POLYPUBLIE
Polytechnique Montréal

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE

Titre: Outil d'optimisation des décisions de sélection et de configuration des opportunités de synergie industrielle
Title:

Auteur: Martin Maillé
Author:

Date: 2013

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Maillé, M. (2013). Outil d'optimisation des décisions de sélection et de configuration des opportunités de synergie industrielle [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/1167/
Citation:

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: https://publications.polymtl.ca/1167/
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Jean-Marc Frayret
Advisors:

Programme: Génie industriel
Program:

Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal

https://publications.polymtl.ca

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

OUTIL D'OPTIMISATION DES DÉCISIONS DE SÉLECTION ET DE CONFIGURATION DES OPPORTUNITÉS DE SYNERGIE INDUSTRIELLE

MARTIN MAILLÉ

DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

(GÉNIE INDUSTRIEL)

JUIN 2013

© Martin Maillé, 2013.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

OUTIL D'OPTIMISATION DES DÉCISIONS DE SÉLECTION ET DE CONFIGURATION DES OPPORTUNITÉS DE SYNERGIE INDUSTRIELLE

présenté par : MAILLÉ Martin

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. AGARD Bruno, Doct., président

M. FRAYRET Jean-Marc, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. MARGNI Manuele, Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

Avant d'entrer dans le cœur de ce mémoire, j'aimerais tout d'abord sincèrement remercier les personnes et organismes qui ont contribué, de près ou de loin, à sa réalisation ainsi qu'à mon évolution, en tant que futur ingénieur mais également en tant que personne. En premier lieu, il convient de souligner le rôle primordial de mon directeur de recherche, monsieur Jean-Marc Frayret, qui m'a guidé tout au long de la réalisation de ce projet, m'a permis de découvrir le monde de la recherche dans les meilleures conditions et a su m'apporter une critique constructive de manière continue afin que je puisse obtenir des résultats à la fois de qualité et méthodologiquement solides. En deuxième lieu, j'aimerais remercier l'ensemble des membres de l'organisme partenaire de recherche, le Centre de Transfert Technologique en Écologie Industrielle, qui m'ont permis de découvrir l'écologie industrielle et sa mise en application et m'ont offert leur temps et leur collaboration tout au long du projet. En particulier, je mentionnerais madame Hélène Gignac, directrice générale, Claude Maheux-Picard, directrice technique, Karine Markewitz, Jean-François Vermette, Jennifer Pinna et Pascal Lemoine, chefs et chargés de projets, ainsi que Marc Olivier, expert en gestion des matières résiduelles, qui m'ont partagé leur passion pour l'écologie industrielle et jouent un rôle de leader au Québec dans cette discipline. Finalement, j'aimerais remercier RECYC-QUÉBEC, le CTTÉI, l'École Polytechnique de Montréal, le Fonds de recherche du Québec – Nature et Technologies (FQRNT) et le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) pour leur support financier.

RÉSUMÉ

Ce projet de recherche présente un système d'aide à la décision, qui vise l'identification d'opportunités efficaces de mise en valeur de sous-produits en contexte de symbiose industrielle. Cet outil tente de supporter les animateurs de réseaux éco-industriels, les agents de développement économique, les conseils municipaux, les consultants ou les centres de recherche dans l'évaluation des bénéfices économiques et environnementaux potentiels de synergies industrielles, ainsi que dans l'identification de structures optimales de réseaux éco-industriels. Les procédés de traitement des matières résiduelles, comme le tri, la transformation, et le transport ainsi que les flux et les coûts de matière et d'énergie qui leur sont associés ont été intégrés à un modèle de programmation mathématique. Ce modèle vise la minimisation des coûts d'approvisionnement et de gestion des matières résiduelles du réseau éco-industriel en entier, ou de n'importe quel sous-ensemble d'entreprises (incluant une seule compagnie). Le modèle permet aussi d'évaluer les variations de flux de matière et d'énergie dans un réseau éco-industriel lorsque les quantités offertes et demandées de sous-produits évoluent dans le temps, grâce à sa modélisation multi-périodes. Une procédure d'analyse multi-objectifs permet également l'utilisation du modèle afin d'évaluer l'impact financier de minimiser la consommation de matières premières vierges et d'énergie par le biais de la réutilisation des ressources et des synergies.

Par la suite, une étude de cas expérimentale basée sur des données publiques relatives aux échanges d'eau de la symbiose industrielle de Kalundborg, au Danemark, est présentée. Le modèle proposé a été testé dans ce contexte afin, d'une part, de comparer les synergies proposées par le modèle à celles qui furent réellement mises en place et, d'autre part, d'analyser les efforts financiers nécessaires à la préservation des ressources. Des horizons de planification de trois et de cinq ans ont également été considérés dans le but d'évaluer l'influence de la durée de la période d'amortissement. Finalement, une analyse de sensibilité sur le prix de l'eau a également été menée pour analyser le rôle de la municipalité dans la promotion des synergies. Ce projet a été mené en collaboration avec le *Centre de Transfert Technologique en Écologie Industrielle*, situé à Sorel-Tracy, Québec, Canada.

ABSTRACT

This research project introduces a decision support tool, which aims to identify efficient industrial by-products reuse opportunities in industrial symbiosis. This tool aims to support eco-industrial network managers, economic development and city officers, consulting organizations, or research centers to evaluate potential environmental and economic benefits of industrial synergies, and identify optimal arrangements of synergies in eco-industrial networks. Therefore, waste management processes, such as sorting, transforming and transportation, and their associated flows and cost of material and energy have been integrated in a mathematical programming model. This model aims to minimize the cost of procurement and waste management activities of the entire eco-industrial network, or of any sub-sets of companies in the network (including a single company). This model also aims to evaluate material and energy flows variations in eco-industrial networks when the quantity of offered by-products and demand evolve over time, due to its multi-period structure. A procedure of multi-objective analysis also enables the model to be used to evaluate the financial impact of minimizing raw material and energy consumption through synergies and resource reuse.

Next, an experimental case study developed from publicly available data related to water exchanges in the industrial symbiosis of Kalundborg, Denmark, is presented. The proposed model was tested in this context to, on the one hand, compare the synergies proposed by the model with actually synergies, and, on the other hand, analyze the financial effort necessary to preserve natural resources. Three and five years planning horizons were also tested in order to assess the impact of the length of recovery period. Finally, a sensitivity analysis on the price of water was also carried out to analyze the role of the municipality as a potential driving force to promote synergies. This project was carried out with the *Centre de Transfert Technologique en Écologie Industrielle*, Québec, Canada.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS III

RÉSUMÉ IV

ABSTRACT V

TABLE DES MATIÈRES VI

LISTE DES TABLEAUX IX

LISTE DES FIGURES X

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS XI

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 REVUE CRITIQUE DE LA LITTÉRATURE 3

1.1 L'écologie industrielle 3

1.1.1 Les projets de symbiose industrielle 3

1.1.2 Les démarches d'écologie industrielle et territoriale 4

1.2 Les outils d'identification de synergies 5

1.3 La conception de la chaîne d'approvisionnement éco-industrielle 6

1.3.1 Optimisation des flux logistiques 6

1.3.2 Problématique multicritères 7

1.4 La gestion de la chaîne d'approvisionnement verte 7

1.5 Synthèse 8

CHAPITRE 2 OBJECTIF ET MÉTHODOLOGIE DE LA RECHERCHE 10

2.1 Objectif général de recherche 10

2.2 Méthodologie de la recherche 10

2.2.1 Diagnostic des processus du partenaire de recherche 11

2.2.2 Analyse des données 13

2.2.3 Modélisation 13

2.2.4 Expérimentation 15

CHAPITRE 3 ARTICLE : DECISION MODEL TO IDENTIFY OPTIMAL INDUSTRIAL WASTE REUSE OPPORTUNITIES 17

Summary 17

3.1 Introduction 18

3.2 Literature review 19

3.3 Objectives and methodology 21

3.4 Optimization model 21

3.4.1 General waste and material flow model 22

3.5 Case Study 24

3.5.1 Case study methodology 27

3.5.2 First experiment 28

3.5.3 Second experiment 31

3.5.4 Case study conclusion 34

3.6 Conclusion and Future Works 34

Acknowledgements 35

References 35

About the authors 39

Summary 40

3.7 Optimization model 40

3.7.1 Hypotheses 40

3.7.2 Sets 41

3.7.3 Parameters 41

3.7.4 Decision variables 42

3.7.5 Decision objectives and trade-off analysis 43

3.7.6 Constraints 44

3.8 Tables and figures 46

CHAPITRE 4 DISCUSSION GÉNÉRALE 56

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 59

RÉFÉRENCES 61

LISTE DES TABLEAUX

Table 3.1: Characteristic units of different flows.....24

Table 3.2: Pipeline and pre-treatment facility investment per company.....26

Table 3.3: Distance between sellers and buyers of the Kalundborg industrial symbiosis 46

Table 3.4: Economic and environmental benefits of different planning horizons computed in the first experiment 47

Table 3.5: Critical water types and parameters of synergies.....52

Table 3.6: Water prices in the municipality of Kalundborg.....52

Table 3.7: Economic and environmental benefits of different planning horizons computed in the second experiment.....53

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Processus actuel de conception des symbioses industrielles au CTTÉI 12

Figure 2.2 : Structure du coût total du réseau 14

Figure 3.1: Flows circulation and stock types 23

Figure 3.2: Exchanges considered, *Inspired from Jacobsen (2006)* 25

Figure 3.3: Predicted and actual water price 46

Figure 3.4: Effect of the δ parameter on the number of synergies proposed 50

Figure 3.5: Effect of the δ parameter on the quantity of water preserved 50

Figure 3.6: Procurement savings per m^3 exchanged 51

Figure 3.7: Water savings in different planning horizons 51

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

BPS	By-product synergy
BRIQ	Bourse des Résidus Industriels du Québec
CTTÉI	Centre de Transfert Technologique en Écologie Industrielle
DSS	Decision support system
DKK	Danish krone
EPA	Environmental Protection Agency
FaST	Facility Synergy Tool
GES	Gaz à effet de serre
GrSCM	Green supply chain management

INTRODUCTION

La préservation des ressources naturelles est à l'heure actuelle un enjeu majeur. L'écologie industrielle est une discipline récente qui s'intéresse, entre autres, à cette problématique, dans le cadre d'une diminution des impacts de l'industrie sur notre environnement. Elle est majoritairement mise en application par le biais des symbioses industrielles, initiatives de groupements d'entreprises basées sur la reproduction du comportement des écosystèmes naturels, où les déchets d'une espèce deviennent des ressources pour une autre. Concrètement, une symbiose industrielle se compose donc d'échanges, entre organisations d'une région donnée ou d'un parc industriel, de sous-produits, pouvant prendre la forme de résidus de production solides, d'eaux usées ou de flux énergétiques, dans le but d'augmenter le taux d'utilisation des ressources. Chacun de ces partenariats est appelé synergie de substitution, une matière première étant substituée par un sous-produit. Dans une moindre mesure, les symbioses peuvent également comprendre des synergies de mutualisation, où plusieurs entreprises partagent des ressources ou accomplissent de manière groupée certaines activités industrielles, par exemple le traitement de sous-produits, le transport, l'approvisionnement ou le stockage.

Les synergies de sous-produits peuvent parfois être initiées par les entreprises elles-mêmes. Cependant, pour certaines, l'écologie industrielle reste un concept obscur. Même lorsque cela n'est pas le cas, les organisations n'ont pas toujours le temps ou les ressources nécessaires à l'évaluation de leurs possibilités de synergies. De plus, elles n'ont pas toujours connaissance des intrants et des extrants de leurs partenaires potentiels et ne sont donc pas en mesure d'identifier et d'évaluer les opportunités d'échange qui s'offrent à elles. C'est exactement dans ce contexte que le rôle d'un animateur de réseau indépendant devient primordial. Pouvant être issu d'une instance gouvernementale, d'un centre de recherche ou encore d'une association industrielle, celui-ci possède une vision globale du réseau d'entreprises et est donc en mesure de mettre celles-ci en contacts et de leur proposer les opportunités de synergies les plus pertinentes en fonction de leurs caractéristiques propres. Bien sûr, cet animateur doit être soutenu par les différents joueurs impliqués dans le projet, afin de s'alimenter en données industrielles et donc de pouvoir établir clairement les besoins de chacun. Cependant, il doit également être épaulé, afin de remplir

pleinement son rôle, par des outils efficaces lui permettant d'étudier la faisabilité et la viabilité des synergies potentielles.

C'est dans cette optique que ce projet de recherche s'est principalement articulé autour de l'élaboration d'un système d'aide à la décision pouvant assister la conception de réseaux éco-industriels en identifiant des partenariats profitables entre des entreprises générant des sous-produits et d'autres susceptibles de les acquérir en remplacement de leurs matières premières. Cet outil, basé sur un modèle d'optimisation mathématique, permet donc à l'utilisateur d'optimiser ses décisions et d'analyser la conciliation des bénéfices économiques et environnementaux découlant de tels partenariats.

CHAPITRE 1 REVUE CRITIQUE DE LA LITTÉRATURE

Cette section présente les différents thèmes qui ont été étudié dans le cadre de ce projet et ont eut une influence sur son développement, ainsi que les sources des données utilisées dans le cadre de l'étude de cas présentée. D'abord, il convient de s'intéresser au domaine de l'écologie industrielle, et en particulier aux projets de symbiose industrielle. Ensuite, il est important de recenser les différents outils d'identification de synergies industrielles, afin d'orienter la structure de celui qui est développé dans le cadre de ce projet de recherche. Le système d'aide à la décision proposé ayant pour but d'optimiser les décisions liées à la conception de chaînes d'approvisionnement éco-industrielles, les enjeux particuliers au design de ce type de réseaux sont ensuite détaillés, notamment l'optimisation des flux logistiques. Finalement, les autres dimensions particulières à la gestion de ces chaînes d'approvisionnement vertes sont également explorées.

1.1 L'écologie industrielle

L'écologie industrielle est définie par Chertow (2004) comme "l'étude des flux de matières et d'énergie dans les activités industrielles et de consommation, des effets de ces flux sur l'environnement et des influences des facteurs économiques, politiques, règlementaires et sociaux sur la circulation, l'utilisation et la transformation des ressources". Son objectif global est de réduire les impacts économiques et environnementaux liés à l'utilisation intensive des ressources naturelles (Adoue, 2007).

1.1.1 Les projets de symbiose industrielle

La symbiose industrielle est une division de ce champ d'étude qui se concentre sur les échanges d'eau, de matière, d'énergie et de sous-produits au sein de réseaux d'entreprises. Tel que suggéré par le terme, l'idée à la base de la symbiose industrielle est de recréer le comportement des écosystèmes naturels, à l'intérieur desquels les déchets d'une espèce deviennent des ressources pour une autre, au niveau des systèmes industriels (Frosch & Gallopoulos, 1989). C'est un moyen intéressant pour les entreprises de réduire leur dépendance aux matières premières vierges, leurs volumes de matière enfouie ou incinérée ainsi que leurs coûts d'approvisionnement et de gestion des matières résiduelles. Une symbiose industrielle est mise en pratique par le biais de réseaux

éco-industriels, ou réseaux de synergies de sous-produits, le plus connu d'entre eux étant situé à Kalundborg, au Danemark. Cet éco-parc étant le plus documenté dans la littérature (Jacobsen, 2006; Ehrenfeld & Gertler, 1997; Ehrenfeld & Chertow, 2002), il a été choisi pour illustrer le type de résultats pouvant être obtenus grâce au système d'aide à la décision présenté dans ce mémoire. Plusieurs autres réseaux éco-industriels on été étudiés en profondeur afin d'identifier les facteurs de succès clés de ces initiatives (Haskins, 2006). Tel qu'observé par Sakr *et al*. (2011), même si un degré de collaboration élevé entre les différents participants est requis, ce n'est pas toujours suffisant pour assurer une conception optimale des relations symbiotiques et leur évolution dans de bonnes conditions. Les apprentissages des projets passés démontrent également la plus grande efficacité du développement des écosystèmes industriels lorsqu'une perspective réseau est adoptée plutôt qu'une vision isolée d'une entreprise (Haskins, 2006). Donc, les animateurs de réseaux indépendants peuvent fréquemment jouer un rôle critique dans le succès de ces initiatives (Kincaid and Overcash, 2001). La littérature nous apprend également que même si la première motivation à la base des projets éco-industriels semble être la préservation des ressources naturelles et l'amélioration des stratégies de gestion des matières résiduelles, la faisabilité économique demeure essentielle à l'implication des entreprises (Lehtoranta *et al*., 2011).

1.1.2 Les démarches d'écologie industrielle et territoriale

Ces démarches allient au développement de projets de symbioses industrielles l'évolution de l'organisation d'un territoire vers son autosuffisance en termes de ressources, par le biais de politiques publiques et d'implication des entreprises dans la durabilité territoriale. La méthodologie COMETHE est un projet de recherche-action visant à supporter ce genre de démarches par l'élaboration d'outils et la systématisation des étapes de mise en œuvre de l'écologie industrielle à l'échelle territoriale (Projet COMETHE, 2013). Le projet a été lancé en 2008 afin de répondre à une volonté d'avancées concrètes dans ce domaine de l'Agence Nationale de la Recherche (en France) et s'est appuyé sur cinq zones pilotes. La méthodologie comporte quatre modules très détaillés et des outils opérationnels associés à chacun de ceux-ci :

- Module 1 : Analyser le potentiel des entreprises et du territoire;
- Module 2 : Étudier les conditions de faisabilité des synergies éco-industrielles;
- Module 3 : Définir les scénarios de mise en œuvre;
- Module 4 : Intégrer la démarche dans une stratégie de développement durable du territoire.

Dans une perspective similaire, le *National Industrial Symbiosis Programme* (NISP) a été lancé à l'échelle du Royaume-Uni. Cette initiative gouvernementale est menée de manière semi-autonome dans une dizaine de régions de cet état, où travaillent en collaboration avec l'industrie des équipes d'anciens industriels et d'animateurs de symbioses afin de promouvoir et d'assister la mise en place de tels projets (National Industrial Symbiosis Programme, 2013). Financé par le secteur public, en grande partie par le biais des taxes d'enfouissement, le programme est accessible gratuitement pour les entreprises (Paquin & Howard-Grenville, 2009). C'est un outil de choix à leur disposition d'améliorer leur performance environnementale en accord avec le contexte du territoire auquel elles appartiennent. Le processus d'aide à la décision présenté dans ce mémoire s'inscrit dans la même optique, visant une optimisation de la circulation des flux au niveau territorial.

1.2 Les outils d'identification de synergies

Un des éléments pouvant faciliter la mise en place de projets de symbiose industrielle est d'ailleurs l'utilisation d'outils d'identification d'échanges potentiels de sous-produits. Plusieurs des outils ont été développés dans les dernières années dans le but d'assister les gestionnaires en entreprise et les animateurs de réseaux dans la recherche d'opportunités. Grant & al. (2010) ont recensé dix-sept d'entre eux, dont Presteo, qui propose sa propre terminologie pour la description des flux, et FaST (*Facility Synergy Tool*), développé par l'Agence de protection environnementale américaine (EPA). Les auteurs comparent leurs fonctionnalités, leurs forces ainsi que leurs faiblesses et listent des améliorations potentielles des technologies d'information et de communication en écologie industrielle. Chertow (2000) classifie ces outils sous trois catégories : jumelage des intrants et extrants, analyse des parties prenantes et prévisions budgétaires de la matière. Elle souligne également la différence entre les outils adaptés aux zones

industrielles existantes et ceux servant à la planification de parcs éco-industriels sur un territoire vierge. Plusieurs logiciels permettent à l'utilisateur de jumeler des organisations selon les sous-produits qu'elles génèrent ou seraient susceptibles d'acquérir. Afin d'accomplir cette tâche, il est d'abord nécessaire de collecter les informations sur la circulation des matières depuis, vers, ou dans un réseau. Eckelman & Chertow (2009) ainsi que Hsiao & al. (2002) montrent comment l'analyse des flux de matière peut être utilisée afin d'identifier des occasions de mise en valeur de ressources, présentant des études de cas de l'île Oahu à Hawaii et de Taiwan.

1.3 La conception de la chaîne d'approvisionnement éco-industrielle

Une fois que des synergies potentielles ont été identifiées, elles doivent être analysées et filtrées selon les bénéfices qu'elles pourraient apporter aux entreprises concernées ou au réseau auquel elles appartiennent. Cela peut notamment être accompli par l'optimisation des flux logistiques dans les réseaux de synergies de sous-produits.

1.3.1 Optimisation des flux logistiques

Le logiciel Eco-flow utilise la programmation mathématique pour concevoir de tels réseaux de manière efficace, en minimisant les coûts totaux ou les impacts environnementaux des flux de matière. Cimren *et al*. (2011) présentent une mise en application de cet outil afin d'analyser les synergies potentielles dans un projet de symbiose industrielle à Kansas City aux États-Unis. Toutefois, ce logiciel fournit une vue statique du réseau éco-industriel, ne considérant pas une évolution de la valeur des paramètres le long d'un horizon de temps. De plus, à la différence de l'outil développé dans le cadre de ce projet de recherche, les auteurs ne détaillent pas les aspects environnementaux et économiques évalués, mais associent simplement un coût et un «éco-impact» à chaque unité de flux vers ou depuis un procédé. De leur côté, Li *et al*. (2011) évaluent les stratégies de tri et leur impact sur la consommation des résidus solides. Ils utilisent un modèle d'optimisation pour allouer des matières premières, provenant soit de la nature, soit de résidus industriels triés, à la production de produits finis. Ce type de modèle d'optimisation d'allocation est régulièrement utilisé pour allouer la production de biens à des sites de production.

Le domaine général de la conception et de l'optimisation des chaînes d'approvisionnement utilise également de manière fréquente la recherche opérationnelle afin de déterminer la localisation

optimale d'une usine ou d'un entrepôt (Beamon, 1998). Ces questions sont au cœur des réseaux de distribution, peu importe si ceux-ci concernent plutôt les flux de sous-produits, de matières premières vierges ou de produits finis. D'ailleurs, Jayaraman *et al*. (1999) proposent un modèle de programmation linéaire mixte afin de minimiser le coût des systèmes logistiques en boucle fermée dans le but d'assister la prise de décision en ce qui concerne la localisation d'usines de remise à neuf et les quantités de matière récupérée à stocker et à distribuer.

1.3.2 Problématique multicritères

Toutefois, la chaîne d'approvisionnement verte, circulaire ou en boucle fermée attache plus d'importance aux facteurs environnementaux, ce qui affecte dans une certaine mesure la planification des opérations. Il faut donc utiliser des méthodes et des outils qui permettent de prendre en compte à la fois les aspects environnementaux et économiques de ces réseaux, et d'équilibrer ceux-ci en fonction du contexte et des objectifs spécifiques. Bouzembrak *et al*. (2011) traitent ces questions en présentant un modèle mathématique multicritères qui explore l'équilibre entre les bénéfices économiques et environnementaux.

1.4 La gestion de la chaîne d'approvisionnement verte

Comme dans plusieurs aspects de nos vies quotidiennes, l'environnement devient une préoccupation croissante au niveau des activités industrielles. Les opérations liées à la chaîne d'approvisionnement montrent clairement un potentiel d'amélioration important en ce qui concerne leur impact sur l'environnement. Par exemple, le transport cause l'émission de quantités considérables de GES, tout comme l'extraction de matières premières vierges, qui contribue également à réduire notre capacité de consommation de ressources non-renouvelables à moyen et à long terme. La gestion de la chaîne d'approvisionnement verte s'intéresse donc à l'intégration des considérations environnementales aux activités logistiques quotidiennes des organisations. Beamon (1999) détaille les principaux éléments à considérer, comme le risque associé aux procédés de traitement des sous-produits et les processus de distribution inverse, puis propose une série d'indicateurs de performance permettant d'évaluer l'efficacité de ces aspects. Hervani *et al*. (2005) proposent également une méthodologie afin de mesurer la performance de la chaîne d'approvisionnement verte, qui se concentre sur les relations inter-organisationnelles. Tel que

mentionné par Wilkerson (2005), la gestion de ces questions importantes doit être vue comme apportant une valeur ajoutée, et non comme un poste de dépenses. De plus, c'est un outil permettant aux compagnies de s'adapter à l'évolution du contexte législatif et des préoccupations des consommateurs. Étant donnée le jeune âge de ce domaine de recherche, il n'y a toujours pas de consensus clair concernant la définition de la gestion de la chaîne d'approvisionnement verte, à cause notamment de l'étendue des opérations qu'elle peut affecter, de la conception à la fin de vie des produits. Toutefois, on peut certainement inclure à cette définition l'adaptation des fonctions d'une entreprise à travers le cycle de vie de ses produits selon une vision environnementale. Pour Van Hoek (1999), c'est un moyen de diminuer les dommages environnementaux des entreprises en réduisant l'empreinte écologique des chaînes d'approvisionnement. L'auteur établit également une nuance entre la logistique inverse et la gestion de la chaîne d'approvisionnement verte. Les flux inversés de biens sont certainement un pas dans la bonne direction mais les efforts écologiques doivent être déployés dans une perspective plus large. La coopération inter-organisationnelle doit aussi être prise en compte, et cette idée est au centre du concept de symbiose industrielle.

1.5 Synthèse

L'écologie industrielle prône une responsabilisation des entreprises au niveau environnemental, notamment par une utilisation optimale des ressources. Elle est particulièrement mise en pratique par le biais de projets de symbiose industrielle, dont le développement peut être favorisé par des initiatives gouvernementales, tels le NISP, ou la méthodologie COMETHE. Différents outils d'identification de synergies industrielles ont été développés dans les dernières années, la plupart étant basés principalement sur la correspondance entre les flux générés par les uns, et les besoins matières des autres. D'autres outils, la plupart étant soutenus par des modèles d'optimisation mathématique, permettent par la suite une évaluation des opportunités détectées. Les réseaux éco-industriels présentant plusieurs défis communs avec les réseaux logistiques traditionnels, plusieurs auteurs proposent l'adaptation au contexte des symbioses industrielles, de modèles de localisation d'usines ou d'entrepôts et d'allocation de matières à ceux-ci. Cependant, même dans les cas où la problématique multicritères est abordée, donc où une perspective environnementale est jumelée aux enjeux économiques, aucun auteur ne traite l'angle d'une planification multi-

périodes d'un réseau éco-industriel. Finalement, plusieurs articles au sujet de la chaîne d'approvisionnement verte détaillent les risques et les enjeux particuliers à la planification et à la configuration de réseaux de synergies de sous-produits. Plusieurs opportunités de recherche existent donc au niveau du développement d'outils d'optimisation de réseaux de synergies de sous-produits prenant en compte ces enjeux et permettant une comparaison des bénéfices économiques et environnementaux à plus ou moins long terme lié à l'acquisition de différentes technologies de traitement de sous-produits industriels.

CHAPITRE 2 OBJECTIF ET MÉTHODOLOGIE DE LA RECHERCHE

Cette section décrit dans un premier temps l'objectif général de ce travail de recherche. Ensuite, les aspects méthodologiques de ce travail sont détaillés, notamment les liens avec le partenaire de recherche, le Centre de Transfert Technologique en Écologie Industrielle, dans le cadre de l'élaboration du processus d'aide à la décision.

2.1 Objectif général de recherche

Suite à l'étude de la littérature et des besoins du partenaire de recherche, l'élaboration d'un système d'aide à la décision permettant l'analyse des coûts et des bénéfices ainsi que des impacts environnementaux liés au développement de synergies de sous-produits a été identifiée comme principal objectif du projet de recherche. À la lumière des caractéristiques relevées au sujet des différents outils de planification de symbioses industrielles documentés, deux aspects semblent particulièrement intéressants à intégrer à la structure d'un système d'aide à la décision dans le cadre de ce projet de recherche. D'une part, celui-ci devrait permettre une recherche de la configuration optimale des synergies, en considérant plusieurs alternatives au niveau des procédés de traitement des sous-produits et des ressources qui leur sont associées. D'autre part, il devrait posséder une structure multi-périodes, permettant la prise en compte de fluctuation des volumes de matières disponibles et requis, des prix et des coûts d'opérations, ainsi que l'évaluation de la rentabilité des investissements à court, moyen ou long terme. Ces différents éléments seraient reflétés dans les solutions optimales du problème d'optimisation mathématique sur lequel s'appuie l'outil. Effectivement, les valeurs optimales des variables de flux et de mise en place de synergies devraient être associées aux décisions les plus judicieuses d'un point de vue économique et environnemental dans des conditions bien précises définies par l'utilisateur.

2.2 Méthodologie de la recherche

Comme le projet est né de la volonté du partenaire de recherche d'améliorer certaines facettes du processus de mise en place de projets de symbiose industrielle, notamment le filtrage des opportunités de synergies et l'évaluation des bénéfices potentiels de celles-ci, l'exploration et l'analyse de ce processus, tout comme une étude de la littérature à ce niveau, à la base de la

définition des objectifs des travaux de recherche. Par la suite, en fonction des besoins particuliers décelés, un modèle d'optimisation a été bâti, avant d'être testé à l'aide de données issues de la symbiose industrielle de Kalundborg, cas emblématique de l'écologie industrielle.

2.2.1 Diagnostic des processus du partenaire de recherche

La première étape de ce projet de recherche a été menée au sein du Centre de Transfert Technologique en Écologie Industrielle, situé à Sorel-Tracy. Elle s'est articulée autour de l'exploration des différentes sphères d'intervention du CTTÉI, et en particulier les projets de symbioses industrielles menées dans différentes régions du Québec. Il a entres autres été important d'analyser les outils actuels utilisés par le centre. Celui-ci a notamment repris en 2005 une initiative de RECYC-QUÉBEC afin de lancer la Bourse des Résidus Industriels du Québec (BRIQ), une plateforme accessible via internet et permettant l'affichage d'offres et de demandes de matières résiduelles. Quelques collaborations inter-organisationnelles ont pu voir le jour grâce à cet outil et le centre de recherche a pour objectif de multiplier ce genre d'ententes. Pour ce faire, il devrait non seulement être possible pour les entreprises de faire connaître leurs besoins ou leurs offres, mais également de se faire proposer des opportunités d'affaires selon leur profil.

Suite à l'expérience de la BRIQ, le CTTÉI a franchi un pas supplémentaire en commençant à mettre sur pieds des projets de synergies de sous-produits. Menées dans un cadre géographique défini (région ou parc industriel), ces initiatives ont pour but d'identifier les intrants et les extrants des organisations impliquées afin de jumeler des générateurs de matières résiduelles et des acquéreurs potentiels. La première phase de l'identification de ces opportunités de collaboration étant à l'heure actuelle basée sur les catégories (ex : bois) et sous-catégories (ex : bois traité) de matières, elle ne situe pas dans leur contexte les offres et les besoins exprimés par les entreprises. En effet, les caractéristiques physiques des flux de matières, les procédés de fabrication utilisés par les partenaires potentiels, les aspects sociaux et logistiques et une quantité importante d'autres facteurs ne sont pas considérés dans le processus. Cela entraîne donc pour les utilisateurs un travail de filtrage considérable des synergies éventuelles. Les chargés de projet du CTTÉI évaluent en effet le potentiel de ces opportunités une à une en ayant recours à l'information disponible, à leur expérience et à leurs compétences en mise en valeur de sous-

produits. La figure 2.1 montre comment sont actuellement menés les projets de synergies de sous-produits par le CTTÉI.

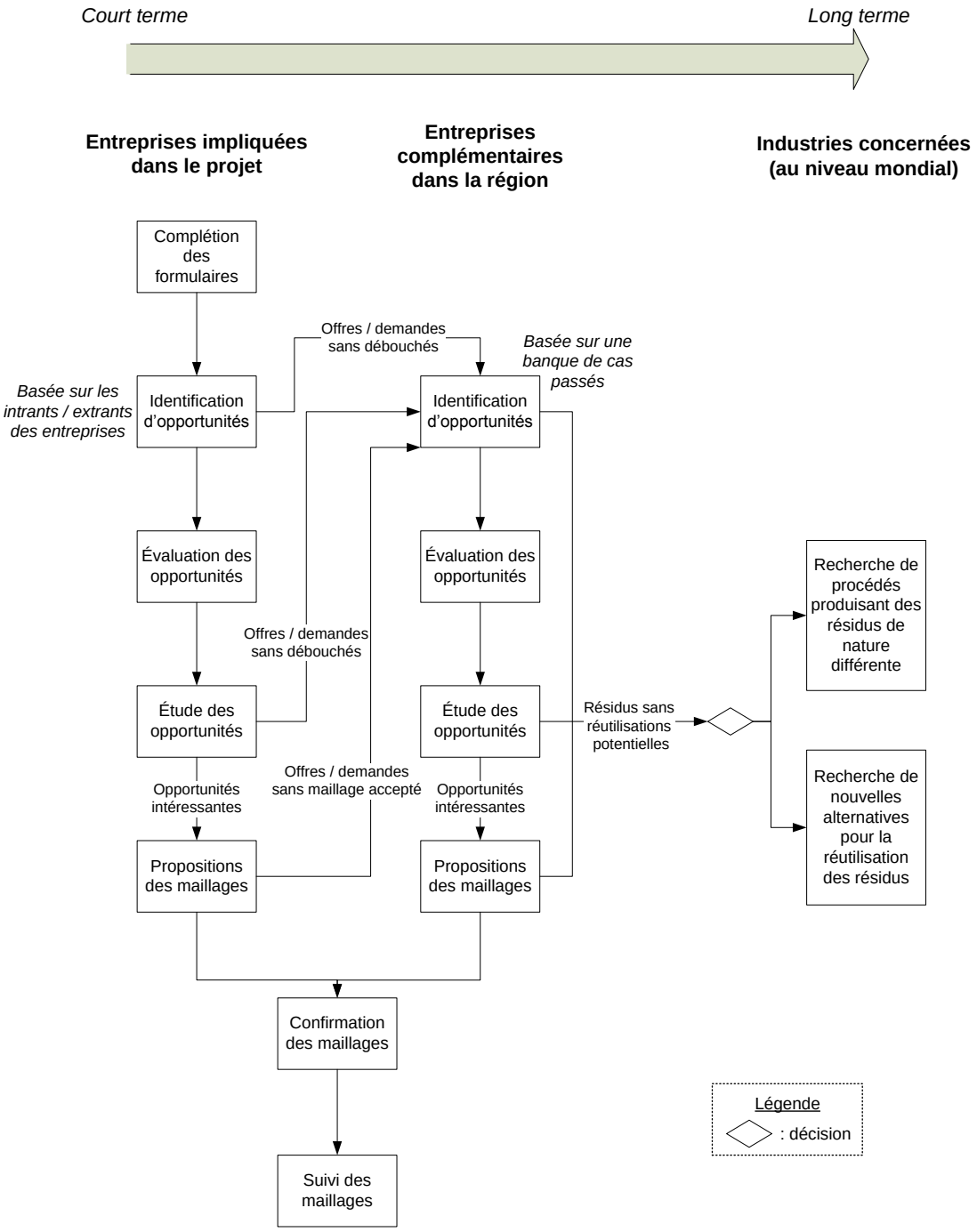

Figure 2.1 : Processus actuel de conception des symbioses industrielles au CTTÉI

D’un autre côté, la situation actuelle présente comme avantage de ne nécessiter qu’une faible quantité d’information sur les entreprises participantes au départ. Un outil d’aide à la décision plus complet nécessiterait pour sa part une plus grande quantité d’information, donc un plus grand travail de collecte de données. Par contre, il permettrait de réduire le temps nécessaire au filtrage des opportunités par la suite. Afin de trouver un équilibre entre ces deux options, il est nécessaire de s’intéresser à la valeur de l’information dans un contexte de développement de projets de symbiose industrielle afin de bien cerner l’impact et le coût liés au fait d’obtenir des données très détaillées de la part des organisations.

2.2.2 Analyse des données

L'analyse des processus et outils actuels, ainsi que des communications personnelles avec les différents chargés de projet, ont révélé un besoin de systématisation de la collecte d'information permettant la recherche de synergies potentielles ainsi qu'un besoin d'automatisation, au moins partielle, du filtrage des différentes opportunités de maillages industriels. L'étude plus en détails des synergies mises en place à l'heure actuelle a illustré la complexité accrue des partenariats inter-entreprises nécessitant l'achat de ressources de traitement ou de tri des sous-produits. Cependant, la littérature montre que ce type de synergies, où les investissements nécessaires sont plus importants, sont souvent celles qui permettent de réaliser les plus importantes économies à moyen et à long termes (Esty and Porter, 1998).

2.2.3 Modélisation

L'étape suivante du projet de recherche a donc consisté en un dénombrement des divers éléments pouvant avoir un impact sur la faisabilité opérationnelle, économique et environnementale des synergies industrielles. L'accent a été mis sur les aspects logistiques habituellement inclus dans les outils de conception et d'optimisation de la chaîne d'approvisionnement classique. Ces aspects ont donc été intégrés à un modèle d'optimisation mathématique. Celui-ci considère, pour les activités d'approvisionnement, de distribution et de gestion de la fin de vie des sous-produits, d'une part, les voies d'élimination traditionnelles des matières résiduelles et les sources d'approvisionnement classiques d'une entreprise et, d'autre part, les opportunités de synergies de sous-produits. L'optimisation du coût total et des impacts environnementaux globaux du réseau

permet donc la proposition, pour chaque unité de flux considérée, de l'une ou l'autre de ces alternatives. Celles-ci peuvent entraîner, selon le cas, des besoins en investissements, notamment liés à l'acquisition de ressources, ou au contraire, le report d'investissements préalablement jugés nécessaires. Plusieurs options sont considérées au niveau des procédés de traitement, de tri ou de décontamination des sous-produits, tout comme en ce qui concerne les ressources matérielles associées à ces procédés. Ces choix peuvent notamment être affectés par les volumes à traiter, les besoins du preneur ainsi que les caractéristiques spécifiques des sous-produits du générateur. La figure 2.2 montre les différents coûts considérés dans le coût total du réseau éco-industriel.

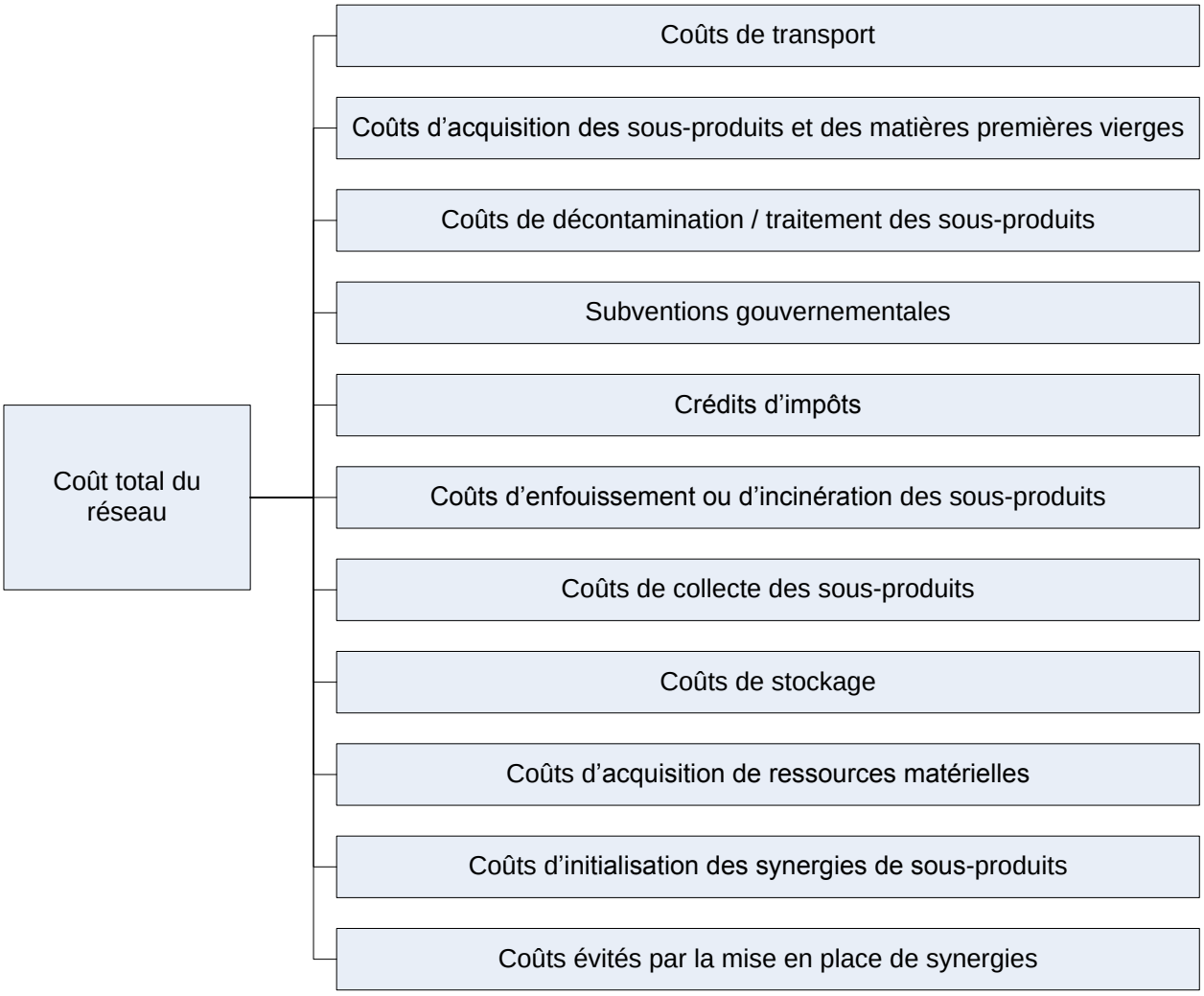

Figure 2.2 : Structure du coût total du réseau

Après une étude des différentes options pour la structure des objectifs en optimisation multicritères (Marler and Arora, 2004), la méthode lexicographique a été privilégiée. Celle-ci prône la seule prise en compte de l'objectif principal, économique dans ce cas-ci, dans un premier temps, ce qui permet l'obtention d'une valeur référence, de laquelle on accepte de s'écarter d'un certain pourcentage dans le cadre de l'optimisation du second critère, environnemental dans ce cas-ci. Ce choix est donc cohérent avec le processus décisionnel des gestionnaires en entreprise, principalement articulé autour de considérations économiques mais avec une certaine prise en compte des facteurs environnementaux, principale raison d'être de l'écologie industrielle. Le modèle peut d'ailleurs être utilisé selon le point de vue d'une seule entreprise, en ne considérant que les intrants et les extrants de celles-ci et les options de traitement qui leur sont associés. Également, comme les flux qui seraient étudiés grâce à l'outil pouvaient tout aussi bien être de nature liquide, solide ou gazeuse et transportés ou stockés de diverses manières, les paramètres intégrés à la structure du modèle mathématique ont été définis afin de prendre en compte cette réalité et de traiter chaque flux selon les unités qui le représente le plus fidèlement. Finalement, malgré la recherche d'un certain équilibre entre le nombre de paramètres et l'efficacité du modèle d'optimisation, la quantité de données à saisir reste importante, cela étant essentiel à l'obtention de solutions judicieuses.

2.2.4 Expérimentation

Une fois le modèle mathématique formulé, la phase d'expérimentation a pu débuté. Le faible niveau d'information au sujet des symbioses industrielles dont la mise en place a été assistée par le partenaire de recherche a contraint à la recherche d'autres cas, pour la validation du modèle. Après un recensement des principaux parcs éco-industriels décrits dans la littérature, celui de Kalundborg a été choisi, notamment à cause du volume important de données publiques à son sujet. Tel que mentionné précédemment, malgré les bénéfices que peut présenter l'outil d'aide à la décision développé, il nécessite d'être alimenté par une quantité importante de données. La réputée symbiose industrielle danoise ayant constamment évolué depuis sa mise en place, il a été convenu de ne considérer que les échanges d'eau entre 1990 et 2002. Ceux-ci sont en effet bien documentés et présentent donc l'avantage de réduire le nombre d'hypothèses nécessaires lors de l'expérimentation. Il est cependant à noter que le modèle se veut générique et peut tout à fait être

utilisé, avec quelques légères adaptations au critère environnemental, afin d'évaluer des possibilités d'échange de résidus de production solides. Dans l'étude de cas présentée dans ce mémoire, la minimisation des quantités d'eau "non-synergique" consommée constituait le sous-objectif environnemental. Or, celui-ci pourrait également être, par exemple, la minimisation des gaz à effet de serre (GES) émis par les différents processus logistiques.

L'outil a donc été testé avec le logiciel d'optimisation AMPL et les solveurs Gurobi et Cplex. À la lumière des résultats obtenus au fur et à mesure, le modèle a été amélioré en continu, jusqu'à l'obtention de solutions cohérentes, qui ont permis de valider la structure de l'outil. Dans le cadre de l'analyse des résultats, deux aspects ont surtout été étudiés et sont présentés au chapitre 3 : l'effort économique nécessaire des entreprises afin de réduire leur consommation d'eau souterraine et le rôle de la municipalité, au niveau de la fixation du prix de l'eau, dans la promotion des synergies de sous-produits.

CHAPITRE 3 ARTICLE : DECISION MODEL TO IDENTIFY OPTIMAL INDUSTRIAL WASTE REUSE OPPORTUNITIES

Martin MAILLÉ, Jean-Marc FRAYRET[1]
École Polytechnique de Montréal

Summary

By-products synergy is a growing practice worldwide. It consists in the maximization of resources utilization with the replacement of raw materials by by-products as inputs for industrial processes. In order to support decision-making in such strategic projects, appropriate tools must be developed. This article presents the results of a project carried out in collaboration with the *Centre de Transfert Technologique en Écologie Industrielle* (CTTÉI), which includes a multi-objective mathematical programming model for the optimization of by-products flows and synergy configurations in eco-industrial networks. This model is evaluated using data related to the Kalundborg industrial symbiosis in order to assess, in a retrospective manner, the behaviour of the companies involved with respect to both economic and environmental benefits of synergies. The experiments also illustrate the influence of the municipality on by-product exchanges profitability. The results are generally coherent with the actual timing of synergy initializations, although it also highlights that for a relatively small cost increase, some synergies could have been initiated earlier. Furthermore, the considerable effect of water price on the length of investments' payback period illustrates the impact of policies and regulations on industrial symbiosis.

Keywords: eco-industrial park, industrial symbiosis, multi-objective optimization, decision support system, by-product synergies

[1] Adress correspondence to: Jean-Marc Frayret, École Polytechnique de Montréal, C.P. 6079, succ. Centre-ville, Montréal (Québec), H3C 3A7, Canada. *Email*: jean-marc.frayret@polymtl.ca

3.1 Introduction

Industrial symbiosis is part of the recent field of industrial ecology that aims to promote effluents, energy flows and solid waste exchanges. To put this idea in practice, by-product synergy networks are today growing all around the world, either in defined regions or within industrial parks. They consist of companies matched together based on their inputs and outputs and maintaining customer-supplier relationships.

As observed by Sakr *et al*. (2011), even if a high degree of collaboration is needed between the different participants in a symbiosis, it is not always sufficient. Lessons from past projects also demonstrate the higher efficiency of industrial ecosystem development when adopting a network perspective instead of an isolated-enterprise point of view (Haskins, 2006). Therefore, independent network facilitators can often play a critical role in the success of those initiatives (Kincaid and Overcash, 2001). In this context, this article presents a decision support system, which aims to identify partnership opportunities, as well as how they should be configured, between enterprises with industrial by-products and enterprises likely to use them as raw materials. The proposed tool, based on a mathematical optimization model, enables such matchmakers to optimize decisions and compute the trade-off between environmental and economic benefits of by-products synergies. Indeed, studies have shown that even if the first motivation behind eco-industrial projects seems to be the preservation of natural resources and the improvement of waste management strategies, economic feasibility is essential to obtain companies' involvement (Lehtoranta *et al*., 2011). In the literature, several systems designed to identify and assess symbiotic opportunities have been proposed. However, logistic and operational feasibility, as well as the dynamic nature of eco-industrial relations are often neglected. Therefore, since supply chain designers must also face these challenges, the use of tools generally used in supply chain design seems adapted to the context of industrial symbiosis design.

3.2 Literature review

Industrial ecology is defined by Chertow (2004) as "the study of flows of materials and energy in industrial and consumer activities, of the effects of these flows on the environment, and of the influences of economic, political, regulatory and social factors on the flow, use, and transformation of resources". Its global objective is to reduce the environmental and economic impacts related to intensive natural resources use (Adoue, 2007). Industrial symbiosis is a subset of this field focusing on exchanges of materials, energy, water and by-products through businesses networks. As suggested by the term, the idea on which is based this concept is to reproduce the behavior of natural ecosystems, where the waste of a species becomes a resource for another one, among industrial networks (Frosch & Gallopoulos, 1989). The eco-park of Kalundborg, Denmark is the most documented one in the literature. Therefore, it has been chosen to illustrate the kind of information that can be brought by the decision support system proposed in this article. A lot of other eco-industrial networks have been investigated in order to identify the key success factors of those initiatives (Haskins, 2006). Among others, synergies identification and assessment steps have to be assisted with relevant tools.

Many of those tools have been developed in the last few years in order to assist managers and network facilitators finding by-product exchanges opportunities. Grant *et al*. (2010) have surveyed seventeen of them, including Presteo, proposing its own terminology to describe flows, and FaST (Facility Synergy Tool), developed by the Environmental Protection Agency (EPA). The authors compared their functionalities, strengths and weaknesses and evaluated opportunities for improvement of information and communication technology in the world of industrial symbiosis. Chertow (2000) classifies those tools under three categories: input-output matching, stakeholder processes and materials budgeting. Many software products enable their users to match companies based on the by-products they generate or could obtain. In order to do this, we firstly have to collect information about the movements of materials to, from and within a network. Eckelman & Chertow (2009) and Hsiao *et al*. (2002) show how Material Flow Analysis (i.e., MFA) can be used to identify resources reuse, presenting case studies of Oahu Island in Hawaii and Taiwan.

Once found, potential synergies need to be analyzed and selected based on their benefits. The Eco-flow software uses mathematical programming to design such networks efficiently, minimizing total costs or environmental impacts of material flows. Cimren *et al*. (2011) present an application of this tool to analyze potential synergies in an industrial symbiosis project in North America. Although this software is useful to analyze network configuration alternatives and minimize cost, it gives a static view of the eco-industrial network, with static parameters, and no amortization of investments over time. Along the same line, Li *et al*. (2011) evaluate sorting strategies and their impact on scrap materials consumption.

Allocation optimization model is used to allocate production of goods to factories. Supply-chain design exploits operational research to determine the optimal location of production facilities or distribution centers. These issues are similar whether flows involves finished goods, virgin raw materials or by-products. However, the green supply chain attaches more importance to environmental factors, which affects operations planning. Beamon (1999) describes other aspects to consider, as the risk associated with the recovery processes and the reverse distribution process, and proposes key performance indicators to evaluate their efficiency. Hervani *et al*. (2005) also propose a methodology to measure the performance of the green supply chain, focusing on inter-organizational issues. Jayaraman *et al*. (1999) propose a mixed-integer programming model to minimize the cost of closed-loop logistics by optimizing the location of remanufacturing facilities. Similarly, Bouzembrak *et al*. (2011) propose a multi-objective mathematical model to balance the economic and environmental benefits.

From a general perspective, supply chain activities show great potential to reduce our environmental footprint. For instance, intelligent transportation system can reduce the emission of greenhouse gases. Similarly, reducing the extraction of virgin material can also reduce our medium and long term dependency to non-renewable resources. Green supply chain management (GrSCM) addresses this integration of environmental concerns in daily logistics operations of organizations (Srivastava, 2007). GrSCM allows companies to adapt to evolving legislative context and consumers' concerns.

3.3 Objectives and methodology

The main objective of the tool introduced in this article is, first, to optimize the selection and configuration of by-product synergies in an eco-industrial network in a multi-period decision environment, and second, to evaluate the economic and environmental sustainability of potential synergies to better understand their cost/saving trade-off.

In this network design context, it is not sufficient to compare the price of waste against the price of raw materials. Logistics activities, including maintaining inventories, residues treatment, processing and transportation must also be taken into account. Similarly, it is also necessary to consider the joint and internal investments required to initialize a synergy. Indeed, the analysis of recent industrial symbiosis projects led in the province of Quebec by the CTTÉI reveals that synergies involving the purchase of sorting or processing equipment are more complex to implement.

Another frequent concern about seller-buyer relationship in an industrial ecology context is the degree of dependency with the partner. One way to deal, at least partially, with this issue is to provide some temporal visibility over a medium to long-term horizon. Typically in a decision support tool, this approach is implemented by adopting a multi-period structure.

The general methodology followed here proposes to, first, develop and implement a mathematical programming model to optimize the design of industrial symbiosis. Second, this methodology proposes to test the decision support tool in a case study based on the water synergies found in the Kalundborg eco-industrial park. In particular, this case study is used to analyse the trade-off between the economic benefit and the volume of water preservedand assess the level of control that a collectivity, such as the city of Kalundborg, can have to promote the development of industrial synergies.

3.4 Optimization model

The proposed model allows the user to set the relative importance of each objective in order to represent her willingness to find a compromise between the economic factor and the

environmental factor. The system also allows the user to change the value of parameters, as well as the length of the planning horizon. Therefore, different scenarios can be analysed. For example, for a potential by-products supplier, the comparison between owning a sorting process and creating a partnership with a third-party recycler can be evaluated. The profitability of acquiring a resource for an enterprise, alone or with partners, can also be measured. The influence of each parameter can be analyzed using sensitivity analysis. The tool can finally be used in order to evaluate material flows in a network when by-products availability and demand evolve over time.

3.4.1 General waste and material flow model

In the model, waste represents by-products produced by the sellers' processes, and material represents treated waste that can be directly used by buyers as inputs for their processes. The term raw material is dedicated to feedstock supplied directly from the environment. The structure of the model is based on four types of stocks: sellers' waste, sellers' material, buyers' waste, and buyers' material. A generalized view of potential waste and material flows, and their transformation, are presented in Figure 3.1.

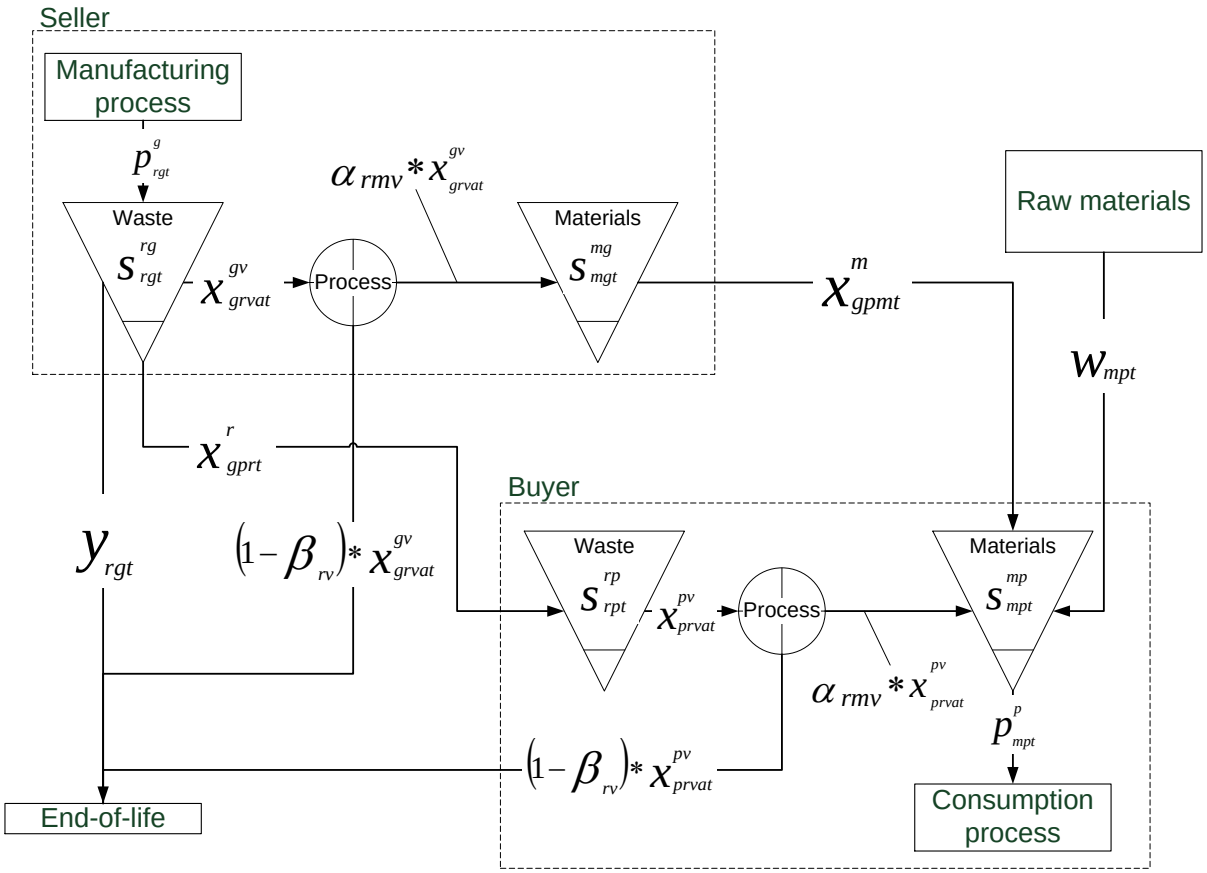

Figure 3.1: Flows circulation and stock types

In order to obtain meaningful environmental savings and analyze them in a decision-making context, the model's parameters and variables units must be consistent with one another. Therefore, the model introduces the notion of characteristic unit, for which, examples are presented in Table 3.1. This unit is one of the attributes of each flow. In particular, it is used in all by-product transformation coefficients (i.e., parameter α related to each (waste, material, process) triplet)). Along the same line, the proposed model can include simultaneously any type of solid, liquid or energy flows. However, in the case of multiple material flows, the analysis of resources savings (i.e., the second objective to optimize) is based on a subjective rating of the importance of each material.

Table 3.1: Characteristic units of different flows

Flows	Units
Cooling water, Wastewater, Surface water, Boiler water, Salty cooling water, organic fertilizer, yeast slurry	m^3
gypsum, fly ash, sludge, nitrogen, phosphorus, soy pills, clay	tons
Steam, heat	GJ

Differently, in order to take into account resource investments that are sometime necessary to initialize a synergy, the model includes different process options, as well as resource options. Similarly, each resource is modeled as a finite capacity facility that can only process a certain amount per time period. Next, the model is multi-period, and therefore takes into account the effect over multiple time periods of parameter variations. Finally, the model also considers a number of hypothesis, listed in the e-supplement, where the optimization model can also be found.

3.5 Case Study

In order to evaluate the relevance of the proposed decision model, this paper presents a case study carried out using publically available data from the eco-industrial park located in Kalundborg, Denmark. More specifically, this case study focuses on water exchanges (Figure 3.2). Water is considered both as a process input (synergies A through E) and as an energy source (synergy F). This choice was made because it is the most documented, including several resource and operating costs and investment, collected from publicly available papers, studies, and official websites. Several assumptions were also made to obtain the parameters required by the mathematical model.

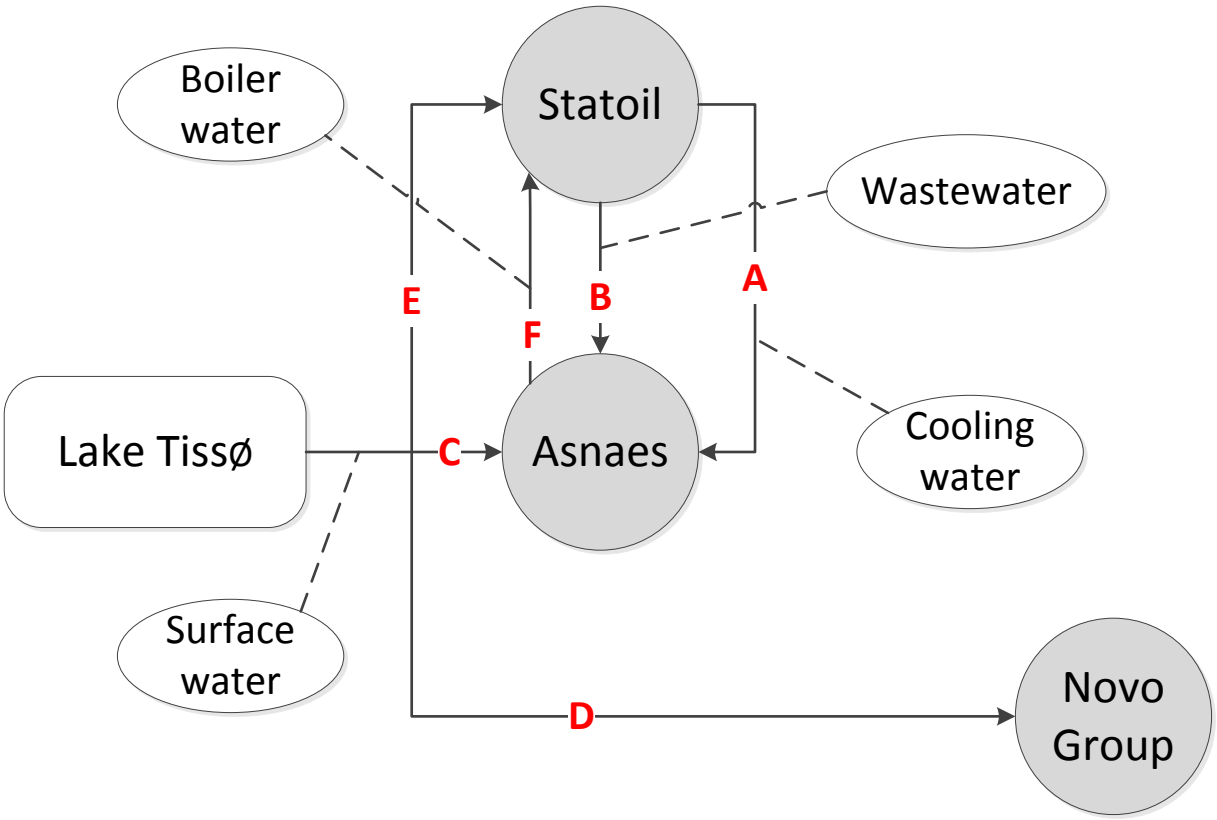

Figure 3.2: Exchanges considered, *Inspired from Jacobsen (2006)*

First, the reuse of wastewater from the Statoil refinery by the Asnaes power plant has started in 1992. This is a win-win partnership, both in environmental and economical terms, since the wastewater is given away and the discharge fees are avoided. The replacement of groundwater with surface water from Lake Tisso located a few kilometers away from the city started in the 1960's and has been evolving ever since. However, in 1997, a large investment was required to extend the pipeline capacity. Another important investment was also required for a water pre-treatment facility at the power station. Although exchanges C, D and E are actually linked by this common decision, we intentionally split the collective investment into individual investments according to local pipeline uses. In other words, we considered these exchanges as independent pairwise synergies. This reflects a limitation of the model that cannot yet take into account collective investment, with more than two enterprises. Consequently, the 72 M DKK

investment required in 1997 to continue using surface water from the Lake was divided according to the volumes needed by each participant, as shown in Table 3.2.

Table 3.2: Pipeline and pre-treatment facility investment per company

Company	Initial investment required
Asnaes power plant	17 786 100,11 DKK
Novo Group	12 730 284,48 DKK
Statoil refinery	41 483 615,41 DKK

For the purpose of the study, it is also assumed that from 1997, the three organisations cannot continue using surface water to fulfill their groundwater needs without these investments. The key economical factors in synergies C, D and E were, on one hand, the pipeline capacity expansion and the pre-treatment facility costs, and, on the other hand, the difference between the price of groundwater and the price of surface water, which is set by the Kalundborg municipality. This highlights the influential role of the municipality that can act as a driving force in the development of by-product exchanges (see second experiment). Lake Tisso, which is considered as a "waste seller" in the decision support process, has a constant annual capacity of 5.000.000 m^3.

Since the refinery was occasionally missing boiler water in order to feed its steam facility, its managers could either make an important investment to expand the capacity of their water pre-treatment facility, or develop, for a much smaller investment, a by-product exchange (synergy F) with its neighbour, the Asnaes power plant, which was producing more boiler water than its needs. Consequently, this synergy was straightforward for both partners. In order to have a relevant price for boiler water, electricity prices for industrial consumers from the European Commission[2] was used. The thermal efficiency of 80°C boiler water (i.e., 36 MJ/m^3) produced by Asnaes leads to a conversion factor of 10 kWh/m^3 of boiler water (Jacobsen, 2006).

[2] http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/energy/data/main_tables

In order to obtain the road distances between companies (Table 3.3 of the e-supplement), the Google Distance Matrix Application Programming Interface was used, using the address of each company. The symbolic enterprise “Others” is used to represent minor actors of the network for which there is few public information. They are small enterprises, such as local farmers, which do not produce waste or reject energy or water flows in relevant quantities. However, they are still collectively able to participate in the symbiosis by using materials or effluents from actors forming the core of the eco-industrial project. The location of this symbolic company has been set to the city center of Kalundborg.

3.5.1 Case study methodology

In order to evaluate the capacity of the model to provide relevant input to decision makers, it was used in a retrospective manner in two distinct series of strategic planning processes. Therefore, to make sure the experiments are as realistic as possible, we only used the data available at the time period considered, and so, for each use of the model. In the first series of strategic planning processes, these processes were simulated over a total period of nine years, from 1992, to 2000. At the beginning of each year, the tool was used in order to propose investment decisions over a five-year horizon, and compare investment decisions between scenarios and with the actual decisions made at that time. Because this process is repeated every year, it is referred to as a rolling horizon planning process, and each planning process is referred to as a planning cycle.

Along the same line, because large investments are amortized over several years, we assumed that the amortization of each investment project is three years, as suggested by Baas (2011). This assumption is important as it allows the total cost of investment to not be allocated just to the first year of its implementation. In other words, this modeling allows the cost and benefit of investment projects to be somewhat balanced over several time periods.

Next, in order to be as close as possible with the real evolution of the Kalundborg symbiosis, whatever the decision solutions proposed by the model at a given planning cycle, the next cycle is always configured using the actual investment decision. This allows us to analyze

the decision-making context at each planning cycle, as well as the companies' willingness to minimize water consumption.

Finally, as explained earlier, although for each planning cycle, actual data was available for the entire planning horizon, we only consider the actual data of previous periods, while data for period one through five were estimated using two different methods (described in the next sections). Similarly, because investment decisions could be proposed earlier or later by the model, investments cost were updated with the historic Danish inflation rate.

3.5.2 First experiment

In this first experiment, the companies' point of view is considered by analyzing the economic concessions they have to make in order to use synergistic water over the most economical water procurement source. As mentioned before, it is assumed that companies forecast water prices considering only past prices. Therefore, for each planning cycle, the average yearly variation of water prices since 1990 is used to predict the prices for the next five years, using regression analysis. Figure 3.3 of the e-supplement shows for each year and each type of water, the average values obtained against the actual prices set by the Kalundborg municipality, which are publicly available. The differences observed are in general minor. These differences arise mainly in the context of disruptive policies set by the municipality to change companies' behaviour, which are difficult to accurately forecast.

In order to assess the value of the companies' concession they must make to save water, we used the lexicographic method described earlier, by incrementally increasing the ∂ factor until all synergies appeared in the solution. This allowed us to compare the total cost impacts of saving different quantities of water. This was systematically done for each planning cycle.

3.5.2.1 Results

Table 3.4 of the e-supplement shows the water and economic savings for all planning cycle. In order to have a reference solution to compute water and economic savings, the values on the first line of each planning cycle (from 1 to 9) are obtained with the calculation of the total

network cost with no new synergies. Table 3.4 also shows that as the willingness of companies to concede a deviation from the minimum cost solution increases (larger δ), more synergies are proposed by the model.

In the first planning cycle, the model proposes the same synergy that was actually implemented. In the next planning cycles (2 to 6), although nothing was actually implemented until 1997, the decision support system proposes, in certain situations, the initialization of synergies C, D and E as soon as in 1995. In the second planning cycle, synergy D is only proposed in 1997 with a large economic concession (corresponding to a 13.4% increase of total cost). This only enables the Novo Group to acquire 491 000 m^3 of surface water in replacement of groundwater. This corresponds to a cost of 4,63 DKK/m^3 of water preserved.

In the planning cycle 3, synergy C is proposed to be implemented in 1998 for a reduction of the total network cost of 1,5%. Also, with an effort of 0,35 DKK/m^3 of water preserved (or a total cost increase of 1,9%), this synergy, along with the synergy D, is proposed for 1997. For a much larger concession of 1,55 DKK/m^3 of water preserved, synergies C, D and E are even proposed in 1998, which corresponds to a total cost increase of 12.2%.

For planning cycle 4 and 5, the inclusion of both synergies C and D lead directly to a total cost reduction of 3,5% in 1995 and 2% in 1996, whereas synergy E is included in the plan for respectively 1,7% and 5,7% cost increases. However, it is interesting to see that in planning cycle 6, the optimal economic plan does not include any synergy, and synergies C, D and E are only included simultaneously in the plan for a total cost increase of more than 10%, which corresponds to a cost of 1,23 DKK/m^3 of water preserved. Within the context of this study, and the limitation of the data available, this result might indicate that the Statoil refinery joined the pipeline project although it was not necessarily profitable, at least during the first year of operation in 1997. Therefore, other unknown factors not included in this study might have contributed to this investment, such as government grants. Similarly, the amortization period might have been extended over 3 years due to the large capital investment required.

Finally, the important economic savings due to avoided discharge fees for the power plant and reduced energy procurement costs for the refinery explain the inclusion of synergy F in the

last three planning cycles (7 to 9), which considers 2002 (the year the synergy was actually implemented).

Overall, it seems that water preservation in the Kalundborg symbiosis was mainly driven by economic factors, with an average payback period of between three and four years. Concerning synergies C and D, the results obtained for some planning cycles suggest that they could have been put in place before 1997.

3.5.2.2 Results Analysis

In this section, we use the results obtained in the first experiment to study the value of saved resources from the organizations' perspective. Since synergies B and F are proposed without economic concession in planning cycles 1 and 6 through 8, these synergies have been omitted in this section.

As explained above, synergies C, D and E, which concern the replacement of groundwater with surface water, can only start being beneficial in 1997. Therefore, investment decisions concerning these synergies are only made in planning cycle 2 through 6. For these planning cycles, the trade-off between environmental concern and the purely economic objective is shown at Figure 3.5 of the e-supplement.

As shown in Figure 3.4 of the e-supplement, a 5% concession leads to the proposition of one more synergy in three cases, and of two more for planning cycle 6. The results for planning cycle 2 highlight planning difficulties arising from the lack of visibility with respect to water prices. In particular, for this planning cycle, the simple forecast method used to compute this information lead to a significant forecast error. Therefore, strategic planning with this specific type of synergies should include all actors, including the city, in order to limit the negative effect of such externalities.

Figure 3.5 of the e-supplement presents the effect of economic concessions with respect to resources savings. From a general standpoint, and within the limitation of the data used to carry out this study, the cost of savings resources can be quite high in the context of water in Kalundborg. This highlights the need for subsidies from government agencies for large synergy

projects. Similarly, except for planning cycle 2, resources savings are in general increasing gradually with an increased concession.

Concerning planning cycle 4, we can see that, even if the number of synergies proposed stays the same for δ=10 and δ=20, water savings still increase quite significantly. This is due to the fact that synergy E is proposed for an implementation in 1999 for δ=10, and for an implementation in 1995 for δ=20 (i.e., a larger concession allows for an earlier setup).

Economic and environmental benefits computed for different planning horizons have then been distributed on the different water exchanges. The chart presented at Figure 3.6 of the e-supplement shows the economic savings per m^3 of water exchanged for the considered synergies. The only synergies not leading to direct economic savings are the D and the E (based on the weighted average of volumes of water saved), while synergies B and F are clearly profitable in all horizons considered, bringing procurement savings of more than 7 DKK for each m^3 of synergistic water. The synergy C is in many cases proposed at δ=0.

3.5.3 Second experiment

As mentioned earlier, the city actually played a key role in setting up the symbiosis by taking critical decisions related to the price of acquisition or discharge of water. This second experiment specifically studies the capacity of the municipality to impact the profitability level and the payback period of by-product synergies. The optimization problem no longer considers two objective functions. Only the economic aspects of the synergies opportunities is considered (i.e., $F_1(x)$). Instead of trading off economic benefits by moving away from the optimal solution, the goal is now to obtain the lowest cost solution proposing the establishment of more synergies by acting either on water prices or discharge cost.

In order to do this, for each synergy studied, a specific type of water has been selected based on their relative impact on the profitability of the synergy, to carry out a sensitivity analysis. This is shown at Table 3.5 of the e-supplement.

In other words, for each synergy at a time, we carried out a sensitivity analysis by studying the impact of the identified parameter mentioned in Table 3.5 of the e-supplement. For each sensitivity analysis, we considered that the studied parameter increased linearly each year at a certain rate throughout the entire planning horizon, while the other prices and fees, as well as volumes, were still predicted based on previous years using regression analysis. We also considered for these parameters, an initial price p_0 set as the last year price. For each synergy and each planning horizon, the rate is first set at 0%, and then increased by one percent at the time, until the model proposed new synergies. The publicly available prices (see Table 3.6 of the e-supplement (Jacobsen (2006)) was used as reference values p_0 for the calculation of forecasted prices of water over planning horizons.

In this context, any price evolution pattern could have been used. As explained above, we have arbitrarily chosen a constant annual rate. The goal of the experiment is therefore to study the capacity of the model to identify the price increase rate leading to the creation of new synergies.

Synergies C, D, E and F have been studied more in depth since they require an economic trade-off in some planning horizons (see first experiment). Therefore, the price of groundwater is the parameter at the center of this second experimentation.

3.5.3.1 Results

Table 3.7 of the e-supplement shows the results of the second experiment. For each cycle studied, the initial price of groundwater is shown, as well as the different final prices (i.e., the fifth year of the planning horizon) associated with the yearly rates of increase leading to changes in the synergy-initialization decisions as suggested by the model. The price of saved water is then calculated as the cost variation between the total network cost and the price of water at 0% rate, over the quantity of water saved. Except for planning cycle 2, annual rates under 10% are often sufficient to motivate the establishment of by-product synergies. It is also possible to observe that in those cycles, synergy C is always the first one to appear, synergy D the second one and synergy E the last one, which is consistent with the results shown in Figure 3.6 of the e-supplement. Horizons 3 and 4 show that the implementation year proposed can also be affected

by the yearly rate applied to the price of groundwater. The large difference between the results obtained for planning cycles 2 and the other horizons is attributable to two main factors. Firstly, the volumes of water needed by companies predicted for the year 1997 in 1993 and in the subsequent years are quite different, especially concerning synergy C. Secondly, in practice, the price of groundwater has been raised a lot more in 1993 and 1994 than in 1991. Finally, it is interesting to see that the unit price of water saved drops as the yearly rate increases.

3.5.3.2 Results analysis

For planning cycle 2, because of the amortization period of three years and the fact that the benefits of the three considered synergies can only be reaped from 1997 onward, even with an important increase of the price of groundwater, there is no synergy proposed before 1997. In planning cycle 3, different synergies appear at yearly rates between 9% and 25%. We can particularly observe the price difference in 1997 to obtain the proposition of the synergy C alone or along with synergy D in 1998. For planning cycle 4, we can observe the coherence between the length of amortization period chosen and the behavior of the model. Indeed, synergies are proposed either in 1995, 1998 or 1999, depending if one, two or three years of the amortization period are included in the planning horizon. In other words, there is no synergy proposed in 1996 and 1997 because an investment made in 1995 is cheaper than in 1996 and 1997 due to inflation. For planning cycle 5, as in the planning cycle 2, all three synergies are proposed for the same year.

Figure 3.7 of the e-supplement shows the influence of the annual rate of increase on the volume of water preserved for the different planning cycle. Except for the planning cycle 2, the necessary rate to save the maximum volume of water, which can be exchanged in the eco-industrial network is of 25% or below. This number may appear quite high, but as it is shown in Table 3.6 of the e-supplement, the Kalundborg municipality has increased the price of groundwater between 1999 and 2000 of more than 50%. Some minor differences in the rate applied can lead to a volume of water saved more than twice as important as in planning cycle 4. As for planning cycle 3, Figure 3.7 of the e-supplement shows a linear evolution of the volume of synergistic water as a function of the annual rate of increase of groundwater's price.

3.5.4 Case study conclusion

Considering the data that was publicly available concerning the Kalundborg industrial symbiosis and the different assumptions we made, the results obtained in the first experiment show that the investments necessary to put in place by-product synergies have payback periods of more than three years. On one hand, the distribution of the expenses between the three participants in the case of synergies C, D and E was certainly more complex than the simple calculation rule we used in this case study. However, the use of a network perspective is adapted to these cases, where the perspective of an enterprise cannot be considered in an isolated manner. On the other hand, as water management was an important concern for the municipality, it is possible that the enterprises had access to other form of revenues, such as government subsidies, in order to balance part of their investments necessary to initialize synergies. This would also be a good way to promote resources preservation without increasing dramatically their price, as it is shown in experiment 2. However, the benefits of the combined options would need to be studied more in depth in order to find the right balance between them. Such a planning exercise could be done cooperatively by both the private sector and the city, especially when synergies concern public resources, such as water.

3.6 Conclusion and Future Works

In recent years, optimization models have been developed to maximize the savings in by-product synergy networks. At the same time, tools to evaluate the environmental performance of such networks were proposed in the literature. However, decision makers have to handle both types of tools. The proposed multi-criteria optimization model can support companies to integrate and analyse altogether economic and environmental issues. This decision model also enables decision makers to analyse through sensitivity analysis, for example, the price a waste should be sold, or the minimal processing capacity of a piece of equipment to buy. Data from the eco-industrial park of Kalundborg were used to illustrate the savings the proposed model is able to identify. The results show that some synergies could have been initialised earlier and that, in general, the companies' behaviour is based on a payback period of around three years. This also

confirms the fact that economic considerations are often the main driver of by-products synergy networks. However, the last part of the case study also highlights the fact that with little financial trade-off, some enterprises could participate a lot more actively in resources preservation and that the municipality of Kalundborg, with its decision-making power concerning the price of water, can significantly affect the profitability of some synergies. Finally, the case study showed the important sensitivity of the model to forecasted prices and volumes, and the complexity involved in collective investments, especially in the distribution of expenses.

Future work and improvement of the model include collective investment where at least three companies are involved in the creation of a synergy. Also, the model must be improved in order to integrate life-cycle analysis results in the optimization process in order to obtain accurate GHG emissions savings. Other tests made on solid waste synergies in the Kalundborg eco-industrial network (not discussed in this paper) showed that with the parameters considered, some exchanges did not seem profitable, even if they were initialized. These results underline the fact that other economic benefits should be taken into account, as the ones associated with the respect of regulations and other elements relative to the field of environmental accounting.

Acknowledgements

The authors would like to thank gratefully the *Centre de Transfert Technologique en Écologie Industrielle* for their collaboration, their relevant suggestions and the sharing of their industrial ecology knowledge and passion. We would also like to thank RECYC-QUÉBEC, the Fonds Québécois de Recherche en Nature et Technologies (FQRNT) and the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) for their financial support.

References

Adoue, C. (2007). Mettre en oeuvre l'écologie industrielle: PPUR presses polytechniques.

Ardente, F., Cellura, M., Lo Brano, V., & Mistretta, M. (2010). Life cycle assessment-driven selection of industrial ecology strategies. Integrated Environmental Assessment and Management, 6(1), 52-60. doi: 10.1897/ieam_2008-065.1

Aviso, K. B., Tan, R. R., Culaba, A. B., Foo, D. C. Y., & Hallale, N. (2010). Fuzzy optimization of topologically constrained eco-industrial resource conservation networks with incomplete information. Engineering Optimization, 43(3), 257-279. doi: 10.1080/0305215x.2010.486031

Bain, A., Shenoy, M., Ashton, W., & Chertow, M. (2010). Industrial symbiosis and waste recovery in an Indian industrial area. Resources, Conservation and Recycling, 54(12), 1278-1287. doi: 10.1016/j.resconrec.2010.04.007

Beamon, B. M. (1999). Designing the green supply chain. Logistics information management, 12(4), 332-342.

Boons, F., Spekkink, W., & Mouzakitis, Y. (2011). The dynamics of industrial symbiosis: a proposal for a conceptual framework based upon a comprehensive literature review. Journal of Cleaner Production, 19(9–10), 905-911. doi: 10.1016/j.jclepro.2011.01.003

Bouzembrak, Y., Allaoui, H., Goncalves, G., & Bouchriha, H. (2011). A multi-objective green supply chain network design. Paper presented at the Logistics (LOGISTIQUA), 2011 4th International Conference on.

Chertow, M. R. (2000). Industrial symbiosis: literature and taxonomy. Annual review of energy and the environment, 25(1), 313-337.

Chertow, M. R. (2004). Industrial symbiosis. Encyclopedia of energy, 3, 407-415.

Chertow, M. R. (2007). “Uncovering” Industrial Symbiosis. Journal of Industrial Ecology, 11(1), 11-30. doi: 10.1162/jiec.2007.1110

Cimren, E., Fiksel, J., Posner, M. E., & Sikdar, K. (2011). Material Flow Optimization in By-product Synergy Networks. Journal of Industrial Ecology, 15(2), 315-332. doi: 10.1111/j.1530-9290.2010.00310.x

Côté, R. P., & Cohen-Rosenthal, E. (1998). Designing eco-industrial parks: a synthesis of some experiences. Journal of Cleaner Production, 6(3–4), 181-188. doi: 10.1016/s0959-6526(98)00029-8

Eckelman, M. J., & Chertow, M. R. (2009). Using Material Flow Analysis to Illuminate Long-Term Waste Management Solutions in Oahu, Hawaii. Journal of Industrial Ecology, 13(5), 758-774.

Ehrenfeld, J., & Chertow, M. R. (2002). Industrial ecology: The legacy of Kalundborg. In R. Ayres & L. Ayres (Eds.), Handbook of Industrial Ecology (pp. 334-348). Cheltanham, UK: Edward Elgar Publishing, Inc.

Ehrenfeld, J., & Gertler, N. (1997). Industrial Ecology in Practice: The Evolution of Interdependence at Kalundborg. Journal of Industrial Ecology, 1(1), 67-79. doi: 10.1162/jiec.1997.1.1.67

Esty, D. C., & Porter, M. E. (1998). Industrial Ecology and Competitiveness. Journal of Industrial Ecology, 2(1), 35-43. doi: 10.1162/jiec.1998.2.1.35

Fiksel, J., & Bakshi, B. (2010, 17-19 May 2010). Industrial ecology network optimization with life cycle metrics. Paper presented at the Sustainable Systems and Technology (ISSST), 2010 IEEE International Symposium on.

Frosch, R. A., & Gallopoulos, N. E. (1989). Strategies for manufacturing. Scientific American, 261(3), 144-152.

Grant, G. B., Seager, T. P., Massard, G., & Nies, L. (2010). Information and Communication Technology for Industrial Symbiosis. Journal of Industrial Ecology, 14(5), 740-753. doi: 10.1111/j.1530-9290.2010.00273.x

Haskins, C. (2006). Multidisciplinary investigation of eco-industrial parks. Systems Engineering, 9(4), 313-330. doi: 10.1002/sys.20059

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(8–10), 985-995. doi: 10.1016/j.jclepro.2004.02.014

Hervani, A. A., Helms, M. M., & Sarkis, J. (2005). Performance measurement for green supply chain management. Benchmarking: An International Journal, 12(4), 330-353.

Hsiao, T. Y., Huang, Y. T., Yu, Y. H., & Wernick, I. K. (2002). Modeling materials flow of waste concrete from construction and demolition wastes in Taiwan. Resources Policy, 28(1–2), 39-47. doi: 10.1016/s0301-4207(03)00004-7

Jacobsen, N. B. (2006). Industrial Symbiosis in Kalundborg, Denmark: A Quantitative Assessment of Economic and Environmental Aspects. Journal of Industrial Ecology, 10(1-2), 239-255. doi: 10.1162/108819806775545411

Jayaraman, V., Guide Jr, V., & Srivastava, R. (1999). A closed-loop logistics model for remanufacturing. Journal of the operational research society, 497-508.

Jelinski, L. W., Graedel, T. E., Laudise, R. A., McCall, D. W., & Patel, C. K. (1992). Industrial ecology: concepts and approaches. Proceedings of the National Academy of Sciences, 89(3), 793-797.

Karlsson, M., & Wolf, A. (2008). Using an optimization model to evaluate the economic benefits of industrial symbiosis in the forest industry. Journal of Cleaner Production, 16(14), 1536-1544. doi: 10.1016/j.jclepro.2007.08.017

Kincaid, J., & Overcash, M. (2001). Industrial Ecosystem Development at the Metropolitan Level. Journal of Industrial Ecology, 5(1), 117-126. doi: 10.1162/108819801753358535

Lehtoranta, S., Nissinen, A., Mattila, T., & Melanen, M. (2011). Industrial symbiosis and the policy instruments of sustainable consumption and production. Journal of Cleaner Production, 19(16), 1865-1875. doi: 10.1016/j.jclepro.2011.04.002

Li, P., Dahmus, J., Guldberg, S., Riddervold, H. O., & Kirchain, R. (2011). How Much Sorting Is Enough. Journal of Industrial Ecology, 15(5), 743-759. doi: 10.1111/j.1530-9290.2011.00365.x

Marler, R. T., & Arora, J. S. (2004). Survey of multi-objective optimization methods for engineering. Structural and Multidisciplinary Optimization, 26(6), 369-395. doi: 10.1007/s00158-003-0368-6

Sakr, D., Baas, L., El-Haggar, S., & Huisingh, D. (2011). Critical success and limiting factors for eco-industrial parks: global trends and Egyptian context. Journal of Cleaner Production, 19(11), 1158-1169. doi: 10.1016/j.jclepro.2011.01.001

Srivastava, S. K. (2007). Green supply-chain management: a state-of-the-art literature review. *International journal of management reviews*, *9*(1), 53-80.

Valero, A., Usón, S., & Costa, J. (2012). Exergy analysis of the industrial symbiosis model in Kalundborg. Paper presented at the The 25th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Perugia, Italy.

Van Hoek, R. I. (1999). From reversed logistics to green supply chains. Supply Chain Management: An International Journal, 4(3), 129-135.

Wilkerson, T. (2005). Can one green deliver another? Boston: Harvard Business School.

About the authors

Martin Maillé is a M.Sc. student at École Polytechnique de Montréal, Montréal (Québec), Canada.

Jean-Marc Frayret is a professor at the department of mathematics and industrial engineering at École Polytechnique de Montréal, Montréal (Québec), Canada.

E-SUPPLEMENT TO :

Decision Model to Identify Optimal Industrial Waste Reuse Opportunities

Martin MAILLÉ, Jean-Marc FRAYRET[3]
École Polytechnique de Montréal

Summary

This supplement contains the optimization model presented in the article, data used for the case study along with results obtained. Figures 3.3 through 3.6 and Table 3.4 refer to the first experiment, while Figure 3.7, along with tables 3.5 through 3.7, relates to the results of the second experiment.

3.7 Optimization model

3.7.1 Hypotheses

- solid by-products can be treated either by a buyer or by a seller;
- third-party recyclers, whose main function is to consolidate by-product flows, are considered as buyers or sellers, depending of their role in the synergy;
- landfilling capacity and available quantity of raw materials are considered sufficient (i.e., infinite);
- buyers cannot acquire by-products and directly send them to landfill;
- the environmental aspects related to waste landfilling include transportation from the enterprise to a landfill site;
- the environmental aspects related to raw material purchase include all activities from cradle to the buyer's process (extraction, transport from the extraction site to the buyer, etc.);
- inventory capacity for by-products and raw materials are independent;
- end product inventories are not considered here.

[3] Adress correspondence to: Jean-Marc Frayret, École Polytechnique de Montréal, C.P. 6079, succ. Centre-ville, Montréal (Québec), H3C 3A7, Canada. *Email*: jean-marc.frayret@polymtl.ca

3.7.2 Sets

R = Types of by-product/waste available

M = Raw materials

$F = R \cup M$ = material flows in the network

G = By-products/waste sellers

P = Potential buyers

$E = G \cup P$ = Enterprises involved in the eco-industrial network

T = Time periods considered

V = Treatment processes

A = Transformation/treatment resources

$V_a \in V$ = Processes that resource $a \in A$ can perform

3.7.3 Parameters

p_{rgt}^{g}: Volume of type r waste of seller g available at period t

p_{mpt}^{p}: Volume of material m required by buyer p at period t

ω_{rv}: Volume of waste produced by the treatment with process v of one unit of type r waste

γ_{rva}: Consumption of resource a related to the treatment with process v of one unit of type r waste

α_{rmv}: Volume of material m obtained by the treatment with process v of one unit of type r waste

d_{gp}: Distance in kilometers between seller g and buyer p

ct_{rv}: Treatment cost of one unit of type r waste with process v

tr_f: Transportation cost of one unit of flow f on one kilometer

ce_{rgt}^{r}: Landfill cost of one unit of type r waste of seller g at period t

ce_{vret}^{v}: Landfill cost of one unit of waste produced by the treatment with process v of type r waste of enterprise e at period t

cm_{mt}: Price of one unit of raw material m at period t

k_{gprt}^{r}: Price of one unit of type r waste sold by seller p to buyer g

k_{gpmt}^{m}: Price of one unit of material m sold by seller p to buyer g

st_f: Inventory cost of one unit of flow f during one period

i_{gprt}: Initialization cost of a synergy between seller g and buyer p for type r waste at period t

ni_{gprt}: Costs avoided with the initialization of a synergy between seller g and buyer p for type r waste at period t

cs_g^{gr}: Inventory capacity of seller g for waste in m^3

cs_g^{gm}: Inventory capacity of seller g for materials in m^3

cs_p^{pr}: Inventory capacity of buyer p for waste in m^3

cs_p^{pm}: Inventory capacity of buyer p for materials in m^3

v_f: Volume in m^3 necessary to hold one unit of flow f in inventory

cap_a: Treatment capacity of resource a per period and per unit of waste

c_{ae}: Purchase price of resource a for the enterprise e

$$g_{ae} = \begin{cases} 1, \text{ if enterprise e owns resource a;} \\ 0, \text{ otherwise.} \end{cases}$$

f_m: Relative importance of the preservation of one unit of material m

∂: trade-off parameter expressed as a percentage of additional cost the decision-maker is ready to accept for environmental considerations

θ: Number of amortization years of investments

3.7.4 Decision variables

In the proposed model, decision variables represent either investment decisions (primary variables), or by-products/waste and material flows (secondary variables). The following list explains all variables used in the model, as illustrated in Figure 3.1.

x_{grvat}^{gv}: Volume of type r waste of seller g transformed with process v on resource a at period t

x_{prvat}^{pv}: Volume of type r waste of buyer p transformed with process v on resource a at period t

x_{gpmt}^{m}: Volume of material m of seller g transferred to the buyer p at period t

x_{gprt}^{r}: Volume of type r waste of seller g transferred to buyer p at period t

y_{rgt}: Volume of type r waste of seller g landfilled at period t

s_{rgt}^{rg}: Inventory of type r waste held by seller g at the end of period t

s_{rpt}^{rp}: Inventory of type r waste held by buyer p at the end of period t

s_{mgt}^{mg}: Inventory of material m held by seller g at the end of period t

s_{mpt}^{mp}: Inventory of material m held by buyer p at the end of period t

w_{mpt}: Volume of raw material m acquired by buyer p at period t

$q_{aet} = \begin{cases} 1, \text{ if enterprise e purchases resource a at period t;} \\ 0, \text{ otherwise.} \end{cases}$

$z_{gprt} = \begin{cases} 1, \text{ if a synergy is between seller g and buyer p for type r waste at period t;} \\ 0, \text{ otherwise.} \end{cases}$

ac_{gprt}: Cost of the amortization at period t linked with the initialization of a synergy between seller g and buyer p for type r waste

3.7.5 Decision objectives and trade-off analysis

As mentioned earlier, this model proposes to optimize two objective functions. In order to optimize both objectives, we use the lexicographic method, as explained in Marler and Arora (2004). In this approach, the total cost of investment and operations are first minimized, which thus provides the minimum cost reference, referred as $F_1(x^*)$. Next, we switch the objective function in order to minimize resource consumption with a maximum deviation δ% from $F_1(x^*)$. This objective function is referred to as $F_2(x)$. In the case study described in the next section, the specific objective is to minimize water consumption. However, this function could be adjusted in

order to minimize GHG emissions, although it would require a large preliminary LCA analysis of the possible options.

$$\boldsymbol{F_1}(\boldsymbol{x}) = \sum_t \sum_p \sum_g \sum_r \Bigg\{ \sum_m \Big(cm_{mt} * w_{mpt} + st_m * \left(s^{mg}_{mg(t-1)} + s^{mp}_{mp(t-1)} \right) + d_{gp} * \left(tr_r * x^r_{gprt} + tr_m * x^m_{gpmt} \right) + k^r_{gprt} * x^r_{gprt} + k^m_{gpmt} * x^m_{gpmt} \Big) + \sum_v \sum_a \left[ct_{rv} * \left(x^{gv}_{grvat} + x^{pv}_{prvat} \right) + \omega_{rv} * \left(x^{gv}_{grvat} * ce^v_{vrgt} + x^{pv}_{prvat} * ce^v_{vrpt} \right) \right] + ac_{gprt} + ni_{gprt} * (1 - z_{gprt}) + st_r * \left(s^{rg}_{rg(t-1)} + s^{rp}_{rp(t-1)} \right) + ce^r_{rg} * y_{rgt} \Bigg\} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{F_2}(\boldsymbol{x}) = \sum_m \sum_p \sum_t \left(w_{mpt} * f_m \right) \tag{2}$$

$$Min\ F_i(x) \qquad i = \{1,2\}$$

3.7.6 Constraints

$$\mathrm{F_1(x)} \leq \left(1 + \frac{\partial}{100}\right) \mathrm{F_1(x_1^*)} \tag{3}$$

$$\mathrm{p^g_{rgt} + s^{rg}_{rg(t-1)} - y_{rgt} - \sum_v \sum_a x^{gv}_{grvat} - \sum_p x^r_{gprt} = s^{rg}_{rgt} \quad \forall\, r \in R, g \in G, t \in T} \tag{4}$$

$$\mathrm{\sum_v \sum_r \sum_a \left(\alpha_{rmv} * x^{gv}_{grvat} \right) + s^{mg}_{mg(t-1)} - \sum_p x^m_{gpmt} = s^{mg}_{mgt} \quad \forall\, m \in M, g \in G, t \in T} \tag{5}$$

$$\mathrm{\sum_v \sum_r \sum_a \left(\alpha_{rmv} * x^{pv}_{prvat} \right) + \sum_g x^m_{gpmt} + w_{mpt} + s^{mp}_{mp(t-1)} - p^p_{mpt} = s^{mp}_{mpt} \quad \forall\, m \in M, p \in P, t \in T} \tag{6}$$

$$\mathrm{\sum_g x^r_{gprt} + s^{rp}_{rp(t-1)} - \sum_v \sum_a x^{pv}_{prvat} = s^{rp}_{rpt} \quad \forall\, r \in R, p \in P, t \in T} \tag{7}$$

$$\mathrm{\sum_r \left(s^{rg}_{rgt} * v_r \right) \leq cs^{gr}_g \quad \forall\, g \in G, t \in T} \tag{8}$$

$$\mathrm{\sum_m \left(s^{mg}_{mgt} * v_m \right) \leq cs^{gm}_g \quad \forall\, g \in G, t \in T} \tag{9}$$

$$\mathrm{\sum_r \left(s^{rp}_{rpt} * v_r \right) \leq cs^{pr}_p \quad \forall\, p \in P, t \in T} \tag{10}$$

$$\mathrm{\sum_m \left(s^{mp}_{mpt} * v_m \right) \leq cs^{pm}_p \quad \forall\, p \in P, t \in T} \tag{11}$$

$$\mathrm{\sum_r \sum_{v \in V_a} \left(\gamma_{rva} * x^{gv}_{grvat} \right) \leq cap_a * \left(q_{agi} + g_{ag} \right) \quad \forall\, g \in G, a \in A, t \in T, i \in [t - (|T| - 1) \ldots t]} \tag{12}$$

$$\mathrm{\sum_r \sum_{v \in V_a} \left(\gamma_{rva} * x^{pv}_{prvat} \right) \leq cap_a * \left(q_{api} + g_{ap} \right) \quad \forall\, p \in P, a \in A, t \in T, i \in [t - (|T| - 1) \ldots t]} \tag{13}$$

$$\mathrm{\sum_t \sum_a q_{aet} \leq 1 \quad \forall\, e \in E} \tag{14}$$

$$\mathrm{M * \sum_{i=0}^{(|T|-1)} \left(z_{gpr(t-i)} \right) \geq \sum_m \left(\alpha_{rmv} * x^m_{gpmt} \right) + x^r_{gprt} \quad \forall\, g \in G, p \in P, r \in R, t \in T} \tag{15}$$

$$ac_{gpri} \geq \frac{z_{gprt} * i_{gprt} + q_{apt} * c_{ap} + q_{agt} * c_{ag}}{\theta} \quad \forall\, g \in G, p \in P, r \in R, a \in A, t \in T, i \in [t - (|T| - 1) \dots t] \qquad (16)$$

$$x^{gv}_{grvat}, x^{pv}_{prvat}, x^{m}_{gpmt}, x^{r}_{gprt}, y_{rgt}, ac_{gprt}, s^{rg}_{rgt}, s^{rp}_{rpt}, s^{mg}_{mgt}, s^{mp}_{mpt}, w_{mpt} \geq 0 \qquad (17)$$

$$z_{gprt}, q_{aet} \in \{0,1\} \qquad (18)$$

The deviation from the optimal solution is restricted by parameter δ in equation (3). Equations (4) through (7) concern the flow balance of each type of stock for each enterprise, while equations (8) through (11) ensure that all companies' storage capacity for a certain type of flow is respected. The possession or purchase of a resource by an enterprise is linked to a maximum treatment capacity, as shown in equations (12) and (13). We considered a maximum of one resource purchase per company and therefore introduced constraint (14). Finally, equations (15) and (16) respectively make sure that a synergy is initiated before a by-product is transferred between two enterprises and that, if such a decision is made, the corresponding cost is included in the objective function for the amortization period.

3.8 Tables and figures

Table 3.3: Distance between sellers and buyers of the Kalundborg industrial symbiosis

Enterprises	Novo Group	Statoil	Asnaes	Soilrem	Gyproc	Kalundborg municipality	Others
Novo Group	0 km	3 km	3 km	4 km	1 km	1 km	3 km
Statoil	3 km	0 km	1 km	0 km	3 km	3 km	6 km
Asnaes	3 km	1 km	0 km	1 km	2 km	3 km	6 km
Lake Tissø	16 km	16 km	18 km	17 km	16 km	16 km	20 km
Kalundborg municipality	1 km	3 km	2 km	3 km	0 km	0 km	3 km

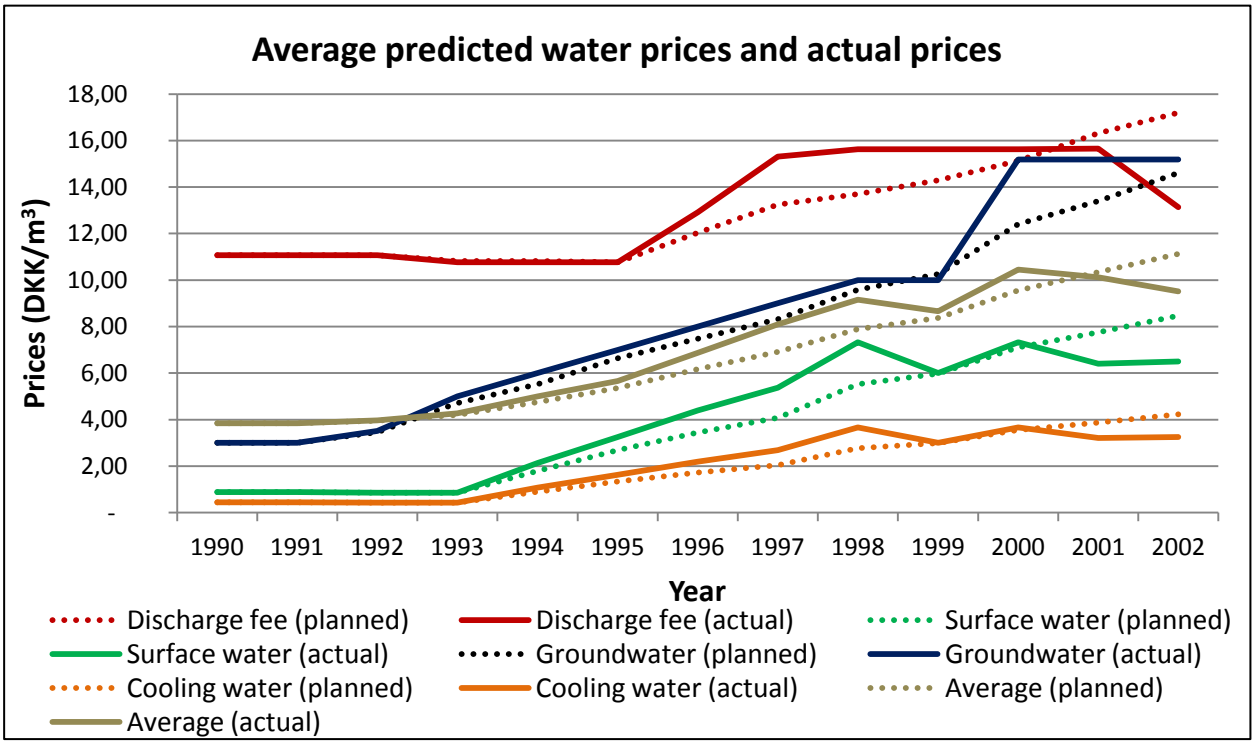

Figure 3.3: Predicted and actual water price

Table 3.4: Economic and environmental benefits of different planning horizons computed in the first experiment

Planning cycle	Time Frame	Test	Non-synergistic water (m^3)	Water saved (m^3)	Total network cost (DKK)	Cost variation (DKK)	Price of water saved (DKK/m^3)	Synergies proposed	Init. year
1	1992-1996	**No new synergy**	17 617 783		20 638 844,35				
		δ=0	17 143 783	474 000	16 974 544,35	(3 664 300,00)	(7,73)	B	1992
2	1993-1997	**No new synergy**	17 067 681		18 551 987,43				
		δ=0	17 067 681		18 551 987,43				
		δ=5	17 067 681		18 551 987,43				
		δ=10	17 067 681		18 551 987,43				
		δ=20	16 576 681	491 000	20 826 505,59	2 274 518,16	4,63	D	1997
3	1994-1998	**No new synergy**	20 995 855		50 388 470,89				
		δ=0	20 085 522	910 333	49 614 033,43	(774 437,45)	(0,85)	C	1998
		δ=5	18 293 855	2 702 000	51 325 496,17	937 025,28	0,35	D	1997
								C	1997
		δ=10	18 293 855	2 702 000	51 325 496,17	937 025,28	0,35	D	1997
								C	1997
		δ=20	17 093 855	3 902 000	56 449 581,15	6 061 110,26	1,55	D	1997
								C	1997
								E	1998

Table 3.4: Economic and environmental benefits of different planning horizons computed in the first experiment (continued)

Planning cycle	Time Frame	Test	Non-synergistic water (m^3)	Water saved (m^3)	Total network cost (DKK)	Cost variation (DKK)	Price of water saved (DKK/m^3)	Synergies proposed	Init. year
4	1995-1999	**No new synergy**	24 913 659		119 284 394,76				
		δ=0	20 482 659	4 431 000	111 383 562,68	(7 900 832,08)	(1,78)	C	1995
		δ=5	19 009 659	5 904 000	115 346 757,87	(3 937 636,89)	(0,67)	D	1995
								C	1995
		δ=10	17 584 659	7 329 000	121 133 345,39	1 848 950,62	0,25	D	1995
								C	1995
								E	1999
		δ=20	14 809 659	10 104 000	131 599 696,89	12 315 302,12	1,22	D	1995
								C	1995
								E	1995
5	1996-2000	**No new synergy**	23 536 551		148 743 991,76				
		δ=0	18 846 151	4 690 400	143 018 791,71	(5 725 200,05)	(1,22)	C	1996
		δ=5	16 882 151	6 654 400	145 881 314,80	(2 862 676,96)	(0,43)	D	1996
								C	1996
		δ=10	13 366 151	10 170 400	156 813 889,19	8 069 897,43	0,79	C	1996
								E	1996
		δ=20	11 402 151	12 134 400	159 676 412,30	10 932 420,52	0,90	D	1996
								C	1996
								E	1996

Table 3.4: Economic and environmental benefits of different planning horizons computed in the first experiment (continued)

Planning cycle	Time Frame	Test	Non-synergistic water (m^3)	Water saved (m^3)	Total network cost (DKK)	Cost variation (DKK)	Price of water saved (DKK/m^3)	Synergies proposed	Init. year
6	1997-2001	**No new synergy**	20 156 033		155 663 057,73				
		δ=0	20 156 033		155 663 057,73				
		δ=5	14 048 533	6 107 500	159 408 688,15	3 745 630,42	0,61	D	1997
								C	1997
		δ=10	9 753 533	10 402 500	169 415 905,19	13 752 847,46	1,32	C	1997
								E	1997
		δ=20	7 298 533	12 857 500	171 454 664,67	15 791 606,94	1,23	D	1997
								C	1997
								E	1997
7	1998-2002	**No new synergy**	17 932 489		109 349 432,11				
		δ=0	17 882 489	50 000	108 932 503,53	(416 928,57)	(8,34)	F	2002
8	1999-2003	**No new synergy**	20 321 739		173 577 013,65				
		δ=0	20 221 739	100 000	172 757 513,65	(819 500,00)	(8,20)	F	2002
9	2000-2004	**No new synergy**	19 878 164		135 760 607,50				
		δ=0	19 728 164	150 000	134 612 107,50	(1 148 500,00)	(7,66)	F	2002

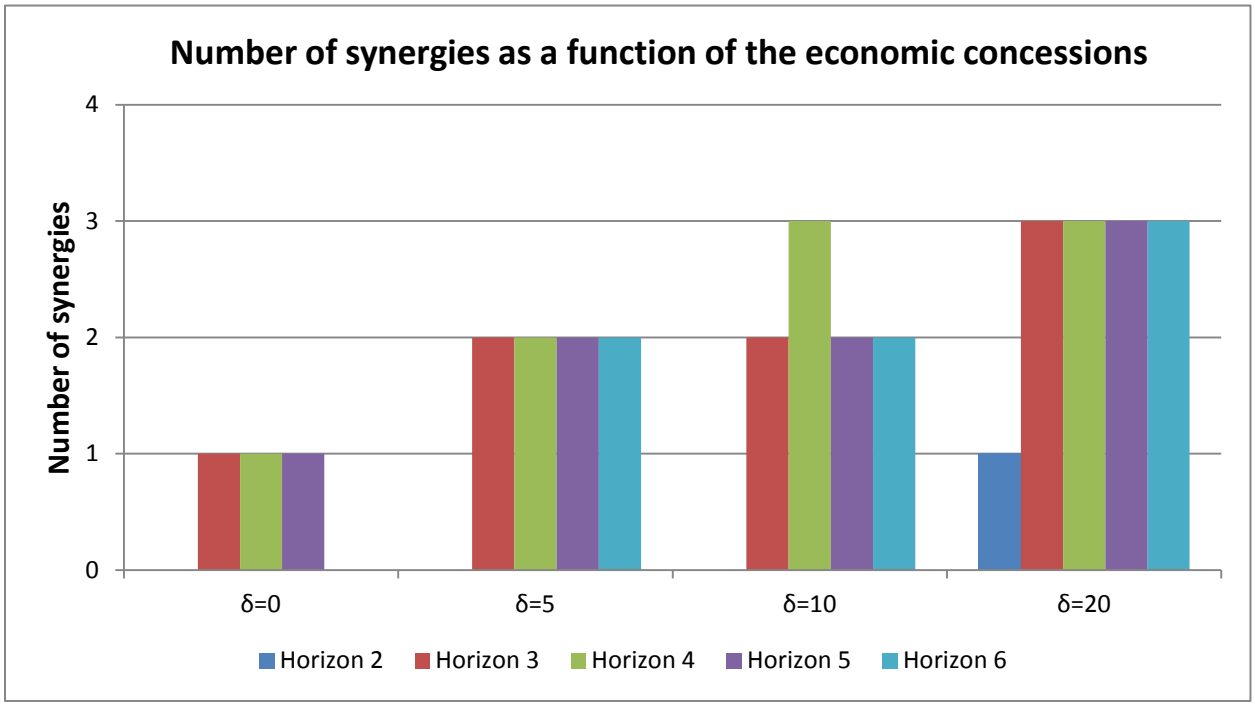

Figure 3.4: Effect of the δ parameter on the number of synergies proposed

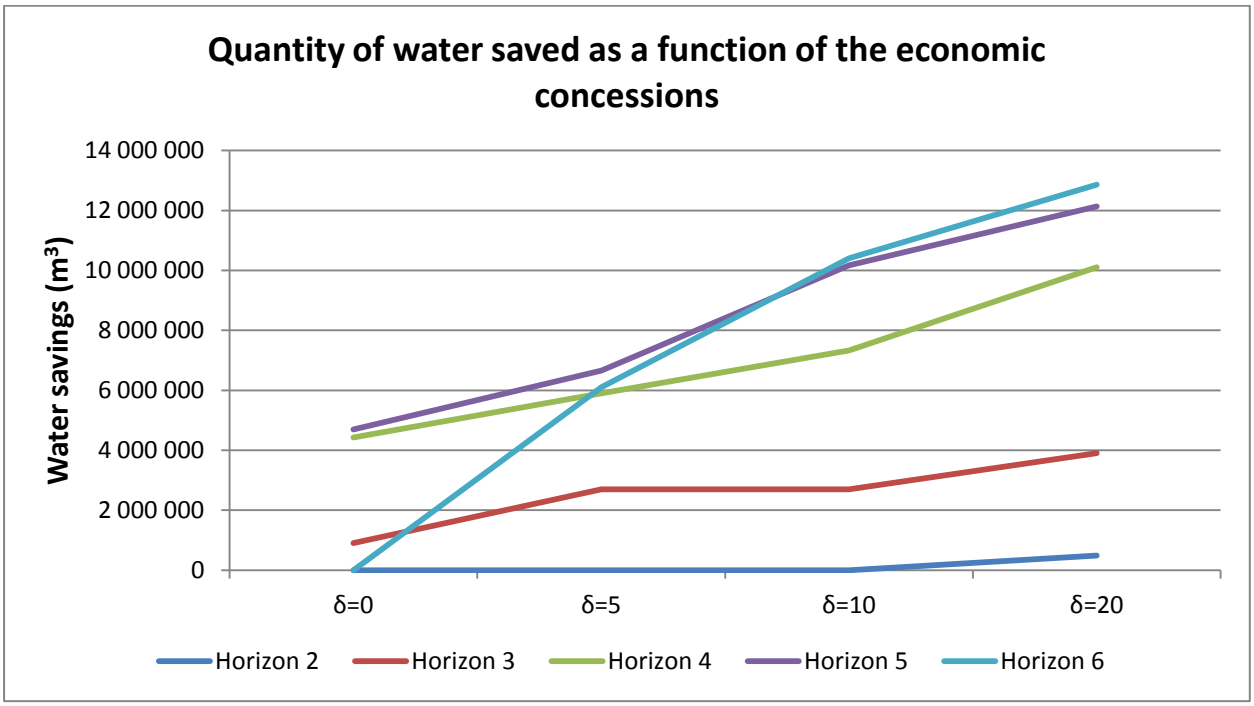

Figure 3.5: Effect of the δ parameter on the quantity of water preserved

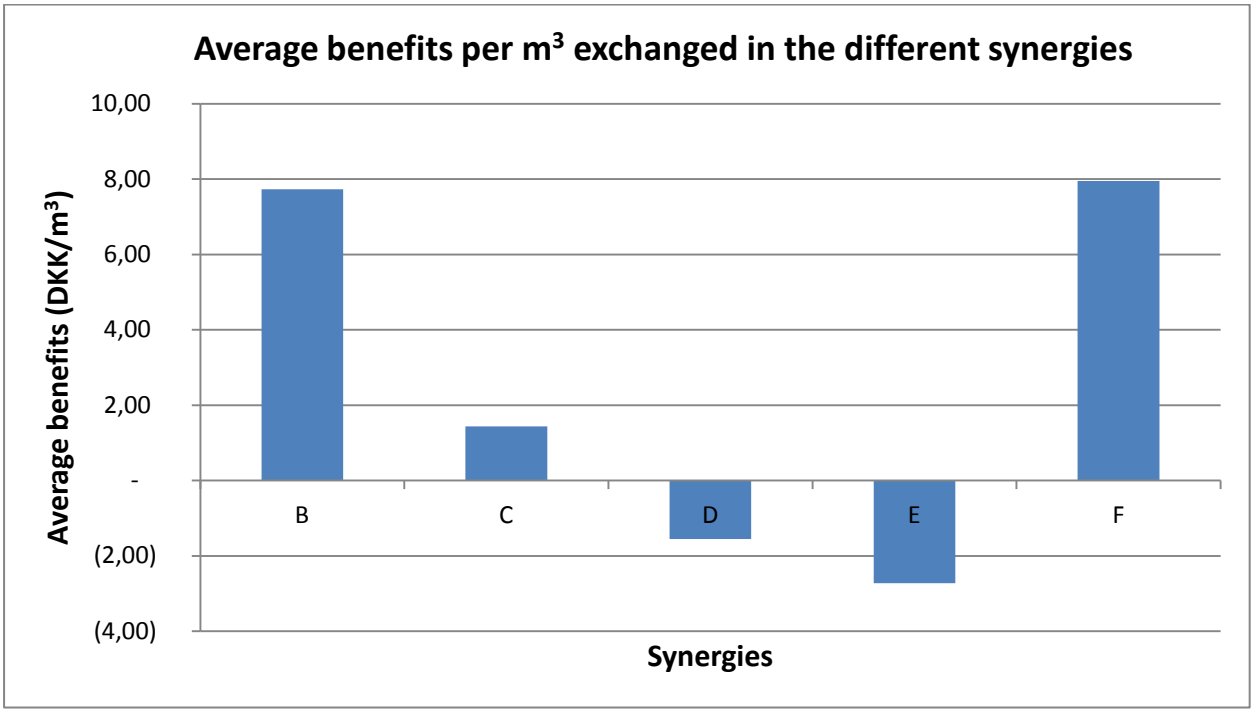

Figure 3.6: Procurement savings per m^3 exchanged

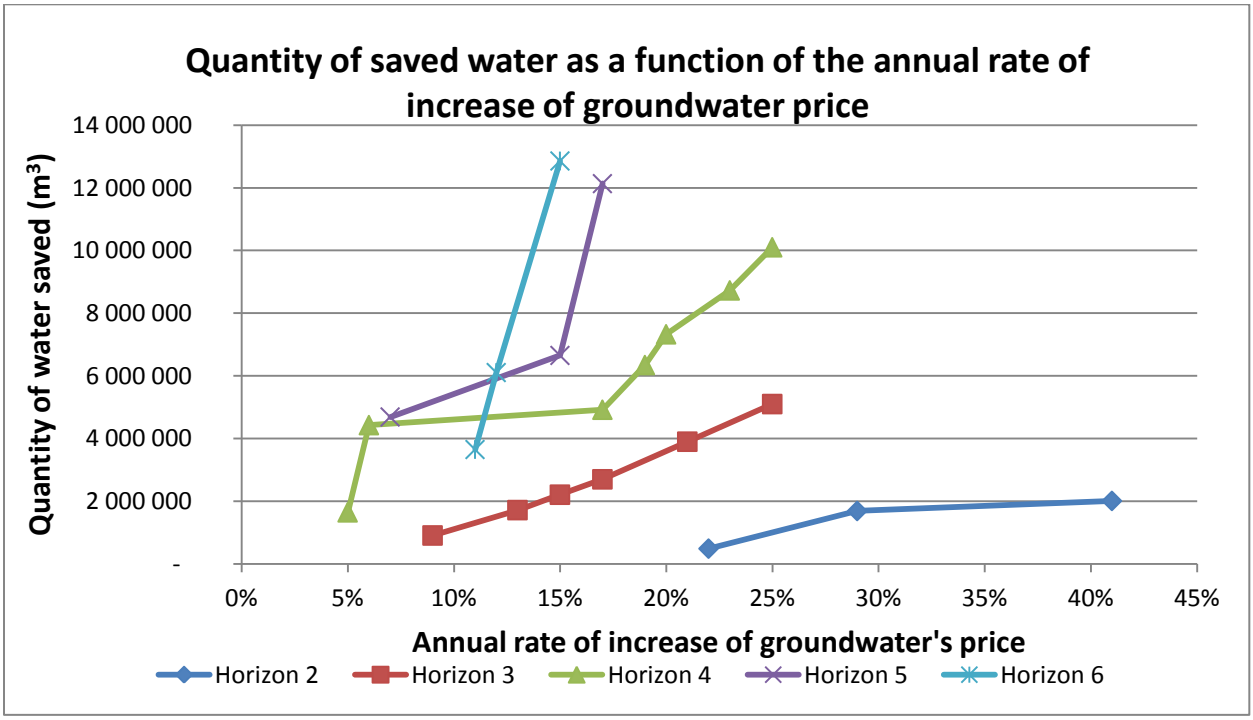

Figure 3.7: Water savings in different planning horizons

Table 3.5: Critical water types and parameters of synergies

Synergy	A	B	C	D	E	F
Critical type of water	Surface water	Wastewater	Groundwater			Boiler water
Critical parameter	Selling price	Discharge fee	Selling price			Discharge fee

Table 3.6: Water prices in the municipality of Kalundborg

	Discharge fee (DKK/m^3)	**Surface water (DKK/m^3)**	**Groundwater (DKK/m^3)**	**Cooling water (DKK/m^3)**
1990	11,07	0,88	3,00	0,44
1991	11,07	0,88	3,00	0,44
1992	11,07	0,85	3,51	0,43
1993	10,77	0,86	5,00	0,43
1994	10,77	2,14	6,00	1,07
1995	10,77	3,25	7,00	1,63
1996	12,91	4,39	8,00	2,20
1997	15,31	5,37	9,00	2,69
1998	15,63	7,32	10,00	3,66
1999	15,63	6,00	10,00	3,00
2000	15,63	7,32	15,19	3,66
2001	15,65	6,41	15,19	3,21
2002	13,13	6,50	15,19	3,25

Table 3.7: Economic and environmental benefits of different planning horizons computed in the second experiment

Planning horizon (Time frame)	Initial price p_0 (DKK)	Annual rate	Final price (DKK)	Non-synergistic water (m^3)	Water saved (m^3)	Total network cost (DKK)	Cost variation (DKK)	Shared cost of water saved (DKK/m^3)	Synergies proposed	Init. year
2 (1993-1997)	3,51	0%	3,51	17 067 681		15 985 412				
		22%	9,49	16 576 681	491 000	27 982 197	11 996 784	24,43	D	1997
		29%	12,54	15 376 681	1 691 000	32 339 098	16 353 685	9,67	D	1997
									E	1997
		41%	19,56	15 054 681	2 013 000	34 479 857	18 494 445	9,19	C	1997
									D	1997
									E	1997
3 (1994-1998)	5,00	0%	5,00	20 995 855		35 048 915				
		9%	7,69	20 085 522	910 333	47 009 129	11 960 214	13,14	C	1998
		13%	9,21	19 275 855	1 720 000	52 187 023	17 138 108	9,96	C	1997
		15%	10,06	18 784 855	2 211 000	54 422 247	19 373 332	8,76	C	1997
									D	1998
		17%	10,96	18 293 855	2 702 000	56 523 507	21 474 592	7,95	C	1997
									D	1997
		21%	12,97	17 093 855	3 902 000	60 111 114	25 062 198	6,42	C	1997
									D	1997
									E	1998
		25%	15,26	15 893 855	5 102 000	61 773 239	26 724 324	5,24	C	1997
									D	1997

Table 3.7: Economic and environmental benefits of different planning horizons computed in the second experiment

Planning horizon (Time frame)	Initial price p_0 (DKK)	Annual rate	Final price (DKK)	Non-synergistic water (m^3)	Water saved (m^3)	Total network cost (DKK)	Cost variation (DKK)	Shared cost of water saved (DKK/m^3)	Synergies proposed	Init. year
									E	1997
4 (1995-1999)	6,00	0%	6,00	24 913 659		88 677 644				
		5%	7,66	23 265 159	1 648 500	101 609 547	12 931 902	7,84	C	1999
		6%	8,03	20 482 659	4 431 000	103 331 982	14 654 337	3,31	C	1995
		17%	13,15	19 991 659	4 922 000	124 466 187	35 788 542	7,27	C	1995
									D	1999
		19%	14,32	18 566 659	6 347 000	127 827 929	39 150 284	6,17	C	1995
									D	1999
									E	1999
		20%	14,93	17 584 659	7 329 000	128 863 835	40 186 190	5,48	C	1995
									D	1995
									E	1999
		23%	16,89	16 184 659	8 729 000	131 179 455	42 501 810	4,87	C	1995
									D	1995
									E	1998
		25%	18,31	14 809 659	10 104 000	131 599 696	42 922 052	4,25	C	1995
									D	1995
									E	1995
5 (1996-2000)	7,00	0%	7,00	23 536 551		114 185 271				
		7%	9,82	18 846 151	4 690 400	136 267 729	22 082 458	4,71	C	1996
		15%	14,08	16 882 151	6 654 400	155 587 795	41 402 523	6,22	C	1996
									D	1996
		17%	15,35	11 402 151	12 134 400	159 676 412	45 491 140	3,75	C	1996
									D	1996

Table 3.7: Economic and environmental benefits of different planning horizons computed in the second experiment

Planning horizon (Time frame)	Initial price p_0 (DKK)	Annual rate	Final price (DKK)	Non-synergistic water (m^3)	Water saved (m^3)	Total network cost (DKK)	Cost variation (DKK)	Shared cost of water saved (DKK/m^3)	Synergies proposed	Init. year
									E	1996
6 (1997-2001)	8,00	0%	8,00	20 156 033		122 801 252				
		11%	13,48	16 503 533	3 652 500	162 582 613	39 781 361	10,89	C	1997
		12%	14,10	14 048 533	6 107 500	165 452 681	42 651 429	6,98	C	1997
									D	1997
		15%	16,09	7 298 533	12 857 500	171 454 664	48 653 412	3,78	C	1997
									D	1997
									E	1997

CHAPITRE 4 DISCUSSION GÉNÉRALE

La réduction des volumes de déchets générés par les systèmes de production actuels est un moyen efficace de diminuer les impacts des activités industrielles sur l'environnement. Cependant, il semble utopique de pouvoir penser à court terme éliminer la totalité des sous-produits, même avec des politiques de développement des procédés de fabrication s'appuyant sur la production propre. La réutilisation des flux à l'intérieur même des usines présente elle aussi, malgré ses bénéfices incontestables, certaines limites. Par exemple, certaines matières voient leurs propriétés internes se dégrader après quelques cycles de recyclage ou sont contaminées ou dégradées au cours des opérations pendant lesquelles elles sont utilisées, ce qui les empêche d'être réinjectées dans le processus de fabrication. Cependant, l'enfouissement, l'incinération ou le rejet dans l'environnement ne sont pas toujours les seules issues pour celles-ci. C'est donc dire qu'il ne faut pas simplement se concentrer sur la diminution des quantités de sous-produits générés et sur la réutilisation de ceux-ci à l'interne, mais également sur des modèles de bouclage des flux au niveau territorial. C'est ainsi l'idée à la base des symbioses industrielles, qui ne doivent donc pas être vues comme concurrentes aux systèmes de production propres, mais plutôt complémentaires à ceux-ci. Dans les cas où la génération de résidus industriels est inévitable, il est essentiel de leur trouver des débouchés et de maximiser leur utilisation et leur durée de vie utile. La plupart des ressources que nous consommons ne se renouvèlent pas ou pas suffisamment rapidement pour soutenir la croissance actuelle de notre demande. Leur utilisation à leur plein potentiel doit donc devenir un enjeu prioritaire.

Le *lean manufacturing* est un modèle de gestion de la production qui prône l'amélioration de la performance des organisations par le biais de l'amélioration continue et de la réduction du gaspillage. Cette pratique identifie les huit éléments suivants comme principales sources de gaspillage au sein d'une entreprise :

- la surproduction;
- le temps d'attente;
- l'excès d'inventaire;
- les tâches inutiles;

- les déplacements superflus;
- les gestes inutiles;
- la non-qualité;
- la mauvaise utilisation du potentiel humain.

Utilisé comme référence en termes de performance organisationnelle à travers le monde entier par de nombreuses entreprises, cette approche ne considère étonnamment pas les pertes au niveau de la matière comme une source de non-productivité. Or, les bénéfices observés dans les différents réseaux de synergies de sous-produits mis en place tendent à prouver que l'efficacité environnementale et économique peut grandement être améliorée par une gestion judicieuse de ses intrants et de ses extrants. Il faut donc faire la promotion auprès des entreprises de ce genre de pratiques et de l'importance de considérer la gestion des flux de matière et d'énergie comme facteur de succès clé de leurs opérations, au même titre que la gestion de la qualité.

Si l'on s'intéresse maintenant au côté purement économique, qui est souvent à la base des décisions d'affaires, de l'écologie industrielle, on remarque tout autant l'intérêt de cette pratique. En effet, tel que mentionnée précédemment, l'approvisionnement et la gestion des matières résiduelles peuvent représenter des postes de dépenses importants dans la plupart des industries. Par conséquent, dans une optique d'amélioration des activités d'approvisionnement, l'acquisition de sous-produits est donc une des avenues qui doivent être explorées, au même titre que le choix des fournisseurs, l'approvisionnement stratégique ou l'externalisation de l'approvisionnement. Il faut donc voir l'écologie industrielle et en particulier les synergies de sous-produits comme une des nombreuses opportunités d'affaires qui s'offrent aux entreprises au niveau de la réduction de leurs coûts et de la gestion de leurs matières résiduelles.

Les projets de symbiose industrielle permettent également de maintenir un tissu industriel fort au sein d'un territoire. C'est pourquoi l'on parle fréquemment d'écologie industrielle et territoriale. Effectivement, il s'agit d'un bon moyen de développer des liens d'affaire privilégiés entre les entreprises d'une même zone industrielle et de pérenniser l'activité économique d'une région. D'ailleurs, de plus en plus de pratiques d'affaires prônent la collaboration inter-organisationnelle, à l'instar de l'écologie industrielle. Les délais et les coûts devant constamment être abaissés, les entreprises doivent en effet nécessairement coopérer en faisant le lien entre leur propre

performance et celle du système industriel dont elles font partie. Des mécanismes de coordination peuvent être donc être mis en place entre les acteurs d'une même chaîne d'approvisionnement, mais également entre des industries qui, de par la nature de leurs activités, ne semblent pas à première vue vouées à tisser des liens, comme c'est bien souvent le cas dans les synergies de sous-produits.

Afin que les pratiques liées à l'écologie industrielle deviennent plus courantes et soient considérées à plus large échelle par les consultants en amélioration de la performance et les gestionnaires d'entreprises, il serait intéressant d'intégrer ces concepts à la formation des futurs ingénieurs, notamment au point de vue du génie industriel. Cette relève de demain ayant intégré lors de sa formation les concepts de base de l'écologie industrielle, il lui sera plus facile de voir l'ensemble des opportunités qui en découlent pour leur organisation.

À plus court terme, les pionniers dans le domaine, tels le CTTÉI au Québec, doivent continuer de faire connaître la discipline, de promouvoir ses bénéfices et de resserrer la structure de systèmes industriels par le biais des symbioses industrielles. Ceci favoriserait une implication plus importante des entreprises dans la mise en place de réseaux éco-industriels et faciliterait par conséquent la collecte d'information des animateurs de réseaux, nécessaire à l'utilisation d'outils tels que celui décrit dans ce mémoire. Les instances gouvernementales doivent également s'assurer d'offrir le support nécessaire aux entreprises et de mettre en place des programmes visant l'utilisation judicieuse des ressources.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La chaîne d'approvisionnement dite *traditionnelle* et la chaîne d'approvisionnement verte présentent plusieurs défis similaires. Les outils de gestion et de conception de réseaux logistiques peuvent donc être adaptés aux particularités des réseaux éco-industriels. Ce projet de recherche présente un modèle d'optimisation mathématique permettant de minimiser les coûts et les impacts environnementaux liés aux activités d'approvisionnement et de gestion de la fin de vie des matières résiduelles d'entreprises impliquées dans une symbiose industrielle. Les aspects logistiques, tels le stockage et le transport, sont pris en compte, tout comme les éléments propres aux synergies de sous-produits, comme les procédés de traitement des sous-produits ainsi que les niveaux de compatibilité entre des extrants industriels et des matières premières qu'ils seraient susceptibles de remplacer. Le modèle sert de support à un processus d'aide à la décision pour les animateurs de réseaux éco-industriels. Il permet notamment à ceux-ci d'étudier la relation entre les aspects économiques et les gains environnementaux, en particulier les volumes de ressources préservées, liés aux échanges de sous-produits. L'outil a été testé avec des données relatives aux échanges d'eau ayant été mis en place au sein de la symbiose industrielle la plus emblématique, celle de Kalundborg, au Danemark. Les résultats montrent que la mise en place de synergies industrielles à Kalundborg était en général appuyée sur des considérations économiques, mais également que ces échanges auraient pu être initiés plus tôt avec des processus décisionnels articulés de manière un peu plus importante autour de la préservation des ressources. Cette relation entre les coûts d'approvisionnement et de fin de vie et les bénéfices environnementaux est étudiée selon deux perspectives : celle des entreprises et celle de la municipalité. D'une part, les organisations peuvent faire certaines concessions économiques afin de mettre en place des synergies de sous-produits. D'autre part, la municipalité, qui contrôle les différents coûts de l'eau, peut agir sur ceux-ci afin d'agir sur la viabilité de ces échanges. Cette deuxième partie de notre expérimentation révèle la grande influence du cadre législatif sur la faisabilité économique des synergies.

Il est important de faire de l'utilisation judicieuse des ressources un enjeu prioritaire au sein des systèmes industriels, donc de réduire notre dépendance aux matières premières vierges et d'essayer d'éviter, lorsque cela et possible, l'enfouissement et l'incinération de résidus de production ainsi que le rejet de flux d'eau et d'énergie présentant encore un potentiel d'utilisation.

Non seulement les synergies de sous-produits s'inscrivent dans cette vision, mais elles offrent aux industriels des opportunités d'affaires encore aujourd'hui souvent négligées. Elles doivent d'ailleurs être vues comme telles; c'est un outil supplémentaire à la disposition des organisations afin d'améliorer leur performance opérationnelle et financière. Il est important de faire connaître cette pratique d'affaire et ses bénéfices potentiels.

Le Centre de Transfert Technologique en Écologie Industrielle joue un rôle de leader sur la scène provinciale au niveau de la promotion et de la mise en œuvre de l'écologie industrielle. Afin de pleinement faire profiter les entreprises québécoises de son expertise, il doit être appuyé par des outils décisionnels performants. Cependant, ceux-ci, à l'instar du modèle d'optimisation mathématique présenté dans ce mémoire, ne peuvent être efficaces que lorsqu'alimentés adéquatement par des données industrielles parfois difficiles à recueillir. L'implication active des membres d'un réseau éco-industriel est donc essentielle à la pérennisation de celui-ci. De son côté, le CTTÉI doit s'assurer de mettre en place des mécanismes de suivi des opportunités qu'il propose afin de d'améliorer de façon continue ses processus liés au développement de symbioses industrielles.

RÉFÉRENCES

Adoue, C. (2007). Mettre en oeuvre l'écologie industrielle: PPUR presses polytechniques.

Ardente, F., Cellura, M., Lo Brano, V., & Mistretta, M. (2010). Life cycle assessment-driven selection of industrial ecology strategies. Integrated Environmental Assessment and Management, 6(1), 52-60. doi: 10.1897/ieam_2008-065.1

Association Orée. *Projet COMETHE*. Consulté le 25 avril 2013, Tiré de http://www.comethe.org/

Aviso, K. B., Tan, R. R., Culaba, A. B., Foo, D. C. Y., & Hallale, N. (2010). Fuzzy optimization of topologically constrained eco-industrial resource conservation networks with incomplete information. Engineering Optimization, 43(3), 257-279. doi: 10.1080/0305215x.2010.486031

Bain, A., Shenoy, M., Ashton, W., & Chertow, M. (2010). Industrial symbiosis and waste recovery in an Indian industrial area. Resources, Conservation and Recycling, 54(12), 1278-1287. doi: 10.1016/j.resconrec.2010.04.007

Beamon, B. M. (1999). Designing the green supply chain. Logistics information management, 12(4), 332-342.

Beamon, B. M. (1998). Supply chain design and analysis::: Models and methods. *International journal of production economics*, *55*(3), 281-294.

Boons, F., Spekkink, W., & Mouzakitis, Y. (2011). The dynamics of industrial symbiosis: a proposal for a conceptual framework based upon a comprehensive literature review. Journal of Cleaner Production, 19(9–10), 905-911. doi: 10.1016/j.jclepro.2011.01.003

Bouzembrak, Y., Allaoui, H., Goncalves, G., & Bouchriha, H. (2011). A multi-objective green supply chain network design. Paper presented at the Logistics (LOGISTIQUA), 2011 4th International Conference on.

Chertow, M. R. (2000). Industrial symbiosis: literature and taxonomy. Annual review of energy and the environment, 25(1), 313-337.

Chertow, M. R. (2004). Industrial symbiosis. Encyclopedia of energy, 3, 407-415.

Chertow, M. R. (2007). “Uncovering” Industrial Symbiosis. Journal of Industrial Ecology, 11(1), 11-30. doi: 10.1162/jiec.2007.1110

Cimren, E., Fiksel, J., Posner, M. E., & Sikdar, K. (2011). Material Flow Optimization in By-product Synergy Networks. Journal of Industrial Ecology, 15(2), 315-332. doi: 10.1111/j.1530-9290.2010.00310.x

Côté, R. P., & Cohen-Rosenthal, E. (1998). Designing eco-industrial parks: a synthesis of some experiences. Journal of Cleaner Production, 6(3–4), 181-188. doi: 10.1016/s0959-6526(98)00029-8

Eckelman, M. J., & Chertow, M. R. (2009). Using Material Flow Analysis to Illuminate Long-Term Waste Management Solutions in Oahu, Hawaii. Journal of Industrial Ecology, 13(5), 758-774.

Ehrenfeld, J., & Chertow, M. R. (2002). Industrial ecology: The legacy of Kalundborg. In R. Ayres & L. Ayres (Eds.), Handbook of Industrial Ecology (pp. 334-348). Cheltanham, UK: Edward Elgar Publishing, Inc.

Ehrenfeld, J., & Gertler, N. (1997). Industrial Ecology in Practice: The Evolution of Interdependence at Kalundborg. Journal of Industrial Ecology, 1(1), 67-79. doi: 10.1162/jiec.1997.1.1.67

Esty, D. C., & Porter, M. E. (1998). Industrial Ecology and Competitiveness. Journal of Industrial Ecology, 2(1), 35-43. doi: 10.1162/jiec.1998.2.1.35

Fiksel, J., & Bakshi, B. (2010, 17-19 May 2010). Industrial ecology network optimization with life cycle metrics. Paper presented at the Sustainable Systems and Technology (ISSST), 2010 IEEE International Symposium on.

Frosch, R. A., & Gallopoulos, N. E. (1989). Strategies for manufacturing. Scientific American, 261(3), 144-152.

Grant, G. B., Seager, T. P., Massard, G., & Nies, L. (2010). Information and Communication Technology for Industrial Symbiosis. Journal of Industrial Ecology, 14(5), 740-753. doi: 10.1111/j.1530-9290.2010.00273.x

Haskins, C. (2006). Multidisciplinary investigation of eco-industrial parks. Systems Engineering, 9(4), 313-330. doi: 10.1002/sys.20059

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(8–10), 985-995. doi: 10.1016/j.jclepro.2004.02.014

Hervani, A. A., Helms, M. M., & Sarkis, J. (2005). Performance measurement for green supply chain management. Benchmarking: An International Journal, 12(4), 330-353.

Hsiao, T. Y., Huang, Y. T., Yu, Y. H., & Wernick, I. K. (2002). Modeling materials flow of waste concrete from construction and demolition wastes in Taiwan. Resources Policy, 28(1–2), 39-47. doi: 10.1016/s0301-4207(03)00004-7

International Synergies Limited. *National Industrial Symbiosis Programme*. Consulté le 25 avril 2013, Tiré de http://www.nispnetwork.com/

Jacobsen, N. B. (2006). Industrial Symbiosis in Kalundborg, Denmark: A Quantitative Assessment of Economic and Environmental Aspects. Journal of Industrial Ecology, 10(1-2), 239-255. doi: 10.1162/108819806775545411

Jayaraman, V., Guide Jr, V., & Srivastava, R. (1999). A closed-loop logistics model for remanufacturing. Journal of the operational research society, 497-508.

Jelinski, L. W., Graedel, T. E., Laudise, R. A., McCall, D. W., & Patel, C. K. (1992). Industrial ecology: concepts and approaches. Proceedings of the National Academy of Sciences, 89(3), 793-797.

Karlsson, M., & Wolf, A. (2008). Using an optimization model to evaluate the economic benefits of industrial symbiosis in the forest industry. Journal of Cleaner Production, 16(14), 1536-1544. doi: 10.1016/j.jclepro.2007.08.017

Kincaid, J., & Overcash, M. (2001). Industrial Ecosystem Development at the Metropolitan Level. Journal of Industrial Ecology, 5(1), 117-126. doi: 10.1162/108819801753358535

Lehtoranta, S., Nissinen, A., Mattila, T., & Melanen, M. (2011). Industrial symbiosis and the policy instruments of sustainable consumption and production. Journal of Cleaner Production, 19(16), 1865-1875. doi: 10.1016/j.jclepro.2011.04.002

Li, P., Dahmus, J., Guldberg, S., Riddervold, H. O., & Kirchain, R. (2011). How Much Sorting Is Enough. Journal of Industrial Ecology, 15(5), 743-759. doi: 10.1111/j.1530-9290.2011.00365.x

Marler, R. T., & Arora, J. S. (2004). Survey of multi-objective optimization methods for engineering. Structural and Multidisciplinary Optimization, 26(6), 369-395. doi: 10.1007/s00158-003-0368-6

Paquin, R., & Howard-Grenville, J. (2009). Facilitating regional industrial symbiosis: Network growth in the UK's National Industrial Symbiosis Programme. *The social embeddedness of industrial ecology*.

Sakr, D., Baas, L., El-Haggar, S., & Huisingh, D. (2011). Critical success and limiting factors for eco-industrial parks: global trends and Egyptian context. Journal of Cleaner Production, 19(11), 1158-1169. doi: 10.1016/j.jclepro.2011.01.001

Srivastava, S. K. (2007). Green supply-chain management: a state-of-the-art literature review. *International journal of management reviews*, *9*(1), 53-80.

Valero, A., Usón, S., & Costa, J. (2012). Exergy analysis of the industrial symbiosis model in Kalundborg. Paper presented at the The 25th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Perugia, Italy.

Van Hoek, R. I. (1999). From reversed logistics to green supply chains. Supply Chain Management: An International Journal, 4(3), 129-135.

Wilkerson, T. (2005). Can one green deliver another? Boston: Harvard Business School.