action Network (BAN, 2007), les téléphones portables sont composés (en poids) en moyenne de 45% de plastiques (PVC, ABS enduit de bromure retardateur de flamme), 40% de circuits imprimés, 4% pour l'affichage à cristaux liquides, 3% de magnésium, 8% de métaux dispersés (cadmium, mercure...).

d'une réflexion linéaire (analyse du processus industriel et de sa rentabilité à court terme) vers des écosystèmes industriels (qui prennent en compte le cycle de vie du produit et le besoin du client). L'approche en termes de « supply chain », qui suppose que l'on étudie toutes les différentes étapes de la création de la valeur, doit internaliser les différents impacts des produits et des services en matière de cycle de vie. Les entreprises qui parviendront avec succès à capter l'attention du futur consommateur seront celles qui auront réussi à instaurer une nouvelle vision de la consommation, « *a sustainable consumption* ». Selon Randall Krantz (2010, p. 7), « *sustainability can serve as an innovation platform to reinvigorate the global economy, aligning improved living standards with less reliance on consumption of natural resources* ».

#### *Le cas Patagonia*

Le centre de distribution de Patagonia, construit à Réno dans le Nevada, réalise 60% d'économie d'énergie grâce à des réflecteurs de lumière solaire et des chauffages radiants (Molga, 2010). Tout a été réalisé en matériaux recyclés. Le siège social a été équipé de panneaux solaires qui fournissent 12% des besoins en électricité. Les 300 salariés y disposent d'une cantine bio, de vélos en libre-service, d'une crèche, d'une école maternelle et d'un bus scolaire qui ramène les enfants au parking pour limiter les trajets urbains. Chaque salarié peut prendre un congé rémunéré par Patagonia pour travailler bénévolement jusqu'à deux mois pour une association environnementale. L'entreprise offre une subvention de 2000\$ pour l'achat d'un véhicule hybride.

Sur les lignes de production, l'impact environnemental de tous les choix de matières est calculé. Les teintures qui utilisaient des sulfures et des métaux toxiques ont disparu des approvisionnements, deux tiers des produits contiennent désormais une fibre respectueuse de l'environnement. 45% de la gamme textile « été » contient des matières recyclées. Des produits tels que les sous-vêtements en polyester, les polaires, les tee-shirts en coton, les vestes de montagne... sont également recyclés. La chaîne de recyclage est aujourd'hui performante : le tissu des vêtements usagés est collecté dans les magasins, découpé, haché, puis réduit à l'état moléculaire et purifié pour constituer une nouvelle matière première à partir de laquelle Patagonia tisse de nouvelles fibres. Ce programme, baptisé Ecocircle concerne 65% de la gamme Automne – Hiver 2009. L'utilisation de fibres recyclées permet de réduire de 3/4 la facture énergétique et de 71% des émissions de CO<sup>2</sup>.

Côté consommateurs, l'entreprise essaie de jouer la transparence en fournissant les informations concernant l'empreinte écologique de ses vêtements sur un site dédié (Footprint Chronicles) : la provenance des matières premières (chanvre biologique importé de Chine mélangé avec du polyester recyclé, du coton biologique et de l'élasthanne, utilisation de la laine mérinos importée de Nouvelle Zélande, vêtements en laine sans chlore), leur parcours jusqu'à l'usine, les énergies dépensées, les déchets générés par la fabrication, l'eau consommée...

Enfin, après avoir mis en place un programme de subventions environnementales dès 1985, Patagonia a cofondé en 2001, le club 1% pour la planète, qui vise à convertir d'autres entreprises à la cause environnementale. Plus de 1200 sociétés ont adhéré à ce principe. Les sommes collectées sont reversées à plus d'un millier d'associations environnementales qui mènent des actions militantes sur le terrain (élevage et recolonisation des rivières allemandes en alevins de saumons, lutte contre les projets hollandais d'implantation de porcheries industrielles dans les PECOS, protection du parc de Sumava en République tchèque, lutte contre le braconnage de grands rapaces en Grande Bretagne, soutien à l'action du réseau Semences Paysannes en France qui regroupe une cinquantaine d'organisations dont l'objectif est de favoriser le développement de la biodiversité dans les exploitations agricoles.

Cette “consommation soutenable” implique que le consommateur agisse en citoyen, et non plus en tant que maximisateur d'utilité. Mais également que les industriels ne se limitent pas à la vente de « *green products*<sup>27</sup> ». Ils ont l'obligation d'amener les consommateurs à demander des biens ayant une valeur environnementale plutôt que des biens énergivores en matière et en énergie (il s'agit de réduire l'empreinte carbone). Il sera donc nécessaire de se focaliser sur le comportement et la structure des choix du consommateur. L'éducation au développement durable devient ainsi une question vive, à laquelle industriels<sup>28</sup>, politiques<sup>29</sup>, associations<sup>30</sup>... doivent apporter une réponse. Cette réponse passe forcément par un rééquilibrage des forces, les trois dimensions du triangle du développement durable (économie, environnement, social) doivent donner lieu à un égal traitement (Diemer, 2010). Les industriels qui initieront une telle démarche (analyse transdisciplinaire) seront capables d'apporter des solutions innovantes. Ils pourront, par la même occasion, fournir une information appropriée (sur ces trois dimensions) auprès de consommateurs qui aspirent à faire des « choix soutenables » (prix, qualité, origine, marque...). Sans ce sursaut collectif, l'espèce humaine risque de découvrir les méfaits de la « bulle environnementale » (Munasinghe, 2010).

## Conclusion

A la fin des années 80, l'écologie industrielle s'est construite autour d'un corpus théorique associant un idéal type (l'écosystème industriel), une approche scientifique transversale (les sciences de l'ingénieur, les sciences de la terre, les sciences sociales, économiques et juridiques) et l'étude de la dynamique des flux (métabolisme industriel). Par analogie, le système industriel est associé à un écosystème biologique dont les principaux objectifs sont la valorisation systématique des déchets (passage des bads aux goods), le bouclage des cycles en minimisant les déchets (mesure quantitative des flux, création de réseaux d'utilisation des ressources et des déchets), la dématérialisation des produits (accroissement de la productivité des ressources, optimisation de l'utilisation de la matière) et la décarbonisation de l'énergie

---

<sup>27</sup> Doreen Fedrigo et John Hontelez (2010, p. 11) s'interrogent sur la pertinence du concept « *green growth* » : « *Green growth is a term more often used now, especially in the framework of the various economic recovery and stimulus packages, although it is still unclear what precisely this phrase means* ».

<sup>28</sup> Ouvert en 1997 par HP et Noranda, le centre de recyclage informatique de Roseville en Californie, traite entre 3000 et 4000 tonnes de matériel par mois. Les ordinateurs, les serveurs et les imprimantes y sont broyés. La matière première (le plastique) ainsi obtenue, est revendue. HP a également mis en place un programme d'incitation au recyclage à destination des consommateurs : une collecte à domicile facturée de 13 à 34 dollars, en échange d'un coupon pour une réduction jusqu'à 50 dollars sur un achat de produit HP, et ce même si l'appareil recyclé porte le logo d'un autre fabricant.

<sup>29</sup> Aux Etats-Unis, l'Etat du Maine a voté en 2005 une loi obligeant les fabricants informatiques à prendre financièrement en charge le recyclage de leur produit. Il fut suivi par l'Etat de Washington en 2006. L'Etat de Californie a quant à lui choisi d'imposer au consommateur une taxe supplémentaire à l'achat, qui alimente un fonds destiné aux fabricants qui recyclent. Au final, ce sont près de 30 Etats qui ont étudié le dossier des déchets électroniques.

<sup>30</sup> Aux Etats Unis, les associations Computer Take Back Campaign et As You Show militent auprès des entreprises d'informatique (intervention à l'occasion des assemblées générales d'actionnaires) et des législateurs pour réduire les risques sanitaires et environnementaux posés par l'accumulation de matériel informatique vétuste, porteur de métaux toxiques comme le mercure, le plomb...).

(évolution vers un système industriel moins gourmand en énergie fossile). Dans cette nouvelle approche de l'écologie, l'innovation technologique et organisationnelle occupe une place importante. D'une part, le recyclage des déchets ne serait plus une fin en soi, il convient de les valoriser collectivement (valeur d'échange, valeur d'utilisation). C'est le fameux modèle de la symbiose industrielle de Kalundborg. D'autre part, l'innovation doit être une solution viable à court et long terme. Ce qui oblige les ingénieurs à prendre en compte toutes les dimensions (technique, environnemental, social et économique) de leur environnement. Au final, l'écologie industrielle recommande aux industriels et aux consommateurs de procéder à un ensemble d'opérations de rationalisation dans leurs modes de production et de consommation. Il ne s'agit pas d'un retour à la bougie, mais d'initier un profond changement dans la société. C'est à ce prix qu'il sera possible de découpler la croissance économique et les atteintes à l'environnement.

## Bibliographie

- Allenby B.R, Allen D.T, Davidson C.I (2007), "Teaching sustainable engineering", *Journal of Industrial Ecology*, vol 11, n°1, p. 8-10.
- Ayres R.U, Ayres L.W (1999), "The Life Cycle of Chlorine , Part IV : Accounting for Persistent Cyclic Organo-Chlorines", *Journal of Industrial Ecology*, vol 3, n°2-3, p. 121-159.
- Ayres R.U, Ayres L.W (1996) «*Industrial Ecology : Towards Closing the Materials Cycle* » Edward Elgar.
- Ayres R.U, Simonis U.E (1995), *Industrial Metabolism : Restructuring for Sustainable Development*, United Nations Publication, New York.
- Ayres R.U (1989) «*Industrial Metabolism and Global Change* », *International Social Science Journal*, pp. 363 – 373. Traduction française, « Le métabolisme industriel et les changements de l'environnement planétaire », *Revue internationale des sciences sociales*, n°121, p. 401-412.
- Ausubel J.H, Sladovich H.E (1989), *Technology and Environment*, National Academy Press, Washington.
- Becattini G. (2004), *Industrial Districts : A New Approach to Industrial Change*, Edward Elgar Publishing Williston, Vermont.
- Becattini G. (2001), *The Caterpillar and the Butterfly : An Exemplary Case of Development in the Italy of the Industrial Districts*, Felice Le Monnier, Firenze.
- Becattini G., Bellandi M., Ottati G.D, Sforzi F. (2003), *From Industrial Districts to local Development : An Itinerary of Research*, Edward Elgar Publishing, Cheltenham.
- Beers V.D, Corder G., Bossilkov A., Berkel V.R (2007), "Industrial Symbiosis in the Australian Minerals Industry", *Journal of Industrial Ecology*, vol 11, n°1, p. 55-72.
- Boiral O., Kabongo J. (2004), "Le management des savoirs au service de l'écologie industrielle", *Revue française de gestion*, n°149, p. 171 – 191.
- Boiral O., Croteau G. (2001), "Du développement durable à l'écologie industrielle ou les métamorphoses d'un concept caméléon", *Xième Conférence de l'Association Internationale de Management Stratégique*, Université de Laval, Québec, 13 – 15 juin, 17 p.
- Bourg D. (2010), "Changer nos modes de vie, tout un programme », *Monde et mondialisation, Ceras – revue Projet*, 18 avril, 3 p.
- Brings Jacobsen N. (2006), "Industrial Symbiosis in Kalundborg", *Journal of Industrial Ecology*, vol 10, n°1-2, p. 239-255.
- Brings Jacobsen N., Anderberg S. (2004), "Understanding the Evolution of Industrial Symbiotic Networks – The Case of Kalundborg" in *Economics of Industrial Ecology: Materials, Structural Change and spatial scales*, Van Der Bergh J., Janssen M. (ed), Cambridge, MA: MIT Press.
- Brullot S. (2006), « L'écologie industrielle : mise en œuvre à l'échelle d'un territoire », *Scientific Workshop 'Frontiers of Research in Industrial Ecology'*, University of Lausanne, Nov 27 – Dec 1th, 16 p.
- Carnot S. (1824) « *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance* » Paris, Bachelier. Réédition en 1872, 1878, 1913, 1953.
- Chertow M.R (2007), "Uncovering Industrial Symbiosis", *Journal of Industrial Ecology*, vol 11, n°1, p. 11-30.

- Chertow M.R (2004), "Industrial Symbiosis" in *Encyclopedia of Energy*, Cleveland C.J (ed), Oxford.
- Chertow M.R (1999), « The Eco-industrial Park Model Reconsidered », *Journal of Industrial Ecology*, vol 2, n°3, p. 8-10.
- Côte R., Cohen-Rosenthal E. (1998), "Designing Eco-industrial parks: A synthesis of some experiences", *Journal of Cleaner Production*, vol 6, p. 181-188.
- Christensen J. (2006), "The History of the Industrial Symbiosis at Kalundborg, Denmark", *Scientific Workshop 'Frontiers of Research in Industrial Ecology'*, University of Lausanne, November 27 – December 1th, 49 p.
- Daniels P.L, Moore S. (2001), "Approaches for Quantifying the Metabolism of Physical Economies : Part I : Methodological Overview", *Journal of Industrial Ecology*, vol 5, n°4, p. 69-93.
- Daniels P.L (2002), "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, p. 65-88.
- Dannequin F., Diemer A. (2009), "Le capitalisme dématérialisé comme développement durable ?", in Laperche B., Crétienneau A-M, Uzinidis D. (dir), *Développement durable : vers une nouvelle économie*, Peter Lang, p. 91 – 120.
- Dannequin F., Diemer A., Petit R., Vivien F-D (2000), « la nature comme modèle ? Ecologie industrielle et développement durable », *Cahiers du CERAS*, n° 38, mai, p. 62-75.
- Dannequin F., Diemer A. (1999a), « La place de la biologie et de la thermodynamique dans la théorie contemporaine : l'oeuvre scientifique de Nicholas Georgescu-Roegen », Colloque de l'ACGEPE, 26 – 27 septembre, Paris, 8 p.
- Dannequin .F, Diemer .A (1999b), « De l'entropie à la constitution d'un programme bioéconomique : Le grand projet de Nicholas Georgescu-Roegen », *Cahiers du CERAS*, Décembre, n° 42, pp. 1- 9.
- Dannequin .F, Diemer .A, Vivien F.D (1999a) « *Ecologie industrielle et développement durable* » Colloque de Reims, Hermès, 8 p.
- Dannequin .F, Diemer .A, Vivien F.D (1999b) « *Industrielle ou politique ? Quelle écologie pour le développement durable ?* » International Conference on Industrial Ecology and Sustainability, Université technologique de Troyes les 22-25 septembre, 8 p.
- Dannequin F., Diemer A., Vivien F.D (1998) « *Thermodynamique, biologie et économie chez Georgescu-Roegen* » Colloque de Reims, journées Hermès, 7 décembre, 8 p.
- Ehrenfeld J.R, Gertler N. (1997), "Industrial Ecology in Practice : The evolution of interdependence at Kalundborg", *Journal of industrial Ecology*, winter, vol 1, n°1, p. 67-79.
- Ehrenfeld J.R (2004), "Can Industrial Ecology be the 'Science of sustainability'?", *Journal of Industrial Ecology*, vol 8, n°1-2, p. 1-3.
- Ehrenfeld J., Chertow M.R (2004), "Industrial Symbiosis: The Legacy of Kalundborg" in *Handbook of Industrial Ecology*, Ayres R. (ed), Northampton, UK: Edward Elgar.
- Ehrenfeld J.R (2005), « Eco-efficiency : Philosophy, Theory and Tools », *Journal of Industrial Ecology*, vol 9, n°4, p. 6 – 8.
- Emmanuel A. (1969), *L'échange inégal*, Maspéro.
- Erkman S. (1994) « *Ecologie industrielle, métabolisme industriel et société d'utilisation* » Genève, ICAST.
- Erkman S. (1997) « Industrial Ecology: An Historical View » *Journal of Cleaner Production*, vol 5, n°1-2, p. 1 – 10.
- Erkman S. (1998) « *Vers une écologie industrielle : comment mettre en pratique le développement durable dans une société hyper-industrielle* » Editions Charles Leopold Mayer, réédition, 2006.
- Erkman S. (2001) « L'écologie industrielle, une stratégie de développement » *Le débat*, n°113, p.106-121.
- Erkman S. (2004), « *L'écologie industrielle, une stratégie de développement* », Exposé, Bruxelles, 9 p.
- Esquissaud P. (1997) « *Ecologie Industrielle* » Paris, Hermann.
- Esty D.C, Porter M.E (1998), « Industrial Ecology and Competitiveness: Strategic Implications for the Firm », *Journal of Industrial Ecology*, vol 2, n°1, p. 35-43.
- Fedrigò D., Hontelez J. (2010), "Sustainable Consumption and Production: An Agenda Beyond Sustainable Consumer Procurement", *Journal of Industrial Ecology*, vol 14, n°1, p. 10 – 12.
- Fisher-Kowalski M. (1998), "Society's Metabolism: The intellectual History of Materials Flow Analysis, Part I, 1970-1998", *Journal of Industrial Ecology*, vol 2, n°1, p. 61-78.
- Fisher-Kowalski M., Hüttler W. (1998), "Society's Metabolism: The intellectual History of Materials Flow Analysis, Part II, 1970-1998", *Journal of Industrial Ecology*, vol 2, n°4, p. 107-136.
- Frosch R. (1995) « L'écologie industrielle du XXe siècle », *Pour la science*, 217, p. 148-151.

- Frosh R.A (1992) «*Industrial Ecology : A philosophical Introduction* » Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, vol 89, p. 800 – 803.
- Frosch R.A, Gallopoulos N.E (1992) « *Towards an Industrial Ecology* », p. 269 – 292, in Bradshaw A.D, «*The Treatment and Handling of Wastes* » Chapman and Hall, London.
- Frosch R.A, Gallopoulos N.E (1989) «*Strategies for Manufacturing* », *Scientific American*, vol 261, Special Issue «*Managing Planet Earth* », September, p. 144 – 152). Traduction française «*Des stratégies industrielles viables* », *Pour la Science*, n°145, novembre 1989, p. 106 – 115.
- Georgescu-Roegen N. (1995) «*Demain, la décroissance: entropologie-écologie-économie*», Sang de la Terre.
- Georgescu-Roegen N. (1987) «*Entropy* » in J. Eatwell, M. Milgate, P.K Newman, *The New Palgrave, A Dictionary of Economics*, vol I, London, Mc Millan Press, (p 153 - 156)
- Georgescu-Roegen N. (1986) "Man and production", in Baranzani M. et Scazzieri R. (eds) "*Foundations of economics*", Basil Blackwell.
- Georgescu-Roegen N. (1979) "Methods in economic science", *Journal of economic issues*, vol XIII, n°2.
- Georgescu-Roegen Nicholas (1978) «*De la Science Economique à la Bioéconomie* », *Revue d'Economie Politique*, t LXXXVIII, n° 3, Mai-Juin, p. 337 - 382.
- Georgescu-Roegen N. (1978) "Mechanistic dogma and economics", *British review of economic issues*, 2.
- Georgescu-Roegen N. (1977) « *What thermodynamics and Biology Can Teach Economists* », *Atlantic Journal Economic*, vol 5, p. 13 – 21.
- Georgescu-Roegen (1977 a) «*What Thermodynamics and Biology Can Teach Economists* », *Bio-Science* vol XXVII, avril, p. 266 - 270.
- Georgescu-Roegen .N (1977 b) «*Inequality, Limits and Growth from a Bioeconomics Viewpoint* » *Review of Social Economy*, vol XXXV, p. 361 - 375.
- Georgescu-Roegen N. (1976), *Energy and Economic Myths*, New York, Pergamon Press.
- Georgescu-Roegen N. (1975), « *Bio-Economic Aspects of Entropy* » dans «*Entropy and Information in Science and Philosophy* » J. Zeman, Amsterdam Elsevier.
- Georgescu-Roegen N. (1971), «*The Entropy Law and the Economic Process* », Harvard University Press (4ème édition 1981).
- Gillet M. (2002), « *Economie sociale et gestion des déchets ménagers* », *Reflets et perspectives*, vol XLI, p. 75-88
- Graedel T.E, Allenby B.R (1995) «*Industrial Ecology* » Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall
- Graedel T.E. (1996) « *On the Concept of Industrial Ecology* », *Annu. Rev. Energy Environ.*, 21, pp. 69-98.
- Granovetter M. (2000), *Le marché autrement*, Desclée de Brouwer, Paris, 239 p.
- Haberl H. (2001), "The Energetic Metabolism of societies Part I: Accounting Concepts", *Journal of Industrial Ecology*, vol 5, n°1, p. 11-33.
- Haberl H. (2001), "The Energetic Metabolism of societies Part II: Empirical Examples", *Journal of Industrial Ecology*, vol 5, n°2, p. 71-88.
- Hardy C., Greadel T. (2002), "Industrial Ecosystems as food webs", *Journal of Industrial Ecology*, vol 6, n°1, p. 29-38.
- Hertwich E.G (2005), "Consumption and Industrial Ecology", *Journal of Industrial Ecology*, vol 9, n°2, p. 1 – 6.
- Huesemann M.H (2003), "The Limits of Technological Solutions to sustainable Development", *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol 5, 1, p. 21 – 34.
- Huppes G., Ishikawa M. (2005), « *Why Eco-Efficiency ?* », *Journal of Ecology Industrial*, vol 9, n°4, p. 2-5.
- Huppes G., Ishikawa M. (2005), « *A Framework for quantified Eco-Efficiency Analysis* », *Journal of Ecology Industrial*, vol 9, n°4, p. 25-41.
- Husar H.B (1995), "Ecosystem and the Biopshere : Metaphors for human included material flows", in Ayres R.U, Simonis U.E (1995), *Industrial Metabolism : Restructuring for Sustainable Development*, United Nations Publication, New York.
- Kaenzig J., Wüstenhagen R. (2009), "The Effect of Life Cycle Cost Information on Consumer Investment Decisions Regarding Eco-innovation", *Journal of Industrial Ecology*, vol 14, n°1, p. 121-136.
- Kartchevsky A., Maillefert M. (2009), "Les approches du développement durable : des théories aux politiques", in Laperche B., Crétieneau A-M, Uzinidis D. (dir), *Développement durable : vers une nouvelle économie*, Peter Lang, p. 27 – 48).
- Keckler S.E, Allen D.T (2006), « *Material Reuse Modeling : A Case Study of Water Reuse, in an Industrial Park* », *Journal of Industrial Ecology*, vol 2, n°4, p. 79-92.

- Krantz R. (2010), "A New Vision of Sustainable Consumption", *Journal of Industrial Ecology*, vol 14, n°1, p. 7 – 9.
- Kormondy E. J. (1969), *Concepts of Ecology*. Englewood Cliffs, N.J, Prentice-Hall, Inc.
- Labrune S. (2000), « *La valorisation des déchets en énergie à partir des parcs agro-industriels de saules* », Mémoire de fin d'études, ISA Beauvais, mars, 128 p.
- Laperche B., Crétieneau A-M, Uzinidis D. (2009), *Développement durable : vers une nouvelle économie*, Peter Lang.
- Leontief W. (1936), « Quantitative input and output relations in the economic systems of the United States », *Review of Economics and Statistics*, vol 18, n°3, p. 105-125.
- Lifset R. (2006), "What Next for Industrial Ecology ?", *Scientific Workshop 'Frontiers of Research in Industrial Ecology'*, University of Lausanne, November 27 – December 1th, 17 p.
- Levine S. (2003), "Comparing products and production in Ecological and Industrial Systems", *Journal of Industrial Ecology*, vol 7, n°2, p. 33-42.
- Lotka A. (1956), *Elements of Mathematical Biology*, New York Dover.
- Lotka A. (1945), «The Law of Evolution as a Maximal Principle » *Human Biology*, vol 17, p. 67 - 194.
- Mailhes L; (2006), "La course au recyclage informatique est lancée aux Etats Unis", *Les Echos*, 25 avril.
- Marshall A. (1919), *Industry and Trade*, Mac Millan, New York.
- Molga P. (2010), "Il faut consommer autrement : interview d'Yvon Chouinard, Président fondateur de Patagonia", *Les Echos*, 11 janvier.
- Moll H.C, Noorman K.J et alii (2005), « Pursuing More Sustainable Consumption by Analysing Household Metabolism in European Countries and Cities », *Journal of Industrial Ecology*, vol 9, n° 1-2, p. 259-275.
- Moolenaar S.W, Lexmond T.M (1998), « Heavy Metal Balances, Part I ", *Journal of Industrial Ecology*, vol 2, n°4, p. 45-60.
- Moolenaar S.W, (1999) Moolenaar S.W, Lexmond T.M (1998), « Heavy Metal Balances, Part II ", *Journal of Industrial Ecology*, vol 2, n°4, p. 45-60.
- Myrdal G. (1963), *Planifier pour développer*, Economie et Humanisme, Les Editions Ouvrières.
- Nahapétian N. (2002) « L'écologie industrielle, exercice pratique », *Alternatives économiques*, n°206, p. 60-63.
- Munasinghe M. (2010), "Can Sustainable Consumers and Producers Save the Planet?", *Journal of Industrial Ecology*, vol 14, n°1, p. 4 – 6.
- Odum E.P. (1976) *Fundamentals of Ecology*, Philadelphia, W.B. Saunders Company..
- Odum E.P (1983), *Basic Ecology*, Saunders College Publishing, Philadelphia.
- Ozyurt D.B, Realff M.J (2001), "Combining a Geographical Information System and Process Engineering to Design an Agricultural Industrial System", *Journal of Industrial Ecology*, vol 5, n°3, p. 13-31.
- Passet R. (1979), *L'économie et le vivant*, Economica.
- Peck S. (2001), "When is an Eco-Industrial Park not an Eco-Industrial Park ?", *Journal of Industrial Ecology*, vol 5, n°3, p. 3-5.
- Poignant S. (2003), « Rapport d'information sur la politique de soutien au développement des énergies renouvelables », *document d'information de l'Assemblée nationale*, n° 1153, 79 p.
- Powers C.W., Chertow M.R. (1997) « Industrial Ecology », in M.R. Chertow, D.C. Esty (eds) *Thinking Ecologically*, New Haven, Yale University Press, p. 19-36.
- Prigogine I. (1968), *Introduction à la thermodynamique des processus irréversibles*, Masson, Paris.
- Randles S., Berkhout F. (2006), "At the Interface of industrial ecology and innovation studies : some emerging themes", *Scientific Workshop 'Frontiers of Research in Industrial Ecology'*, University of Lausanne, November 27 – December 1th, 13 p.
- Rosenqvist H., Aronsson P., Hasselgren K., Perttu K. (1997), "Economics of using municipal wastewater irrigation of willow coppice crops", *Biomass and Energy*, vol 12, n°1, p. 1-8.
- Sauvy A. (1952), "Trois mondes, une planète", *L'observateur*, 14 août, n°118, p. 14.
- Schandl H., Turner G. (2009), "The dematerialization Potential of the Australian Economy", *Journal of Industrial Ecology*, vol 13, n°6, p. 863 – 879.
- Schipper L. (2000), "On the Rebound : the Interaction of Energy Efficiency, Energy Use and Economic Activity", *Energy Policy*, vol 28, 6/7, p. 351 – 353.
- Schulze P. (1996), *Engineering with Ecological Constraints*, National Academy Press.

- Smoots M.C, Antoine S., Beauchamp A., Bourg D. (2005), *Le développement durable, les termes du débat*, Dalloz.
- Svalov Municipality (1998), *Kageröd Recycling Projet*, Department of civil works, Sweden, 3 p.
- Tilley D.R (2003), "Industrial Ecology and Ecological Engineering : Opportunities for Symbiosis", *Journal of Industrial Ecology*, vol 7, n° 2, p. 13-32.
- Tukker A., Cohen M.J, Zoysa U. et alii (2006), « The Oslo Declaration on Sustainable Consumption", *Journal of Industrial Ecology*, vol 10, n°2, p. 9-14.
- Tukker A., Cohen M.J, Hubacek K., Mont O. (2010), "Sustainable Consumption and Production", *Journal of Industrial Ecology*, vol 14, n°1, p. 1 – 3.
- Vivien F. D. (1994) "Economie et écologie", La découverte
- Vivien F.-D. (2000) « Industrielle ou politique ? Quelle écologie pour le développement durable ? » in Bourg D., Erkman S. (eds) *Industrial Ecology and Sustainability : Proceedings*, Troyes/ICAST.
- Vivien F.D (2002), « Rencontre du troisième type... d'écosystème ou quand l'écologie devient industrielle », *Colloque de Dunkerque*, 8 p.
- Vivien F.D (2005), *Le développement soutenable*, La Découverte.
- Vivien F.D (2006), "L'écologie industrielle : une critique du point de vue de l'économie politique", *Scientific Workshop 'Frontiers of Research in Industrial Ecology'*, University of Lausanne, November 27 – December 1th, 22 p.
- Watt K.E.F (1973), *Principles of Environmental Sciences*, Mc Graw Hill, New-York.
- Wells P., Orsato R.J (2005), "Redesigning the Industrial Ecology of the Automobile", *Journal of Industrial Ecology*, vol 9, n°3, p. 15-30.
- Zhu Q., Lowe E.A, Wei Y.A, Barnes D. (2007), "Industrial Symbiosis in China", *Journal of Industrial Ecology*, vol 11, n°1, p. 31-42.