

**Observatoire du Management Alternatif
Alternative Management Observatory**

Mémoire de recherche

L'écologie industrielle :
une stratégie conciliant les dimensions économique et
environnementale du développement durable?

Elodie Payre

12 juin 2008

Majeure Alternative Management – HEC Paris
2007-2008

Genèse du présent document

Ce cahier de recherche a été réalisé sous la forme initiale d'un mémoire de recherche dans le cadre de la Majeure Alternative Management, spécialité de troisième année du programme Grande Ecole d'HEC Paris.

Il a été dirigé par Bernard Garrette, Professeur à HEC Paris, Responsable du Département Stratégie et Politique d'Entreprise, et soutenu le 12 juin 2008 en présence de Bernard Garette et Frédéric Dalsace, Professeur associé au sein du Département Marketing à HEC Paris.

Origins of this research

This research was originally presented as a research essay within the framework of the "Alternative Management" specialization of the third-year HEC Paris business school programme.

The essay has been supervised by Bernard Garrette, Professor in HEC Paris, Strategy and Business Policy Area Head, and delivered on June, 12th 2008 in the presence of Bernard Garrette and Frédéric Dalsace, Associate Professor within HEC Paris Marketing Department.

Charte Ethique de l'Observatoire du Management Alternatif

Les documents de l'Observatoire du Management Alternatif sont publiés sous licence Creative Commons <http://creativecommons.org/licenses/by/2.0/fr/> pour promouvoir l'égalité de partage des ressources intellectuelles et le libre accès aux connaissances.

L'exactitude, la fiabilité et la validité des renseignements ou opinions diffusés par l'Observatoire du Management Alternatif relèvent de la responsabilité exclusive de leurs auteurs.



L'écologie industrielle : une stratégie conciliant les dimensions économique et environnementale du développement durable ?

Résumé : Ce mémoire se propose d'analyser un nouveau modèle d'organisation, qui prend en considération les contraintes environnementales, et d'évaluer sa pertinence économique. Permet-il de créer de la valeur ? L'approche étudiée est celle de l'écologie industrielle, qui consiste « à envisager le système industriel comme un cas particulier d'écosystème », avec le dessein de rendre son fonctionnement compatible avec celui des écosystèmes biologiques. L'échange de flux de matière et d'énergie ainsi que la mutualisation de certains services pourraient permettre aux entreprises qui les mettent en œuvre de réaliser des économies et de générer des revenus additionnels (efficacité accrue dans l'utilisation des ressources, vente de co-produits à d'autres organisations, recherche de synergies). Profits et préservation de l'environnement peuvent-ils vraiment aller de pair comme l'affirment des entrepreneurs et des universitaires convaincus par l'assertion de la « triple bottom line »? Si oui, quelles sont les conditions de la réalisation de ce double objectif économique et environnemental ?

Mots-clés : Ecologie industrielle, Développement durable, Triple bottom line, Stratégie environnementale

Industrial ecology: a strategy combining the economic and environmental dimensions of sustainable development?

Abstract: The purpose of this dissertation is to analyse a new business model, which takes into account environmental constraints, and to assess its economic relevance. Does it add value ? Industrial ecology, the concept studied in this paper, considers « *the industrial system as a specific case of ecosystem* » and aims at making its running compatible with the one of biological ecosystems. The exchange of material and energy flows as well as the common use of services could enable companies to save money and to earn additional incomes (increased resource efficiency, selling of by-products to commercial partners, implementation of synergies). Can profit-making and nature conservation really go together as many people coming from both the academic and the business worlds, who are convinced by the assertion of the « triple bottom line », maintain? If the answer is yes, what are the necessary conditions to achieve this double economic and environmental objective ?

Keywords: Industrial ecology, Sustainable development, Triple bottom line, Environmental strategy

Remerciements

Avant tout, un immense merci à Eve Chiapello et Karim Medjad, qui nous ont permis, grâce à la majeure Alternative Management, d'aborder autrement l'enseignement à HEC.

Merci à toutes les personnes qui m'ont apporté leur soutien en me faisant profiter de leur expérience et de leurs contacts, notamment Thanh Nghiem et Daniel Grande, ainsi que Mme. Ricart et l'Association Ecopal, M. Traisnel, M. Dupré, M. Massard et M. Laurent.

Un grand merci et toute ma reconnaissance à M. Garrette pour ses conseils et ses commentaires qui m'ont permis d'orienter ma réflexion et d'adopter une approche critique. Tous mes remerciements également à M. Dalsace pour avoir témoigné de l'intérêt à l'égard de mon travail et avoir accepté de l'évaluer.

Merci à mes parents et à ma sœur pour leur soutien pendant toute ma scolarité et notamment pendant la laborieuse phase de réalisation de ce mémoire.

Table des matières

INTRODUCTION	7
PARTIE 1. CADRAGE HISTORIQUE ET CONCEPTUEL DE L'ÉCOLOGIE INDUSTRIELLE	10
1.1. Mise en perspective historique : l'écologie industrielle, une théorisation récente	10
1.1.1. Les prémices de l'écologie industrielle : des débuts peu concluants	10
1.1.2. L'institutionnalisation de l'écologie industrielle : un nouvel élan grâce au monde économique et à la prise de conscience des enjeux environnementaux	11
1.2. Définition du concept et caractéristiques globalement admises	12
1.2.1. Le contenu conceptuel de l'écologie industrielle	12
1.2.2. Les principes d'une stratégie éco-industrielle	14
1.3. L'écologie industrielle à l'épreuve de la critique	15
1.3.1. La critique de l'analogie avec les écosystèmes biologiques	16
1.3.2. La critique des principes de l'écologie industrielle	17
1.4. Le choix dans ce mémoire d'une conception non restrictive de l'écologie industrielle	18
1.4.1. L'écologie industrielle : quel intérêt ?	18
1.4.2. Les critères essentiels et la définition choisie	19
PARTIE 2. METHODOLOGIE DE LA RECHERCHE	21
2.1. Définition opérationnelle de notre objet d'étude	21
2.1.1. Définition empirique : une ou des écologies industrielles ?	21
2.1.2. Définition de la création de valeur pour les entreprises	24
2.1.2.1. La profitabilité comme approche opérationnelle de la création de valeur par l'écologie industrielle	24
2.1.2.2. Les composantes du profit dans la mise en œuvre de l'écologie industrielle	25
2.2. Hypothèses de recherche	28
2.3. Le choix d'une méthodologie adaptée	31
PARTIE 3. ANALYSE DES RESULTATS DE L'ETUDE EMPIRIQUE.....	33
3.1. Les exemples de mise en œuvre de l'écologie industrielle : une confirmation de la combinaison environnementale et économique « gagnant-gagnant » ?	33
3.1.1. Une réduction du fardeau environnemental plutôt qu'un impact positif	33
3.1.2. Des bénéfices économiques effectifs mais limités et peu évalués	36
3.1.3. Le choix d'une approche contingente ou l'identification des conditions de succès des initiatives en écologie industrielle	38

3.1.3.1. Mise en parallèle des résultats avec la typologie des stratégies environnementales proposée par Boiral	38
3.1.3.2. D'autres facteurs identifiés grâce à notre étude comparative	40
3.1.3.2.1. Un environnement réglementaire et culturel influençant l'émergence de projets en écologie industrielle.....	40
3.1.3.2.2. D'autres facteurs à l'échelle de l'entreprise ou de la zone industrielle ont un rôle déterminant.....	42
3.2. Les limites de notre étude et une conception élargie de la notion de création de valeur	46
3.2.1. L'écologie industrielle, des limites empiriques déjà identifiés avant même une démonstration convaincante	46
3.2.2. Un modèle où l'économique prime sur l'environnement.....	47
3.2.2.1. La "triple bottom line", une conception discutable du développement durable..	47
3.2.2.2. L'analyse coûts-bénéfices, une méthode appropriée à l'écologie industrielle ?.	49
3.2.3. Une approche stratégique plutôt qu'économique de la création de valeur.....	49
CONCLUSION	53
BIBLIOGRAPHIE	55
ANNEXES	59

Introduction

Depuis la publication en 1987 du rapport Brundtland par la Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement, la notion de développement durable a parcouru un chemin considérable et occupe désormais une place centrale dans les préoccupations individuelles et collectives, comme en témoigne la prégnance de ce thème dans le discours des entreprises sur leur site Internet ou dans leur rapport annuel.

Différents modèles conceptuels ont été développés autour de cette problématique, un des plus connus étant celui de la « triple bottom line » proposé par John Elkington. Dans un article intitulé « *Towards the sustainable corporation : Win-win-win business strategies for sustainable development* » publié en 1994, l'auteur suggère une approche tridimensionnelle de la durabilité, en conciliant performance financière (« *Profit* »), performance sociale (« *People* ») et performance environnementale (« *Planet* »). De nombreux articles académiques se sont efforcés par la suite d'analyser au travers d'études théoriques et empiriques les interactions complexes entre ces objectifs considérés jusqu'alors comme incompatibles. Les travaux menés à ce sujet aboutissent à des résultats contradictoires qui ne font qu'illustrer la complexité des considérations relatives au développement durable, notion dont les contours demeurent flous. Les principes de la « triple bottom line » ne peuvent être considérés comme des évidences et, si leur réalisation demeure conditionnelle, une approche contingente s'avère nécessaire. Il importe donc d'analyser cette assertion de manière plus approfondie, avant d'affirmer que les dimensions économiques, sociales et environnementales peuvent être conciliées.

Les recherches se concentrent souvent sur la combinaison de deux des dimensions du modèle, avec une prédilection pour la question économique. La littérature académique relative à la combinaison « *People* » et « *Profit* » est relativement riche ; de même, une attention croissante est portée à l'analyse théorique et à l'étude empirique des bénéfices économiques du management environnemental des entreprises. Il semblerait, si l'on en croit certains dirigeants d'entreprises, que les stratégies « vertes » soient non seulement bénéfiques pour l'environnement, mais aussi génératrices de profits. Ainsi, lors d'une conférence donnée en 2007 à l'Ecole des Hautes Etudes Commerciales de Paris, Philippe Joffard, Président Directeur Général de Lafuma, affirmait, en louant les mérites de l'éco-conception : « *quand vous dites*

avoir moins de déchets, en réalité vous vous demandez comment optimiser la matière. La seule différence, c'est que là, non seulement vous le faites pour améliorer la valeur économique, mais vous le faites pour des raisons de diminution d'impact sur l'environnement. En substance, c'est faire en sorte que la bonne économie rejoigne la bonne écologie. Sachant que c'est valable dans les deux sens »¹.

Préservation de la planète et performances économique et financière iraient-elles donc de pair ? Dès lors, comment justifier la multiplication des constats alarmistes sur l'état de la Terre, constats récurrents semblant témoigner du peu d'écho que rencontre l'affirmation « win-win » auprès des entreprises ou du moins du peu d'entrain des dirigeants à intégrer les considérations environnementales dans leur stratégie globale ? Les chiffres sont éloquentes : en 2006, les activités humaines ont rejeté au niveau mondial 150 millions de tonnes de déchets industriels dangereux et 1 à 2 milliards de tonnes de déchets industriels non dangereux² tandis que 90% des matières initialement utilisées pour la production ou contenues dans les produits sont devenues des déchets 6 semaines après leur vente³. A ces observations, autant de réponses différentes sont apportées par les milieux scientifiques ou le monde des affaires, sans effort d'intégration cohérente ou de confirmation empirique, rendant leur appréhension particulièrement complexe. Si les partisans d'un développement durable souhaitent que ce concept ne demeure pas un vœu pieux, il s'avère donc nécessaire de démontrer sa pertinence, afin de proposer aux entreprises des arguments convaincants et des solutions pragmatiques, efficaces environnementalement et compatibles avec leurs objectifs de rentabilité économique et de compétitivité.

A cette fin, ce travail de recherche se propose d'étudier les interactions entre « *Profit* » et « *Planet* » au travers de l'analyse d'une approche originale proposée pour mettre en œuvre le développement durable, l'écologie industrielle. Cette démarche, que nous définirons plus précisément dans la première partie de ce mémoire, suggère que le système industriel s'inspire des écosystèmes naturels, qui constituent son fondement, et dont il tire l'essentiel des ressources nécessaires à son fonctionnement. D'après Suren Erkman, journaliste scientifique et un des principaux experts francophones de cette discipline, on peut décrire l'organisation des activités économiques comme « *une certaine configuration de flux et de stocks de matière, d'énergie et d'information* » ; cette organisation peut être mise en parallèle avec les flux traversant les systèmes biologiques, considérés comme durables en raison des propriétés

¹ Minutes de la conférence donnée en octobre 2007 à HEC : http://appli7.hec.fr/amo/fiche_detail.php?num=23

² AIE (2006). "Panorama mondial des déchets 2006", Editions Cyclope, cité dans l'Usine Nouvelle (2007)

³ Paul Hawken, cité dans Gibbs, D. & Deutz, P. (2007)

qui les caractérisent, fonctionnement cyclique et interdépendance des espèces. L'objectif de ce mémoire est de déterminer si l'écologie industrielle offre un potentiel de création de valeur pour les entreprises, et notamment pour ses actionnaires. On négligera volontairement les autres parties prenantes (salariés, riverains, société...) afin de ne pas introduire la dimension sociale dans notre recherche et de concentrer notre étude sur les interactions entre les éléments « *Planet* » et « *Profit* » du développement durable. Comme le regrette Suren Erkman, le champ socio-économique de l'écologie industrielle a été globalement peu investigué *a contrario* du champ scientifique. Pourtant, les travaux empiriques menés à ce sujet soulignent que les motivations invoquées pour mener des initiatives en écologie industrielle sont avant tout économiques, sans qu'un nombre représentatif de recherches académiques vienne confirmer cette affirmation. Ce mémoire repose sur le postulat qu'une adhésion généralisée ou du moins plus significative des entrepreneurs et des dirigeants au concept d'écologie industrielle ne peut se faire sans la démonstration de son intérêt économique, et, dans une moindre mesure, de son impact environnemental positif ou neutre.

La question à laquelle nous allons donc chercher d'apporter une réponse est : Dans quelle mesure l'écologie industrielle offre-t-elle aux entreprises un modèle alternatif de création de valeur pour leurs dirigeants et leurs actionnaires, prenant en considération les enjeux environnementaux actuels ? Nous nous efforcerons dans un premier temps de définir ce concept et de mettre en perspective la réflexion suscitée autour de cette notion depuis son émergence. Après avoir présenté la méthodologie employée dans le cadre de notre travail, nous analyserons les résultats obtenus et les limites de notre étude, afin d'élargir notre compréhension de la notion de création de valeur.

Nous démontrerons ainsi que, même si des initiatives opérationnelles en matière d'écologie industrielle contribuent à réduire de manière notable l'impact négatif des activités économiques, elles ne permettent pas d'annihiler l'ensemble des émissions et rejets néfastes ou de réduire à néant la ponction de ressources naturelles. Ce constat met à mal la promesse d'une combinaison véritablement profitable entre « *Planet* » et « *Profit* » ; il ne justifie néanmoins pas d'abandonner toute recherche quant à la rentabilité de la stratégie proposée par l'écologie industrielle, dans la mesure où, à défaut d'être curative, elle peut corriger une partie des effets environnementaux négatifs de notre système, tout en permettant, sous certaines conditions que l'on déterminera, une amélioration de la performance économique des entreprises.

Partie 1. Cadrage historique et conceptuel de l'écologie industrielle

1.1. Mise en perspective historique : l'écologie industrielle, une théorisation récente

1.1.1. Les prémices de l'écologie industrielle : des débuts peu concluants

Si, dès la fin du 18^{ème} siècle, l'utilisation de sous-produits et de déchets se développe afin de nourrir une industrialisation et une urbanisation avides de matières premières (utilisation des chiffons pour la production de papier, des sous-produits de la boucherie pour la colle ou le savon, de la boue des rues pour fertiliser les terres agricoles)⁴, ce n'est que dans la deuxième moitié du 20^{ème} siècle que l'écologie industrielle se constitue comme un champ scientifique à part entière au croisement de l'écologie, de l'ingénierie et de la bio-économie.

En effet, les idées annonçant l'émergence de l'écologie industrielle apparaissent réellement au cours des années 1970, voire un peu plus tôt, de manière sporadique, dans les travaux de quelques écologues datant des années 1950, puis dans ceux de Robert Ayres, un physicien et économiste américain, qui, dans le cadre du métabolisme industriel, un champ d'étude parallèle souvent assimilé de manière erronée, initie l'étude des flux de matière. Erkman souligne également la contribution du géochimiste Preston Cloud, qui, un des premiers, emploie l'expression d'« écosystème industriel » dans un article daté de 1977. Les articles de recherche citent également le rôle pionnier du biologiste américain Barry Commoner, qui, dans un essai publié en 1971, The Closing Circle⁵, attribue l'origine des maux environnementaux à l'absence d'échanges cycliques de matières entre les organisations humaines et leur environnement naturel. On entrevoit déjà la notion de boucle fermée si chère aux promoteurs de l'écologie industrielle. Cependant, aux Etats-Unis, le concept demeure nettement accaparé par quelques scientifiques sans rencontrer un écho significatif au sein des

⁴ Barles, S. (2007)

⁵ Cité dans Suh, S. & Kagawa, S. (2005)

milieux académiques et sans susciter un intérêt quelconque auprès des cercles économiques et encore moins des entreprises.

L'écologie industrielle connaît un succès très relatif dans d'autres pays avec des initiatives au Japon ainsi qu'en Belgique. Dès la fin des années 60, l'Industrial Structure Council, une agence de conseil japonaise indépendante du Ministry of International Trade and Industry, réalise une mission de prospection visant à déterminer les modalités d'un développement moins dépendant de la consommation de ressources et suggérant une approche écologique des activités économiques. Suite à ces travaux, divers projets se concrétisent à partir de 1973 afin d'améliorer l'efficacité énergétique du système industriel au Japon. Un travail collectif intitulé *L'écosystème Belgique – Essai d'écologie industrielle*⁶ est publié en 1983 par le Centre de recherche et d'information sociopolitiques, un organisme indépendant proche des milieux progressistes belges. Ses auteurs suggèrent de définir le « *système industriel comme un écosystème constitué de l'ensemble de ses moyens de production, et de ses réseaux de distribution et de consommation, ainsi que des réserves de matières premières et d'énergie qu'il utilise et des déchets qu'il rejette* ». L'accueil fait à cet essai demeure cependant très réservé.

1.1.2. L'institutionnalisation de l'écologie industrielle : un nouvel élan grâce au monde économique et à la prise de conscience des enjeux environnementaux

Les idées mises en avant par l'écologie industrielle tombent alors en désuétude jusqu'à la fin des années 1980, où la publication d'un papier dans une édition spéciale « *Managing Planet Earth* » de la prestigieuse revue *Scientific American* leur donne un nouveau souffle grâce à la récupération de la problématique par le monde des affaires et à un contexte devenu plus réceptif aux préoccupations environnementales. En effet, cet article, « *Strategies for Manufacturing* », est le fruit de la réflexion de deux cadres haut placés de General Motors, Nicholas Gallopoulos et Robert Frosch, qui jouit d'une popularité notable auprès des milieux économiques et politiques. Les auteurs proposent une approche intégrée impliquant un rassemblement des acteurs et appellent à une restructuration « *écosystémique* » du modèle traditionnel de l'activité industrielle afin d'optimiser la consommation d'énergie et de matière, de minimiser la production de déchets et d'utiliser en tant que matières premières les

⁶ Cité dans Erkman, S. (1997)

effluents d'un autre processus de production. Les propos de Gallopoulos et Frosch sont ensuite repris dans les travaux d'un consultant d'Arthur D. Little, Hardin Tibbs, qui s'efforce de rendre leurs recommandations plus accessibles aux entrepreneurs et aux dirigeants d'entreprise.

Reformulée par le milieu économique avec le soutien de la National Academy of Engineering américaine, l'écologie industrielle se révèle une réponse opérationnelle adaptée aux problèmes émergeant autour de la problématique du développement durable, alors que ce concept gagne progressivement en audience à la même époque avec le rapport Brundtland puis le Sommet de la Terre au Brésil en 1992. L'écologie industrielle s'institutionnalise et devient au cours des années 1990 une discipline à part entière, faisant l'objet de colloques réguliers (1991 : premier symposium sur le sujet à Washington, sous le patronage de la National Academy of Science ; 1998 : première Gordon Research Conference in Industrial Ecology, conférence organisée dès lors tous les deux ans), disposant d'une revue académique spécialisée (1997 : création du Journal of Industrial Ecology) et ayant une organisation dédiée (2001 : création de l'International Society of Industrial Ecology – ISIE – qui propose notamment une conférence bisannuelle à Leiden en Suisse).

1.2. Définition du concept et caractéristiques globalement admises

1.2.1. Le contenu conceptuel de l'écologie industrielle

Si l'analogie avec les écosystèmes biologiques est au cœur des transformations suggérées par l'écologie industrielle, il n'en demeure pas moins difficile de déterminer les spécificités formelles de ce concept. En effet, la littérature existante ne nous a pas permis d'identifier une définition consensuelle.

L'apparente antithèse entre les termes « écologie » et « industrielle » est souvent mise en exergue par les auteurs pour remettre en question l'approche traditionnelle qui les considère comme opposés. En effet, celle-ci, que l'on qualifie de linéaire ou allant du « berceau à la tombe » (« from cradle to grave ») et qui consiste à prélever les ressources fournies par la nature, à les transformer au travers de divers processus industriels puis à se défaire des déchets résiduels, envisage le système industriel comme distinct des écosystèmes naturels.

Pourtant, le fonctionnement du premier dépend de manière étroite des seconds. Dans le cadre d'une approche « end of pipe » des problèmes environnementaux engendrés par cette organisation des activités économiques, les améliorations se font de manière ponctuelle et graduelle, en aval de la production en développant les technologies de dépollution, en réduisant le volume des déchets ou simplement en les transférant d'un lieu à un autre. C'est ainsi le cas des déchets solides qui sont incinérés et qui, transformés en cendres, occupent certes un espace moindre, mais n'en demeurent pas moins nocifs pour l'environnement au travers de la pollution des sols, des eaux souterraines ou encore de l'atmosphère⁷.

L'écologie industrielle introduit donc une innovation en rupture avec les pratiques traditionnelles, en soulignant les interactions entre la biosphère et les activités économiques. L'expression ne comprend pas l'écologie au sens politique du terme, mais au sens scientifique comme la « science de l'économie, du mode de vie, des rapports vitaux externes des organismes »⁸. Cette discipline étudie notamment les flux traversant les systèmes biologiques et les transformations qu'ils induisent par le biais de leur métabolisme. L'adjectif « industrielle » est quant à lui envisagé au sens anglo-saxon du terme, c'est-à-dire intégrant « [l']appareil de production, [le] système de distribution, [les] services publics ou privés, [l']agriculture, [les] collectivités, [le] transport, [l']habitat... »⁹, mais aussi les consommateurs. Le concept insiste donc sur le fait que le système industriel peut être considéré comme un cas particulier d'écosystème animé par des flux de matière, d'énergie et d'information. Il ne peut se réduire à des échanges entre acteurs économiques de produits et de services évalués selon des unités de valeur « immatérielle » ou monétaire. L'objectif global de l'écologie industrielle est donc d'étudier le fonctionnement du système actuel afin de déterminer les mutations lui permettant d'évoluer vers un système « compatible avec le fonctionnement 'normal' des écosystèmes biologiques »⁷. Ces changements devraient idéalement permettre aux activités humaines de ne plus conduire à une dégradation de leur environnement et à prendre en considération de manière permanente la contrainte liée au caractère limité des ressources naturelles dont elles peuvent disposer.

⁷ Erkman, S. (1998)

⁸ D'après Donald Worster (1977), cité dans Vivien, F.-D. (2003)

⁹ Adoue, C. (2007)

1.2.2. Les principes d'une stratégie éco-industrielle

L'évolution vers un système économique viable à long terme en accord avec les principes de l'écologie industrielle repose sur quatre axes essentiels identifiés par Suren Erkman⁷.

En premier lieu, les déchets doivent être valorisés systématiquement comme des ressources. Il s'agit d'appliquer au système industriel un des principes au fondement de l'écologie scientifique. Le biologiste Barry Commoner précise en effet que dans la biosphère « [l]a matière circule et se retrouve toujours en quelque lieu »⁵, contrairement au système linéaire actuel, qui ne fait que transférer la matière d'un point à un autre, jusqu'à la mise en décharge ou à l'incinération. Une circulation cyclique de la matière, s'inspirant par exemple du modèle naturel offert par les chaînes alimentaires dans les écosystèmes naturels, envisagerait les effluents résultant de la production de certaines entreprises comme de potentielles matières premières pour d'autres sociétés, selon des modalités techniques et économiques qu'il convient de définir et d'évaluer¹⁰.

La minimisation des émissions dissipatives résultant de la production, mais aussi de l'utilisation des produits constitue le deuxième axe d'une stratégie éco-industrielle. De nombreux éléments contenus dans les métaux lourds toxiques tels que le chrome, le mercure ou le plomb sont disséminés dans la nature au cours de l'usage et ont un impact environnemental non négligeable. Or, on dispose généralement des technologies permettant de réduire ces dissipations nocives en améliorant les matériaux existants, en leur substituant des corps présentant des propriétés similaires mais étant moins dangereux ou en favorisant la récupération en fin de vie de certains produits, tels que les solvants de l'industrie chimique¹¹, afin d'éviter leur mise en décharge.

La dématérialisation des produits et des activités économiques, troisième élément présenté par Suren Erkman, consiste à diminuer le volume et la vitesse de circulation des flux de matière. Un des problèmes majeurs inhérent au mode de fonctionnement de notre système est en effet la durée de vie des produits¹². La dématérialisation ambitionne d'intégrer une quantité moindre de matières dans les produits et services, réduction permise par les progrès technologiques mais aussi par l'usage partagé. Elle vise également à améliorer la durabilité

¹⁰ Ces questions seront abordées dans la deuxième partie de ce mémoire.

¹¹ Pour certains solvants chlorés, Dow Chemicals a développé le concept « Rent a molecule », qui lui permet de vendre la fonction offerte par la molécule et non celle-ci. Ainsi la société américaine la récupère auprès de ses clients après usage.

¹² Cf. notes de bas de page 2 et 3

des produits en favorisant leur résistance, leur modularité au gré des évolutions, la compatibilité des composants constitutifs des différents appareils ou encore la maintenance régulière incluse dans les services proposés par les entreprises. Ces principes d'utilisation intensive et de durabilité jouent un rôle prépondérant dans l'émergence de l'économie de fonctionnalité, un business model novateur mis en œuvre par des multinationales telles que Xerox, Michelin ou Interface. Certains auteurs considèrent qu'elle fait partie intégrante de l'écologie industrielle.

Enfin, la diminution des émissions de gaz carbonique liées au processus de production et de consommation constitue le quatrième axe fondamental de l'écologie industrielle grâce à l'utilisation d'une quantité moindre et au remplacement des sources d'énergie actuelles par des énergies non fossiles. On retrouve ici un principe mis en exergue par les écologues à propos des systèmes naturels dont le fonctionnement repose avant tout sur l'utilisation de l'énergie solaire, une énergie renouvelable utilisée par exemple dans le cadre de la photosynthèse. Même si l'écologie industrielle semble accorder plus d'importance à l'étude des flux de matière, les flux d'énergie, associés à chacun d'eux, ne peuvent être négligés. L'optimisation de la circulation des matériaux au sein du système industriel contribuerait à réduire le gaz carbonique rejeté lors de leur transport et de leur transformation industrielle. Si une décarbonisation totale de notre système industriel, de même qu'une substitution des énergies renouvelables aux hydrocarbures, demeure peu envisageable à court terme au regard des technologies disponibles et de nos modes de production et de consommation, une réduction proportionnelle du carbone dans les sources d'énergie utilisées s'avère plus réaliste.

1.3. L'écologie industrielle à l'épreuve de la critique

Comme nous l'avons mentionné dans l'aperçu historique, près de trente ans ont été nécessaires pour que l'écologie industrielle s'impose comme un champ d'étude à part entière. Le désaccord quant au contenu de ce concept peut notamment expliquer cette inertie relative. La pertinence scientifique de l'analogie tout comme son aptitude à répondre à la problématique du développement durable sont remises en cause. Certaines critiques ne nous paraissent pas totalement justifiées, mais leur brève évocation nous permettra de préciser notre compréhension de cette approche ainsi que notre connaissance de ses limites et du débat qu'elle suscite.

1.3.1. La critique de l'analogie avec les écosystèmes biologiques

Certains universitaires s'interrogent tout d'abord sur le fondement scientifique de la métaphore écologique. Le modèle des écosystèmes naturels ne semble pas nécessairement adapté à la complexité inhérente aux activités socio-économiques, qui sont par définition hybrides, combinant des objets industriels, artificiels, avec des éléments naturels, qui échappent, au moins partiellement, au contrôle humain¹³. Dès lors, l'approche qui consiste à les envisager sous forme de flux de matière et d'énergie, que l'on peut quantifier, étudier et optimiser, peut s'avérer redoutablement simplificatrice. Franck-Dominique Vivien (2003) remarque ainsi que « *[l]es problèmes d'environnement auxquels les sociétés doivent faire face – et, en particulier, ceux concernant la gestion de la pollution – renvoient à des questions plus complexes que celles qu'étudie habituellement la science écologique* ».

Au-delà du caractère approprié de l'analogie avec les écosystèmes naturels, certains auteurs considèrent que sa pertinence est contestable. Dans le cadre d'une conférence organisée à la Haas School of Business en 2000 par une association d'entreprises à but non lucratif, « The Future 500 », sur le thème « Industrial Ecology 2000: Maximizing Shareholder Value, Lessons from the Natural World », John Harte, professeur à Berkeley, met l'accent sur les limites de l'application des principes biologiques aux activités économiques. Les écosystèmes naturels ne sont pas très efficaces, dans la mesure où la productivité moyenne de la photosynthèse est de l'ordre de 0,5% alors que celle des usines électriques est soixante fois supérieure. Les activités humaines vont plus loin dans la récupération des déperditions de chaleur, en utilisant par exemple celles générées par la production électrique pour le chauffage des bâtiments, alors que, dans la nature, l'énergie est utilisée une seule fois et les détritiques sont rejetés dans l'atmosphère. Enfin, il souligne que la sélection naturelle, reposant sur la compétition entre les espèces plutôt que sur la coopération, est en désaccord avec l'idéal humain de justice. L'ensemble des participants à cette discussion suggère donc de considérer la nature comme une contrainte limitante plutôt que comme un modèle. Néanmoins, les opinions divergent quant à la pertinence du modèle qu'offrent les écosystèmes vivants puisque, d'après Korhonen, Huisinck & Chiu (2004), la métaphore écologique encourage les entreprises à « *utiliser le modèle de la nature de recyclage des matières, d'utilisation en cascade de l'énergie et d'écosystème durable basé sur l'énergie solaire* », ce qui semble contradictoire avec les critiques formulées par Harte et ne nous permet pas de conclure.

¹³ Vivien, F.-D. (2003)

1.3.2. La critique des principes de l'écologie industrielle

En premier lieu, la méconnaissance de cette stratégie et son manque d'unité ne permettent pas de donner une base solide aux initiatives opérationnelles des entreprises. Des auteurs critiquent l'absence de certains éléments que d'autres considèrent comme inhérents au concept d'écologie industrielle. Ainsi, Oldenburg & Geiser (1997) regrettent que « *les écologistes industriels accordent (...) une considération limitée au traitement et aux pratiques d'élimination des déchets* », alors que la valorisation systématique des déchets est au cœur du premier des quatre principes définis par Erkman (1998) et que la prise en compte de la fin de vie du produit afin de faciliter le recyclage ou la réutilisation est mise en avant par Frosch.

Par ailleurs, la valorisation systématique des déchets comme ressources, qui traduit l'objectif ultime de bouclage de tous les flux de matière et d'énergie, n'est probablement pas possible ni même pertinente. Ehrenfeld (2004) s'interroge sur la valeur pragmatique de l'analogie et, à cette fin, cite Johansson qui lance le défi aux universitaires travaillant sur ce champ d'étude de démontrer son utilité pratique ou d'en déterminer les faiblesses ; il faut se demander « *si cette métaphore spécifique peut en effet servir à définir de nouvelles stratégies pour le développement industriel* ». C'est une question à laquelle nous nous efforcerons d'apporter une réponse dans une approche étendue de la création de valeur.

L'avancement actuel de la recherche relative à l'écologie industrielle s'avère de surcroît limité. Peu d'exemples opérationnels viennent corroborer l'affirmation de ses bénéfices économiques et environnementaux tandis que les études empiriques menées jusqu'à présent ont porté sur un nombre restreint de cas, n'ont pas toujours été quantifiées avec précision¹⁴ et se sont concentrées sur certains flux de matière ou d'énergie¹⁵ ainsi que sur la production en négligeant les étapes relatives à la consommation et au recyclage. L'intérêt de l'écologie industrielle demeure donc partiellement spéculatif¹⁶.

¹⁴ Karlsson, M. & Wolf, A. (2007)

¹⁵ Burström, F. & Korhonen J. (2001)

¹⁶ Gibbs, D. & Deutz, P. (2007)

1.4. Le choix dans ce mémoire d'une conception non restrictive de l'écologie industrielle

1.4.1. L'écologie industrielle : quel intérêt ?

Notre compréhension de l'écologie industrielle nous incite à penser que les critiques formulées à son encontre seraient justifiées si cette approche prétendait imiter la nature sans distinction et sans esprit critique. Une approche simplement mimétique conduirait en effet à nier les spécificités de ces deux objets d'étude et à remettre en question les évolutions technologiques qui ont permis aux activités humaines de se développer grâce à la transformation des ressources naturelles. Or, il nous semble que ce concept vise avant tout à stimuler la réflexion et la créativité des entrepreneurs et des dirigeants en les exhortant à sortir du schéma de pensée traditionnel et à changer de perspective : les ressources ne sont pas illimitées, le système industriel ne peut fonctionner sans la contribution de la biosphère, qu'il importe donc de préserver ; certains principes la régissant peuvent également inspirer une organisation nouvelle s'accordant mieux avec la notion de durabilité. Nous choisissons donc de considérer cette expression comme une métaphore ontologique plutôt que normative¹⁷, qui assimilerait complètement le système industriel et les écosystèmes naturels.

La démarche globale de l'écologie industrielle se traduit dans sa capacité à dépasser les frontières épistémologiques entre les disciplines académiques en rapprochant les théoriciens et praticiens de divers champs d'étude, de la biologie aux sciences humaines. Originalité notable et concordance avec les enjeux du développement durable, l'écologie industrielle sous-tend une approche globale et systémique, qui prend en considération l'ensemble des acteurs et la totalité du cycle de vie des produits et des services de l'amont à l'aval de la production, de l'extraction des matières premières et de la conception de ceux-ci jusqu'à leur consommation et au rejet des déchets finaux. Cette approche holistique doit influencer significativement la manière dont les entreprises envisagent leur stratégie et la gestion de leurs opérations. Elle permet de s'affranchir des cloisonnements sectoriels et fonctionnels traditionnels induits par une approche linéaire et d'une conception de l'organisation économique comme un rassemblement d'acteurs isolés. Le choix de l'expression « économie circulaire » pour les projets d'écologie industrielle menés en Chine traduit cette volonté

¹⁷ Ehrenfeld, J. (2004) : dans cet article, l'auteur distingue l'approche ontologique, qui envisage l'écologie industrielle comme un moyen d'élargir la réflexion, de l'approche normative, qui considère que la métaphore définit des normes quant à la conception d'un monde plus durable

d'inclure l'ensemble des activités économiques et de ne pas limiter leur champ à la seule industrie, comme pourrait le laisser penser l'adjectif « industrielle » au sens strict.

Alors que le développement durable apparaît souvent comme un concept flou manquant de contenu opérationnel, l'écologie industrielle propose une approche objective et quantifiée grâce à l'étude approfondie du métabolisme et des flux de matière et d'énergie internes aux entreprises et entre les acteurs économiques, préalable nécessaire à la définition de stratégies efficaces et efficientes. Face aux constats pessimistes évoqués dans l'introduction, l'écologie industrielle ne considère pas les questions environnementales comme auxiliaires mais les place au cœur de la stratégie de l'entreprise.

1.4.2. Les critères essentiels et la définition choisie

Contrairement à Robert Frosch, qui, en 1995, définissait l'écologie industrielle comme « *l'ensemble des pratiques destinées à réduire la pollution industrielle* »¹⁸, nous envisageons cette approche sous un angle plus restrictif. Les sociétés du secteur environnemental (gestion de l'eau et des déchets, production d'énergies renouvelables) et celles appartenant au secteur des « cleantechs » (production de technologies dites « propres » ou « vertes ») ne nous semblent pas devoir être incluses. D'après notre compréhension de l'écologie industrielle, cette qualification requiert en effet une approche systémique dépassant les stratégies environnementales menées individuellement par les entreprises. Ainsi, l'éco-conception ou la prévention amont de la pollution, initiatives menées en interne, pourraient faciliter le recyclage des produits, la réutilisation de certains sous-produits par d'autres entreprises, en évitant d'y incorporer des éléments trop complexes ou potentiellement nocifs ou encore favoriser une gestion mutualisée des déchets, mais sont insuffisantes si elles ne s'intègrent pas dans une démarche collaborative. L'écologie industrielle relève davantage d'un processus global que d'un produit particulier.

En ce sens, les synergies visant à améliorer l'impact environnemental des acteurs économiques et leur performance financière s'intègrent tout à fait dans l'écologie industrielle. Cyril Adoue (2007) distingue deux types de synergies dans le cadre de cette approche : les synergies de mutualisation consistent à mutualiser la production, l'approvisionnement (acquisition de matières utilisées en commun), l'évacuation (« coferroutage » ou « cocamionnage » des marchandises) ou le traitement des flux, tandis que les synergies de

¹⁸ Vivien, F.-D. (2003)

substitution permettent de substituer des matières, de l'eau ou de l'énergie aux éléments initialement employés dans les processus de production (les quantités importantes de sable issues du lavage des betteraves d'une usine sucrière peuvent ainsi être utilisées par une entreprise de travaux publics). La recherche de synergies témoigne de l'inscription des dimensions « Planet » et « Profit » au cœur des objectifs poursuivis par l'écologie industrielle.

En revanche, le bouclage des flux de matière et d'énergie ne nous semble pas un élément constitutif de l'écologie industrielle. En effet, les conditions de faisabilité sont particulièrement exigeantes (proximité géographique entre les entreprises et complémentarité entre l'offre d'effluents et la demande de ressources), réduisant significativement ses perspectives de développement et compromettant la mise en œuvre de l'écologie industrielle à une échelle autre qu'anecdotique.

Dès lors, nous envisageons l'écologie industrielle, comme l'ensemble des initiatives, s'inspirant de certains principes propres aux écosystèmes naturels, qui permettent d'intégrer la contrainte de limitation des ressources et de préservation de l'environnement dans la stratégie des acteurs économiques, en adoptant une approche holistique spatiale (interactions et collaboration entre acteurs des secteurs privé et public) et temporelle (prise en compte du cycle de vie des produits et services) visant à optimiser les flux de matière et d'énergie. La définition de Graedel (1994), qui décrit l'écologie industrielle comme « *une approche globale systémique qui prend en considération la conception des produits, les processus de production et la mise en œuvre de stratégies de production durables, 'en cherchant à optimiser le cycle de vie total des matériaux, des matières vierges aux produits finis, déchets et jusqu'à l'ultime élimination'* », nous semble la plus proche de notre conception du sujet.

Partie 2. Méthodologie de la recherche

Nous allons nous efforcer dans cette deuxième partie d'approfondir notre question de recherche initiale, « Dans quelle mesure l'écologie industrielle offre-t-elle aux entreprises un modèle alternatif de création de valeur, pour leurs dirigeants et leurs actionnaires, prenant en considération les enjeux environnementaux actuels ? », afin de mettre l'accent sur les enjeux qu'elle soulève.

2.1. Définition opérationnelle de notre objet d'étude

2.1.1. Définition empirique : une ou des écologies industrielles ?

Nous allons maintenant nous intéresser au contenu opérationnel de l'écologie industrielle afin de préciser l'objet empirique de notre étude.

D'après les articles académiques (Chertow (2000, 2004)), l'écologie industrielle se décline à trois niveaux opérationnels différents : au niveau microéconomique par des initiatives environnementales au sein de l'entreprise, au niveau mesoéconomique au travers des relations inter-entreprises à l'échelle d'une zone industrielle ou d'une ère géographique délimitée, et enfin au niveau macroéconomique par des réseaux d'entreprises intra- et extra-régionaux. Chertow propose également une typologie plus détaillée : la première catégorie identifiée est celle des systèmes de recyclage classiques, impliquant une interface entre l'organisation qui vend et celle qui collecte les produits en fin de vie ; la deuxième concerne les systèmes de bouclage des flux de matières et d'énergie au sein d'une usine ou d'une entreprise ; les systèmes d'échanges de matières et d'énergie constituent le troisième type lorsqu'ils relient des entreprises voisines sur une zone définie, le quatrième type lorsqu'ils ont lieu entre des entreprises locales mais non voisines, et, enfin, le cinquième type lorsque des entreprises organisées « virtuellement » interagissent à l'échelle d'une région.

Certains auteurs, à l'instar de Barnes (1998) ou d'Harper & Graedel (2004), mettent davantage l'accent sur les modalités d'implémentation de l'écologie industrielle que sur les formes d'organisation choisies pour ce faire. Différents outils sont présentés, insistant sur une prise en compte de l'ensemble du cycle de vie des produits de l'amont à l'aval. On peut ainsi

mentionner l'évaluation du cycle de vie du produit (« *Life-Cycle Assessment* ») ou l'analyse de la circulation des matières (« *Material Flow Analysis* »). Les objectifs affichés des ces méthodes analytiques sont d'améliorer l'utilisation des ressources naturelles afin de ralentir leur épuisement et l'impact environnemental négatif, en cherchant à dématérialiser l'économie et en développant une économie de services, en réduisant l'intensité matérielle des produits, et en utilisant en cascade les ressources pour des usages aux exigences décroissantes (par exemple, un wagon de train peut être utilisé dans un premier temps pour le transport des passagers, puis pour celui des marchandises). D'autres approches sont plus directement opérationnelles : la prévention de la pollution (« *Pollution Prevention* ») considère les effets polluants des produits en amont et s'efforce de les limiter ; l'éco-conception (« *Design for the Environment* ») consiste à définir en amont l'impact du produit sur l'environnement et à le concevoir de manière à minimiser celui-ci ; l'éco-efficience (« *Ecoefficiency* ») a pour objectif d'améliorer la qualité environnementale, l'efficience ainsi que la profitabilité des produits et services ; le parc éco-industriel (ou troisième type décrit par Chertow) regroupe sur un territoire donné des entreprises mutualisant certaines activités ou échangeant des sous-produits selon les principes du marché. Cependant, à nouveau, les différences entre ces approches ne sont pas très nettes, dans la mesure où l'éco-efficience, ou combinaison entre performance économique et performance environnementale, est souvent présentée dans la littérature académique comme une conséquence positive permise par une utilisation efficace des autres méthodes (« *Pollution Prevention* », « *Ecoefficiency* »...) au travers de la réduction de la consommation de matières et d'énergie et non comme un moyen à part entière de mettre en œuvre l'écologie industrielle.

Ces classifications des approches de la mise en œuvre de l'écologie industrielle nous confrontent donc à des difficultés similaires à celles rencontrées pour définir le concept ; l'écologie industrielle ne fait pas plus l'unanimité au niveau empirique qu'au niveau conceptuel. Ainsi, pour de nombreux auteurs, cette stratégie intègre aussi bien les pratiques individuelles que collectives. Le caractère indéfini de l'écologie industrielle, en théorie et en pratique, se traduit dans les initiatives de certaines entreprises qui se réclament de cette approche de manière parfois approximative. En témoigne l'exemple de Shell décrit par Anita Burke, Responsable Développement Durable de cette société lors de la conférence "Industrial Ecology 2000: Maximizing Shareholder Value, Lessons from the Natural World"¹⁹ organisée par la Haas School of Business : elle inclut ainsi la conformité réglementaire à l'échelle

¹⁹ In Roundtable discussion (2001). "Business as a living system: The Value of Industrial Ecology"

globale ou la prise en compte du coût carbone dans l'ensemble des décisions d'investissement dans la démarche du groupe pétrolier pour mettre en œuvre l'écologie industrielle, initiatives qui apparaissent relativement dérisoires au regard de la nécessité d'une approche systémique globale et de la détermination de priorités environnementales et de rentabilité que la responsable met en avant pour caractériser les actions de Shell.

Cependant, étant donné la définition conceptuelle que nous avons retenue dans la première partie de ce mémoire, définition qui sous-tend un effort d'approche systémique ainsi qu'un certain degré de collaboration entre les acteurs, notre étude ne portera pas sur les exemples se limitant aux seules initiatives relevant du premier type décrit par Chertow. En effet, même si ce mode de mise en œuvre de l'écologie industrielle envisage les interactions entre le vendeur et le collecteur des produits finaux, cette forme de management environnemental n'intègre pas la dimension holistique, qui nous paraît constituer l'apport majeur de l'écologie industrielle par rapport aux approches classiques. Les exemples de parcs éco-industriels ou de symbioses industrielles, comme celui de Kalundborg au Danemark qui fait office de référence en matière de pratique de l'écologie industrielle, intègrent cette notion de coopération entre les acteurs et nous semblent donc particulièrement intéressants pour notre travail. L'Agence Américaine pour la Protection Environnementale définit cette configuration de zone d'activité comme « *une communauté d'établissements industriels et de services cherchant à améliorer leur performance environnementale et leur performance économique en collaborant pour la gestion des problématiques environnementales (...). En coopérant, les entreprises cherchent à obtenir un bénéfice collectif qui dépasse les bénéfices cumulés des initiatives propres aux entreprises si celles-ci optimisaient leur seule performance particulière* »²⁰. D'après Zhu et Cote (2004), l'objectif ultime de ces communautés d'entreprises est de boucler les cycles de matières sur l'ensemble de leur cycle de vie, de l'extraction des matières premières à la consommation des produits et aux déchets finaux. Les parcs éco-industriels représentent donc un degré avancé d'accomplissement de la finalité et des éléments opérationnels caractéristiques de l'écologie industrielle, de même que les initiatives menées par les clubs d'entreprises locaux qui ont pour objectif la minimisation de leurs déchets (« *Waste Minimization Programmes* » mis en œuvre dans différents comtés du Royaume-Uni).

²⁰ Tudor, T., Adam, E. et Bates, M. (2007)

2.1.2. Définition de la création de valeur pour les entreprises

2.1.2.1. La profitabilité comme approche opérationnelle de la création de valeur par l'écologie industrielle

L'écologie industrielle nous intéresse en tant que modèle alternatif de création de valeur, permettant de concilier potentiellement des résultats économiques positifs et un impact positif (ou du moins neutre) sur l'environnement naturel.

Nous avons choisi de considérer la création de valeur sous l'angle des entreprises et de leurs actionnaires. Il ne nous semble pas pertinent d'étudier la création de valeur pour les autres parties prenantes, telles que les employés, les clients ou les riverains, dans la mesure où cela introduirait potentiellement la dimension sociale de la « triple bottom line », qui rendrait l'analyse plus complexe et peut-être plus subjective. Dans le cadre de cette étude, nous souhaiterions en effet évaluer les résultats quantitatifs en matière de profitabilité pour l'entreprise et d'impact sur l'environnement de la mise en œuvre de l'écologie industrielle, afin de déterminer s'il s'agit d'une stratégie efficace pour mettre en pratique le concept de développement durable. A défaut d'un double constat économique et environnemental systématiquement positif, il nous faudrait identifier les conditions favorisant le succès de cette approche.

La dimension « *Planet* » sera évaluée au travers des données présentes dans les études empiriques et faisant état de l'évolution des émissions, telles que la réduction du dioxyde de carbone ou du soufre généré par rapport aux procédés organisationnels classiques, ainsi que de l'utilisation de ressources naturelles (charbon, pétrole, eau). Il nous faudra à partir de ces informations déterminer si l'écologie industrielle peut neutraliser l'impact environnemental des activités des entreprises.

En ce qui concerne la dimension « *Profit* », c'est-à-dire la valeur ajoutée en termes économiques, nous étudierons la profitabilité des pratiques, grâce à l'évaluation des revenus et des coûts qu'elles génèrent. Ce choix s'explique par le degré d'avancement de la recherche théorique et empirique en matière d'écologie industrielle, peu d'informations chiffrées et d'études approfondies étant disponibles. Il ne s'avère notamment pas envisageable d'analyser la corrélation entre le cours boursier d'une société et le lancement d'un projet d'écologie industrielle afin d'évaluer l'intérêt de cette pratique pour les actionnaires. En effet, les actions entreprises se font généralement à l'échelle d'usines intégrées dans des parcs éco-industriels

ou de filiales, mais concernent rarement une société dans sa globalité. Dans le cas de la symbiose industrielle de Kalundborg, les synergies sont mises en œuvre entre des entités locales de taille réduite, telles qu'une centrale électrique ou une raffinerie pétrolière ; cette dernière, par exemple, est rattachée à une société norvégienne, Statoil, qui n'a pas initié de telles mesures pour l'ensemble de ses succursales. Dès lors, si nous parvenions à observer un potentiel de rentabilité pour l'écologie industrielle, celui-ci serait probablement limité ; son impact sur les résultats économiques de l'entreprise voire du groupe, et donc sur le cours boursier dans le cas où l'entité serait cotée, ne serait probablement pas observable directement. Nous envisagerons donc la notion de création de valeur sous l'angle de la rentabilité lorsque les données à notre disposition le permettent.

2.1.2.2. Les composantes du profit dans la mise en œuvre de l'écologie industrielle

Le profit d'une entreprise est fonction des revenus générés ainsi que des coûts fixes et variables nécessaires à l'activité. Avant d'évaluer la rentabilité des initiatives en matière d'écologie industrielle, nous allons donc identifier ces charges et ces bénéfices que nous devrions observer dans le cadre de notre étude empirique.

Comme le souligne Cyril Adoue dans un entretien accordé à La Revue Durable, « *Le système industriel n'est pas conçu pour favoriser les échanges de flux entre entreprises. Les procédés industriels se construisent indépendamment les uns des autres. Il est donc rare que les sous-produits des uns soient utilisables tels quels par les autres (...). Leur évolution nécessite du temps et des investissements* »²¹. La faisabilité technique, l'évaluation du métabolisme du système industriel, c'est-à-dire des flux et des stocks de matières et d'énergie, ainsi que l'identification d'opportunités de synergies de substitution ou de mutualisation entre les entreprises doivent faire l'objet d'études préalables qui requièrent des compétences en ingénierie et représentent donc un coût pour les entreprises. La qualité des flux, leur pureté et leur état physique permettent rarement des échanges sans aucune adaptation des procédés, mais les solutions technologiques ou organisationnelles disponibles, telles que la prévention en amont grâce au tri à la source pour éviter le mélange des déchets ou l'éco-conception des produits, permettent généralement de dépasser ces inadéquations qualitatives. Elles requièrent cependant des investissements pour adapter les installations industrielles ou pour acquérir des équipements. Les caractéristiques de l'organisation industrielle actuelle ne constituent pas le

²¹ La Revue Durable (2007) p.33

seul obstacle à la mise en œuvre de l'écologie industrielle ; le système réglementaire qui appuie cette organisation n'est pas neutre. La législation environnementale, en France par exemple, est très stricte quant à la gestion des produits possédant le statut de déchet, dont l'utilisation exige une procédure d'autorisation préfectorale longue et complexe, qui peut retarder l'emploi des équipements installés et donc le retour sur investissement. De même, les exigences de traçabilité imposées par certaines réglementations peuvent contrecarrer les efforts de collecte mutualisée des déchets. A ces coûts initiaux uniques, s'ajoutent d'éventuels coûts récurrents de maintenance et d'exploitation, puisque le fonctionnement des nouvelles installations peut nécessiter un accroissement du facteur travail avec des ressources humaines supplémentaires, ainsi que des coûts de transport des flux en fonction de leur état physique et de l'éloignement des entités qui collaborent. Comme le font remarquer Burström et Korhonen (2001), l'innovation environnementale, si elle est potentiellement source de création de valeur sur le marché « vert », peut néanmoins conduire l'entreprise à entreprendre plus d'actions que les « free-riders ». Etant donné les caractéristiques des législations actuelles souvent plus favorables aux améliorations graduelles qu'aux technologies de rupture, ces derniers en tirent un avantage compétitif à court terme.

Nous avons recensé les coûts additionnels, mais l'écologie industrielle pourrait également permettre une diminution significative des charges des entreprises, grâce à la mise en œuvre de synergies de substitution (l'achat des co-produits d'une entreprise est potentiellement moins onéreux que l'acquisition des matières premières primaires jusqu'alors employées dans les processus de production) et de synergies de mutualisation (la gestion mutualisée des déchets ou de l'approvisionnement pour des produits communs à différentes entités peut permettre de réaliser des économies d'échelle). Outre l'avantage économique tiré de la différence qualitative entre ressources d'usage primaire et ressources d'usage secondaire, l'utilisation de quantités moindres de matière ou d'énergie peut également être favorisée par une optimisation de la gestion des flux.

Contrairement aux stratégies environnementales classiques, telles que l'approche traditionnelle « end-of-pipe », et même les méthodes plus avancées, telles que la prévention amont de la pollution ou l'éco-conception, qui n'agissent qu'au niveau des coûts, voire des bénéfices indirects liés à une amélioration de l'image auprès des clients, l'écologie industrielle peut s'avérer une source de revenus supplémentaires pour l'entreprise. En effet, si on intègre le bouclage (même partiel) des flux de matière et d'énergie dans le cadre de son implémentation, la valorisation de certains effluents peut permettre d'obtenir une

rémunération grâce à leur revente à une autre entité, tout en supprimant les coûts de traitement des flux sortants, liés notamment au stockage ou à l'incinération des déchets.

Enfin, en plus de ces coûts et revenus directs, il faut prendre en considération les conséquences économiques indirectes, bien que celles-ci soient par nature plus difficiles à estimer ; il est de surcroît plus difficile d'identifier les liens de causalité entre la mise en œuvre de l'écologie industrielle et l'amélioration de l'image de l'entreprise auprès des consommateurs et des investisseurs, le perfectionnement du management de la qualité et de l'innovation ou encore les bénéfices inhérents à l'anticipation d'une rigidité accrue des contraintes réglementaires. Ces avantages relèvent plus du management stratégique que de l'optimisation de la profitabilité. Mais si l'écologie industrielle permet à l'entreprise de saisir des opportunités, elle peut aussi induire des menaces, dans la mesure où elle accroît l'incertitude de l'environnement dans lequel elle évolue. En effet, l'approvisionnement en ressources auprès d'une organisation avec laquelle la collaboration n'est pas coutumière, peut s'avérer problématique ; en cas de rupture de la production ou de modification des procédés de fabrication chez le « fournisseur », la pérennité de l'activité du « valorisateur » des produits dérivés sera mise en péril. Il existe également des risques commerciaux et sociaux pour les entreprises identifiées par la réglementation comme traitant des déchets, en raison d'une potentielle dévalorisation de leur image auprès de la clientèle ou de l'émergence de tensions avec les employés et les riverains, comme le syndrome « *Not In My BackYard* » (« *Où vous voulez mais pas chez moi* »). En effet, de nombreux recours peuvent être présentés devant une juridiction afin de remettre en cause la procédure préfectorale autorisant la valorisation des déchets. Ces démarches peuvent bloquer partiellement ou totalement l'activité, avec des conséquences financières notables. La mise en œuvre de synergies nécessite un échange d'informations quant aux procédés de production, généralement considérés comme confidentiels et donc une négociation relative aux termes de la collaboration ; ces pratiques, bien que pouvant au final permettre une meilleure utilisation des ressources et une meilleure gestion environnementale, nécessitent des efforts temporellement et financièrement coûteux.

2.2. Hypothèses de recherche

L'objectif de ce mémoire est de confirmer ou d'infirmer la promesse de l'écologie industrielle de contribuer à la réalisation effective des dimensions économique et écologique du développement durable. Les études de faisabilité menées préalablement à la mise en œuvre de tout projet dans cette discipline combinent les deux aspects. Ainsi, dans son essai *Mettre en œuvre l'écologie industrielle*, Cyril Adoue décrit les différents critères qui doivent être évalués successivement avant la concrétisation d'une synergie de substitution et, dans une moindre mesure, d'une synergie de mutualisation : la faisabilité technique, qualitative et quantitative doit être étudiée en premier lieu, suivie de la faisabilité réglementaire, puis économique, culturelle et enfin environnementale. La recherche d'un bénéfice économique précéderait donc le dessein de contribuer à réduire l'impact environnemental du système industriel. Etant donné ces observations et le double projet de l'écologie industrielle, nous faisons l'hypothèse que cette approche permet l'accomplissement de ces deux dimensions de la « triple bottom line ».

Cependant, la profitabilité de la gestion des questions sociales et environnementales par les entreprises suscite la controverse. De nombreux articles nourrissent ainsi le débat autour de la problématique de la compatibilité entre « *Profit* » et « *People* ». Prahalad est à l'origine de l'assertion « *Bottom of the pyramid* », selon laquelle les entreprises multinationales peuvent réaliser des profits significatifs en vendant leurs produits aux populations défavorisées, dont le potentiel commercial est souvent inexploité, tout en contribuant parallèlement à la réduction de la pauvreté en facilitant l'accès à de nombreux produits et services. Or, deux articles récents de Karnani viennent démontrer les failles de ce propos : la crème blanchissante pour la peau « Fair & Lovely » vendue en Inde par HLL, une filiale d'Unilever, et souvent montrée en exemple pour illustrer cette thèse, renforcerait les préjugés raciaux en tirant profit de la vulnérabilité d'une population particulièrement sensible à des arguments commerciaux promouvant une amélioration de sa condition sociale et une émancipation des femmes. En fondant son affirmation sur cet exemple, Karnani balaie donc d'un revers de main les prétentions sociales et humanistes des entreprises, en affirmant que la contrainte majeure ne relève pas de l'offre mais de la demande, dont la faiblesse s'explique par le niveau des revenus des consommateurs les plus pauvres. Il souligne de surcroît l'absence de pertinence

économique de cette théorie ; le faible potentiel du marché au bas de la pyramide offre des opportunités de profits relativement limitées.

Les démonstrations de Prahalad et de Karnani confirment l'intérêt qu'il existe à évaluer la pertinence de la réalisation combinée des différentes dimensions du développement durable, mais les résultats contradictoires obtenus invitent à approfondir l'analyse de cette problématique. En effet, un constat assez similaire peut être dressé pour la conciliation de la rentabilité financière et de la performance environnementale. Un article de la *Revue Française de Gestion* (Boiral, 2005) souligne ainsi que les études conduites au sujet des stratégies environnementales des acteurs économiques démontrent, selon les objectifs poursuivis par leurs auteurs, soit que « Profit » et « Planet » sont antithétiques, soit qu'il est possible de générer de la valeur économique en améliorant la gestion des questions environnementales. Boiral oppose le modèle classique, qui considère la prise en compte de la biosphère comme une contrainte générant des coûts additionnels, à celui reposant sur « l'hypothèse de Porter », selon laquelle les approches « win-win » sont possibles, l'intégration des préoccupations environnementales dans la stratégie s'avérant une source de compétitivité accrue. Les études empiriques existantes viennent corroborer ces deux thèses apparemment antagoniques. Le seul exemple de l'entreprise américaine Dow Chemicals est particulièrement révélateur : un programme de réduction des déchets à la source a permis un retour sur investissement de 55%, mais, globalement, les deux cent milliards de dollars investis la même année dans des stratégies environnementales ont eu un retour sur investissement négatif de 16%. La complexité des enjeux environnementaux rend les considérations manichéennes, qui opposent la conception « win-win » à la conception « win-loose », très peu pertinentes dans un contexte où le développement durable devient une préoccupation tout autant politique qu'économique. L'exigence d'une approche contingente de la problématique de la conciliation entre compétitivités économique et environnementale conduit Boiral à formuler cinq conditions essentielles au succès de ces mesures :

- Les initiatives environnementales ont des résultats économiques positifs, bien que difficiles à isoler, lorsqu'elles sont intégrées dans une politique globale d'excellence manufacturière et de management de la qualité. Elles se confondent alors avec les bonnes pratiques de gestion.
- Les approches palliatives consistent en des investissements en aval de la production, qui ne modifient pas les processus de manière notable et ont donc un impact limité sur la rentabilité, alors que les mesures préventives supposent une transformation radicale des

techniques ou de l'organisation de la production, plus susceptibles d'être profitables pour les entreprises.

- L'efficacité marginale des stratégies environnementales est décroissante, les résultats en matière de réduction de la pollution étant plus significatifs pour les investissements initiaux ; les actions des entreprises les plus avancées génèrent donc généralement des retours sur investissements moindres.
- L'anticipation des changements des contraintes réglementaires est d'autant plus importante que le renouvellement des technologies et des équipements dans le secteur d'activité est long et coûteux.
- La prise en compte des parties prenantes, telles que les clients, les pouvoirs politiques ou encore les autres entreprises, est d'autant plus nécessaire que l'image de l'entreprise est sensible aux pressions extérieures et est valorisée par des actions environnementales.

Nous formulons donc l'hypothèse qu'il existe une variabilité importante dans le degré d'achèvement des objectifs économiques et environnementaux de l'écologie industrielle ; nous pensons que les résultats observés dépendront de certains éléments sectoriels et organisationnels, concernant notamment la capacité des acteurs à dépasser le paradigme concurrentiel pour parvenir à collaborer et la flexibilité du système pour s'adapter à un environnement changeant, ainsi que d'autres caractéristiques qu'il nous faudra déterminer précisément.

Nous chercherons par ailleurs à déterminer dans quelle mesure la typologie proposée par Boiral dans l'article cité précédemment s'applique à l'écologie industrielle. On peut en effet supposer, qu'ayant passé en revue un nombre représentatif d'initiatives entrepreneuriales en matière d'environnement, les principes généraux de réussite que l'auteur a identifiés sont pertinents pour cette approche spécifique. Il est à noter que les deux premiers éléments nous semblent inhérents au concept d'écologie industrielle, puisqu'il s'agit d'une stratégie globale d'amélioration des processus visant à réduire l'impact environnemental du cycle de vie du produit, de l'amont à l'aval. Il en va de même du dernier, dans la mesure où l'approche systémique prônée par les partisans de l'écologie industrielle intègre l'ensemble des parties prenantes de l'entreprise. Dès lors, il semblerait que cette classification ne soit pas suffisamment précise et spécifique pour nous permettre d'évaluer les différents degrés de réussite des projets d'écologie industrielle ; elle constitue cependant une base intéressante pour notre travail et nous permet d'affirmer que cette démarche compte a priori parmi les initiatives environnementales permettant de concilier environnement et compétitivité.

2.3. Le choix d'une méthodologie adaptée

Il nous faut maintenant expliquer le choix de notre méthode d'analyse, ce qui inclut la sélection d'un échantillon approprié et l'identification de sources d'information pertinentes.

L'étude comparative nous semble la mieux à même de rendre compte de la diversité que l'on observe dans la mise en œuvre de l'écologie industrielle, aussi bien quant à leur échelle, de la zone industrielle au programme national, qu'à leur contenu opérationnel, du simple club de minimisation des déchets à la collaboration avancée incluant des échanges de matière et d'énergie entre entreprises. Certains projets datent des années 1970, mais la plupart sont en cours de réalisation; les initiatives viennent du secteur privé ou du secteur public, voire du tiers-secteur avec des associations pro-actives en la matière. Mais diversité ne signifie pas multiplicité, car force est de constater, qu'aussi séduisant le concept puisse sembler, il n'existe pas pléthore de réalisations concrètes, en particulier en France, où la conduite de projets de recherche constitue le degré d'avancement ultime à l'heure actuelle. Il est en effet paradoxal de constater que l'écologie industrielle, bien que popularisée au début des années 1990 par des cadres de l'industrie, qui ont réussi là où les universitaires avaient jusqu'alors échoué, ne rencontre en pratique qu'un écho limité auprès des entrepreneurs et des dirigeants d'entreprise. Certains auteurs, à l'instar de Gibbs et Deutz (2007), soulignent la divergence entre la théorie et la mise en application (« *implementation gap* »), peu d'exemples opérationnels permettant de valider les affirmations de l'écologie industrielle conceptuelle. Fan, Bourg et Erkman (2006) dénombrent ainsi une cinquantaine d'éco-parcs, dont la majorité consiste en des opérations éparses et parmi lesquels aucun n'atteint le degré d'achèvement de la symbiose industrielle de Kalundborg en termes de synergies et d'échanges.

Notre sélection de cas a donc essentiellement consisté à trouver des études empiriques suffisamment documentées. Nous avons choisi d'analyser les travaux les plus fouillés auxquels nous avons eu accès, soit vingt-six cas de parcs éco-industriels plus ou moins intégrés et de clubs d'entreprises. Ce nombre nous paraît assez représentatif ; en effet, les études comparatives des articles de recherche que nous avons consultés portent sur six (Heeres, Vermeulen et de Walle, 2004) à seize cas (Gibbs et Deutz, 2007). Les données collectées sont issues de travaux menés par des universitaires et publiés dans des revues académiques, majoritairement anglo-saxonnes, telles que le *Journal of Cleaner Production*, *Ecological Economics* ou encore *Resources, Conservation and Recycling*. Une autre source

d'information riche provient de rapports d'évaluation réalisés par des associations telles qu'APREIS (Acteurs, Pratiques, Recherches Internationales pour le développement durable) ou par des projets financés par l'Union Européenne tels qu'ECOSIND (Ecosystème Industriel). Enfin, des personnes impliquées dans des initiatives en matière d'écologie industrielle ont été contactées directement afin d'obtenir des compléments d'information et des données plus précises concernant notamment la recherche menée par l'association Ecopal sur les opportunités d'un développement éco-industriel dans la région de Dunkerque et le projet Ecosite conduit dans le canton de Genève en Suisse.

Outre la difficulté rencontrée pour trouver des exemples pertinents permettant d'apporter une réponse à notre question de recherche, il faut également souligner l'absence d'uniformité des études empiriques consultées. De ce fait, il s'avère impossible d'agréger les informations obtenues, tant les durées et les échelles des observations, de même que la précision des travaux diffèrent. Au problème posé par la divergence entre le concept et la transcription opérationnelle de l'écologie industrielle s'ajoute ainsi la complexité d'obtention d'informations fiables quant à la validation empirique de la réalisation d'un double objectif économique et environnemental, complexité qui est évoquée dans plusieurs articles (Suh et Kagawa, 2005 ; Burström et Korhonen, 2001). En effet, certains auteurs se contentent d'affirmer les bénéfices économiques et la réduction de l'impact environnemental permis par la mise en œuvre de l'écologie industrielle, tandis que d'autres conduisent des entretiens et des analyses quantitatives approfondies ou construisent des modèles mathématiques élaborés appuyant leur démonstration. La majorité des études se révèle de surcroît partielle, se concentrant sur certains flux et stocks de matière et d'énergie, ou peu détaillée, précisant les résultats obtenus pour l'ensemble du système d'échanges et de coopération mis en place, ce qui ne permet pas de rendre compte de l'éventuelle diversité des résultats obtenus pour chacune des entités participant. On entraperçoit ici les limites de l'analyse d'une stratégie complexe ayant des ambitions « globales » dans le cadre d'un mémoire de recherche.

Partie 3. Analyse des résultats de l'étude empirique

3.1. Les exemples de mise en œuvre de l'écologie industrielle : une confirmation de la combinaison environnementale et économique « gagnant-gagnant » ?

Notre étude empirique, dont les résultats détaillés sont présentés dans l'Annexe 1, se propose de comparer vingt-six exemples de déclinaison opérationnelle des principes de l'écologie industrielle.

Sur les vingt-six cas analysés, seuls dix ont fait l'objet d'une évaluation relativement approfondie des résultats économiques et environnementaux obtenus, tandis que, pour sept d'entre eux, les conséquences de l'implémentation de l'écologie industrielle dans des parcs éco-industriels ou des clubs d'entreprises sont très peu, voire absolument pas chiffrées. Certains travaux se concentrent ainsi sur les résultats observés pour certains flux de matière ou d'énergie ou se contentent seulement d'affirmer leurs conclusions sans les documenter.

3.1.1. Une réduction du fardeau environnemental plutôt qu'un impact positif

Le tableau récapitulatif présenté en Annexe 1 de ce mémoire souligne les opportunités de réduction de la consommation de ressources telles que l'électricité, le pétrole, le charbon, l'eau et diverses matières premières utilisées dans les procédés industriels grâce à des efforts d'amélioration de l'efficacité des processus au travers de différentes synergies de substitution ou de mutualisation mises en œuvre. Les exemples de parcs éco-industriels et de regroupements d'entreprises illustrent par ailleurs la possibilité d'une restriction des quantités de déchets produits et mis en décharge. Enfin, les résultats observés semblent attester d'une diminution des émissions néfastes pour l'environnement, telles celles de dioxyde de carbone ou de dioxyde de soufre, diminution permise par l'application de principes propres à

l'écologie industrielle (cf. notamment les cas 1, 2, 6, 7, 9, 15, 24 et 26 du tableau de l'Annexe 1).

Aucun des travaux consultés ne prétend cependant à une revue exhaustive de la circulation de matière et d'énergie, la plupart d'entre eux se concentrant sur les ressources globalement reconnues comme nocives pour l'environnement (dioxyde de carbone et autres gaz à effet de serre, combustibles divers, eau...). Il s'avère de surcroît difficile de quantifier précisément la diminution du volume pour l'ensemble des flux entrants et sortants des systèmes de production des entreprises considérées individuellement. En effet, en raison du principe de coopération inhérent à l'écologie industrielle, les mesures se font souvent à l'échelle meso, pour un système donné, ce qui ne permet pas d'évaluer les résultats pour chacune des entreprises participant au projet et rend plus complexe une analyse dans la variance des réalisations (en fonction, par exemple, du secteur d'activité à laquelle l'entreprise appartient, de sa taille, de son mode de management...). Seule une étude propose une recherche approfondie pour une entreprise donnée, mais ce travail est rendu possible par les modalités choisies par cette société chinoise (cf. cas 24) pour mettre en œuvre l'écologie industrielle ; cette dernière envisage les synergies non pas avec des organisations extérieures mais entre les différentes entités qui la constituent.

De même qu'il n'existe pas d'analyse microéconomique, l'absence d'évaluation macroéconomique n'est pas sans poser problème pour une stratégie environnementale qui prône une approche systémique globale. En effet, même si l'écologie industrielle conceptuelle souligne la nécessité de prendre en compte l'ensemble du cycle de vie du produit, les exemples pratiques intègrent peu cette dimension et les études existantes se focalisent avant tout sur la production, négligeant l'impact environnemental de la consommation. Ehrenfeld (2004) souligne ainsi le possible effet « rebond » (« *rebound effect* ») de l'éco-efficience. Si l'on considère qu'une efficience environnementale accrue (réduction de la consommation de matière et d'énergie) se traduit par des gains économiques (nous étudierons l'impact de l'écologie industrielle sur la rentabilité des entreprises dans la partie 3.1.2), un surplus peut être généré pour le consommateur (si l'entreprise répercute l'avantage obtenu en diminuant par exemple le prix de ses produits ou en augmentant les revenus de ses employés). Celui-ci consommerait alors davantage, annihilant tout ou partie des effets positifs liés à une production moins néfaste environnementalement. Les réalisations opérationnelles de l'écologie industrielle ainsi que leurs évaluations ne semblent donc pas toujours à la hauteur des objectifs fixés ni des enjeux liés aux préoccupations du développement durable. Nous ne

disposons donc pas de tous les éléments nous permettant d'évaluer de manière pertinente les effets environnementaux de l'écologie industrielle.

Si cette approche permet de réduire l'impact environnemental des activités économiques, elle ne satisfait cependant pas parfaitement l'assertion de la « triple bottom line », selon laquelle il existe une opportunité de bénéfice pour l'environnement, si l'on entend par le terme bénéfice un impact positif. En effet, dans les travaux considérés, il est question de diminution des conséquences négatives, mais en aucun cas de neutralité et encore moins d'effet environnemental positif, puisque les émissions dissipatives de la production industrielle (et agricole) ne sont pas totalement supprimées, tandis que l'extraction de matières premières de la biosphère continue. La stratégie 3R, « Reduce, Reuse, Recycle », qui est au cœur de l'implémentation de l'écologie industrielle, n'induit en effet pas de remise en cause de l'utilisation de ressources naturelles dans le cadre des activités économiques ; elle vise davantage à une dématérialisation progressive de la production et de la consommation et met l'accent sur une diminution de la quantité de matière incorporée par unité de produit ou de service vendue au client (comme le propose la notion « *d'unité d'utilisation* » développée par l'Institut Wuppertal). On peut néanmoins envisager que la concrétisation des objectifs ultimes de l'écologie industrielle conceptuelle se traduirait au niveau opérationnel par la création de boucles fermées, la matière et l'énergie étant réutilisées ou recyclées continuellement grâce à la mise en œuvre d'un écosystème industriel réel ; un tel fonctionnement mettrait fin à la ponction des ressources disponibles. Si elle demeure peu réalisable, cette application idéale souligne néanmoins le potentiel de l'écologie industrielle qui, à défaut de permettre de créer des ressources naturelles, pourrait contribuer à approcher de la neutralité environnementale.

L'hypothèse d'un avantage environnemental (qui relève ici d'une amélioration et se distingue de l'impact positif ou neutre envisageable à plus long terme) n'étant pas infirmée par notre étude empirique, il nous faut donc analyser maintenant la deuxième dimension de la « triple bottom line » à laquelle notre recherche est consacrée, à savoir le bénéfice économique de ce type de pratique.

3.1.2. Des bénéfices économiques effectifs mais limités et peu évalués

Afin d'évaluer la dimension économique, nous avons choisi d'étudier la rentabilité des projets d'écologie industrielle. Cependant, les travaux de recherche qui se sont intéressés aux exemples de parcs éco-industriels et de clubs d'entreprises présentés en annexe recensent rarement l'exhaustivité des coûts et des revenus que nous avons identifiés dans nos hypothèses. Les analyses les plus étayées présentent les investissements réalisés initialement pour adapter les processus existants à la mise en œuvre de synergies et donc faciliter la compatibilité qualitative des flux de matière et d'énergie entre les organisations qui coopèrent. Elles font également mention des pertes ou des gains économiques générés annuellement par le fonctionnement des entreprises suivant une stratégie éco-industrielle (cf. notamment les cas 1, 6, 7, 9, 12, 15, 19, 21 et 24 du tableau de l'Annexe 1, pour lesquels les chiffres sont les plus précis). Sur les vingt-six études de cas réalisées, les recherches empiriques indiquent des bénéfices économiques pour quinze d'entre elles, ce qui représente environ 56 % des projets observés. Lorsque des investissements ont été réalisés, le retour sur investissement est positif après une période d'une durée variant de deux ans (comme pour l'Ecoparc de Saint-Félicien à Québec au Canada, cas 17) à dix ans (résultats prévisionnels pour Fairfield à Baltimore aux Etats-Unis d'Amérique, cas 19). La symbiose industrielle de Kalundborg (cas 1), qui est pionnière en matière d'application des principes de l'écologie industrielle et qui est souvent considérée comme un modèle international par et pour les autres initiatives, a fait l'objet de nombreuses études, ce qui nous permet de croiser les résultats de plusieurs sources. Ceux-ci sont sensiblement homogènes et signalent un retour sur investissement en quatre à cinq ans pour les entreprises impliquées, ce qui semble assez caractéristique du potentiel de l'écologie industrielle au regard des autres exemples étudiés.

Les résultats observés doivent néanmoins être nuancés, car même pour les cas où nous disposons de chiffres précis, les auteurs mentionnent des limites. Beaucoup d'auteurs soulignent par exemple le caractère particulier du cas qu'ils étudient, excluant toute généralisation possible des conclusions de leurs travaux. Ainsi, Karlsson et Wolf (2007) ont réalisé un examen très précis à partir d'une méthode de modélisation des flux de matière et d'énergie entre les entités d'un système de coopération entre quatre usines dans l'industrie forestière (cas 26). Cette approche leur permet d'identifier les améliorations possibles de l'organisation grâce à une comparaison des coûts des différentes configurations afin d'aider à

la prise de décision lors de la planification de symbioses industrielles. Ils démontrent que, dans les six modèles de collaboration envisagés, plus le système est intégré (c'est-à-dire plus les échanges sont nombreux entre les entités participantes), plus son coût total est réduit et plus sa stabilité est grande par rapport au fonctionnement autonome des organisations. Les auteurs précisent cependant qu'ils ne peuvent généraliser les conclusions tirées de cette étude de cas ; afin de confronter les seuls coûts de fonctionnement des diverses configurations, ils choisissent également de ne pas intégrer les investissements nécessaires dans leurs calculs. Il est possible de démontrer qu'une symbiose industrielle peut générer des bénéfices économiques, mais la magnitude de ceux-ci doit être évaluée au cas par cas. Ce constat ne permet pas d'affirmer que la dimension « Profit » de l'écologie industrielle est systématiquement positive. De même qu'au niveau environnemental il n'existe pas d'analyse détaillée des résultats pour chaque entité, la répartition des bénéfices économiques est rarement envisagée.

Il faut souligner de surcroît que nous ne disposons pas d'analyses quantitatives précises pour un certain nombre d'initiatives en cours, en raison du caractère souvent jugé confidentiel des données relatives aux flux de matière et d'énergie des entreprises ou tout simplement de l'absence d'indicateurs de performance mis en place pour évaluer les réalisations. D'autres exemples témoignent d'une absence de rentabilité qui menace leur pérennité, à l'instar du parc éco-industriel de Cape Charles aux Etats-Unis (cas 20). Créé à partir de zéro en 1994 par le President Council for Sustainable Development, ce dernier a nécessité des investissements s'élevant à 7,5 millions de dollars, mais, d'après une étude de 2007, la désignation d'EIP (« Eco-Industrial Park ») n'a pas permis d'améliorer la compétitivité économique du site, qui est actuellement en vente, sans qu'aucun acheteur potentiel ne soit prêt à opérer le parc sous le système des engagements restrictifs destinés à promouvoir un comportement éco-industriel²².

L'absence d'homogénéité dans les résultats des vingt-six projets d'écologie industrielle évalués dans le cadre de notre mémoire nous incite à préciser les conditions de succès des initiatives environnementales conduites par les entreprises. De nombreux travaux ont déjà été menés à ce sujet et nous souhaitons les mettre en parallèle avec nos observations, afin de valider ou non les typologies proposées et de déterminer dans quelle mesure celles-ci sont applicables à l'écologie industrielle en particulier.

²² Gibbs, D. & Deutz, P. (2007)

3.1.3. Le choix d'une approche contingente ou l'identification des conditions de succès des initiatives en écologie industrielle

La variabilité des résultats obtenus signifie que l'application du concept d'écologie industrielle ne suffit pas à garantir la performance économique d'une stratégie intégrant l'environnement au cœur de son développement.

3.1.3.1. Mise en parallèle des résultats avec la typologie des stratégies environnementales proposée par Boiral

Constatant l'ambivalence de la combinaison entre profitabilité et performance environnementale, l'article de Boiral publié dans la *Revue Française de Gestion* en 2005 proposait, comme nous l'avons évoqué dans la partie 2.2. de ce mémoire, une classification en cinq points des initiatives menées.

Le premier et le deuxième éléments, à savoir l'intégration des projets environnementaux dans une politique d'excellence manufacturière et le caractère préventif de la démarche, nous semblent caractéristiques de l'écologie industrielle, puisqu'il s'agit d'une stratégie qui vise à améliorer la performance globale des entreprises, de la conception des produits jusqu'à leur élimination ultime, grâce à une meilleure efficacité dans l'utilisation des ressources et à la mise en œuvre de synergies entre les acteurs. Suren Erkman écrit ainsi dans un article du *Journal of Cleaner Production* : « *La motivation réelle pour cette évolution [vers un écosystème industriel] repose manifestement sur une compétitivité accrue : l'écologie industrielle est un moyen pour les entreprises de mieux exploiter leurs produits et leurs ressources (notamment leurs déchets), plus efficacement* »²³. Ces deux points ne nous permettent donc pas d'identifier des motifs de variabilité dans les résultats que nous avons observés, mais confirment, si l'on se fie aux travaux de Boiral, que l'écologie industrielle est une approche environnementale particulièrement pertinente dans une perspective « win-win ».

Nous ne disposons pas des données nous permettant d'estimer l'évolution de la profitabilité des initiatives en fonction du degré d'avancement et d'implication de l'entreprise en matière environnementale et donc de valider ou d'infirmer l'assertion concernant le rendement décroissant des investissements. On peut cependant envisager que les bénéfices initiaux de l'écologie industrielle soient significatifs étant donné la rupture organisationnelle

²³ Erkman, S. (1997)

et opérationnelle induite (recherche d'efficacité dans l'utilisation des ressources, mutualisation de services, coopération...) et que la mise en œuvre d'échanges supplémentaires entre les entreprises ait un retour sur investissement moindre.

Si l'action structurante des politiques publiques peut contribuer à la réussite de ces projets, l'importance de la capacité à devancer les évolutions réglementaires nous paraît difficile à apprécier. En effet, nous ne connaissons pas précisément le contexte législatif des pays ou régions dans lesquels ils ont été mis en place ni les spécificités des différents secteurs d'activités en termes d'investissements. Néanmoins, l'exemple de Kalundborg (cas 1) semble valider cette hypothèse : les entreprises participant à cette organisation relèvent principalement de l'industrie lourde (raffinerie pétrolière, centrale électrique ou usine de fabrication de matériaux de construction) ; on peut supposer que le coût et le temps de renouvellement de leurs installations sont relativement importants. Or, la législation et les taxes écologiques, qui ont été implémentées après la création de la symbiose industrielle dans les années 1970²⁴, ont contribué à rendre les échanges de flux entre les industriels de plus en plus avantageux. Une adaptation visant à satisfaire des normes environnementales devenues plus exigeantes n'a pas été nécessaire, permettant ainsi de limiter les coûts et confirmant les bénéfices d'une approche anticipative des changements réglementaires.

Quant au dernier point, relatif à la sensibilité de l'image de l'entreprise aux pressions extérieures et sa valorisation par des actions environnementales, même si les travaux consultés ne nous permettent pas d'évaluer l'impact réputationnel de l'écologie industrielle (les études dont nous disposons n'ont pas cherché à chiffrer la perception de l'opinion publique ni des clients, ni à mesurer la valorisation possible sur les marchés financiers, mais soulignent ce potentiel), il faut noter que nombre d'entreprises intégrées dans des symbioses ou des parcs éco-industriels appartient à des secteurs d'activités particulièrement affectés par les critiques adressées aux activités économiques relativement à la pollution qu'elles génèrent. Les parcs incluent fréquemment des usines pétrochimiques, métallurgiques, forestières ainsi que des centrales électriques qui gagnent à se montrer pro-actives dans leur gestion des préoccupations environnementales. Mais cet argument demeure insuffisant. En effet, la présence de ces sociétés peut être justifiée par l'importance de l'efficacité énergétique, notamment électrique, dans tous ces projets ; l'intérêt de la cogénération et de la recherche de complémentarités entre les activités, afin de mettre en œuvre des synergies de mutualisation ou de substitution, apparaît alors évident. La faisabilité et l'efficacité des processus industriels

²⁴ La Revue Durable (2007).

précèdent donc probablement la recherche d'un avantage commercial dans les motivations des entreprises. Etant donné le degré d'avancement des recherches actuelles et l'attention portée par les études sur les phases productives, il nous semble donc difficile d'affirmer que les bénéfices économiques peuvent être corrélés à la vulnérabilité des entreprises quant aux questions environnementales.

Dans le cas de l'écologie industrielle, la classification proposée par Boiral ne s'avère pas suffisamment précise ni adéquate pour expliquer la réussite économique incertaine des cas étudiés. Par ailleurs, les données disponibles ne permettent pas une analyse reposant sur des critères qui requerraient une analyse plus approfondie. Il nous faut donc chercher d'autres conditions de succès au regard des informations fournies par les travaux consacrés aux projets existants.

3.1.3.2. D'autres facteurs identifiés grâce à notre étude comparative

3.1.3.2.1. Un environnement réglementaire et culturel influençant l'émergence de projets en écologie industrielle

Sur les vingt-six cas analysés dans notre étude, neuf ont été conduits dans des pays du Nord de l'Europe (Danemark, Suède, Finlande, Pays-Bas) ou germaniques (Autriche, Suisse), tandis que onze projets ont été menés dans des pays « anglo-saxons » (Royaume-Uni, Etats-Unis d'Amérique, Canada, Australie), dont sept en Amérique du Nord. Ce constat démontre que l'environnement dans lequel opèrent les entreprises est un fondement nécessaire à l'affirmation du modèle de l'écologie industrielle et confirme les propos de Christian Traisnel²⁵, directeur de l'association CD2E, Création Développement d'éco-entreprises, dans la région Nord-Pas de Calais. Ce dernier souligne le rôle clé de la législation, qui apparaît notamment plus favorable dans les pays du Nord de l'Europe. Ainsi, aux Pays-Bas, les taxes sur les déchets sont quatre à cinq fois supérieures à celles existant en France tandis que leur épandage et leur stockage sont interdits. De même, le cadre réglementaire danois impose aux entreprises de soumettre au gouvernement régional les plans détaillant les efforts de réduction de la pollution, tandis que sa souplesse facilite une collaboration réelle entre les instances gouvernementales et les entreprises réglementées ; une certaine marge de manœuvre est laissée aux acteurs privés, ce qui stimule leur capacité d'innovation. Au Royaume-Uni, pays connu pour son retard en matière environnementale, la réglementation devient

²⁵ Entretien téléphonique réalisé le 12 février 2008

progressivement plus contraignante, avec une taxe sur les déchets mis en décharge qui augmente au fil des années. Enfin, en 2002, le gouvernement central chinois a promu l'écologie industrielle comme stratégie de développement, stimulant la création de parcs éco-industriels par des lois ainsi que par des instruments économiques incitatifs. Les autorités publiques jouent donc un rôle structurant dans l'émergence d'initiatives entrepreneuriales en matière d'écologie industrielle.

A la dimension législative, s'ajoutent les spécificités culturelles quant aux questions environnementales et économiques. Celles-ci permettent d'appréhender les divergences dans les valeurs et les pratiques nationales et justifient une capacité plus ou moins prononcée des entreprises à dépasser l'approche concurrentielle traditionnelle pour coopérer. Ainsi, Guillaume Massard, animateur du groupe de sociétés prenant part au projet Ecosite (cas 8) mené dans le cadre de la loi cantonale sur l'Agenda 21 à Genève, insiste sur le « *niveau de connaissances en matière d'environnement et de flux (...) très élevé* »²⁶. Grâce à l'éducation faite en amont par les services de l'Etat, l'implication des entreprises est facilitée. La collaboration ne va pas de soi dans le milieu des affaires, où la recherche d'un avantage compétitif passe davantage par la concurrence que par les échanges et le travail en commun ; or, d'après la littérature relative à l'écologie industrielle et les entretiens réalisés dans le cadre de ce mémoire, cet élément est décisif. L'émergence spontanée de la symbiose industrielle de Kalundborg a été favorisée notamment par la culture de gestion ouverte et transparente qui prévaut dans les pays scandinaves ainsi que par l'esprit d'équipe et le climat de confiance propres à la petite ville danoise et mis en avant par Jorgen Christensen, dirigeant d'une des usines participant à l'initiative. Un tel environnement est propice à l'échange d'informations, notamment de données confidentielles relatives aux procédés de production. Cet échange préside à la recherche de synergies et donc à la mise en place de programmes d'écologie industrielle.

Mais, réglementation flexible ou incitative et sensibilité aux préoccupations environnementales, si elles facilitent les échanges de co-produits et la valorisation des déchets entre les organisations, ne sont pas nécessairement synonymes de réussite pour les projets éco-industriels initiés. En effet, seules quatre des neuf réalisations nordiques et huit sur onze projets anglo-saxons génèrent des bénéfices économiques, bénéfices qui demeurent de surcroît incertains et rarement chiffrés avec précision. Le contexte national ne s'avère donc pas discriminant dans le succès de l'écologie industrielle ou ne suffit du moins pas à justifier

²⁶ La Revue Durable (2007)

les variances au sein de zones géographiques relativement proches voire les degrés variables de réussite dans un même pays (comme l'illustre l'exemple des Pays-Bas, cas 9 et 10).

3.1.3.2.2. D'autres facteurs à l'échelle de l'entreprise ou de la zone industrielle ont un rôle déterminant

Notre étude comparative illustre les résultats économiques jusqu'à présent modérés que l'écologie industrielle a permis d'atteindre. Même si les entreprises impliquées sont prêtes à investir dans des infrastructures nécessaires à la mise en œuvre de synergies, l'avantage offert par la valorisation de co-produits ou la mutualisation de certains services n'est pas suffisant pour justifier le déplacement des entreprises et leur installation sur une aire géographique commune. Dès lors, la réussite d'un projet repose généralement sur une zone industrielle déjà existante, où des recherches de synergies sont menées afin d'identifier les moyens de concilier rentabilité et impact moindre sur l'environnement. L'exemple du programme INES (cas 9), conduit à Rotterdam aux Pays-Bas, est assez représentatif de cette approche : la zone pétrochimique qui regroupe les usines de près de quatre-vingt sociétés a été transformée en parc éco-industriel à partir des structures existantes, avec la mise en œuvre progressive d'échanges d'eau et de chaleur ; cette collaboration a permis de réaliser des économies significatives et un retour sur investissement de six ou sept ans est prévu. Cette condition de succès constitue aussi un frein au développement du potentiel offert par l'écologie industrielle ; elle suppose l'existence préalable de complémentarités entre des entités, qui, si elles ne sont pas nécessairement concentrées sur une zone géographique délimitée, doivent se trouver à une distance qui ne rende pas le coût économique et environnemental du transport rédhibitoire.

La mutualisation de certains services ne requiert pas toujours une complémentarité entre les activités, mais le traitement des déchets, le « cocamionnage » ou le « coferroutage » des marchandises, avant même d'envisager des échanges de flux de matière ou d'énergie, exigent des dispositions minimales pour coopérer. A cet égard, le cas de la symbiose industrielle de Kalundborg (cas 1) est particulier, puisque les entreprises installées dans la ville danoise présentaient à l'origine des complémentarités notables ; la présence d'une centrale thermique, dont la production de chaleur excédentaire est utilisable par des organisations très diverses (de la raffinerie au réseau de chauffage de la municipalité) a aussi largement contribué au succès reconnu de cette application spontanée et assez avancée des principes de l'écologie industrielle. L'échec du parc de Cape Charles aux Etats-Unis (cas 20) démontre qu'il est

difficile de programmer un parc industriel sur le modèle danois sans que des infrastructures préexistent.

Par ailleurs, la taille critique de la zone industrielle concernée mais aussi la taille des entités participant au projet est une question cruciale. Une étude consacrée au Kawasaki Zero Emission Industrial Park (cas 25) au Japon²⁷ souligne la réticence des petites et moyennes entreprises (PME) à investir dans les équipements nécessaires au bouclage des cycles de matière et d'énergie en raison de la stagnation voire de la récession économique structurelle au Japon, qui menace leur rentabilité et leurs perspectives de croissance. De même, l'extension du projet Ecopal (cas 13) de la zone de Petite Scynthe - Grande Scynthe, qui compte une cinquantaine d'entreprises de taille et d'activité très différentes (d'Arcelor-Mittal aux PME locales), à six nouvelles zones industrielles sur l'ensemble du bassin dunkerquois, offrant un potentiel de cent cinquante entreprises supplémentaires, nous conduit à penser que la profitabilité des synergies identifiées dépend étroitement du volume des flux.

La présence d'une plate-forme jouant le rôle d'intermédiaire entre les organisations participerait également au succès des initiatives. Comme nous l'avons évoqué dans la partie 3.1.3.2.1, la coopération entre les entreprises privées et entre celles-ci et les institutions publiques n'est pas naturelle et va plutôt à l'encontre des pratiques communes. Dès lors, la présence d'associations d'entrepreneurs, telles celles constituées à Rotterdam pour le projet INES (Europort - Botlek Interests Industry, dont quatre-vingt partenaires industriels sont membres), à Dunkerque (Ecopal est une association de loi 1901) ou celle préexistante à Kalundborg (Rotary Club local), qui initient ce type de démarche ou s'impliquent de manière proactive dans leur mise en œuvre, est perçue comme un élément essentiel. Tudor, Adams et Bates (2007), recensant les facteurs-clés de succès identifiés suite à divers travaux, considèrent que la présence d'une association d'entreprises ainsi que celle d'une grande société, jouant le rôle de pôle d'attraction (« *magnet* ») pour les autres participants au projet, contribuent à la réalisation des objectifs de l'écologie industrielle. De même, Burström et Korhonen (2001) arguent qu'il faut identifier ce qu'ils appellent un « *anchor tenant* » ou un point d'ancrage qui ait une influence déterminante sur l'activité locale ou régionale. Cette fonction peut être endossée par un acteur régional qui influence les principaux flux physiques de matière et d'énergie de la région, comme une entreprise productrice d'énergie ou une organisation publique locale, celle-ci étant souvent en charge de la gestion des déchets

²⁷ <http://www.indigodev.com/IndigoEco-Japan.doc>

municipaux. La planification, la création et la gestion d'un écosystème industriel, l'information des managers et des dirigeants, leur apprentissage de la collaboration sont des tâches que les entreprises ne veulent pas accomplir seules, notamment pour des motifs de confiance mutuelle ainsi qu'en raison des investissements en temps et en argent requis avant de profiter des bénéfices espérés.

Cependant, le rôle central d'une association ou d'un club, permettant aux entreprises d'échanger sur leurs pratiques, ne peut remplacer l'implication réelle des entreprises. L'« *anchor tenant* » contribue à les fédérer, à leur démontrer les avantages de la coopération, mais l'étude comparative menée par Heeres, Vermeulen et de Walle (2004) entre trois parcs éco-industriels américains et trois parcs néerlandais, représentatifs du degré d'avancement de l'écologie industrielle dans ces deux pays, est révélatrice : au terme de leur recherche empirique fondée sur des entretiens et une revue d'articles, les trois auteurs affirment que les seconds ont connu globalement une réussite supérieure aux premiers ; ce succès s'explique en partie par l'implication plus active des entreprises aux Pays-Bas, qui se manifeste notamment par un partage des coûts de programmation des projets entre acteurs publics et privés. Aux Etats-Unis, les parcs éco-industriels étant présentés davantage comme un moyen de stimuler l'emploi local que comme un moyen de concilier bénéfices économiques et environnementaux, les sociétés n'ont souvent pas trouvé leur intérêt dans ces initiatives d'écologie industrielle. Une telle approche freine l'adhésion à un concept relativement méconnu et dont les avantages demeurent encore incertains.

A cette participation, s'ajoute la nécessité d'une approche pragmatique, ascendante (« bottom-up ») prêtant une attention réelle aux attentes des entreprises. Celle-ci est soulignée par grand nombre d'articles (Pellenbarg (2002), Tudor, Adams et Bates (2007)) et par les interlocuteurs contactés pour réaliser ce travail. Peggy Ricart²⁸, coordinatrice de projets pour les petites et moyennes entreprises (PME) au sein de l'association Ecopal (cas 13), précise que celles-ci ne sont pas approchées sous l'angle « écologie industrielle », mais sous l'angle « animation de zone industrielle ». Même si l'écologie industrielle ambitionne de permettre l'échange de flux, la mutualisation est un premier pas nécessaire avant d'envisager la mise en œuvre de synergies de substitution. Didier Cousin, délégué Collectivités Territoriales pour Gaz de France à Lille et secrétaire de l'association, confirme cet élément essentiel de la démarche : « À l'origine, l'idée est de rattacher le projet d'écologie industrielle à une dynamique collective d'entreprises, de manière à ce que les responsables puissent tirer de

²⁸ Entretien téléphonique réalisé le 17 avril 2008

véritables profits de leur participation au projet »²⁹. L'approche se doit par ailleurs d'être progressive, envisageant une coopération croissante entre les acteurs une fois la confiance installée et la conviction des bénéfices potentiels de l'écologie industrielle largement partagée. Ainsi, aux Pays-Bas, en particulier pour le projet INES (cas 9), des projets de prévention de la pollution utilisant des infrastructures communes ont été conduits dans un premier temps, car ils sont perçus comme peu risqués avec des opportunités de bénéfices économiques et environnementaux substantiels ; puis, lorsque ces premiers s'avèrent un succès, les entreprises envisagent un développement renforcé de leurs relations et se montrent plus favorables à des investissements dans des projets avec un risque et une rentabilité supérieurs.

Le Programme National de Symbiose Industrielle (NISP) conduit au Royaume-Uni (cas 6), a obtenu des résultats convaincants. Initié lui aussi par une organisation regroupant en son sein des entreprises diverses, le Conseil britannique des entreprises pour le développement durable, il privilégie une approche pragmatique. Des ateliers sont organisés régulièrement afin de permettre à des managers exerçant dans des secteurs d'activité différents de se rencontrer afin d'évoquer les problématiques environnementales qui les préoccupent et de déterminer des pistes d'action. Des rencontres individuelles ont lieu en parallèle, au cours desquelles les responsables du NISP suggèrent aux entrepreneurs « *d'entrer leurs bilans de matières et d'énergie dans une base de données régionale pour identifier les fournisseurs ou repreneurs potentiels de certains de leurs produits* »³⁰, afin de rendre possible, après un certain temps, les échanges de flux et le bouclage des cycles de matière et d'énergie. L'objectif de ces projets est avant tout de dépasser le scepticisme inhérent à toute innovation et de développer l'esprit collaboratif entre les entreprises.

La diversité des exemples de mise en œuvre des principes de l'écologie industrielle ainsi que le degré variable de leur réussite nous conduit à penser que les déclinaisons opérationnelles de cette stratégie environnementale ne permettent pas systématiquement de concilier performance économique et préservation des ressources naturelles ; cette observation nous invite à une certaine réserve. La recherche des conditions de succès révèle qu'il n'existe pas de modèle absolu en la matière et que l'approche doit être conçue en fonction du contexte global et local, en prenant en considération les préoccupations des entreprises et en leur offrant la possibilité d'expérimenter de manière graduelle les avantages

²⁹ <http://www.cerdd.org/spip.php?article1631>

³⁰ La Revue Durable (2007)

qu'elles peuvent tirer d'une collaboration accrue pour le traitement de leurs co-produits et de leurs déchets.

Nous souhaitons maintenant identifier les limites qui sont apparues dans notre questionnement, dans notre méthodologie mais également dans notre objet d'étude. L'objectif serait de déterminer en particulier comment appréhender différemment la notion de création de valeur. Une approche insistant davantage sur les aspects stratégiques que sur la dimension économique pourrait se révéler plus en adéquation avec la réflexion nourrie par le développement durable et avec les opportunités offertes par l'écologie industrielle.

3.2. Les limites de notre étude et une conception élargie de la notion de création de valeur

3.2.1. L'écologie industrielle, des limites empiriques déjà identifiés avant même une démonstration convaincante

Nous avons déjà évoqué le décalage entre l'écologie industrielle conceptuelle et sa déclinaison opérationnelle. Les parcs éco-industriels représentent les seules réalisations concrètes de cette discipline et très peu mettent en application le principe de bouclage des flux de matière et d'énergie.

Outre cette limite quantitative, on constate des failles qualitatives dans les aspirations de l'écologie industrielle à mettre en œuvre le développement durable. Le changement radical de système qui est promu par cette approche ne s'observe pas dans les faits. La recherche d'une efficacité accrue des ressources naturelles, si elle présente des avantages économiques et environnementaux certains, ne s'accompagne pas d'une rupture avec notre système fondé largement sur l'utilisation d'énergies fossiles et de matériaux polluants. Ainsi, le fonctionnement de la symbiose industrielle de Kalundborg (cas 1), considéré internationalement comme exemplaire, repose presque totalement sur la chaleur fournie aux entreprises proches et à la municipalité par une centrale thermique fonctionnant au charbon ; une usine de raffinage de pétrole de la société Statoil tient également une place importante dans l'organisation. Il n'y a donc pas d'effort avancé pour substituer des formes d'énergie renouvelable au pétrole ou au charbon.

Jean-Philippe Laurent³¹, Directeur Recherche et Développement de la branche Energie de Veolia Environnement considère de surcroît que l'objectif ultime d'utilisation en cycle fermée des ressources et d'un possible fonctionnement en « *autarcie locale* » est une « *aberration* ». En écho aux critiques mentionnées dans la première partie, le principe de bouclage préconisé par le concept présente des limites pratiques à l'échelle macroéconomique. En effet, la « relocalisation » que permettrait éventuellement la mise en œuvre de synergies pourrait remettre en cause certains échanges interrégionaux, voire conduire à la disparition de certaines activités, qui n'auraient plus lieu d'être si les flux étaient valorisés, grâce à des synergies inter-entreprises. Mais, les efforts de R&D en cours, menés notamment par les entreprises de gestion de services à l'environnement à l'instar de Veolia et de Suez (Annexe 2), témoignent du potentiel stratégique offert par ce modèle pour la création de nouvelles activités.

3.2.2. Un modèle où l'économique prime sur l'environnement

3.2.2.1. La "triple bottom line", une conception discutable du développement durable

Le modèle de la « triple bottom line » ou des « trois piliers » suggère une approche du développement durable qui permettrait de concilier les préoccupations économiques, environnementales et sociales. Le schéma envisageant la durabilité comme l'intersection entre des cercles de taille équivalente figurant ces trois dimensions est globalement admis et c'est pourquoi nous l'avons choisi comme fondement de notre réflexion, en concentrant notre attention sur les aspects « *Profit* » et « *Planet* ». On peut cependant s'interroger sur la pertinence de cette conception du développement durable et des hypothèses qu'elle sous-tend.

En effet, le modèle actuel considère que ces trois éléments, et en particulier les deux qui nous intéressent dans le cadre de cette étude, sont distincts, bien que présentés sur un même plan. Or il semblerait qu'en cherchant à tout prix à démontrer la viabilité économique des mesures environnementales, on accorde plus d'importance au premier terme, à savoir « développement », qu'au second, « durable » ; on intègre ainsi les préoccupations environnementales au cœur des décisions économiques, les reléguant au second plan et subordonnant leur prise en compte au potentiel qu'elles offrent pour générer des profits.

³¹ Entretien téléphonique réalisé le 23 avril 2008

Giddings, Hopwood et O'Brien (2002) mettent en garde contre les risques inhérents à une telle segmentation des trois dimensions, qui minimise leurs interconnexions, qui suppose que des compromis peuvent être faits (en accroissant la richesse, on pourrait par exemple contrebalancer l'épuisement des ressources naturelles) et qui conduit à donner la priorité à certains éléments plutôt qu'à d'autres. Le modèle néo-classique traditionnel suggère que l'on peut donner un prix aux méfaits environnementaux en les internalisant : l'intégration du coût carbone dans le prix de vente des produits, en tenant compte des émissions de dioxyde de carbone qui ont été nécessaires pour les différentes étapes de leur production, de l'extraction des matières premières à leur distribution, relève de cette approche ; si l'on donne une valeur économique à l'environnement, il apparaît difficile de considérer ces deux dimensions du modèle de la « triple bottom line » comme équivalentes. L'approche, qui consiste à monétiser les ressources naturelles, même si elle s'affranchit partiellement de notre modèle actuel, continue à penser l'économique comme une préoccupation supérieure à l'environnemental.

L'écologie industrielle est présentée par ses partisans comme une rupture avec le fonctionnement habituel de notre système, puisqu'elle adopte une manière radicalement différente d'envisager les activités économiques, considérées comme faisant partie intégrante de la biosphère ; le système industriel est un écosystème particulier, étroitement lié à son environnement naturel. Une telle vision est en accord avec le nouveau schéma proposé par l'article de Giddings, Hopwood et O'Brien (2002) : les trois cercles de la « triple bottom line » ne sont plus seulement en intersection mais deviennent concentriques ; l'économie est le plus petit cercle, inclus au cœur des deux autres, non pas parce que celle-ci est jugée prépondérante sur les autres dimensions, mais parce qu'elle repose étroitement sur la société qui elle-même dépend de l'environnement. Ce modèle nous semble plus en accord avec l'approche holistique et systémique mise en avant par l'écologie industrielle, qui inclut la performance économique dans les préoccupations environnementales, et suggère une conception notablement différente de notre manière de concevoir le monde.

Ce constat nous conduit à nous interroger sur la pertinence de notre choix d'une évaluation comparant les coûts et les bénéfices économiques des exemples opérationnels de l'écologie industrielle.

3.2.2.2. L'analyse coûts-bénéfices, une méthode appropriée à l'écologie industrielle ?

L'analyse coûts-bénéfices s'inscrit dans le modèle classique de la « triple bottom line » ; elle accorde une place importante à l'économique et se borne à une approche utilitariste, reposant sur l'hypothèse qu'il est possible de donner une valeur monétaire à la détérioration de l'environnement et à l'épuisement des ressources naturelles. Cette approche, que nous avons choisie pour comparer les exemples d'application des principes de l'écologie industrielle, induit par ailleurs une approche micro-économique. En effet, on en revient en pratique à une évaluation partielle en dépit de la conception systémique et globale mise en avant par l'écologie industrielle conceptuelle. Notre comparaison des résultats obtenus par divers parcs éco-industriels et clubs d'entreprises se fait à une échelle microéconomique ; elle fait en outre plus de cas de la production que de la consommation. Cette méthode n'est peut-être donc pas parfaitement adaptée au modèle de l'écologie industrielle.

Cependant, même si l'écologie industrielle conceptuelle met l'accent sur une approche holistique, notre étude empirique a démontré que le succès opérationnel repose en premier lieu sur le pragmatisme des acteurs et notamment « *l'orientation business* »³² dans la mise en œuvre de synergies entre les sociétés. Bien qu'une approche monétariste reconnaisse une place centrale à la dimension « *Profits* », elle se révèle cohérente avec la traduction des principes du développement durable faite actuellement par les entreprises ; on perçoit néanmoins à nouveau une forme d'« *implementation gap* » entre les concepts relatifs au développement durable et leur réalisation dans les faits.

3.2.3. Une approche stratégique plutôt qu'économique de la création de valeur

Notre étude empirique nous a permis de constater la variabilité des résultats économiques dans le cadre d'une analyse microéconomique de groupes d'entreprises fonctionnant selon des modalités éco-industrielles, en mettant en parallèle les coûts engendrés et les revenus générés. Puisque ce mode d'évaluation ne s'avère pas parfaitement adaptée à l'approche systémique de l'écologie industrielle et néglige, outre la consommation, d'autres modes de création de valeur, tels que l'avantage compétitif lié à une meilleure image environnementale ou à de

³² La Revue Durable (2007)

nouvelles opportunités de produits ou de services, nous adoptons une perspective plus globale, intégrant la dimension stratégique.

Le modèle des « cinq forces de Porter » nous offre un cadre d'analyse intéressant, qui nous permet de confronter le positionnement des acteurs, le pouvoir des fournisseurs et des clients, ainsi que les organisations déjà présentes sur le marché face aux potentiels nouveaux entrants et aux produits de substitution. Dans la perspective de l'écologie industrielle, certains acteurs, en particulier les entreprises de gestion de services à l'environnement, occupent une position avantageuse, puisqu'ils sont en charge du traitement de la majorité des effluents, jusqu'alors très peu réutilisés ou valorisés dans d'autres processus industriels. Selon Christian Traisnel, Directeur de l'Association CD2E (Création Développement d'éco-entreprises³³, ces grands groupes se montrent quelque peu réticents aux initiatives d'écologie industrielle qui pourraient les priver d'une source de revenus significative, provenant du traitement des déchets ultimes incinérés, stockés et rarement recyclés.

Cependant, cette affirmation semble quelque peu en contradiction avec les exemples de l'Annexe 2 ; ces sociétés, qui disposent d'importantes capacités en recherche et développement, s'engagent dans la prospection d'opportunités de valorisation des flux. SITA Solving, filiale de Suez Environnement, a intégré dans son offre un procédé innovant, qui permet de valoriser les boues issues du lavage des fumées de hauts-fourneaux dans le cadre de la production de fonte et rend possible leur purification afin de les réintroduire dans les processus de fabrication. Ces acteurs, peu nombreux, installés durablement sur le marché « vert », possèdent une taille critique et une avance, qui les place en position de force pour la gestion des questions environnementales rendues populaires par la problématique du développement durable ; l'oligopole qu'ils constituent peut également apparaître comme un obstacle à l'entrée sur le marché de nouvelles organisations qui chercheraient à se positionner sur des marchés de niche jusqu'alors inexploités.

Même si la valorisation de co-produits est une pratique encore peu répandue, des petites et moyennes entreprises développent des activités novatrices autour de ces principes. La Compagnie Industrielle des Lubrifiants d'Aulnoye (CILA) a par exemple conçu une offre spécifique de régénération des huiles industrielles usagées, consistant à collecter les huiles issues des processus de production d'entreprises de l'industrie lourde, à les traiter et à revendre à des fabricants des huiles « de base » prêtes à recevoir des additifs. La société Roll-Gom³⁴, elle, s'est spécialisée dans la fabrication de roues à bandage en caoutchouc recyclé

³³ Entretien téléphonique réalisé le 12 février 2008

³⁴ Cette PME de 94 salariés est néanmoins rattachée à une entité de plus grande envergure, le groupe Aurea.

issues de pneumatiques usagés non réutilisables. De même, le Relais, qui regroupe une quinzaine d'entreprises à but socio-économique, a créé un éco-isolant thermique, présentant des capacités équivalentes à la laine de verre, fabriqué à partir de textiles non-réutilisables recyclés selon un procédé de production plus efficient énergétiquement et moins polluant. En dépit de la diversité de leurs métiers, ces différentes sociétés se considèrent comme opérant dans le domaine de l'environnement et du développement durable et l'affirment explicitement sur leur site Internet. En se positionnant sur ce marché stratégique, ces entreprises bénéficient d'une concurrence limitée grâce à leur statut de pionnier. La société Roll-Gom, créée en 1989, avec un chiffre d'affaires annuel de 11 millions d'euros, est ainsi le leader européen de la roue de manutention, face à une compétition presque inexistante.

Un des principes de l'écologie industrielle, la valorisation de co-produits, met à disposition des entreprises des produits de substitution à un coût moindre, puisque ce sont des matières premières secondaires, issues des procédés de production d'autres entités. L'eau utilisée dans les processus industriels peut être traitée grâce à diverses innovations techniques tels que les ultraviolets, l'osmose inverse ou la filtration membranaire afin d'être réutilisée pour des usages non-domestiques tels que l'irrigation des parcelles agricoles, le nettoyage des zones urbaines ou l'arrosage des espaces verts. La symbiose industrielle de Kalundborg fournit divers exemples de produits de substitution : la biomasse résultant de la fabrication d'enzymes permet de réaliser des concentrés d'azote et de phosphore utilisables pour l'épandage agricole ; le procédé de production de la centrale électrique génère du sulfate de calcium, qui, hydraté, devient du gypse, principale ressource d'une fabrique de panneaux en plâtre, tandis que la vapeur émise est employée pour les besoins en chaleur d'entreprises environnantes ; les boues issues de la station d'épuration de la municipalité contiennent des bactéries qui accélèrent la décontamination biologique des sols offrant un produit alternatif à une société de traitement des sols³⁵. En Inde, enfin, la société Natura a pénétré un marché avec de fortes barrières à l'entrée, grâce à la production de substituts au bois à partir de résidus agricoles ; elle est ainsi parvenue à se passer du bois, matière première à laquelle il est difficile d'accéder, et à s'affranchir de la législation stricte à laquelle est soumise l'industrie forestière.

L'écologie industrielle permet donc d'élargir la gamme de matières premières à disposition des activités industrielles et agricoles et pourrait donc induire parallèlement une mutation profonde du panorama des fournisseurs et des clients potentiels des entreprises. Si les changements du système économique encouragés par l'écologie industrielle parviennent à dépasser le nombre relativement limité de cas observés dans notre étude empirique et à

³⁵ Ces exemples sont tirés de la revue L'Usine Nouvelle – Remoue, A. (2007)

s'étendre au-delà de zones industrielles dispersées à travers le monde pour atteindre une échelle régionale, cette approche pourrait modifier considérablement le cadre stratégique dans lequel évoluent des entreprises appartenant à des secteurs d'activités très différents.

L'écologie industrielle offre donc des opportunités intéressantes, notamment en termes de positionnement stratégique par rapport aux concurrents mais aussi à l'égard des clients et des investisseurs. Divers travaux (Hart (1997), Cornier, Magnan et Morard (1994)) démontrent une corrélation positive entre la sensibilité écologique des entreprises et la hausse de la valeur des actions ; les sociétés « vertes » obtiendraient des performances supérieures sur les marchés financiers. Outre la popularité, conjoncturelle ou structurelle, des préoccupations environnementales, celle-ci s'explique notamment par le souci des investisseurs de réduire les risques de sanctions liées aux contraintes réglementaires de plus en plus exigeantes ou l'exposition à des crises médiatiques liées à la pollution. Cependant, si l'image « verte » d'une entreprise peut s'avérer une source d'avantage compétitif, elle présente une certaine ambivalence dans le cas de l'écologie industrielle. En effet, les matières premières secondaires pourraient être considérées comme non pures par les consommateurs, tandis que les riverains des entreprises participant à ce type de projet pourraient se montrer hostiles à la valorisation de co-produits, en particulier de ceux ayant le statut de déchets, avec le syndrome « NIMBY », « *Not In My Back-Yard* ». Outre le risque commercial, il existe donc un risque concernant la pérennité de l'activité et le retour sur investissement des équipements acquis. En France, par exemple, l'autorisation préfectorale au titre d'une rubrique de traitement des déchets exige une publicité extérieure à l'entreprise, qui peut susciter des réticences et justifier de nombreuses sources de recours pouvant remettre en cause l'arrêté d'exploitation.

Une évaluation stratégique du potentiel de l'écologie industrielle pourrait permettre de mieux apprécier les spécificités de cette approche et de favoriser l'émergence d'une nouvelle conception intégrée du développement durable, dans laquelle les dimensions économiques et environnementales ne sont plus seulement interconnectées. Le peu d'exemples opérationnels et le manque de recul dont nous disposons quant à ces initiatives constituent un obstacle à la généralisation d'une stratégie encore méconnue. L'identification d'un plus grand nombre de projets et la conduite de travaux de recherche approfondis aux échelles micro-, meso- et macroéconomiques, est un préalable nécessaire afin de mieux cerner les opportunités offertes par l'écologie industrielle.

Conclusion

Face à la prolifération de discours abordant la thématique du développement durable, notre mémoire avait pour ambition d'évaluer un modèle de mise en œuvre, afin de déterminer s'il est possible d'améliorer simultanément les performances économiques et l'impact environnemental des entreprises : « Dans quelle mesure l'écologie industrielle offre-t-elle aux entreprises un modèle alternatif de création de valeur, pour leurs dirigeants et leurs actionnaires, prenant en considération les enjeux environnementaux actuels ? ».

Il existe à l'heure actuelle une distance incontestable entre l'écologie industrielle conceptuelle et la traduction opérationnelle des principes qu'elle promeut. Notre étude empirique nous a néanmoins permis de constater, qu'à défaut d'un bienfait pour la nature, cette approche, mise en œuvre à l'échelle de parcs éco-industriels, permettrait de ralentir l'épuisement des ressources naturelles et de diminuer les émissions néfastes pour la biosphère, tout en offrant un intéressant potentiel de profitabilité. Certaines conditions nécessaires à l'accomplissement partiel d'un développement doublement avantageux ont été identifiées :

- une réglementation incitative et flexible imposant des contraintes environnementales ;
- un contexte culturel favorisant la coopération et les échanges inter-entreprises ;
- la transformation de structures existantes, en tirant partie des complémentarités entre les activités ;
- la présence d'une plate-forme, jouant le rôle de pôle d'attraction et d'intermédiaire entre les acteurs privés et publics ;
- et surtout une approche pragmatique et progressive, prêtant une attention permanente aux attentes des entreprises et favorisant une implication réelle des entreprises dans la programmation et la réalisation des projets.

En accord avec cette ultime condition de succès, nous avons également pu observer qu'une application stricte des principes de l'écologie industrielle, notamment l'objectif de bouclage des flux de matière et d'énergie de même que la prise en compte de l'ensemble du cycle de vie du produit, est difficilement envisageable dans la configuration actuelle du système économique. Dès lors, la mutualisation de certaines activités, moins risquée, plus profitable à court terme et donc plus facile à mettre en œuvre, devrait précéder la recherche de synergies de substitution et la valorisation de co-produits.

Il nous semble que notre méthode d'analyse coûts-bénéfices reposait sur une conception contestable du développement durable, accordant plus de considération aux préoccupations économiques, et ne rendant pas parfaitement compte des spécificités de l'écologie industrielle. L'exigence de pragmatisme, qui s'est affirmée dans notre étude, nous conduit cependant à ne pas totalement remettre en cause le modèle au fondement de notre travail et à envisager une approche intermédiaire, mettant l'accent sur des aspects stratégiques et non plus seulement économiques. Le faible degré de mesure et de suivi de la performance des parcs éco-industriels constitue probablement un obstacle à l'adhésion des entreprises et de l'opinion aux principes de l'écologie industrielle, dans la mesure où leur vertu-même n'est pas établie. L'élaboration d'indicateurs fiables nous semble un pré-requis, avant d'envisager une analyse stratégique plus approfondie.

Dans le cadre de la majeure Alternative Management, nous avons été sensibilisés aux nouvelles pratiques managériales qui se développent, notamment afin d'intégrer les préoccupations récentes relatives aux questions environnementales. Notre attention a porté en particulier sur des approches, telles que l'écologie industrielle ou l'économie de fonctionnalité, qui témoignent de la capacité d'innovation et de renouvellement des milieux d'affaires. Marquant une rupture réelle avec les business models traditionnels, elles nous paraissaient un moyen de donner un contenu opérationnel à cette notion floue qu'est le développement durable. Pourtant, cette étude a permis de montrer que les points qui nous semblaient les plus intéressants dans l'écologie industrielle, à savoir la conscience accrue de l'imbrication des activités économiques dans l'environnement et la dimension holistique, sont ceux que les entreprises ont le moins traduit en pratique. Au contraire, les opportunités économiques et stratégiques offertes par la valorisation d'effluents rencontrent une audience supérieure ; elles donnent en effet lieu à la mise en œuvre d'échanges au sein de parcs éco-industriels et à une échelle plus large. Dans la perspective des fonctions que nous serons amenés à exercer en entreprise, nous retiendrons avant tout de ce travail que le pragmatisme doit primer sur le caractère novateur et intellectuellement stimulant des démarches proposées afin d'aborder efficacement des problématiques complexes et nouvelles.

Bibliographie

- Adoue, C.** (2007). Mettre en œuvre l'écologie industrielle, Collection Science et ingénierie de l'environnement, Presses polytechniques et universitaires romandes
- Allenby, B.** (2000). "Industrial ecology, information and sustainability", Foresight, vol. 2, n°2
- Barles, S.** (2007). "Le siècle d'or de l'écologie industrielle dans les villes françaises : 1790-1880", La Revue Durable, n°25
- Barnes, P.E.** (1998). "Industrial Ecology", Business and Economics Review, 44, 2, pp.21-24
- Boiral, O.** (2005). "Concilier environnement et compétitivité, ou la quête de l'éco-efficience", Revue française de gestion, n° 158, pp.163-186
- Boyd, C.** (2001). "Sustainability is good business", The OECD Observer, 228
- Burström, F. & Korhonen J.** (2001). "Municipalities and industrial ecology: reconsidering municipal environmental management", Sustainable Development, 9, pp.36-46
- Chertow, M.R.** (2000). "Industrial Symbiosis: Literature and Taxonomy", Annual Review of Energy and Environment
- Chertow, M.R.** (2004). Industrial Symbiosis. Encyclopaedia of Energy 2004, 3, pp.1-9
- Dahlström, K. & Ekins, P.** (2006). "Combining economic and environmental dimensions: Value chain analysis of UK iron and steel flows", Ecological Economics, 58, pp.507-519
- Ehrenfeld, J.** (2004). "Industrial ecology: a new field or only a metaphor? ", Journal of Cleaner Production, 12, pp.825-831
- Elkington, J.** (1994). "Towards the sustainable corporation: Win-win-win business strategies for sustainable development", California Management Review, vol.36, n° 2, pp.90-100
- Erkman, S.** (1997). "Industrial ecology: an historical view", Journal of Cleaner Production, 5, n° 1-2, pp.1-10
- Erkman, S.** (1998). Vers une écologie industrielle, Editions Charles Léopold Mayer, Paris (deuxième édition enrichie et mise à jour : 2004)
- Fan, X., Bourg, D. & Erkman, S.** (2006). "L'économie circulaire en Chine. Vers une prise en compte de l'environnement dans le système économique chinois ?", Futuribles, n° 324, pp.21-42
- Gibbs, D. & Deutz, P.** (2007). "Reflections on implementing industrial ecology through eco-industrial park development", Journal of Cleaner Production, 15, pp.1683-1695

- Harper, E.M. & Graedel, T.E** (2004). "Industrial ecology: a teenager's progress", Technology in society, 26, pp.433-445
- Hart, S.L.** (1997). "Beyond Greening: Strategies for a sustainable world", Harvard Business Review, n° Janvier-Février 1997
- Heeres, R.R, Vermeulen, W.J.V. & De Walle, F.B.** (2004). "Eco-industrial park initiatives in the USA and the Netherlands: first lessons", Journal of Cleaner Production, 12, pp.985-995
- Giddings, B., Hopwood, B. & O'Brien, G.** (2002). "Environment, Economy and Society: Fitting them together into sustainable development", Sustainable Development, 10, pp.187-196
- Karlsson, M. & Wolf, A.** (2007). "Using an optimization model to evaluate the economic benefits of industrial symbiosis in the forest industry", Journal of Cleaner Production, 20, pp.1-9
- Karnani, A.** (2007). "Doing well by doing good – Case study: 'Fair & Lovely' whitening cream", Strategic Management Journal, vol.28, pp.1351-1357
- Karnani, A.** (2007). "The Mirage of Marketing to the Bottom of the Pyramid: How the Private Sector can help alleviate Poverty", California Management Review, vol.49, n°4, pp.90-111
- Korhonen, J., Huisingh, D. & Chiu A.S.F.** (2004). "Applications of industrial ecology – an overview of the special issue", Journal of Cleaner Production, 12, pp.803-807
- Oldenburg, K.U. & Geiser, K.** (1997). "Pollution prevention and... or industrial ecology?" Journal of Cleaner Production, 5 (1-2), pp.103-108
- Pellenbarg, P.H.** (2002). "Sustainable business sites in the Netherlands: a survey of policies and experiences". Journal of Environmental Planning and Management, 45 (1), pp.59-84
- Phillips, P.S., Barnes, R., Bates, M.P. & Coskeran, T.** (2006). "A critical appraisal of an UK county waste minimization programme: The requirement for regional facilitated development of industrial symbiosis/ecology", Resources, Conservation and Recycling, 46, pp.242–264
- Prahalad, C.K.** (2004). Fortune at the Bottom of the Pyramid: Eradicating Poverty through Profits, Wharton School Publishing, Philadelphia, PA
- Remoue, A.** (2007). Dossier sur l'écologie industrielle, L'Usine Nouvelle, n°3078
- Roundtable discussion** (2001). "Business as a living system: The Value of Industrial Ecology" (conference organized by the Future 500, a non-profit network of companies, at the Haas School of Business), California Management Review, vol.43, n°3, pp.16-25

- Salman Hussain, S.** (1999). "The Ethics of 'going green': the corporate social responsibility debate", Business Strategy and the Environment, 8, pp.203-210
- Salmi, O.** (2007). "Eco-efficiency and industrial symbiosis – a counterfactual analysis of a mining community", Journal of Cleaner Production, 15, pp.1696-1705
- Sawhney, A. & Jose, P.D.** (2003). "The Greening of Business Strategy: From Compliance to Competitive Advantage", IIM Bangalore Management Review, n° de Sept. 2003, pp. 130-133
- Suh, S. & Kagawa, S.** (2005). "Industrial Ecology and Input-Output Economics: an Introduction", Economic Systems Research, vol. 17, n°4, pp.349-364
- Tudor, T., Adam, E., Bates, M.** (2007). "Drivers and limitations for the successful development and functioning of EIPs (Eco-industrial parks): A literature review", Ecological Economics, n°61
- Vivien, F.-D.** (2003). "Rencontre du troisième type... d'écosystème ou quand l'écologie devient industrielle", Innovations, n°18, pp.43-57
- Yang, S. & Feng, N.** (2008). "A case study of industrial symbiosis: Nanning Sugar Co., Ltd. In China, Resources", Conservation & Recycling, 52, pp.813-820

Sites Internet:

- Pôle Français d'Ecologie Industrielle (PFEI) : <http://www.france-ecologieindustrielle.fr>
- Institut ICAST, créé par Suren Erkman : <http://www.icast.org/>
- Centre Ressource du Développement Durable (CERDD) : <http://cerdd.org>
- Centre de Recherches et d'Etudes Interdisciplinaires sur le Développement Durable (CREIDD) : <http://www.utt.fr/labos/CREIDD/index.php>
- Réseau coopératif APREIS, Acteurs, Pratiques, Recherches Internationales pour le développement durable: <http://www.apreis.org/index.htm>
- Projet Conception d'Outils METHodologiques et d'Evaluation pour l'écologie industrielle (COMETHE) lauréat d'un appel d'offre lancé en 2007 par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) dans le cadre du Programme de Recherches ECOtechnologies et Développement Durable (PRECODD) : <http://comethe.org>
- Club d'écologie industrielle de l'Aube à Troyes : <http://www.ceiaube.fr/>
- Association Auxilia : www.auxilia.asso.fr
- Projet ECOSIND: <http://www.ecosind.net>
- Resource Optimization Initiative : www.roi-online.org
- Site du cabinet de conseil Indigo Development, « Creating systems solutions for sustainable development through industrial ecology »: <http://www.indigodev.com/>
- <http://dly.free.fr/site/spip.php?rubrique14>
- Symbiose industrielle de Kalundborg au Danemark : <http://www.symbiosis.dk/>
- Site de Veolia Environnement : www.veoliaenvironnement.com
- Site de Suez Environnement : <http://www.suez-environnement.com>
- Site de Roll-Gom: <http://www.roll-gom.com/>
- Site de la Compagnie Industrielle des Lubrifiants d'Aulnoye (CILA) : <http://www.cila.fr/entreprise.php>
- Alternative Management Observatory : www.hec.fr/amo

Annexes

Annexe 1 : Principales caractéristiques et résultats des projets éco-industriels analysés dans l'étude comparative

Annexe 2 : Exemples d'études de cas

Annexe 1 : Principales caractéristiques et résultats des projets éco-industriels analysés dans l'étude comparative

N°	Nom du projet	Lieu	Echelle	Date de début	Acteur en charge du projet	Nombre de participants	Résultats	Facteurs clés de succès mis en avant	Sources
1	Symbiose industrielle de Kalundborg	Kalundborg, Danemark	Ville	1970s	Formation spontanée par 5 entreprises proches géographiquement + municipalité	6 industriels (raffinerie Statoil, centrale électrique Energie E2, 2 usines de biotechnologies - Novo Nordisk et Novozymes, usine fabriquant des matériaux de construction en gypse Gyproc, société de dépollution des sols Soilrem) + la municipalité de kalundborg (Noveren, entreprise municipale de gestion des déchets) Développement de synergies et d'échanges de vapeur d'eau, de chaleur, d'eau, de gaz, de sulfure...)	Réduction des ressources / émissions / déchets par an: - 30 K tonnes de pétrole (CA) / 20 000 t (UN et Ecosind) - 30 K tonnes de charbon (Ecosind) - 1 M m3 d'eau (CA) / 3 Mm3 (UN) - 130 K tonnes de CO2 (CA) - 380 tonnes de SO2 (CA) / 25 Ktonnes (Ecosind) - 65 K tonnes de cendres volantes (CA) - 280 K tonnes de biomasse liquide (CA) - 200 K tonnes de gypse (Ecosind) Revenus annuels dégagés par le système estimés à 10 M\$ (Erkman, 1998) / 11M€ (La Revue Durable, 2007) / 15 M\$ (L'Usine Nouvelle, 2007 et Ecosind, 2008,) / 17M€ (Nahapétian, 2002) Investissement initial de 75M\$ (pour mettre en place les 18 premiers échanges / pour 19 projets selon Ecosind), 60M\$ en 20 ans selon Erkman et 84M€ en 30 ans selon Nahapétian (in "Rencontre du 3eme type..."), retour sur investissements en 4-5 ans (UN) Selon Karlson & Wolf, pas d'analyse détaillée confirmant ces chiffres; analyses existantes se concentrent sur certains flux de matières (eau)	- Le cadre réglementaire danois impose aux entreprises de soumettre au gouvernement régional les plans détaillant les efforts de réduction de la pollution, mais sa souplesse facilite une collaboration réelle entre les instances gouvernementales et les entreprises réglementées, en donnant une certaine marge de manœuvre aux acteurs privés. - Une culture de gestion ouverte et transparente prévaut dans les pays scandinaves. Jorgen Christensen, dirigeant d'une des usines participant à la symbiose, souligne aussi l'esprit d'équipe et le climat de confiance propres à K., où tous sont amenés à se rencontrer régulièrement et notamment les managers (Rotary Club) ce qui favorise l'échange d'informations.	- Erkman, S. (1998). Vers une écologie industrielle - Adoue, C. (2007). Mettre en œuvre l'écologie industrielle - Remoue, A. (2007). Dossier, L'Usine Nouvelle, n°3078 - La Revue Durable (2007), n°25 - Karlsson, M. & Wolf, A. (2007). Using an optimization model to evaluate the economic benefits of industrial symbiosis in the forest industry, Journal of Cleaner Production - Vivien, F.-D. (2003). Rencontre du troisième type... d'écosystème ou quand l'écologie devient industrielle, Innovations - Guide Ecosind 2006
2	Système d'approvisionnement en énergie de Jyväskylä	Jyväskylä, Finlande	Ville	1960s	Formation spontanée et évolution progressive vers l'écologie industrielle, incitée par la législation environnementale finlandaise qui impose des standards élevés.	Usine électrique Rauhalhti, Fabrique de papier Kangas, Centre horticole Greenlandia, ménages et entreprises de services reliés par des échanges d'électricité, de chaleur, d'eau, de vapeur, des déchets forestiers. Cogénération de chaleur et d'électricité et utilisation des déchets industriels comme combustibles	- Consommation de combustibles externes inférieure de 40% avec cette organisation (co-production et utilisation des déchets): réduction de 963 GWh en 1980 à 122 GWh en 1997 de la consommation de mazout, réduction des émissions de sulfure (de 3,7 Kt en 1980 à 1,7 Kt en 1997 de SO2). En 1997, l'efficacité des combustibles avec le système est de 86% contre 40% avec une usine classique ("condensing thermal power plant") => économies monétaires. - Utilisation en cascade des ressources permettant des économies significatives (production d'électricité, puis de vapeur industrielle, pour le chauffage des ménages puis de l'horticulture)		- Korhonen, J., Wihersaari, M. & Savolainen, I. (1999). Industrial Ecology of a Regional Energy Supply System, The Case of the Jyväskylä Region, Finland, GMI, 26 - Saikku, L. (2006). Eco-industrial parks: A background report for the eco-industrial park project at Rantasalmi, Publications of Regional Council of Etelä-Savo

N°	Nom du projet	Lieu	Echelle	Date de début	Acteur en charge du projet	Nombre de participants	Résultats	Facteurs clés de succès mis en avant	Sources
3	Uimaharju Industrial Park	Eno, Finlande	Zone d'activité	1960s	Emergence spontanée	Diverses entreprises participant (produits forestiers, pâte à papier, scierie, traitement de cendres résiduelles, coproduction de chaleur et d'électricité, gaz industriels, traitement d'eaux usées)	- Développement de boucles fermées de matière et d'énergie - Diversité accrue du système industrielle		Saikku, L. (2006). Eco-industrial parks: A background report for the eco-industrial park project at Rantasalmi, Publications of regional Council of Etelä-Savo
4	Harjavalta Industrial Park	Harjavalta, Finlande	Zone d'activité		Emergence spontanée	13 entreprises: Boliden Harjavalta Oy, OMG Harjavalta Nickel Oy, Porin Lämpövoima Oy, AGA, Kemira, the town of Harjavalta. Echanges d'électricité, de chaleur, de cuivre, d'acier...	- Bénéfices environnementaux - Recyclage et efficacité énergétique accrues - Efficacité accrue dans la logistique - Sécurité accrue grâce à une coopération renforcée - Amélioration de l'emploi, des relations internationales, du capital intellectuel et de l'image de la municipalité		Saikku, L. (2006). Eco-industrial parks: A background report for the eco-industrial park project at Rantasalmi, Publications of regional Council of Etelä-Savo
5	Symbiose industrielle de Landskrona (LISP)	Landskrona, Suède	Ville	2002 (projet), 2003 (lancement en tant que projet pilote pour la Suède)	Projet initié par l'International Institute for Industrial Environment Economics (IIIEE) in Lund, avec le soutien de la Swedish Business Development Agency (NUTEK)	19 entreprises (surtout des PME, 1/2 sont des filiales de groupes internationaux) appartenant à des secteurs d'activité variés (impression, emballage, recyclage, traitement des déchets, agro-alimentaire, industrie chimique...) + bureau du commerce et de l'industrie et départements techniques et environnementaux de la municipalité	Aucune réalisation à l'heure actuelle, les infrastructures sont en cours d'installation et les collaborations possibles en cours d'étude (utilisation des eaux usées d'une usine de fabrication de pare-brises par une entreprise d'impression, utilisation de déchets solides enfouis pour l'industrie du BTP, échanges de compétences managériales, de savoir et d'information)		Saikku, L. (2006). Eco-industrial parks: A background report for the eco-industrial park project at Rantasalmi, Publications of regional Council of Etelä-Savo
6	National Industrial Symbiosis Programme (Nisp)	Royaume-Uni	Pays, 12 organisations régionales (première initiative à l'échelle nationale au monde)	2002 (soutien public depuis 2005)	Initié par le Conseil britannique des entreprises pour le développement durable, devenu un des 7 piliers du "Business Resource Efficiency and Waste Programme" (politique du gouvernement britannique pour aider les entreprises à réduire leurs déchets, promouvoir le recyclage et utiliser les ressources avec plus d'efficacité)	8 000 entreprises membres du Nisp	Réduction des ressources / émissions / déchets entre avril 2005 et mai 2007 (LRD, chiffres vérifiés par un organisme indépendant du Nisp): - 1,7 M de t de matières détournées des décharges - 2 M de t d'émissions de CO ² évitées - 4,4 M de t de matériaux vierges économisés - 2,5 M de t d'eau potable utilisées en moins - 287 000 t de déchets dangereux supprimés - 383 postes de travail créés, 442 sauvés - Réduction des transports Coûts / Revenus : - 105 M€ de coûts en moins pour les industriels - 141 M€ de ventes en plus pour les industriels - 52 M€ d'investissements pour des installations de recyclage - Gains prévisionnels pour chaque région participante: 60 M€ - Création de nouvelles opportunités d'activité et soutien de nouvelles start-ups	- La réglementation devient progressivement plus contraignante : une taxe a été introduite en 2001 par le gouvernement, augmentant chaque année de 4,5€ par tonne de déchet mis en décharge et qui s'élève en 2007 à 26€. - Depuis 2005, le NISP est un des sept piliers de la politique du gouvernement britannique dans le cadre du programme BREVV. - Approche pragmatique, ascendante, prêtant une réelle attention aux attentes des entreprises et organisant des ateliers où des managers travaillant dans des secteurs différents ont l'opportunité de se rencontrer afin d'échanger sur leurs pratiques	- La Revue Durable (2007) - Saikku, L. (2006). Eco-industrial parks: A background report for the eco-industrial park project at Rantasalmi, Publications of regional Council of Etelä-Savo

N°	Nom du projet	Lieu	Echelle	Date de début	Acteur en charge du projet	Nombre de participants	Résultats	Facteurs clés de succès mis en avant	Sources
7	Waste minimisation in Northamptonshire	Northamptonshire, Royaume-Uni	Pays, décliné au niveau des counties	1990s		20 clubs de minimisation des déchets et d'efficacité des ressources (ratio entreprises réalisant des formations à la minimisation des déchets / unité de population 9 fois supérieur aux autres counties des East Midlands)	<p>Au niveau du RU, 1993-2004, 121 clubs: 45% des clubs font CR d'économies pour un total de 56 m £, avec une moyenne de 26 300 £ par entreprise membre d'un club et un ratio moyen économies / financement externe de 6,2.</p> <p>Pour les clubs du N. le ratio économies par unité de coût varie de 20 (Northampton) à 7, 1 (Corby Waste Not), contre 51,2 (Resource Efficiency Action Programme, Scotland) à 0,8 (bete) au niveau national. La valeur médiane est de 6,2.</p> <p>Clubs du N: 174 entreprises, dont 90% sont des PME. Ex: NREP (un des projets du N.), 19 entreprises en 2005: 600£ par entreprise pour participer au projet, économies potentielles totales: 3 762 529 £ (environ 643 m en efficacité des processus, 640 m en matières premières, 811 m en électricité, 510 m en déchets solides), dont 60% réalisées après 2 ans. La moyenne d'économies annuelles / entreprises est d'environ 119 m £. Cependant, même en considérant les économies potentielles, 40 % des entreprises n'économiserait toujours pas 1% de leur CA (alors qu'il a été démontré qu'il est possible d'atteindre 4%, Pratt & Phillips, 2000).</p>		Phillips, P.S., Barnes, R., Bates, M.P. & Coskeran, T. (2006). "A critical appraisal of an UK county waste minimisation programme: The requirement for regional facilitated development of industrial symbiosis/ecology", Resources, Conservation and Recycling
8	Ecosite	Genève, Suisse	Canton	2003 (en cours)	Projet mené dans le cadre de la loi Agenda 21 par un groupe de travail regroupant les principaux services de l'Etat de Genève.	<p>Etude du métabolisme industriel du canton, afin de dresser une cartographie des principaux flux et stocks de matières et d'énergie</p> <p>Initiation en 2005 d'une dynamique de bouclage des flux de matières, d'eau et d'énergie (synergies de mutualisation et de substitution) regroupant 19 entreprises (sur les 43 contactées) appartenant à des secteurs d'activités variés.</p>	<p>- 7 pistes de création d'activités ont été identifiées (régénération de solvants, mise en place d'un service d'essuyage, récupération / réparation de palettes, production d'aliments pour animaux...).</p> <p>- Pas d'indicateur précis mis en place en 2006, mais des bénéfices environnementaux (limitation de la saturation des capacités de traitement de déchets, utilisation pragmatique des ressources en eau et en énergie, augmentation du taux de valorisation des déchets et effluents) et économiques (baisse du coût des déchets pour les industriels et la collectivité) sont attendus.</p> <p>- Un rapport d'activité doit être remis dans le courant de l'été 2008 à l'Etat de Genève. Des études économiques ont été initiées pour comparer le prix de la matière première à celle de la matière réutilisée, pour évaluer les coûts de transformation, de transport. D'après G. Massard, le modèle de l'analyse coût-bénéfice est le plus approprié.</p> <p>- Ex: Genève-Lac-Nation: pomper l'eau du lac en profondeur et à en extraire la chaleur l'hiver à l'aide de pompes à chaleur pour chauffer des bâtiments. L'été, l'eau est simplement pompée et circule dans le réseau de chauffage, refroidissant ainsi les mêmes locaux (T eau = 8% environ, toute l'année). Ce projet permet d'économiser 1,5 Kt de mazout / an économisées soit 4,8 Kt / an équivalent CO2 et environ 400 Km3 /can d'eau.</p>	<p>- G. Massard souligne le « niveau de connaissances en matière d'environnement et de flux (...) très élevé » , grâce à l'éducation faite en amont par les services de l'Etat.</p>	<p>- La Revue Durable (2007)</p> <p>- Guide Ecosind 2006</p> <p>- Echange de mails avec G. Massard, Ingénieur Environnement à l'ICAST (document 4. Genève - Lac - Nation - Ecologie industrielle et valorisation du CO2?)</p>

N°	Nom du projet	Lieu	Echelle	Date de début	Acteur en charge du projet	Nombre de participants	Résultats	Facteurs clés de succès mis en avant	Sources
9	Ines (Industrial Ecosystem Project)	Rotterdam, Pays-Bas	Zone pétrochimique	Phase 1: 1994-1997 Phase 2: 1999-2002 (INES Mainport) Phase 3: 2003-2007 (Rotterdam Harbour Industry Complex Programme - HIC)	Initié par l'association Europort / Botlek Interests Industry avec 80 partenaires industriels	80 sociétés de la zone pétrochimique du port Transformation d'un parc industriel existant en EIP L'objectif premier était la mise en œuvre de systèmes de management environnemental au sein de chaque entreprise; échanges d'eau et de chaleur.	Estimations des coûts et bénéfices (économiques et environnementaux): - Coûts de réalisation: > 100 M\$ - Bénéfices économiques: > 16 M\$ par an, qui devraient donc permettre un retour sur investissement en 6-7 ans - Bénéfices environnementaux: - 157,8 MWth energy - 152,2 M Nm ³ gaz par an - 272 500 tonnes CO ₂ - 225,7 tonnes NO _x - 158 MW de chaleur perdu - utilisation réduite d'autres ressources	- Aux Pays-Bas, les taxes sur les déchets sont quatre à cinq fois supérieures à celles existant en France tandis que l'épandage et le stockage de ceux-ci sont interdits - Double objectif économique et environnemental simultané (contrairement aux projets américains) - Participation active des entreprises au projet (temps, argent, autres ressources...) les coûts étant partagés entre gouvernement et entreprises tandis que les coûts de réalisation incombent entièrement aux entreprises (si ce n'est les subventions publiques dont elles peuvent bénéficier) - Approche progressive: mise en place de projets de prévention de la pollution en utilisant des infrastructures communes (peu risqués avec un potentiel bénéfice économique et environnemental substantiel). Lorsque ces premiers s'avèrent un succès, les entreprises envisagent un développement renforcé de leurs relations et sont plus favorables pour investir dans des projets avec un risque et des bénéfices économiques supérieurs - Présence d'une association d'entrepreneurs comme jouant le rôle de plate-forme pour éduquer et informer les entre	- Heeres, R.R., Vermeulen, W.J.V. & de Walle, F.B. (2004). Eco-industrial park initiatives in the USA and the Netherlands: first lessons, Journal of Cleaner Production - Saikku, L. (2006). Eco-industrial parks: A background report for the eco-industrial park project at Rantasalmi, Publications of regional Council of Etelä-Savo - Entretien avec C. Traisnel, directeur de l'association CD2E
10	RiVu (Rietvelden / Vutter)	Den Bosch, Pays-Bas		1996		Plus de 200 entreprises	Estimations des coûts de planification: 100 000 \$, bénéfices non connus	Idem	Idem
11	Russian Kola Science Center	Péninsule de Kola, Russie	Zone industrielle ("complex utilization" proche du concept de symbiose industrielle)	1980s	Comité Central du Parti Communiste (Decree 338)	9 unités de productions reliées par 20 flux de déchets ou de produits dérivés.	Eco-efficience supérieure du premier, même si toutes les émissions environnementales néfastes ne sont pas réduites. En revanche, grâce aux technologies end-of-pipe et de prévention amont de la pollution, les émissions sont similaires dans les 2 systèmes, rendant le second modèle potentiellement plus intéressant dans un environnement tel que celui de Kola. Exemple: - Pour le cupro-nickel: augmentation de l'éco-efficience de 0.99 t produit à 20.31 t produit par 1 t SO ₂ émise entre 1985 et 2003 dans le modèle intégré, contre 0.99 t produit à 1,51 t produit par 1 t SO ₂ émise pour le modèle actuel sur la même période.		Salmi, O. (2007). Eco-efficiency and industrial symbiosis – a counterfactual analysis of a mining community, Journal of Cleaner Production
12	Ecosind - District de Prato	Toscane, Italie	District industriel			Exploitations artisanales et PME (majorité d'entreprises tertiaires spécialisées dans quelques phases du cycle productif textile)	Installation d'une station de cogénération permettant une économie annuelle de 220 K€ sur la facture énergétique totale. L'investissement est intéressant car, la durée de vie utile de cette station étant estimée à environ 50 000 h d'exercice (soit 13 ans). La durée d'amortissement étant de 10 ans, à un taux d'intérêt de 8 %, l'économie après calcul de la tranche d'amortissement sera de 41 K€/an, obtenant ainsi une VAN de 270 K€. Réduction des émissions de gaz à effet de serre environ égale à 9,2 K t/an, c'est-à-dire 4 % grâce à l'utilisation actuelle de la cogénération		Guide Ecosind 2006

N°	Nom du projet	Lieu	Echelle	Date de début	Acteur en charge du projet	Nombre de participants	Résultats	Facteurs clés de succès mis en avant	Sources
13	Ecopal	France	Territoire du Dunkerquois	2001	Municipalité dans le cadre de l'Agenda 21 de Grande-Scynthe (Daniel Truy), puis après le changement de municipalité, relais pris par les industriels et création de l'Association Loi 1901, Ecopal.	Initialement: zone industrielle de Petite-Scynthe/ Grande Scynthe, avec à ce jour 50 entreprises participantes (grandes entreprises: EDF, GDF, Arcelor, Sollac... et PME-PMI: Campbell Générale, Condimentaire, ADS); clubs d'échanges sur les pratiques environnementales, contrats cadres mutualisant collecte de déchets dangereux... Extension en cours à 6 zones industrielles, soit 150 entreprises supplémentaires	<ul style="list-style-type: none"> - Gestion mutualisée pour le traitement de certains déchets, mutualisation de différents services (sécurité, restauration...) - Gaz de France a installé une centrale énergétique DK6 pour la récupération de gaz sidérurgiques fatals d'Arcelor Mittal, afin de les réutiliser comme combustibles dans le cadre du chauffage urbain (et notamment des usines Arcelor Mittal): 4,7 Mds m3 de gaz sidérurgiques traités / an et 255 MW électriques produits à partir des gaz sidérurgiques. - Une ferme piscicole s'est créée à proximité d'une centrale nucléaire d'EDF afin de récupérer l'eau chaude rejetée par celle-ci - La mutualisation de la collecte des déchets DEE permet de partager les frais de transport entre l'ensemble des entreprises participantes ; plus celles-ci sont nombreuses, plus leurs coûts propres diminuent. Ainsi, l'évacuation des déchets par une entreprise seule s'élève à 300 €, alors que le forfait est de 137 € dans le cadre de la gestion mutualisée, somme qui est répartie entre les entreprises adhérant au service. Le gain économique est donc de 20 à 50% selon le participant - Diagnostic énergie régional auquel 6 entreprises ont participé: coût d'un diagnostic: 1,5 K€ (au lieu de 7,5 K€ - subvention Francee 80%), économies : 300 K€ / an pour les 6 entreprises, 620 tonnes équivalent pétrole / an 	<ul style="list-style-type: none"> - Approche pragmatique: les PME ne sont pas approchées sous l'angle "écologie industrielle", mais sous l'angle "animation de zone industrielle". Même si le but ultime de l'EI est l'échange de flux, la mutualisation est un premier pas nécessaire avant d'envisager la mise en oeuvre de synergies de substitution. "À l'origine, l'idée est de rattacher le projet d'écologie industrielle à une dynamique collective d'entreprises, de manière à ce que les responsables puissent tirer de véritables profits de leur participation au projet." (Didier Cousin, Secrétaire d'Ecopal) - Approche progressive: une fois que la confiance s'est installée, les PME-PMI sont invitées à participer aux clubs d'échanges thématiques - Problématique de l'échelle géographique et de la masse critique d'activités industrielles suffisantes pour permettre la circulation et l'échange de flux de matières, d'énergie (zone industrielle de Deux-Scynthes trop petite, d'où une nécessaire extension à l'ensemble du bassin Dunkerquois voire de la région Nord Pas-de-Calais. Mais, la taille n'est pas un obstacle, si la démarche est intégrée) - Obstacles: réglementation rigide telle que cl 	<ul style="list-style-type: none"> - http://www.cerdd.org: dossier Ecopal - Entretien téléphonique avec P. Ricart, Coordinatrice de projet à Ecopal (17/04/2008)
14	Système de recyclage de Styrie	Styrie, Autriche	Province		Formation spontanée	Réseau complexe d'échanges entre des entreprises appartenant à des secteurs d'activités divers (agriculture, agro-alimentaire, plastique, textile, papier, énergie, traitement des métaux, menuiserie, matériaux de construction et traitement et négoce de déchets)	<ul style="list-style-type: none"> - Revenus économiques des produits dérivés - Coûts inférieurs ou qualité supérieure de certains produits dérivés par rapport aux matières premières équivalentes - Economies sur les coûts de mise en décharge - Réduction des émissions, recyclage (1992: 34 Kt de gypse, 445 Kt de bois résiduel, 200 Kt de scories d'acier...) 		<ul style="list-style-type: none"> - Saikku, L. (2006). Eco-industrial parks: A background report for the eco-industrial park project at Rantasalmi, Publications of regional Council of Etelä-Savo - http://www.unep.fr/pc/ind-estates/casestudies/Styria.htm
15	Burnside Industrial Park	Halifax, Canada	Zone d'activité	1992	Eco-Efficiency Center	1 400 PME dans la zone d'activité Ex: réutilisation du polystyrène d'une société informatique par une société d'emballage	<ul style="list-style-type: none"> 2000: résultats pour 34 entreprises inscrites au programme: <ul style="list-style-type: none"> - 1 569 t de déchets solides préservés de l'enfouissement - 119 K litres de déchets liquides préservés des égouts - 13,5 M litres de consommation d'eau évités - 90 602 \$ économisés Farnell LTd. a substitué le glycol à l'eau en installant un nouveau circuit de refroidissement. Les économies sont estimées à 5 K\$ / an, permettant de rembourser l'investissement en moins d'un an, la consommation d'eau a diminué de 85 %. 		Etude APREIS

N°	Nom du projet	Lieu	Echelle	Date de début	Acteur en charge du projet	Nombre de participants	Résultats	Facteurs clés de succès mis en avant	Sources
16	Centre de transfert technologique en écologie industrielle (CTTEI)	Sorel-Tracy, Québec, Canada	Ville	1999	CTTEI	- BRIQ : Bourse de Résidus Industriels du Québec (plateforme virtuelle d'échange de sous-produits industriels) - Excell Materials recycle les déchets de l'industrie du métal comme abrasifs pour le nettoyage haute pression, comme matériaux de filtration dans les stations d'épuration ou pour les travaux routiers.	- Réutilisation de 2 Mt de résidus industriels / an dans le secteur (soit 80% des déchets industriels solides de Sorel-Tracy) - Création d'entreprises high-tech. Ex: Ferrinov, qui recycle la poussière issue de la sidérurgie en pigments utilisés en peinture et dans les plastiques; le processus ne nécessite pas de ressources minérales primaires, requiert des ressources énergétiques réduites, ce qui permet de réduire les émissions de GES.		Guide Ecosind 2008
17	Ecoparc de Saint-Félicien	Saint-Félicien, Québec, Canada	Zone agro-industrielle		PGF Enviro et Centre québécois de développement durable	Construction d'une unité de cogénération de 25 MW alimentée par les déchets de l'industrie forestière et d'un réseau de distribution d'eau chaude. L'énergie thermique issue de l'unité de cogénération est distribuée à des entreprises de production agricole (chauffage des serres), de transformation agroalimentaire et agro-industrielle.	- Bénéfices économiques: économies de 80% à 80% / an des frais de chauffage, retour sur investissements en 24 à 36 mois - Bénéfices environnementaux: réduction de 80% des émissions de gaz à effet de serre, réduction des impacts sur l'eau, les sols, la biodiversité et la santé humaine.		http://www.enviroclub.ca/fiches/index.php
18	Brownsville regional IS	Brownsville, USA	Région	1994	Projet pilote choisi par le Presidents Council for Sustainable Development	EIP virtuel, les 34 entreprises participantes n'étant pas localisées dans un unique parc industriel	Coûts de développement du programme informatique estimés : 250 000 \$, bénéfices inconnus	- Motivation économique (création d'emplois est l'objectif premier) avant d'être environnementale - Manque d'investissement des entreprises: sont plus passives qu'aux Pays-Bas et leur contribution financière à la programmation est donc moindre	Heeres, R.R., Vermeulen, W.J.V. & de Walle, F.B. (2004). Eco-industrial park initiatives in the USA and the Netherlands: first lessons, Journal of Cleaner Production
19	Fairfield	Baltimore, USA	Zone industrielle	1994	Projet pilote choisi par le Presidents Council for Sustainable Development	Environ 80 entreprises, parc créé à partir d'une zone industrielle préexistante	Prévisions originales du projet: environ 62 M\$ de coûts de réalisation, bénéfices économiques prévus dans les 10 années à venir (article de 2004): création minimum de 2 500 emplois	Idem	Idem
20	Cape Charles STIP	Cape Charles, USA	Ville	1994	Projet pilote choisi par le Presidents Council for Sustainable Development	Inconnu, création "from scratch" (pas de parc industriel préexistant)	Estimations des coûts de réalisation: environ 7,5 M\$, bénéfices inconnus (395 emplois directs créés) La désignation EIP n'a pas permis d'améliorer la compétitivité économique du site, qui est en vente, sans qu'aucun acheteur potentiel ne soit prêt à opérer le parc sous le système de engagements restrictifs destinés à promouvoir un comportement éco-industriel => abandon des activités EIP	Idem	- Idem - Gibbs, D. & Deutz, P. (2007). Reflections on implementing industrial ecology through eco-industrial park development, Journal of Cleaner Production

N°	Nom du projet	Lieu	Echelle	Date de début	Acteur en charge du projet	Nombre de participants	Résultats	Facteurs clés de succès mis en avant	Sources
21	Phillips Eco Enterprise Center, Minneapolis	Minnesota, USA	Zone industrielle	1993 (création du Green Institute) et 1999 (création du PEEC)	Rôle pivot du "Green Institute", une association à but non lucratif	Regroupement sur un même site de 15 entreprises (entreprises "vertes", éco-activités industrielles et commerciales complémentaires)	<p>Réduction de l'utilisation et de la dépendance aux énergies fossiles en utilisant une pompe de chaleur terrestre (ground heat pump)</p> <p>2000: budget annuel de 3 M\$, financé à 75% par le revenu des activités et à 25% par les financements locaux et nationaux (les dons sont utilisés pour les fonctions administratives, RH et la planification). Coût de construction de l'éco-centre supérieur d'environ 10% par rapport à une construction traditionnelle, mais retour sur investissement en 4 à 5 ans grâce aux économies de fonctionnement (utilisation de 55% de l'énergie d'une construction de même taille: énergie solaire, récupération des eaux de pluie, utilisation de 79% de matériaux récupérés dans la construction). Création de 240 emplois.</p> <p>Considéré comme un des centres les "plus économes et efficaces au monde en matière de gestion des ressources et d'énergie"</p>		- Gibbs, D. & Deutz, P. (2007). Reflections on implementing industrial ecology through eco-industrial park development, Journal fo Cleaner Production - Etude de l'APREIS
22	Kwinana Industrial Area	Perth, Australie	Zone industrielle	1980s		Industries diverses: usines de traitement des minéraux, centrale électrique, station d'épuration, cimenterie, groupe d'industries de services. Mise en œuvre de 32 synergies de sous-produits entre entreprises, de 15 synergies utilitaires (utilisation partagée d'infrastructures telles que pour la collecte d'eau ou la cogénération) et synergies d'approvisionnement entre 22 entreprises locales et 13 extérieures à la région.	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction des dépenses pour la gestion de la réserve de gypse (à long terme) - Réduction du coût de la source de gypse pour la raffinerie d'alumine - Economies pour Air Liquide pour produire du CO2 alimentaire à partir d'autres formes d'émission de CO2. - 2 installations de cogénération installées en 1996 représentent une source fiable d'approvisionnement en électricité et en vapeur. Ces infrastructures permettent à BP de réduire de 170 K tonnes / an les émissions de CO2 et d'économiser 15 M A\$ en stoppant l'ancienne chaudière. 		Guide Ecosind 2006
23	Gladstone Industrial Area	Gladstone, Australie	Zone industrielle			6 entreprises locales et 1 externe impliquées mettant en œuvre 5 synergies, 4 de sous-produits et 1 d'infrastructures.	<ul style="list-style-type: none"> - Construction d'un pipeline permettant à Queensland Alumina d'utiliser les effluents secondaires de Calliope River Sewage Treatment Plant pour son procédé de nettoyage des boues. Elle a ainsi réalisé des économies de 6,5 ML d'eau / jour et a mis fin à la décharge des effluents traités de CRSTP dans les cours d'eau locaux. 		Van Beers, D., Corder, G.D., Bossilkov, A. & Van Berkel, R. (2006). Regional Synergies in the Australian Mineral Industry. Case studies and enabling tools, Material, Minerals, and Metal Ecology Conference, Novembre 2006, Cape Town, South Africa

N°	Nom du projet	Lieu	Echelle	Date de début	Acteur en charge du projet	Nombre de participants	Résultats	Facteurs clés de succès mis en avant	Sources
24	Nanning Sugar Co., Ltd. (société de l'industrie sucrière)	Guangxi, Région autonome de Zhuang, Chine	Entreprise		Société Nanning Sugar	Transition vers une société circulaire intégrée dans la stratégie de développement sur le mode mis en avant par les autorités chinoises (réduire, réutiliser et recycler, bouclage des cycles de matière et utilisation recyclée de l'énergie) Mise en œuvre de 2 chaînes éco-industrielles principales entre les 6 entreprises affiliés et 8 filiales du groupe: - cane→sugar-refining→turning molasses into alcohol→turning alcohol slops into compound fertilizer→using compound fertilizer when planting cane - cane→sugarrefining→bagasse→pulping→paper-making. 6 chaînes secondaires ont également été mises en oeuvre	1. Investissements de 190 M CNY pour construire une nouvelle papeterie - Nouvelle ligne de production ("stop sugar-refining to pulping") à partir de 2001; en 2004, les revenus additionnels des ventes s'élèvent à 104 M CNY et les profits et taxes à 45,85 M CNY 2. Création d'un unique système de production d'alcool pour les 6 entreprises affiliées (objectif: réduire coûts et améliorer l'efficacité): - Investissements pour centraliser la production: 30 M CNY; et pour construire une nouvelle ligne de production de compound fertilizer - En 2004, profit de la production d'alcool: 16,14 M CNY (augmentation de 113,2% par rapport à 2003) + normes de qualité les plus exigeantes satisfaites par le fertilisant (DB45/02-1995). ... Au total, au niveau économique: - 1997 (avant les investissements): Valeur de la production: 832,6 M CNY, CA: 807,82, Taxes: 107, Profits: 3,03 - 2004: 2046 (+ 145%), 2045,11 (+ 153%), 270,66 (+ 153%), 170,33 (+ 5521%) Au niveau environnemental (pour 10,000 CNY de valeur de production industrielle) - 1997: 17,36 kg de COD, 41, 93 kg de SO2, 383,33 - 2004: 6,60 (-62%); 17,36 (-59%); 249,12 (-35%)	- Suren Erkman loue l'« action structurante »6 des autorités chinoises, qui proposent une vision économique au plus haut niveau dans le domaine de l'environnement, même s'il souligne qu'il faut se méfier des effets d'annonce.	- La Revue Durable (2007) - Yang, S. & Feng, N. (2008). A case study of industrial symbiosis: Nanning Sugar Co., Ltd. In China, Resources, Conservation & Recycling
25	Kawasaki Zero Emission Industrial Park	Kawasaki, Japon	Zone industrielle	1980s	Projet mené en concertation par la municipalité de Kawasaki et les entreprises locales	Zone industrielle de la côte de Kawasaki regroupe 50 entreprises de l'industrie lourde (raffinage de pétrole, production d'acier, production d'électricité, chimie) ainsi qu'un grand nombre de PME actives dans le domaine du recyclage. Mise en place de programmes de recyclage et de réutilisation des matières entre les usines, de réduction des émissions, promotion d'un support logistique et coordination des échanges de matières, de recherche et développement. Le plan global doit être achevé en 2010.	- Utilisation des cendres issues d'usines d'incinération pour la production de ciment - Utilisation de déchets pétroliers en tant que combustible pour des fours de production - Recyclage d'appareils électroniques pour la production d'acier - Création d'un fourneau utilisant des déchets plastiques municipaux au lieu du charbon (Financement partiel du système par le MITI), permettant de recycler 40 Kt de déchets plastiques par an. - Mutualisation de l'énergie utilisée par les entreprises participantes pour améliorer l'efficacité énergétique globale. - Le programme d'utilisation en cascade de la chaleur énergétique issue d'une entreprise à proximité du Zero Emission Industrial Park rencontre des difficultés, car celle-ci n'a pas encore trouvé de bénéfice économique à court-terme de cet arrangement.	- Réticence des PME à investir dans les équipements nécessaires au bouclage des cycles de matière et d'énergie en raison de la stagnation voire de la récession économique structurelle au Japon.	http://www.indigodev.com/IndigoEco-Japan.doc
26	Forest Industry	Etude théorique dans l'industrie forestière				4 usines: une fabrique de pâte à papier, une scierie, un réseau de chauffage du district et une usine d'amélioration de biocarburants	Comparaison théorique avec la méthode MIND entre un modèle où les usines fonctionnent de manière autonome et diverses autres configurations, où elles sont reliées par des échanges: - De 3,8% à 17,6% de réduction des coûts totaux du système - Evolution de la production d'électricité: de -1% à =1,7% (en moyenne hausse) - Diminution des déperditions de vapeur d'eau de 10,8% à 78% (système totalement intégré) - Diminution des déperditions de chaleur de 0,1% à 80,4% (système totalement intégré)	- Complémentarité initiale des activités étudiées qui ne requiert pas de lourds investissements dans des équipements (qui, en outre, ne sont pas pris en compte dans les calculs)	Karlsson, M. & Wolf, A. (2007). Using an optimization model to evaluate the economic benefits of industrial symbiosis in the forest industry, Journal of Cleaner Production

Annexe 2 : Exemples d'études de cas

Cas 1 / Une association de promotion de l'écologie industrielle : Ecopal

Ecopal : ECOnomie et ECOlogie Partenaires dans l'Action Locale, Association Loi 1901 à but non lucratif

Historique :

1998-99 : Daniel Truy initie la dynamique de l'écologie industrielle dans le cadre de l'Agenda 21 de la Municipalité de Grande Scynthe. La municipalité a également reçu l'aide de Suren Erkman, une référence dans la discipline (pré-étude de faisabilité), tandis que certains responsables issus du monde de l'entreprise commencent à s'intéresser au sujet (Didier Cousin, délégué collectivités territoriales de Gaz de France)

2001 : création de l'association Ecopal avec à sa tête des donneurs d'ordre locaux de renom (grandes entreprises telles que Sollac, Arcelor, EDF, GDF,... et des PME-PMI) pour prendre le relais des activités initiées par la municipalité de Grande Scynthe (suite au changement de municipalité).

Des clubs d'échange, des commissions de travail sont mis en place autour de différents thèmes (déchets souillés, chiffons...), regroupant les responsables environnement des grandes entreprises, afin de leur permettre de discuter des problématiques qui les préoccupent et d'échanger autour de leurs pratiques. L'objectif était par la suite de mettre en œuvre des actions de groupement des déchets.

Parallèlement, les PME-PMI (de taille très variable – de 3-4 employés à 500 – et appartenant à des secteurs aussi divers que l'agroalimentaire, la chimie, la maintenance industrielle, la chaudronnerie...) sont prospectées afin de les sensibiliser aux questions environnementales (notamment la gestion des déchets) et de développer les pratiques de mutualisation (regroupement des déchets mais aussi de divers services aux entreprises tels que la gestion de la sécurité ou du fléchage sur la zone industrielle, la mutualisation des services de restauration) en leur démontrant les gains économiques en résultant (grâce à la mutualisation des coûts); mais le concept d'écologie industrielle n'est pas directement évoqué, car le « métabolisme industriel » ou l'« échange de flux » n'ont pas la dimension pratique requise pour leurs préoccupations... Après 3 ou 4 ans de collaboration avec les entreprises, celles-ci sont invitées à participer aux clubs environnement. A l'heure actuelle,

des patrons de PME sont leaders de commissions de travail (ex : patron d'une chaudronnerie très sensible aux questions d'environnement).

Quelle compréhension de l'écologie industrielle ?

Le but est bien à terme d'échanger les flux, mais l'étape préliminaire met l'accent sur la mutualisation, bien plus que sur la substitution ; il faut avant tout être prêt à échanger autour d'une table (existence de filières pour le traitement des déchets, qui pourraient être utilisées en commun par des industriels). Il n'est pas envisageable dans un premier temps de boucler les flux. Depuis début 2007, le thème de l'échange des flux commence néanmoins à être abordé avec les PME (2 personnes sur les 6 employés de l'association travaillent sur ce sujet, après avoir été formées aux bases de données existantes, telles que le logiciel Prestéo, outil qu'Ecopal est la première à utiliser en France). D'après le Président d'Ecopal, l'association « est en train d'essayer les plâtres pour les autres ».

Des exemples de projet :

Des contrats-cadre ont été mis en place pour mutualiser la collecte de déchets entre cinquante entreprises, en particulier pour des déchets toxiques ainsi que la collecte et le tri du papier de bureau et du carton.

Les grandes entreprises, membres d'Ecopal, mènent aussi des projets d'écologie industrielle entre elles. Ainsi, Gaz de France a installé des cassis pour la récupération des gaz sidérurgiques de Sollac-Arcelor avec une centrale énergétique, afin de les réutiliser comme combustibles dans le cadre du chauffage urbain. Ce système permet d'utiliser des ressources ayant un pouvoir calorifique et qui auparavant étaient rejetées dans l'atmosphère.

Une ferme piscicole s'est créée à proximité d'une centrale nucléaire d'EDF afin de récupérer l'eau chaude rejetée par celle-ci.

Quels résultats ?

Les industriels se sont rendu compte que valoriser des déchets ou des flux perdus présente un intérêt économique. Une fois la confiance installée, les entreprises prennent conscience au travers de ces différentes initiatives que se mettre en réseau peut être économiquement avantageux, en particulier grâce à la réalisation d'économies d'échelle.

Par exemple, la mutualisation de la collecte des déchets toxiques permet de partager les frais de transport entre l'ensemble des entreprises participantes ; plus celles-ci sont nombreuses, plus leurs coûts propres diminuent. Ainsi, l'évacuation des déchets par une

entreprise seule s'élève à 300 €, alors que le forfait est de 137 € dans le cadre de la gestion mutualisée, somme qui est répartie entre les entreprises adhérant au service.

La prise en compte du facteur économique, si elle est un atout pour le déploiement des actions de mutualisation menées par Ecopal, constitue également un frein en cela qu'elle peut être priorisée au détriment de la notion d'environnement industriel chère aux institutions dunkerquoises. « *Valoriser les déchets implique parfois de changer les processus. Et si cela revient moins cher à un industriel d'acheter de la matière première que des résidus secondaires, il optera pour le premier choix ! Cela reste un raisonnement strictement économique avant tout* » souligne Lobna Rakik, ancienne chef de projet chez Ecopal.

Ces résultats évidents nourrissent quelques critiques du CERDD quant au caractère basique des actions entreprises par Ecopal ; Peggy Ricart pense néanmoins que cela donne de l'espoir pour l'écologie industrielle. Une équipe au sein de l'association Ecopal est depuis peu dédiée à l'étude des flux, donc à l'écologie industrielle pure et souhaite démontrer en 2008 les possibilités de synergies et d'échanges entre entreprises. La démarche est nécessairement progressive ; on ne pouvait envisager en 2002, alors que l'association avait été créée en 2001, de mettre en place immédiatement des synergies. La mise en place de partenariats avec les collectivités, la Communauté Urbaine de Dunkerque, la chambre de commerce et des entreprises s'avère un travail de longue haleine.

Des éco-entreprises se sont déployées dans la région pour apporter un service de gestion des effluents : Bois Environnement Service, une entreprise d'insertion qui récupère et valorise le bois ; Emmaüs, qui récupère, trie et valorise les D3E, le plastique et le bois ; NSU Cash palettes, qui récupère et répare des palettes bois ou encore Agriopale Spycker, une plateforme de compostage des déchets.

Malheureusement, l'association n'accorde pas assez de temps au chiffrage et à la valorisation des actions entreprises.

Les conditions de succès et les difficultés rencontrées:

- « Ne pas parler d'écologie industrielle au premier abord ! ». Il faut avant tout prendre le temps d'écouter les attentes des entreprises, les aider dans la gestion de leur zone d'activité. Lorsque la confiance s'installe, celle-ci doit être entretenue au travers d'évènements conviviaux (ex : barbecue annuel) et on peut alors commencer à enquêter sur leurs déchets, leurs problématiques énergétiques et à estimer le potentiel. Les entreprises apprécient également le rôle d'animateur de zone et de guichet unique joué par Ecopal : les entreprises contactent l'association lorsqu'elles rencontrent des

problèmes, et même si ceux-ci ne relèvent pas de ses compétences, elle s'efforce de suivre les dossiers.

- Problématique de l'échelle géographique et de la masse critique d'activités industrielles suffisantes pour permettre la circulation et l'échange de flux de matières, d'énergie (zone industrielle de Deux-Scynthes trop petite, d'où une nécessaire extension à l'ensemble du bassin Dunkerques voire de la région Nord Pas-de-Calais. Mais, la taille n'est pas un obstacle, si la démarche est intégrée dès la naissance d'un projet de nouvelle zone d'activité. Il est nécessaire pour développer des filières de sous-produits à même d'alimenter des activités industrielles au sein d'une zone d'activité de parvenir à une concentration suffisante de flux ayant des caractéristiques similaires.
- Les barrières juridiques et réglementaires : une entreprise qui raffine des huiles de poisson et des huiles végétales souhaiterait récupérer les graisses résultant de la production du beurre de cacao d'une autre usine. Les deux entités disposaient des capacités nécessaires pour la récupération et l'acheminement, mais la classification de ce produit comme déchet par la DRIRE pose problème ; il faudrait toute une procédure d'autorisation préfectorale pour pouvoir utiliser cet effluent. Des démarches sont menées auprès de la DRIRE pour voir s'il serait envisageable de tester, de démontrer qu'il n'existe pas de risques environnementaux dans la récupération des déchets.

Sources :

- Entretien avec un coordinateur de projets pour les PME-PMI (17 avril 2008)
- Informations complémentaires : <http://www.cerdd.org>

Cas 2 / Une symbiose industrielle dans l'industrie forestière

La symbiose industrielle (SI, un sous-domaine de l'écologie industrielle) engendre à la fois des bénéfices économiques pour les entreprises impliquées et des bénéfices environnementaux en réduisant les impacts => situation « win-win ». Cependant, peu d'études viennent confirmer cette hypothèse, même à Kalundborg, l'exemple de symbiose industrielle le plus documenté dans la littérature, aucune évaluation approfondie n'a été réalisée (ex : évaluation quantitative de Brings Jacobsen (Industrial symbiosis in Kalundborg, Denmark. A quantitative assessment of economic and environmental aspects. *Journal of Industrial Ecology*, 2006;10(1-2):239-55) limitée aux échanges d'eau, même si elle apporte une confirmation à cette théorie ; des estimations des économies générées par l'ensemble du système ont été menées, mais il manque une analyse détaillée pour confirmer ces chiffres et il s'agit plus d'approximations que de calculs (site Internet de la symbiose industrielle de Kalundborg). Chertow et Lombardi (Chertow MR, Lombardi DR. Quantifying economic and environmental benefits of co-located firms. *Environmental Science & Technology*, 2005;39(17):6535-41) ont réalisé une étude quantitative d'un système de SI à Porto Rico, similaire à celui de Kalundborg et ont identifié des bénéfices économiques et environnementaux pour les différentes entreprises participantes.

Dans l'évaluation des SI, il est difficile d'évaluer quelles sont les économies vraiment attribuables au système intégré et celles qui sont liées à d'autres moyens de production plus propre (« cleaner production ») ou auraient été générées de toute manière. En outre, nombre limité d'exemples et question du référentiel de comparaison.

Méthode utilisée :

Système étudié dans l'industrie forestière: une fabrique de pâte à papier, une scierie, un réseau de chauffage du district et une usine d'amélioration de biocarburants.

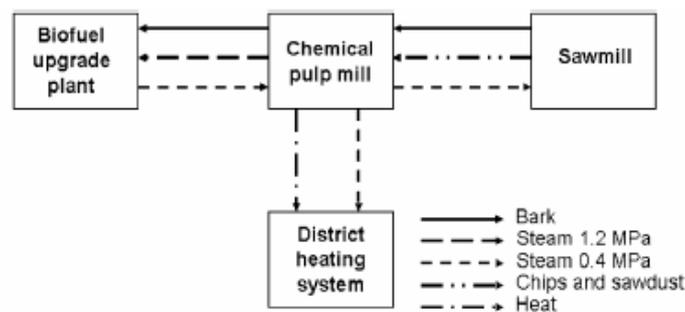


Fig. 2. A schematic picture of the system including possible material and fuel exchange. The system boundary used in the study is drawn around all subsystems.

MIND (Method for analysis of INDustrial energy systems), une méthode d'optimisation pour étudier les flux de matière et d'énergie et évaluer la structure modélisée, afin notamment de trouver les améliorations possibles. Les résultats obtenus permettent de comparer les coûts des différentes configurations, afin d'aider à la prise de décision lors de la planification d'initiatives de symbioses industrielles dans l'industrie forestière. Cette méthode permet une approche avec plusieurs objectifs (même si cette étude se limite à la perspective financière).

Résultats :

Bénéfices financiers et système plus stable de la symbiose industrielle par rapport au mode où les entités fonctionnent de manière autonome. Mais, il est difficile de généraliser à partir de cette étude de cas : il est possible de montrer qu'une SI peut générer des bénéfices économiques, mais la magnitude de ceux-ci doit être évaluée au cas par cas. En effet, dans toutes les configurations de symbiose envisagée, le coût total du système est réduit par rapport au fonctionnement autonome des entités. Le système le moins coûteux est la SI totalement intégrée.

L'analyse de sensibilité permet de montrer que dans le cas de la SI, les entreprises sont moins affectées par les variations dans le prix de l'essence et par le retrait des certificats « verts » (« green certificates »). Une augmentation des prix du pétrole et/ou de l'électricité rend même la SI plus attractive. Seule exception : une hausse du prix de l'écorce, qui affecte légèrement plus le système intégré. => ces résultats vont à l'encontre de l'hypothèse qui veut que la coopération accroisse la vulnérabilité

Dans ce modèle, les investissements ne sont pas inclus, afin que les différents systèmes soient comparables (mais il est à noter que certains investissements sont évités dans la SI : chaudières de la scierie et l'usine de biocarburants, tandis que d'autres sont nécessaires : tuyaux et arrangements nécessaires au transport des produits dérivés) => il serait donc intéressant d'étudier la rentabilité des différentes configurations.

Table 1
Different cases evaluated in the case study

Case	Chemical pulp mill	Sawmill	Biofuel upgrading plant	District heating system
0	Stand-alone	Stand-alone	Stand-alone	Stand-alone
1	X	Stand-alone	Stand-alone	X
2	X	X	Stand-alone	Stand-alone
3	X	X	Stand-alone	X
4	X	Stand-alone	X	Stand-alone
5	X	Stand-alone	X	X
6	X	X	X	Stand-alone
7	X	X	X	X

X indicates that the specific subsystem is integrated with at least one other subsystem.

Table 5
Results of the modelled cases compared to the reference case (Case 0)

Case	Decrease in system cost [%]	Increase in electricity production [%]	Decrease in steam discharge [%]	Decrease in discharge of waste heat [%]	Increase in bark sales [%]
1	6.5	0.9	10.6	26.3	4.9
2	5.5	1.5	56.8	0.1	-6.1
3	13.5	1.7	56.8	71.7	23.0
4	3.8	-1.0	21.2	0.1	45.2
5	10.8	-0.3	23.8	43.1	57.8
6	9.3	0.5	78.0	0.1	39.2
7	17.6	0.5	78.0	80.4	72.8

Limites :

Cette étude n'évalue pas la répartition des bénéfices économiques entre les différentes entités ; elle n'évalue pas les impacts environnementaux (mais la méthode MIND le permettrait).

Certains avantages liés à la SI n'ont pas été évalués (partage d'infrastructures et de bâtiments, mutualisation du risque et des coûts d'investissements, accès à des ressources rares, optimisation interne accrue pour s'adapter à l'intégration), de même que certains inconvénients potentiels (déperditions liées au transport, conflits d'intérêt, manque de flexibilité du système qui peut réduire l'incitation des différentes entités à minimiser leur production de déchets et à économiser l'énergie).

Source :

- Karlsson, M. & Wolf, A. (2007). Using an optimization model to evaluate the economic benefits of industrial symbiosis in the forest industry, *Journal of Cleaner Production*, 20.

Cas 3 / Les entreprises de gestion de services à l'environnement

Veolia (Energie et Environnement):

Quelle conception de l'écologie industrielle ?

Il semble contre-productif de vouloir rechercher « le Graal » en matière de bouclage des flux. Veolia, en tant qu'entreprise de gestion de services environnementaux, a une position particulière ; l'écologie industrielle s'inscrit au cœur de son activité. La vertu environnementale est inhérente au développement de cette entreprise.

Son marché se partage entre les collectivités locales (environ 50%) et le secteur privé (environ 50%). Pour ce dernier segment, l'objectif est d'identifier des solutions vertueuses pour l'environnement (que ce soit pour l'eau, les déchets ou l'énergie) et qui présentent un avantage économique.

Les enjeux environnementaux actuels ont conduit à la transformation du business model de Dalkia, filiale de Veolia Environnement, de la vente d'énergie à la vente de solutions d'économies d'énergie.

Exemple 1 :

En République Tchèque, une entreprise cliente de Dalkia, utilisant une quantité importante d'énergie pour ses procédés chimiques, récupère des coproduits issus d'une centrale énergétique de cogénération appartenant à Veolia, effluents qui étaient auparavant perdus. Cette solution est source de bénéfices économiques pour l'entreprise cliente, qui se fournit en énergie à un coût moindre, et pour la filiale de Veolia qui bénéficie de la réutilisation de flux. Il résulte également de ce système un impact environnemental moindre.

Exemple 2 :

« La valorisation énergétique du déchet (...). Elle permet de recycler les métaux, de fabriquer du compost, et de produire de l'énergie en brûlant les résidus. L'usine de Miami-Dade aux Etats-Unis (...) fournit de l'électricité à 45 000 foyers, récupère 3 000 tonnes d'aluminium, 36 000 tonnes d'aluminium, 36 000 tonnes d'acier et de métaux et produit près de 80 000 tonnes de compost par an ». (Site Internet : www.veoliaenvironnement.com)

Les moteurs des mesures « vertes » :

Différents moteurs soutiennent l'émergence d'initiatives environnementales diverses et notamment de l'écologie industrielle :

1. Motivation économique : la hausse du coût de l'énergie rend l'utilisation de coproduits (ou matières premières secondaires) plus rentable (mais cette incitation est moins forte en France que dans d'autres pays, car l'électricité demeure relativement peu coûteuse). En outre, il ne faut pas oublier que les salaires des dirigeants sont souvent annexés au résultat de leur entreprise, d'où une incitation forte à privilégier la performance économique.
2. Motivation réglementaire : les réglementations sont de plus en plus strictes quant à l'efficacité énergétique, comme en témoignent les normes pour la construction.
3. Motivation stratégique : les initiatives vertes permettent aux entreprises de se différencier et d'améliorer leur image de marque, même si l'on peut s'interroger sur la pérennité de ce facteur (s'agit-il d'un effet de mode, qui gagne en audience depuis quelques années ou d'un facteur clé ayant une influence durable sur l'activité des entreprises ?)

M. Laurent est donc convaincu de l'intérêt de la mise en œuvre de l'écologie industrielle pour Veolia, mais il se montre plus critique quant aux projets « autarciques » de certaines municipalités ayant pour dessein un bouclage local des flux, même s'il importe de prendre en considération la question du transport dans les décisions des entreprises. Il souligne les risques inhérents à une volonté trop poussée de localisation de l'économie : le traitement des eaux usées requiert par exemple des compétences particulières (que les entreprises de gestion de services à l'environnement connaissent mieux), incompatibles avec une utilisation non maîtrisée de ces flux pour les réutiliser dans le cadre de processus industriels, qui peuvent conduire à des incidents très dangereux. De même, la méthanisation, ou compostage des déchets organiques, nécessite des sources d'approvisionnement diversifiées, sans quoi les composts obtenus ne sont pas stables : on ne peut donc se satisfaire d'une source unique ou peu diversifiée liée à une localisation trop marquée des activités économiques.

Selon lui, l'utilisation optimisée des matières et de l'énergie, notamment la valorisation et la mutualisation des coproduits, qui conduit à repenser complètement les schémas existants s'avère la première priorité. L'approche systémique proposée par l'écologie industrielle apparaît comme une priorité de second plan, tandis que « l'autarcie » prônée par certains est considérée comme « une aberration » (tels les éco-quartiers BedZed – logements 20 % plus chers, ne bénéficiant qu'à quelques centaines de personnes, problèmes dans l'évacuation des

déchets...). La réutilisation et le recyclage ne doivent pas être envisagés au seul niveau local. Une approche pragmatique, en accord avec les considérations économiques, est essentielle. M. Laurent reconnaît que la législation peut parfois représenter une contrainte pour les industriels et un obstacle à la valorisation des ressources, surtout lorsque celles-ci ont la qualification de déchets (la réutilisation de chaleur ne pose ainsi aucun problème), mais elle permet avant tout de prévenir les abus et constitue donc une garantie de protection pour les citoyens.

Sources :

- Entretien avec un directeur R&D Energie d'une entreprise pour les services à l'environnement (23 avril 2008),
- Site Internet www.veoliaenvironnement.com

Suez Environnement :

Exemple 1 : Traitement des eaux usées

Degrémont, en collaboration avec le CIRSEE (Centre International de Recherche Sur l'Eau et l'Environnement) de Suez, a développé une gamme « Re-Use », qui permet de rendre à l'eau sa qualité d'avant utilisation grâce à diverses innovations techniques et pratiques efficaces (ultraviolets, osmose inverse, filtration membranaire...). L'eau peut ainsi être réutilisée pour des usages non-domestiques tels que l'irrigation des parcelles agricoles, le nettoyage des zones urbaines ou l'arrosage des espaces verts. Une telle usine de réutilisation des eaux usées est ainsi exploitée en Italie par Degrémont ; d'une capacité de plus de un million équivalent habitant, cette usine, la plus importante d'Europe, « permet de recycler les eaux usées traitées et désinfectées pour l'irrigation de cultures maraîchères à haute valeur ajoutée ».

Exemple 2 : Recyclage des boues des hauts-fourneaux

SITA Solving, spécialiste de la gestion déléguée aux industriels, a intégré dans son offre un procédé innovant, breveté par RECUPYL, et permettant de valoriser les boues issues du lavage des fumées de hauts-fourneaux dans le cadre de la production de fonte. Ce procédé rend possible la purification de ces boues et leur réintroduction dans les process de fabrication.

Exemple 3 : Valorisation des matières premières secondaires – Le recyclage des pneus usagés

Le recyclage des pneus usagés conduit notamment à la production de granulats de caoutchouc, utilisés dans la fabrication d'aires de jeu, de sols sportifs, de roues et de mobiliers urbains, ou de ferrailles utilisées dans des aciéries. Dès 2005, une filiale de SITA France, Norvalo, a initié un projet de recherche sur un débouché pérenne et innovant pour ces produits, en utilisant un mélange de fibres textiles, de granulats de caoutchouc et de matrices cellulaires résultant dans un nouveau matériau présentant des propriétés très intéressantes. Ce matériau a servi pour la construction du bâtiment d'une déchetterie, exploitée par une filiale de SITA.

Source :

- « Rechercher, développer et innover », brochure de Suez Environnement, 2007