

Titre: Étude d'une opportunité de création de réseaux de symbiose industrielle dans un cadre urbain
Title: industrial symbiosis networks in an urban context

Auteur: Louis Guittin
Author:

Date: 2019

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Guittin, L. (2019). Étude d'une opportunité de création de réseaux de symbiose industrielle dans un cadre urbain [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal].
Citation: PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/4029/>

Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/4029/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Nadia Lahrichi, & Sophie Bernard
Advisors:

Programme: Maîtrise recherche en génie industriel
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**Étude d'une opportunité de création de réseaux de symbiose industrielle dans
un cadre urbain**

LOUIS GUILTTIN

Département de mathématiques et de génie industriel

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

Génie industriel

Août 2019

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

**Étude d'une opportunité de création de réseaux de symbiose industrielle dans
un cadre urbain**

présenté par **Louis GUITTIN**

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

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

Jean-Marc FRAYRET, président

Nadia LAHRICHI, membre et directrice de recherche

Sophie BERNARD, membre et codirectrice de recherche

Martin TRÉPANIER, membre

DÉDICACE

À la Famé

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier Nadia Lahrichi et Sophie Bernard pour m'avoir appuyé pendant ces presque deux années. Dans tous mes doutes et toutes mes hésitations, j'ai su trouver un chemin grâce à vos conseils et avis. Merci pour cela.

Je remercie également Mélissa Stoia et Julien Beaulieu pour m'avoir initié aux activités du CTTÉI et de Synergie Montréal. Merci particulièrement à toi Julien pour tes disponibilités, tes propositions et pour les réponses à toutes mes questions.

Je tiens également à remercier ma famille pour son soutien dans l'entreprise de cette maîtrise et à tous mes amis avec qui ces deux années furent mémorables dans cette belle ville.

Enfin, je remercie Jean-Marc Frayret et Martin Trépanier d'avoir accepté de faire partie du jury de mon mémoire.

RÉSUMÉ

L'écologie industrielle est une vision relativement récente du fonctionnement des systèmes industriels visant à revoir l'approche linéaire des standards actuels afin d'orienter les industries vers des écosystèmes imitant le fonctionnement de la biodiversité naturelle. A cet effet, la symbiose industrielle est une des approches de l'écologie industrielle visant à intégrer notamment l'échange de matières résiduelles entre entreprises pour limiter l'utilisation de matières vierges et le traitement excessif des déchets. La mise en place de symbioses industrielles est une démarche qui s'inscrit dans une dynamique complexe dans laquelle les industries se doivent d'être sensibilisées à cette nouvelle approche et dans laquelle la recherche de correspondances techniques pour les matières et procédés est nécessaire pour permettre ces échanges. L'étude de plusieurs exemples existant à travers le monde ont montré la diversité des approches adoptées, selon la nature des industries et le choix des zones d'études. Une zone d'étude urbaine comme celle de l'Île-de-Montréal comporte plusieurs caractéristiques notables comme la présence d'un grand nombre de secteurs industriels et d'entreprises. Ceci augmente considérablement la possibilité d'y mettre en place des synergies (une synergie est un échange de matière résiduelle entre deux entreprises). Ce mémoire propose une approche de mise en place de réseaux de symbiose industrielle dans une telle zone d'études avec une approche macro par activités industrielles permettant une possibilité large de sélections d'entreprises. Une méthodologie de recherche aboutissant à la proposition de synergies en deux points majeurs est proposée :

- Le choix d'activités industrielles à associer pour obtenir des structures d'échanges possibles et donc sélectionner ensuite des entreprises qui peuvent collaborer
- Un outil d'optimisation mathématique proposant des synergies entre ces entreprises en guise d'outil d'aide à la décision

Ce deuxième point fait par ailleurs l'objet d'une discussion sur la portée et l'utilisation de la méthode pour un animateur de symbiose industrielle : l'applicabilité de cette méthode est à portée macro et permet d'exprimer des potentiels de symbiose industrielle sous les objectifs énoncés. Pour atteindre une utilisation micro et ainsi aspirer à une réelle mise en place, l'outil mathématique peut être utilisé de manière itérative en parallèle de la mise en place de synergies avec l'ajustement de certaines synergies sous formes de contraintes lorsqu'une incompatibilité pratique est détectée. Enfin, une conclusion sur les limites et les améliorations possibles est proposée.

ABSTRACT

Industrial ecology is a relatively recent vision of the operation of industrial systems aimed at revising the linear approach of current standards in order to guide industries towards ecosystems imitating the functioning of natural biodiversity. To this end, industrial symbiosis is one of the approaches of industrial ecology aimed at integrating in particular the exchange of residual materials between companies to limit the use of virgin materials. The establishment of industrial symbiosis is an approach that is part of a complex dynamic in which industries must be aware of this new approach and in which the search for technical correspondences for materials and processes is necessary to allow these trades. The study of several examples from around the world showed the diversity of approaches adopted, according to the nature of the industries and the choice of study areas. An urban area such as the Island of Montreal has several notable characteristics, such as the presence of a large number of industrial sectors and a large number of manufacturers. This considerably increases the possibility of setting up synergies (a synergy is an exchange of residual material between two companies). This thesis proposes an approach of setting up industrial symbiosis networks in such a study zone with a macro approach by industrial activities, allowing a wide possibility of selections of companies. A research methodology leading to the proposal of synergies in two major points is proposed:

- The choice of industrial activities to associate to obtain possible exchange structures and then select companies that can collaborate
- A mathematical optimization tool proposing synergies between these companies as a decision support tool

This second point is also the subject of a discussion on the scope and use of the method for an industrial symbiosis facilitator: the applicability of this method is macro-wide and allows the expression of industrial symbiosis potentials. under the stated objectives. To achieve a micro-wide use and to aspire to a real implementation, the mathematical tool can be used iteratively in parallel with the establishment of synergies with the adjustment of certain synergies and constraints and with the new application of the tool when a practical incompatibility is detected. Finally, a conclusion on the limits and possible improvements is proposed.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	II
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIÈRES	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	IX
LISTE DES FIGURES	X
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XII
LISTE DES ANNEXES	XIII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Mise en contexte.....	1
1.2 Plan du mémoire.....	3
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	5
2.1 Caractéristiques d'une symbiose industrielle et contextes d'établissement.....	5
2.2 La symbiose industrielle établie dans un cadre urbain.....	6
2.2.1 Étude des opportunités de synergies	7
2.2.2 Outils d'aide stratégique à la décision pour la mise en place de synergies	9
2.3 Les analyses de réseaux existant	10
2.4 Synthèse	11
CHAPITRE 3 OBJECTIF ET MÉTHODOLOGIE.....	13
3.1 Objectif	13
3.2 Hypothèses	13
3.3 Méthodologie	14

3.3.1	Génération de structure	15
3.3.2	Affectation des synergies à l'aide d'un outil d'optimisation mathématique.....	17
CHAPITRE 4	ÉTUDE DE DEUX EXEMPLES.....	23
4.1	Génération d'instances	23
4.2	Étude d'un premier exemple	25
4.2.1	Affectation des synergies à l'aide de l'outil mathématique	28
4.3	Étude d'un deuxième exemple	46
4.3.1	Affectation des synergies à l'aide de l'outil mathématique	48
4.4	Utilisation des résultats et approche itérative pour la mise en place des synergies	58
4.5	Conclusion sur les deux exemples	58
CHAPITRE 5	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	60
BIBLIOGRAPHIE	63	
ANNEXES	66	

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1 : Quantités annuelles de matières résiduelles demandées par activité industrielle pour la première structure	27
Tableau 4.2 : Quantités annuelles de matières résiduelles offertes par activité industrielle pour la première structure (N correspond au nombre d'employés de l'entreprise).....	27
Tableau 4.3 : Paramètres économiques utilisés pour la première structure	29
Tableau 4.4 : Comparaison des quantités totales entre les entreprises choisies de l'activité centrale et les entreprises périphériques, pour chaque matière.....	31
Tableau 4.5 : Coûts relatifs à la réception de palettes de bois pour chaque entreprise de l'activité industrielle centrale	33
Tableau 4.6 : Comparaison des quantités totales entre les entreprises choisies de l'ensemble C et l'ensemble P, pour chaque matière	38
Tableau 4.7 : Tableau récapitulatif premier exemple, application pour 3 entreprises de l'activité industrielle centrale	41
Tableau 4.8 : Quantités annuelles de matières résiduelles demandées par activité industrielle pour la deuxième structure	47
Tableau 4.9 : Quantités annuelles de matières résiduelles offertes par activité industrielle pour la deuxième structure (N correspond au nombre d'employés de l'entreprise)	48
Tableau 4.10 : Paramètres économiques utilisés pour la deuxième structure	49
Tableau 4.11 : Comparaison des quantités totales entre les entreprises choisies de l'ensemble C et l'ensemble P, pour chaque matière	51
Tableau 4.12 : Tableau récapitulatif deuxième exemple, application pour 3 entreprises de l'activité industrielle centrale	53

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Caractérisation des flux d'une entité, adapté de Bin et al. (2015).....	7
Figure 3.1 : Méthodologie synthétisée	15
Figure 3.2 : Exemple de structure initiale générée.....	17
Figure 4.1 : Première structure d'étude.....	26
Figure 4.2 : Localisation des différentes entreprises relevées pour la première structure	30
Figure 4.3 : Réseau obtenu pour la première structure avec toutes les entreprises de l'activité centrale sélectionnées ($\varepsilon=0\%$)	35
Figure 4.4 : Réseau obtenu pour la première structure avec toutes les entreprises de l'activité centrale sélectionnées ($\varepsilon=20\%$)	36
Figure 4.5 : Réseau obtenu pour la première structure avec toutes les entreprises de l'activité centrale sélectionnées ($\varepsilon=50\%$)	37
Figure 4.6 : Réseau obtenu pour la première structure avec 3 entreprises de l'activité centrale sélectionnées ($\varepsilon=0\%$).....	42
Figure 4.7 : Réseau obtenu pour la première structure avec 3 entreprises de l'activité centrale sélectionnées ($\varepsilon=5\%$).....	43
Figure 4.8 : Réseau obtenu pour la première structure avec 3 entreprises de l'activité centrale sélectionnées ($\varepsilon=20\%$).....	44
Figure 4.9 : Réseau obtenu pour la première structure avec 3 entreprises de l'activité centrale sélectionnées ($\varepsilon=40\%$).....	45
Figure 4.10 : Deuxième structure d'étude	46
Figure 4.11 : Localisation des différentes entreprises relevées pour la deuxième structure	50
Figure 4.12 : Réseau obtenu pour la deuxième structure avec 3 entreprises de l'activité centrale sélectionnées ($\varepsilon=0\%$).....	54
Figure 4.13 : Réseau obtenu pour la deuxième structure avec 3 entreprises de l'activité centrale sélectionnées ($\varepsilon=5\%$).....	55

Figure 4.14 : Réseau obtenu pour la deuxième structure avec 3 entreprises de l'activité centrale sélectionnées ($\varepsilon=15\%$).....56

Figure 4.15 : Réseau obtenu pour la deuxième structure avec 3 entreprises de l'activité centrale sélectionnées ($\varepsilon=30\%$).....57

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ASPL	Average shortest path length
ASR	Analyse sociale des réseaux
BC	Betweenness Centrality
CTTÉI	Centre de Transfert Technologique en Écologie Industrielle
SCIAN	Système de classification des industries de l'Amérique du Nord

LISTE DES ANNEXES

Annexe A – Déclinaisons du groupe « fabrication » SCIAN66

Annexe B – Quantités annuelles offertes et demandées par entreprise pour nos deux exemples..68

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

L'impact de l'homme sur l'environnement est une préoccupation grandissante au sein des sociétés actuelles. A l'heure où les ressources naturelles nécessitent d'être protégées, le mode de consommation se doit d'être amélioré afin de contribuer à cet objectif. La fabrication industrielle est directement contributrice de l'épuisement des ressources naturelles. La consommation excessive de ces dernières et la génération de matières résiduelles sont les conséquences d'un mode de production linéaire. L'écologie industrielle est un concept relativement récent visant à revoir ce mode de production en faisant interagir les entreprises à la manière d'un écosystème naturel grâce à un cheminement cyclique des flux de matières. Les systèmes industriels ne doivent pas être isolés mais ils doivent être en harmonie avec leur environnement (Graedel & Allenby, 1995).

La symbiose industrielle consiste en un échange physique en matériaux, eau, énergie et sous-produits parmi plusieurs organisations (Ehrenfeld, J. R. & Chertow, 2002). Elle est définie comme une des approches de l'écologie industrielle qui s'établit dans un système de groupement inter-entreprises (Chertow, 2000). Les arguments avancés en la faveur de la symbiose industrielle sont généralement les bénéfices économiques générés par les entreprises et les bienfaits environnementaux dus à la réduction de l'épuisement des ressources et au traitement en fin de vie d'une quantité réduite de matières résiduelles. Dans ce sens, l'efficacité de la symbiose industrielle est souvent appuyée par l'exemple pionnier du parc éco industriel de la ville de Kalundborg au Danemark (Ehrenfeld, J. & Gertler, 1997; Jacobsen, 2006).

En restreignant la définition aux matériaux et sous-produits, une synergie correspond à un échange matériel entre deux entreprises dans lequel la matière résiduelle d'une entreprise devient la ressource de l'autre. Plusieurs modes de développement de symbiose industrielle existent. Par exemple, la symbiose de Kalundborg s'est développée entre les entreprises qui ont agi de manière autonome. Cependant, dans un contexte d'entreprises existantes, un animateur a un rôle central pertinent. Dans une zone d'étude donnée, les opportunités de synergies sont le plus souvent étudiées par cet animateur externe. Il lui est tout d'abord nécessaire de caractériser les ressources utilisées et les matières résiduelles générées par chacune des entreprises présentes. L'étape suivante consiste à trouver des synergies possibles entre entreprises dès lors qu'il existe une compatibilité

entre une matière résiduelle d'un acteur et la ressource d'un autre acteur. Cette compatibilité peut être directe ou indirecte car elle peut nécessiter un traitement partiel de la matière à échanger.

La symbiose industrielle peut être opérée dans plusieurs contextes, chacun ayant ses particularités. Chertow (1999) propose une taxonomie de cinq types d'échanges de flux matériels. Le cinquième type défini correspond à la symbiose industrielle parmi des entreprises répandues sur une vaste zone comme une agglomération ou une région. La symbiose industrielle opérée sur une zone comme l'Île-de-Montréal correspondrait à ce dernier type. D'après l'auteure, celui-ci offre l'avantage de comporter un grand nombre d'entreprises opérant dans des activités industrielles variées, ce qui peut grandement augmenter les potentiels de matières en jeu et de synergies.

D'un point de vue individuel, une entreprise peut être concernée par plusieurs types de matières pour lesquelles il existe des potentiels de synergies. Plus le nombre de matières en jeu sera grand, plus la possibilité d'établir des synergies avec d'autres acteurs, avec lesquelles les compatibilités sont identifiées et validées, sera important. En plus d'en tirer les avantages économiques et de réduire son impact sur les ressources naturelles, ceci offre à l'entreprise la possibilité d'acquérir une expérience en écologie industrielle qu'elle pourra naturellement répandre dans son entourage industriel. Cette conséquence peut intéresser un animateur qui chercherait également à faire diffuser le concept d'écologie industrielle dans sa région d'études pour ainsi rendre les acteurs industriels autonomes dans une telle démarche. A cet effet, plusieurs analyses autour de symbioses industrielles existantes montrent l'intérêt d'avoir un ou plusieurs acteurs activement impliqués. On peut parler parfois de cœurs de réseau ou d'entreprises clés qui joueront le rôle central d'informateurs et de transmetteurs de connaissance (Domenech & Davies, 2011; Martin et al., 1996).

Les études de symbioses industrielles existantes montrent par ailleurs l'existence d'activités industrielles clés présentes dans plusieurs cas et pouvant donc jouer ce rôle central dans le réseau (Domenech et al., 2019). C'est dans cette direction que ce mémoire va principalement se diriger. En effet, le travail d'un animateur de symbiose industrielle est dans beaucoup de cas initié par la volonté d'une entreprise ou d'une association d'entreprises, dans l'optique de trouver des synergies pouvant les satisfaire. Dans ce mémoire, nous allons davantage nous concentrer sur une nouvelle approche où un animateur travaillerait sur une volonté indépendante de toute entreprise de trouver des synergies. Ainsi, nous proposerons une approche où les activités industrielles seront visées

avant de sélectionner des entités pouvant participer à des synergies. Le cadre urbain peut proposer beaucoup d'entreprises d'une même activité industrielle (dont les procédés et les matières exploités sont équivalents). Ainsi, plusieurs entreprises d'une activité qualifiée de clé peuvent jouer ce rôle central. Dans le même ordre d'idée, les associations avec d'autres entreprises dites « périphériques » pour établir des synergies peuvent être multiples en raison de la présence d'un grand nombre de collaborateurs potentiels dans la zone urbaine.

Dans un réseau d'entreprises, la sélection des opportunités de configuration des synergies peut être établie grâce à un outil d'aide à la décision. Dans le cadre d'une symbiose industrielle, des outils d'optimisation mathématique peuvent être utilisés en théorie pour cette aide à la décision, au travers d'objectifs traduisant plusieurs types de critères comme des critères économiques et environnementaux. De cette manière, ils peuvent venir en appui d'une planification stratégique.

Ce projet a été appuyé par l'organisme Synergie Montréal et le Centre de Transfert Technologique en Écologie Industrielle (CTTÉI) de Sorel-Tracy au Québec, organismes initiateurs de symbioses industrielles dans le Québec et plus particulièrement à Montréal dans le cadre de cette étude. Déjà présents auprès de quelques entreprises à l'Est de Montréal, nos partenaires nous ont suggéré une étude globale pour la mise en place de symbioses industrielles à l'échelle de l'Île-de-Montréal.

L'objectif de ce mémoire est de proposer une approche de mise en place de symbioses industrielles, allant de l'étude d'opportunités de synergies par activité industrielle jusqu'à la définition d'un outil stratégique d'aide à la décision pouvant permettre de proposer des synergies afin de créer des réseaux de symbiose industrielle comportant des entreprises des ces activités industrielles non initiées, dans un contexte urbain similaire à celui de l'Île-de-Montréal.

1.2 Plan du mémoire

Ce mémoire sera articulé en quatre chapitres en plus de cette introduction. Tout d'abord, nous effectuerons une revue de la littérature afin de recenser les approches existantes pour la mise en place de symbioses industrielles, tant au niveau des opportunités matérielles que des stratégies de mise en place de synergies et des critères à considérer (chapitre 2). Ensuite, nous proposerons une méthode et un outil d'aide à la mise en place de synergies permettant de créer des réseaux de symbiose industrielle pertinents au regard des critères et informations relevés (chapitre 3). Nous expérimenterons et discuterons ensuite l'applicabilité de cette méthode sur deux exemples (chapitre

4). Enfin, nous conclurons quant aux objectifs énoncés et aux différentes limites du modèle (chapitre 5).

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre sera consacré à une revue de littérature visant à préciser quelques éléments de définition et de caractérisation des symbioses industrielles. Ensuite, il sera nécessaire de relever les approches effectuées pour mettre en place des symbioses industrielles dans un contexte urbain similaire au nôtre, allant de l'étude globale d'opportunités de synergies dans un contexte géographique large, jusqu'à la présentation d'outils permettant une aide à la décision sur la mise en place de synergies. Une section sur l'analyse des réseaux en termes de critères sociaux sera également développée.

2.1 Caractéristiques d'une symbiose industrielle et contextes d'établissement

Une symbiose industrielle peut être définie comme un échange de sous-produits, eau ou énergie entre deux entreprises qui ne collaboreraient pas traditionnellement du fait de leur incompatibilité au regard de leurs secteurs d'activités différents (Chertow, 2000). De ce fait, l'approche pour la mise en place d'une symbiose industrielle n'est pas aussi intuitive qu'un échange économique traditionnel et n'est pas constituée d'une approche standard en pratique. Plusieurs exemples de symbioses industrielles existent dans la littérature. Parmi eux, le plus repris est celui de la ville de Kalundborg au Danemark (Domenech & Davies, 2011; Ehrenfeld, J. & Gertler, 1997; Jacobsen, 2006; Martin et al., 1996). Les échanges concernent principalement de l'eau, des sous-produits et de la chaleur entre une dizaine d'acteurs dont des services publics. L'évolution de Kalundborg fut constante et n'a pas nécessité d'animateur externe et des améliorations sont effectives encore aujourd'hui. La symbiose de Kalundborg est celle qui est le plus largement relayée dans la littérature du fait de son statut de pionnière mais également du grand nombre de données disponibles. D'autres symbioses industrielles où la présence d'un animateur externe a permis de catalyser le processus existent et sont largement relayées et analysées dans la littérature. Chertow (2000) effectue une taxonomie des différents types de symbiose industrielle dans laquelle la distinction se fait principalement sur des considérations géographiques :

- Un type avec un parc industriel bien délimité (similaire à une zone d'activité industrielle)

- Un type correspondant à des firmes plus espacées géographiquement (quelques kilomètres sur une région industrielle)
- Un type correspondant à une région plus large (comme une agglomération, une province)

L'auteure développe par ailleurs les différentes caractéristiques intéressantes propres à ces différents types de symbiose industrielle et cite également des projets existants à travers le monde.

A la lumière de l'exemple de Kalundborg, une critique est réalisée notamment sur les risques et sur la faisabilité d'une synergie (Ehrenfeld, J. & Gertler, 1997). Parmi eux nous pouvons citer :

- les risques acheteur : lier son entreprise à une seule autre, et donc faire face aux aléas de la continuité en approvisionnement
- les risques vendeur : bouleversement des installations de l'acheteur, arrêt du flux et nouvelles mesures à prendre pour les déchets
- les risques économiques : respecter une faisabilité économique et prendre en compte les coûts de transaction entre les acteurs

Bien que les faisabilités techniques puissent être étudiées et respectées, la mise en place d'une symbiose industrielle réside le plus souvent dans une confiance d'affaires. Celle-ci est la clé d'une mise en place de synergies efficace et réussie.

2.2 La symbiose industrielle établie dans un cadre urbain

Comme nous l'évoquions dans l'introduction de ce mémoire, la caractéristique principale d'une grande ville est d'offrir un grand nombre d'opportunités de synergies grâce à la présence de secteurs industriels variés et d'un grand nombre d'entreprises. A ce propos, il est nécessaire de définir une démarche pour relever le maximum d'opportunités de synergies, afin d'aboutir aux recommandations souhaitées dans le cadre d'une aide stratégique de ciblage d'entreprises et de mise en place d'un réseau répondant à nos objectifs. Une approche adaptée est présentée par Bin et al. (2015).

La première étape consiste à étudier les opportunités de synergies. Tout d'abord, ceci consiste à relever, grâce à diverses sources d'informations, les données pertinentes concernant les entreprises présentes sur la zone d'études. Ces informations concernent leurs caractéristiques administratives propres et les caractéristiques reliées à leur production. Dans notre cas, les intrants de matière, les

matières résiduelles générées, les données de localisation et le nombre d'employés seront les données adéquates. La figure 2.1 résume schématiquement pour une entité les flux jugés pertinents. Ensuite, les associations possibles entre entreprises sur la base des informations obtenues et des compatibilités entre les matières à échanger peuvent être effectuées.

La deuxième étape est une étape d'évaluation et d'optimisation de la mise en place des synergies potentielles ainsi identifiées grâce à des objectifs qui peuvent dépendre de l'intérêt des animateurs. Boons et al. (2017) étudient sept cas d'initiatives de symbiose industrielle catégorisées par le type d'animateur. Les intérêts d'un initiateur industriel privé sont généralement la recherche d'un bénéfice économique et la réduction de ses impacts environnementaux. Lorsqu'une tierce partie est à l'origine du projet (organisation privée ou organisation gouvernementale), ces objectifs sont également recherchés à l'échelle du réseau d'entreprises visées mais la diffusion du concept de symbiose industrielle et le développement économique local sont par ailleurs des motivations supplémentaires pour lesquelles l'approche d'évaluation et d'optimisation peut différer. C'est davantage dans cette logique que s'inscrit notre partenaire.

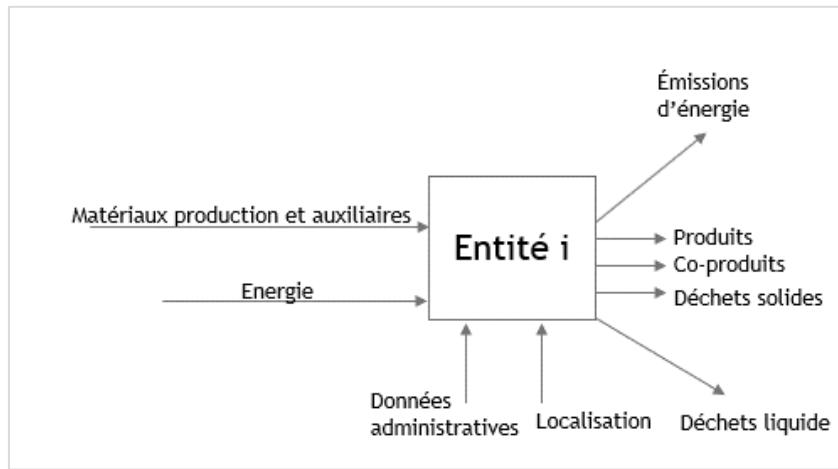


Figure 2.1 : Caractérisation des flux d'une entité, adapté de Bin et al. (2015)

2.2.1 Étude des opportunités de synergies

Afin d'étudier les opportunités de synergies, il est nécessaire de commencer par la recherche d'informations sur les différentes industries et activités industrielles en présence dans la zone d'étude. L'approche individuelle et directe des entreprises par prospection de la part d'un animateur est une solution fiable qui traduirait la meilleure précision qualitative sur les types de matières (exemple : copeaux de bois, poussières de verre, un certain type de solvant, *etc.*) et la meilleure

précision quantitative. Mais une approche plus générale peut également être intéressante dans un contexte plus large comme celui de l'Île-de-Montréal. A cet effet, plusieurs sources d'informations permettent d'estimer l'utilisation de matières premières et la génération de matières résiduelles d'une entreprise, pouvant constituer un potentiel pour des synergies. Aid et al. (2015) présentent le logiciel *Looplocal* aidant à viser les régions à fort potentiel d'implantation d'une symbiose industrielle. Dans une étude de cas sur la Suède, les auteurs utilisent des données d'inventaires de cycle de vie et des bases de données sur la génération de matières résiduelles par secteur industriel. Cependant, si l'utilisation de matières premières peut être identifiée, les types de déchets générés peuvent être plus difficilement caractérisables. Une estimation heuristique est utilisée ensuite pour affecter qualitativement et quantitativement les flux de matières aux entreprises de la zone d'études. Ceci constitue donc davantage une approche par activité industrielle.

La recherche de toutes les synergies possibles est ensuite effectuée par association de compatibilités entre les flux de matières sortant et entrant entre deux activités industrielles ou deux entreprises. La précision et le détail des différentes sources d'informations utilisées sur les types de matières permet d'obtenir les estimations les plus réalistes. Par ailleurs, de nombreux outils utilisables par un animateur et propres à l'identification de synergies ont été développés. Grant et al. (2010) évaluent dix-sept de ces outils tirés d'études et d'applications réelles et déterminent notamment les points d'amélioration pour contribuer à l'avancement de la technologie de l'information dans le cas de symbioses industrielles et de la communication autour de ces opportunités. Ces outils rassemblent en général plusieurs aspects sur la faisabilité des échanges avec notamment des aspects techniques liés aux compatibilités et aux processus éventuels de transformation de matières, ou des aspects économiques et environnementaux. D'un point de vue plus individuel, une interface de collaboration entre entreprises comme *SymbioSyS* permet aux entreprises de partager des informations sur leurs intrants et extrants ce qui leur permet ensuite de caractériser des synergies potentielles (Álvarez & Ruiz-Puente, 2017).

Certains types de synergies reviennent fréquemment dans les études et tendent à se standardiser. Pour citer un exemple, nous pouvons retrouver plusieurs fois le cas de cendres résiduelles qui peuvent fournir des entreprises de construction pour la fabrication de ciment ou d'autres produits comme des briques (Guo et al., 2016; Yu et al., 2015). De plus, certains secteurs industriels qualifiés de secteurs clés en symbiose industrielle sont également mis en avant car ils se retrouvent impliqués activement dans plusieurs exemples de réseaux à travers le monde (Domenech et al.,

2019). Cette dernière étude cite notamment les secteurs primaires de fabrication dont la fabrication de pulpes et de papier, l'industrie du métal, les activités minières et la fabrication de matériaux de construction. Afin de découvrir plus généralement des exemples existants et pertinents de synergies, une approche par web sémantique peut être effectuée comme le proposent Ghali et Frayret (2019).

Il existe donc plusieurs outils, méthodes ou exemples existant permettant à un animateur d'explorer des opportunités de symbiose industrielle dans sa zone d'études. L'approche effectuée par notre partenaire de recherche est une analyse des intrants et extrants des entreprises présentes dans la zone d'études pour lesquels des synergies avec des partenaires potentiels sont ensuite déterminées par ses animateurs. En plus des caractéristiques intrinsèques à la matière, ces identifications sont également soumises à des considérations propres à la relation d'échange comme des contraintes logistiques ou relationnelles. Certaines synergies peuvent également engendrer une modification des procédés de production permettant d'intégrer au mieux la matière résiduelle pour l'entreprise receveuse. Nous relevons tout de même qu'il est intéressant de procéder par activité industrielle pour avoir une approche estimative globale de matières générées et utilisées, ce qui permet initialement d'englober un maximum d'opportunités de synergies.

2.2.2 Outils d'aide stratégique à la décision pour la mise en place de synergies

L'étude des opportunités de synergie ayant été menée, un animateur peut se retrouver ensuite confronté au choix d'adopter la meilleure stratégie pour proposer la mise en place des synergies adéquates à un système d'entreprises, avec ses objectifs. La littérature recense une multitude d'outils d'aide à la décision dans ce sens grâce à l'optimisation mathématique. Chaque outil est adapté à un contexte et à des objectifs et considérations particulières. Raabe et al. (2017) mettent en place un outil d'optimisation individuelle qui cherche à maximiser le coût de transaction de la synergie en faveur de l'acteur qui établit le mode de transport de la matière dans la synergie. Cet acteur peut aussi bien être un offreur qu'un receveur. Ceci prend en compte le coût de la matière à échanger et le coût de chaque mode de transport considéré selon les collaborateurs potentiels, afin que cet acteur reçoive ou offre la totalité de sa quantité de matière demandée ou offerte. Ce choix est justifié avec l'idée de motivation économique qui inciterait davantage l'entreprise à s'impliquer dans des échanges en symbiose industrielle.

Des outils dont l'application s'effectue à un réseau d'entreprises ont également été créés. Cimren et al. (2011) proposent un outil d'optimisation statique d'un réseau de flux matériels se basant sur des objectifs de minimisation de coûts économiques liés aux échanges, aux dispositions et aux processus éventuels de transformation, et des objectifs de minimisation des impacts environnementaux liés à ces mêmes considérations. Maillé et Frayret (2016) proposent un outil d'optimisation multicritères d'un réseau de flux matériels sur un horizon à plusieurs périodes se basant sur des objectifs similaires et dont la méthode mathématique diffère. Brondi et al. (2018) présentent un outil de sélection des synergies basé sur une approche d'analyse de cycle de vie. Leong et al. (2017) présentent un outil multi-objectifs se basant sur des critères économiques, environnementaux, de connectivité et de fiabilité pour la création de synergies. Au regard des outils développés, les considérations sont en générale effectuées sur des réseaux identifiés, regroupant un nombre restreint d'entreprises. Lorsqu'un réseau est identifié, les demandes et les offres de chaque acteur sont recensées et les outils opèrent un choix en termes de types de flux à lui affecter dans le respect des objectifs énoncés (flux synergique, flux de matière vierge).

2.3 Les analyses de réseaux existant

L'analyse de réseaux existants dans la littérature peut nous permettre d'anticiper des critères et objectifs à prendre en compte afin de créer un réseau de symbiose industrielle. Bien que les optimisations économiques et environnementales soient majoritairement les objectifs considérés et étudiés dans des choix de synergies, de plus en plus d'études s'accordent à étudier la structure des réseaux de symbiose industrielle. A cet effet, l'analyse sociale des réseaux est utilisée dans de nombreux domaines scientifiques (Wasserman & Faust, 1994) et peut être particularisée aux réseaux de symbiose industrielle (Domenech & Davies, 2009). Dans cette optique, l'analyse des réseaux se fait au-delà des considérations matérielles et vise plutôt à évaluer la qualité du réseau en présence par la caractérisation des rôles des différents acteurs ou de critères plus généraux comme la connectivité du réseau qui facilite l'échange de matières résiduelles et la transmission du savoir. Un ensemble d'indicateurs peuvent être calculés à cet effet afin de caractériser une multitude de propriétés qui peuvent légitimer un acteur à part entière ou la structure globale du réseau. Un premier indicateur est appelé *Betweenness Centrality* (BC). Cet indicateur quantifie la faculté d'une entreprise dans le réseau à se situer sur un grand nombre de chemins les plus courts entre les autres nœuds (Butts, 2008). Une entreprise avec un BC élevé aura une grande influence

sur le réseau en termes d'échanges de matières résiduelles (Song et al., 2018). Un deuxième indicateur est appelé chemin moyen le plus court, en anglais *Average Shortest Path Length* (ASPL). Cet indicateur quantifie le degré de connexion du réseau. Plus cet indicateur sera petit, plus les matières résiduelles pourront facilement être échangées (Song et al., 2018). Cette analyse et ses interprétations ont été effectuées pour plusieurs cas réels et ont montré l'importance d'avoir certaines caractéristiques individuelles comme l'indicateur *Betweenness Centrality* ou globales comme le chemin moyen le plus court. Ceci est non-exhaustif et d'autres indicateurs caractérisent d'autres propriétés dans un réseau. Leurs conséquences positives sur le fonctionnement du réseau ont également souvent été relevées et recommandées (Domenech & Davies, 2011; Song et al., 2018). En termes d'influence sociale, Ghali et al. (2017) établissent un modèle de simulation par agent pour étudier l'influence de caractéristiques sociales sur la mise en place de synergies comme la confiance et le savoir. Mais également d'autres facteurs comme l'influence de la création de nouvelles synergies (changement dynamique) dans un réseau établi et le type de réseau dans lequel cette simulation est établie. Tous ces facteurs ont une influence sur la création de synergies et cette étude montre que le comportement des entreprises influence la création de synergies.

2.4 Synthèse

Cette revue de la littérature nous a permis d'identifier une démarche globale pouvant aboutir à la mise en place potentielle des réseaux de symbiose industrielle par un animateur externe dans une zone urbaine. A ce propos, l'étude d'opportunités de synergies, par la caractérisation des différents flux de matières des entreprises et l'identification d'associations potentielles entre entreprises, est une étape cruciale avant d'évaluer et d'optimiser la mise en place de synergies et donc de réseaux. Dans l'étude d'opportunités de synergies à large échelle, nous avons relevé l'intérêt de procéder par activité industrielle ce qui permet d'obtenir un maximum de possibilités de synergies car la présence d'un grand nombre d'entreprises à l'activité industrielle similaire dans une zone urbaine facilite la caractérisation des flux et augmente les opportunités de synergies. Cependant, la collecte d'informations à ce sujet et l'avancée de la technologie de l'information dans ce domaine rendent cette approche compliquée en pratique car la précision des informations est primordiale pour légitimer une synergie potentielle. Concernant la mise en place de synergies, des outils d'aide à la décision grâce à l'optimisation mathématique sont utilisés de manière théorique et s'appliquent à des réseaux identifiés composés d'entreprises déjà impliquées. Les objectifs de ces outils diffèrent

mais relèvent souvent de considérations économiques ou environnementales. Ces outils sont souvent appliqués à des parcs industriels déjà définis pour lesquels une optimisation est souhaitée.

Cependant, peu d'études allient la recherche d'entreprises pouvant participer à des synergies, suivie ensuite d'une proposition de synergies sous une forme optimisée. Une approche dans ce sens serait alors intéressante et ce, grâce à la caractérisation proposée par activité industrielle. De plus, la prise en compte de caractéristiques sociales propres aux réseaux peut être intéressante pour établir des synergies. C'est dans ce contexte que nous nous proposons de développer une méthode de mise en place de réseaux de symbiose industrielle dans un cadre urbain, allant de l'identification de structures d'échanges potentielles entre plusieurs entreprises jusqu'à la mise en place d'associations entre entreprises et de synergies, constituant notre réseau, grâce à un outil d'optimisation mathématique.

CHAPITRE 3 OBJECTIF ET MÉTHODOLOGIE

3.1 Objectif

L'objectif de ce travail est de proposer une méthode exploitant une approche novatrice où la recherche de synergies s'effectue tout d'abord sur des activités industrielles. La sélection des entreprises s'effectuerait ensuite. Ainsi, il serait également possible de créer en pratique des réseaux de symbiose industrielle aux propriétés intéressantes. En effet en pratique, le travail d'un animateur dans la recherche de synergies est initié par une entreprise elle-même, ou par un animateur souvent démarché par un industriel ou un groupement industriel dans le cadre de collaborations, pour effectuer des recherches de synergies pour leur développement personnel. Dans cette approche, nous proposons une démarche où l'activité industrielle sera ciblée avant l'entreprise.

Comme nous l'énoncions dans la revue de la littérature au chapitre 2, deux critères à ce propos sont la présence d'acteurs clés et une bonne connectivité du réseau en présence pour l'échange de flux matériels. D'un point de vue économique, les synergies doivent être justifiées par une faisabilité économique qui incitera les entreprises à intégrer le processus. Cette méthode aboutira à la proposition d'un ensemble de synergies proposées entre différentes entreprises, constituant des potentiels intéressants au regard des critères d'optimisation énoncés. L'idée est alors de proposer une mise en place pour passer de ces potentiels à la création réelle des synergies proposées afin que cette méthode soit utile à la planification stratégique de synergies entre ces entreprises qu'il faudra démarcher.

Afin de contextualiser au mieux notre étude, nous nous proposons d'effectuer quelques suggestions et hypothèses au niveau des éléments à considérer.

3.2 Hypothèses

Le fort potentiel d'implication d'une entreprise est défini comme étant son intérêt à offrir ou recevoir plusieurs types de matières dans le cadre de synergies (exemples de types de matières : déchets métalliques, déchets plastiques, déchets organiques, solvants, palettes de bois, contenants en carton, etc.). Si ces synergies peuvent être concrétisées avec d'autres entreprises, ceci justifiera son investissement dans le processus de symbiose industrielle. A cet effet, ces entreprises

identifiées comme à fort potentiel peuvent constituer de prime abord les acteurs clés à partir desquels il est intéressant d'établir le réseau proposé.

Cette méthode s'appuiera également sur une autre hypothèse qui est la similitude par activité industrielle des matières premières utilisées et des matières résiduelles générées. Nous justifions cette hypothèse par la similitude des procédés de production et des produits fabriqués des entreprises d'une même activité industrielle, requérant les mêmes types de matières premières et générant les mêmes types de matières résiduelles. Les études d'identifications d'opportunités de synergies relevées dans la littérature nous suggèrent que cette approche est envisageable au regard de la redondance de certaines activités industrielles impliquées et de la redondance des types de synergies correspondantes dans les exemples de symbioses industrielles à travers le monde.

De ces deux hypothèses découlent des structures d'échanges globales possibles entre une activité industrielle centrale et d'autres activités industrielles ou ensembles d'entreprises dites périphériques.

3.3 Méthodologie

La méthodologie d'expérimentation s'articule comme suit :

1. **Génération de structure** : à partir d'une activité industrielle clé (ou centrale), identifier les matières en jeu pour des synergies, les entreprises concernées et caractériser les quantités offertes ou demandées pour les types de matières correspondant. Identifier ensuite les entreprises périphériques pouvant prétendre qualitativement à ces échanges et caractériser les quantités offertes ou demandées pour les types de matières correspondantes. Cette étape est relative à l'étape d'étude des opportunités de synergie, relevée dans notre revue de littérature.
2. **Affectation des synergies à l'aide d'un outil d'optimisation mathématique** : à partir de toutes les synergies potentielles identifiées, l'application d'un outil mathématique d'aide stratégique adapté dans ce contexte permettra d'affecter les synergies pour tous les types de matières aux entreprises de l'activité industrielle centrale. Cette étape est relative à l'étape d'évaluation et d'optimisation des synergies en fonction de nos objectifs, relevée dans notre revue de littérature.

La figure 3.1 décrit synthétiquement la méthodologie composée de ses étapes et sous-étapes.

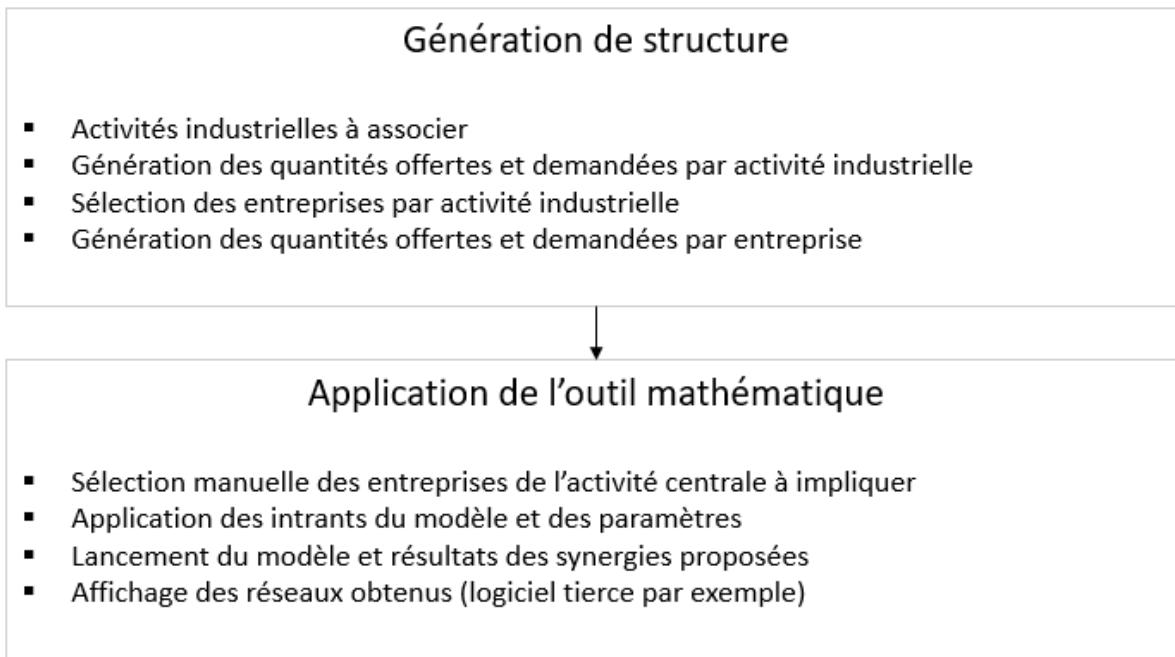


Figure 3.1 : Méthodologie synthétisée

3.3.1 Génération de structure

Il est tout d'abord nécessaire d'identifier une activité industrielle centrale et les types de matières qui lui sont associées et pouvant être impliquées dans des synergies, conformément à l'hypothèse énoncée à la section 3.2. L'activité industrielle centrale choisie initialement et ses entreprises présentes et sélectionnées par l'animateur dans la zone d'études doivent ensuite être associées avec des entreprises dites « périphériques » (ou activités industrielles périphériques constituées de plusieurs entreprises) pouvant collaborer dans le cadre de synergies. Ainsi, si l'activité centrale A génère la matière résiduelle a et qu'une entreprise utilise la matière a en intrant de son processus, alors on pourra associer qualitativement les entreprises de A avec cette entreprise périphérique. Si c'est une activité industrielle périphérique B qui est identifiée pour correspondre au type de matière a , alors nous pourrons associer qualitativement les activités industrielles A et B. De ces associations peut découler un ensemble de possibilités de synergies car nous pouvons relever ensuite l'ensemble des entreprises intégrant les activités A et B. Dans notre cas, nous utiliserons également des activités industrielles pour identifier les entreprises périphériques.

Chaque activité industrielle recensera son lot d'entreprises pour lesquelles nous pourrons générer des quantités d'offres et de demandes pour les matières relevées sur une période donnée. Ceci va

donc constituer les intrants du modèle. La figure 3.2 illustre qualitativement un exemple de structure initiale générée. L'activité industrielle à fort potentiel est l'activité A et les activités périphériques sont B, C et D. Les types de matières en jeu sont *a*, *b*, *c* et *d*. Des compatibilités directes de matières sont illustrées pour simplifier les associations.

Chaque encadré de la figure possède son lot d'entreprises présentes sur la zone d'études. Selon les sources d'informations disponibles, les méthodes d'estimations quantitatives des types de matières par entreprise sont multiples. Nous ne préconisons en conséquence ici aucune méthode particulière. Nous présenterons dans la génération d'instances au chapitre 4 une méthode d'estimation par nombre d'employés selon des données nationales annuelles catégorisées par activité industrielle.

Particularités et mise en œuvre

Les informations sur les activités industrielles sont souvent obtenues à partir de données publiques sur l'industrie. Par exemple, l'Europe et l'Amérique du Nord possèdent par exemple leurs propres systèmes de classification d'entreprises permettant d'obtenir des données concernant une multitude d'informations. L'idée étant d'obtenir, à la manière de Aid et al. (2015), des données générales quantitatives d'intrants et d'extrants par activité industrielle. Une estimation heuristique permettrait de ramener ces estimations à une entreprise (par nombre d'employés, par chiffre d'affaire...). Cependant, d'une classification à l'autre, les données ne sont pas présentes sous la même forme. C'est d'ailleurs pour cela que notre proposition d'associations et de récoltes de données reste assez large car elle dépend de la forme et la précision sous laquelle il est possible de récolter et d'organiser ces données. Dans le chapitre 4, nous présenterons un exemple de récolte de données pour notre zone d'études à l'aide du Système de Classification Industrielle d'Amérique du Nord (SCIAN).

L'activité industrielle centrale pourrait être sélectionnée par un animateur selon diverses raisons qui peuvent être son potentiel découvert à l'aide d'exemples existant ou grâce à la poursuite des recherches sur l'identification de telles activités et ce, grâce aux progrès en termes d'écologie industrielle tant au niveau technologique qu'au niveau de la sensibilisation des acteurs industriels. Dans les exemples de symbioses industrielles à travers le monde, certains secteurs industriels se retrouvent souvent comme étant des activités industrielles centrales comme nous l'énoncions au chapitre 2. Il aurait été intéressant d'expérimenter notre méthode à partir de ces exemples adaptés à l'Île-de-Montréal. Cependant, le manque de présence d'entreprises affiliées à ces activités dans

notre zone d'études et le manque d'informations sur les types et les quantifications de matières correspondantes rendent cette application difficile. Au regard de la difficulté de répétabilité d'exemples existant à notre cas, nous proposerons notre propre identification d'activité industrielle et nous en choisirons quelques-unes pour lesquelles nous supposerons qu'elles peuvent jouer un rôle central grâce à un intérêt pour quelques matières susceptibles d'être échangées. Le choix d'entreprises périphériques est effectué dans notre cas avec une identification d'activités industrielles périphériques pouvant collaborer avec l'activité industrielle centrale. Cependant, cette sélection pourrait en pratique provenir d'entreprises dont les informations sur les flux et la localisation sont présentes dans des bases de données de l'animateur, résultant de prospections déjà établies.

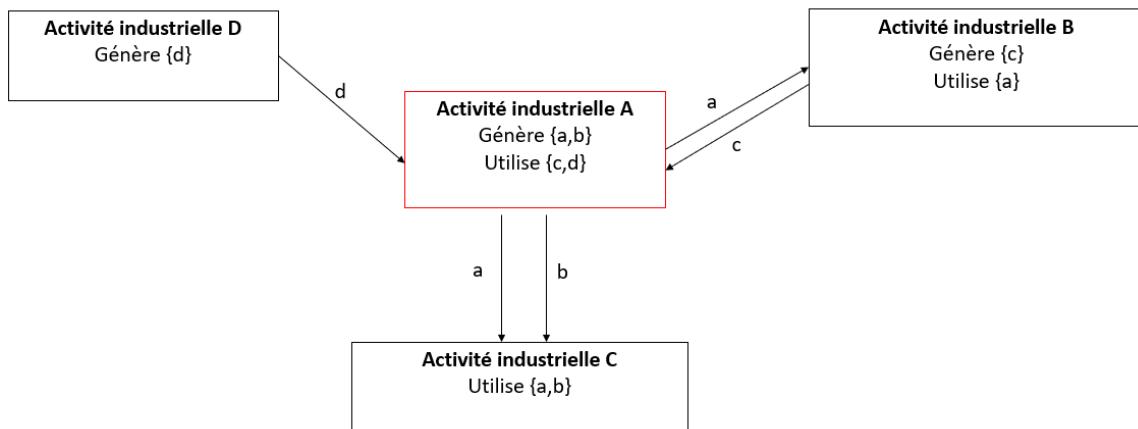


Figure 3.2 : Exemple de structure initiale générée

3.3.2 Affectation des synergies à l'aide d'un outil d'optimisation mathématique

3.3.2.1 Objectif de cet outil

L'objectif de l'outil est d'affecter des synergies entre les entreprises de l'activité industrielle centrale et des entreprises périphériques afin que les quantités offertes ou demandées de ces premières soient complétées au maximum pour tous leurs types de matières. Dans cette optique, nous proposons un programme mathématique linéaire mixte pour modéliser le problème d'affectation de ces synergies. Cet outil permet à l'utilisateur de régler l'importance relative entre le facteur économique lié au coût total du réseau et la sélection par l'outil du nombre d'entreprises

périphériques pour effectuer toutes les synergies. L'outil proposé est statique et se basera sur des quantités d'offres et de demandes en matières résiduelles sur une même période.

Le modèle proposé est un graphe. Chaque nœud correspond à une entreprise et chaque arc orienté correspond à une synergie :

- Un nœud possède une quantité demandée et une quantité offerte pour chaque type de matière (cette quantité est nulle dans le cas où l'entreprise n'est pas concernée par une matière)
- Un arc orienté possède une capacité relative au flot maximum qui peut circuler entre les deux entreprises sur la période sélectionnée, et donc un flot établi par l'application de l'outil correspondant à la quantité de matière échangée pour la synergie entre les deux entreprises

La section 3.3.2.2 décrit le modèle mathématique correspondant

3.3.2.2 Modèle mathématique

Définition des ensembles

K = ensemble des types de matières à échanger par l'activité industrielle centrale

C = ensemble des entreprises de l'activité industrielle centrale identifiée

P = ensemble des entreprises périphériques identifiées

$N = C \cup P$ = ensemble des nœuds

Définition des paramètres

o_{ik} : quantité offerte de l'acteur $i \in N$ pour la commodité $k \in K$ sur la période

d_{jk} : quantité demandée de l'acteur $j \in N$ pour la commodité $k \in K$ sur la période

c_{ij} : distance entre les entreprises $i \in N$ et $j \in N$

s_j^k : distance entre l'entreprise $j \in N$ et son fournisseur initial pour la matière $k \in K$

l_i^k : distance entre l'entreprise $i \in N$ et le site de traitement en fin de vie de la matière $k \in K$

t_k : coût moyen unitaire du transport de la commodité $k \in K$

r_k : redevance unitaire pour le traitement de la matière résiduelle k en fin de vie

p_k : coût moyen unitaire de la matière $k \in K$, par le fournisseur initial

e_k : coût moyen unitaire de procédé éventuel pour la transformation de la matière résiduelle k

ε : pourcentage fixé par l'utilisateur pour un écart du coût total minimum lié aux synergies

$[\delta_1, \delta_2]$: intervalle de pourcentages dans lequel doit se situer le flot reçu par une entreprise périphérique pour un type de matière par rapport à sa quantité demandée

Définition des variables

f_{ijk} : flot de matière entre l'entreprise $i \in N$ et l'entreprise $j \in N$ pour la commodité $k \in K$

$$x_{pk} = \begin{cases} 1 & \text{si l'entreprise } p \in P \text{ est choisie dans la solution pour recevoir } k \in K \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$y_{pk} = \begin{cases} 1 & \text{si l'entreprise } p \in P \text{ est choisie dans la solution pour distribuer } k \in K \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Fonction objectif

La fonction objectif $f_1(x)$ en (3.1) permet de minimiser le coût total des synergies, lié au transport des matières résiduelles. L'objectif est de minimiser ce coût pour obtenir les synergies les plus économiques.

Une adaptation de cette fonction permettra plutôt de minimiser le nombre d'entreprises périphériques utilisées pour collaborer avec les entreprises choisies de l'ensemble C . Une entreprise peut être choisie pour distribuer des flux de matières, pour recevoir des flux de matières, ou pour effectuer ces deux actions. Lorsque le coût optimal sera obtenu pour satisfaire les échanges de matière pour les entreprises de l'activité centrale, nous autoriserons l'écart d'un pourcentage ε de la fonction objectif $f_1(x)$ et nous chercherons à minimiser $f_2(x)$ traduite en (3.2) pour obtenir un minimum d'entreprises avec qui les entreprises de l'activité centrale effectueront ces synergies. Nous effectuons donc successivement les étapes 1) et 2) (sous les contraintes décrites ci-après) :

$$f_1(x) = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in K} t_k \cdot c_{i,j} \cdot f_{i,j,k} \quad (3.1)$$

$$f_2(x) = \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} (x_{pk} + y_{pk}) \quad (3.2)$$

- 1) **Min** $f_1(x)$
- 2) **Min** $f_2(x)$ t.q. $f_1(x) \leq \left(1 + \frac{\varepsilon}{100}\right) \cdot f_1(x_1^*)$

où x_1^* correspond à la meilleure solution obtenue pour la fonction objectif $f_1(x)$ à l'étape 1).

La section suivante décrit les contraintes du modèle pour ces deux résolutions.

Contraintes

Les contraintes (3.3) et (3.4) assurent que les flux de matières distribués pour une entreprise ne dépassent pas sa quantité offerte. La contrainte (3.4) assure en même temps que seules les entreprises de l'activité industrielle centrale, sélectionnées au préalable par l'animateur, puissent distribuer des matières.

$$\sum_{c \in C} f_{p,c,k} \leq o_{p,k} \cdot y_{p,k}, \forall p \in P, \forall k \in K \quad (3.3)$$

$$\sum_{p \in P} f_{c,p,k} \leq o_{c,k}, \forall c \in C, \forall k \in K \quad (3.4)$$

Les contraintes (3.5), (3.6) et (3.7) assurent que la totalité des flux pour une matière, reçus par une entreprise sélectionnée dans la solution soit d'une part égale à sa demande pour la matière considérée pour l'activité centrale, et d'autre part compris entre deux pourcentages δ_1 et δ_2 de sa demande pour les entreprises périphériques. Ceci a été ajusté afin de ne pas rendre la résolution trop restrictive à cause de contraintes d'égalité. Ce taux peut être établi en raison de la possibilité de s'écartier légèrement d'une demande annuelle estimée. Ces contraintes traduisent la condition de participation d'une entreprise au réseau dans la solution, en plus de la faisabilité économique des synergies.

$$\sum_{p \in P} f_{p,c,k} = d_{c,k}, \forall c \in C, \forall k \in K \quad (3.5)$$

$$\sum_{c \in C} f_{c,p,k} \leq \delta_2 \cdot d_{p,k} \cdot x_{p,k}, \forall p \in P, \forall k \in K \quad (3.6)$$

$$\sum_{c \in C} f_{c,p,k} \geq \delta_1 \cdot d_{p,k} \cdot x_{p,k}, \forall p \in P, \forall k \in K \quad (3.7)$$

Les entreprises de l'activité centrale sélectionnées par l'utilisateur possèdent une quantité totale de matière à offrir ou à recevoir. Pour chaque matière :

- si pour un type de matière, la quantité totale offerte par ces entreprises est plus grande que la quantité totale demandée par les entreprises périphériques, alors toute la matière offerte ne pourra être totalement distribuée et donc nous imposerons que la quantité totale demandée des entreprises périphériques soit distribuée.
- si pour un type de matière, la quantité totale offerte par ces entreprises est plus faible que la quantité totale demandée par les entreprises périphériques, alors toute la matière offerte pourra être totalement distribuée et donc nous imposerons que la quantité totale offerte des entreprises centrales soit distribuée.

Dans les deux cas, l'objectif est de conditionner la distribution de matière résiduelle des activités centrales en la maximisant selon les situations. Selon les conditions initiales en termes de quantités, les deux situations peuvent apparaître et afin de les différencier sans intervention d'un utilisateur, les contraintes d'inégalité (3.8) et (3.9) ont été établies et imposeront, grâce également à la contrainte (3.4), les égalités adéquates mentionnées dans les deux points précédents. Si ces contraintes n'existaient pas, la quantité distribuée serait nulle au regard de la première fonction objective qui rendrait les flots nuls dans une logique de minimisation des coûts.

$$\sum_{p \in P} \sum_{c \in C} f_{c,p,k} \geq \sum_{c \in C} o_{c,k}, \forall k \in K \quad (3.8)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{c \in C} f_{c,p,k} \geq \sum_{p \in P} d_{p,k}, \forall k \in K \quad (3.9)$$

Une synergie a lieu entre deux entités si elle vérifie une faisabilité économique au regard de la situation initiale d'achat de la matière première pour l'entreprise demandeuse et au regard de la disposition initiale prise par l'entreprise offreuse dans la gestion de la matière résiduelle. Afin de définir cette faisabilité économique, nous nous inspirerons de l'étude de Yazan et Fraccascia (2019). Si une entreprise i offre la matière k à l'entreprise j, la condition de faisabilité est la suivante :

$$c_{ij}^{syn,k} \leq c_i^{d,k} + c_j^{f,k} \quad (3.10)$$

où $c_{ij}^{syn,k}$ correspond aux coûts unitaires propres à la synergie entre i et j (transport + procédé éventuel de transformation), $c_i^{d,k}$ correspond coûts unitaires propres au traitement en fin de vie de la matière k par l'entreprise i (transport lieu fin de vie + procédé de traitement) et $c_j^{f,k}$ correspond aux coûts unitaires pour la matière vierge k pour l'entreprise j (transport fournisseur + prix unitaire fournisseur).

L'inéquation (3.11) traduit la contrainte correspondante pour notre outil :

$$(t_k \cdot c_{ij} + e_k) \leq (r_k + t_k \cdot l_i^k) + (p_k + t_k \cdot s_j^k), \forall k \in K, \forall i \in N, \forall j \in N \quad (3.11)$$

Notons tout de même que le prix unitaire de la matière échangée, négocié entre les deux entreprises devra également respecter une condition, qui cependant, est indépendante de la faisabilité globale de la synergie dans le modèle et ne fait pas l'objet d'une contrainte. Ceci sera davantage dû à la négociation entre les entreprises, après proposition d'une synergie et constitue un problème non-traité ici.

Enfin, les contraintes (3.12) et (3.13) traduisent les domaines de validité des variables du modèle :

$$f_{i,j,k} \geq 0, \forall i \in N, \forall j \in N, \forall k \in K \quad (3.12)$$

$$x_{p,k}, y_{p,k} \in \{0,1\}, \forall p \in P, \forall k \in K \quad (3.13)$$

CHAPITRE 4 ÉTUDE DE DEUX EXEMPLES

Afin de visualiser et de discuter les résultats escomptés du modèle, nous allons l'appliquer sur deux structures basées sur une activité industrielle centrale et sur des activités industrielles périphériques pour l'échange de plusieurs matières. La méthode présentée à la section 3.3.1 étant générale pour la génération de structures et pour les différents termes génériques définis, nous allons tout d'abord présenter plus précisément les éléments utilisés dans notre cas. Cette génération de structure peut être amenée à changer en raison de la définition d'activité industrielle par l'animateur, et surtout des données à disposition. Bien que la réplicabilité de ces exemples à une situation réelle soit discutable, une structure plus légitime pourrait exister sous cette même forme et ainsi être interprétée et discutée identiquement.

Ensuite, nous allons appliquer l'outil mathématique à ces structures et discuter les éléments pertinents comme les conditions à respecter pour la structure initiale afin d'obtenir une forme de résultats intéressante, mais également l'utilisation qui peut être faite par l'animateur de ces synergies proposées et donc de l'outil.

4.1 Génération d'instances

Afin de définir des activités industrielles centrales et périphériques pour nos exemples, nous utiliserons le système de classification des industries de l'Amérique du Nord (SCIAN). Un code SCIAN (ou classe SCIAN) est un code standardisé à 6 chiffres décrivant précisément l'activité d'une entreprise. Ce code est une carte d'identité pour l'entreprise. Nous utiliserons donc un code SCIAN comme définition d'une activité industrielle. La classe SCIAN découle d'une déclinaison de codes provenant d'un système de classifications d'activités professionnelles en Amérique du Nord. Les industries manufacturières sont caractérisées par le groupe '31'. La déclinaison progressive de ce groupe (en y ajoutant à chaque fois un chiffre à son extrémité droite) permet de spécifier l'activité industrielle d'une entreprise. En annexe A est illustré un exemple d'une déclinaison possible pour des industries manufacturières. Après avoir généré des structures avec des activités industrielles grâce à cette classification, un recensement des industries manufacturières de l'Île-de-Montréal nous permettra à cet effet de sélectionner les entreprises de chaque activité dans notre structure de base pour obtenir des localisations réelles pour l'expérimentation. Dans cette table, les entreprises sont catégorisées par code SCIAN. La définition

d'activité industrielle est ici propre à notre zone d'études mais elle serait en général libre tant que ses termes sont satisfaits (similitude des produits finis fabriqués et des procédés justifiant l'utilisation et la génération des mêmes types matières).

Les quantités demandées pour les matières résiduelles ont été estimées avec une source de données fournie par le Centre de Transfert Technologique en Écologie Industrielle (CTTÉI). Ces données ont été générées grâce à des tables de Statistique Canada et permettent de catégoriser la ressource et l'emploi en commodités (matières, services, produits finis, etc.) par secteur industriel. Les secteurs industriels référencés dans ces données correspondent aux groupes SCIAN (code à 4 chiffres de la classification SCIAN). Nous avons donc associé qualitativement chaque activité industrielle de cette structure (donc les codes SCIAN dans notre exemple) au groupe SCIAN duquel il décline. Chaque donnée pour chaque commodité par secteur industriel est une quantité exprimée en [\$/employé] pour l'année 2014. Par exemple, si une entreprise compte 40 employés et que l'emploi en copeaux de bois pour son secteur industriel correspond à une quantité annuelle de 400 \$/employé, nous estimerons que l'entreprise nécessite une quantité annuelle de 16 000 \$ de copeaux de bois. Une estimation du prix unitaire moyen de copeaux de bois permet d'estimer cette quantité en unités (massique, volumique...). Ceci constituera la méthode pour déterminer les quantités demandées en matières que nous nécessitons. Cette estimation par nombre d'employés n'est pas nécessairement fiable mais traduit une des méthodes existantes d'estimation à grande échelle telle que nous l'opérons. De plus, cette donnée nous est disponible pour chaque entreprise. D'autres méthodes heuristiques comme une méthode fonction du chiffre d'affaires peuvent également être établies. Ceci montre également la difficulté à obtenir des données pertinentes à grande échelle. Cependant, l'approche itérative pour l'utilisation de l'outil décrite en section 4.4 peut permettre après prospection des entreprises, de corriger ces données d'intrants et d'extrants et ainsi d'utiliser la méthode de manière plus fiable.

Les quantités offertes ont été générées de deux manières en fonction des données à disposition :

- 1) A l'aide d'exemples de quelques entreprises générant effectivement ces matières résiduelles. Comme pour les quantités demandées, nous estimerons une quantité proportionnellement au nombre d'employés. Les quantités en jeu et le nombre d'employés de l'entreprise prise comme référence seront utilisés pour estimer les quantités offertes des entreprises de notre système. Ces exemples proviennent de données non-publiques fournies

par le CTTÉI qui correspondent à des quantifications d'offres de matières résiduelles effectuées par des entreprises au terme de prospections et de recensements effectués par des animateurs.

- 2) A l'aide des ressources de commodités par secteur industriel, représentée dans les tables issues de Statistique Canada. La valeur proposée pour chaque commodité correspond à la quantité annuelle de sa vente pour cette activité industrielle en [\$/employé]. Par exemple, si une entreprise comprend 40 employés et que la ressource de son secteur industriel pour des déchets de bois correspond à une quantité annuelle de 200\$/employé, nous estimerons que l'entreprise revalorise une quantité annuelle de 8 000\$ de déchets de bois. Ainsi, nous l'associerons à la quantité annuelle offerte bien qu'elle ne représente *a priori* qu'une partie de la matière résiduelle générée qui est déjà revalorisée dans le cadre d'autres échanges économiques. Pour estimer de manière massique cette quantité, nous nécessitons le prix moyen de revente de cette matière par le secteur industriel. A cause de la difficulté d'obtention de cette donnée, nous estimerons le prix moyen de revente avec d'autres sources comme le prix de revente de la commodité par des recycleurs dans le cas de déchets. La réelle fraction résiduelle non revalorisée n'est pas représentée dans ces tables et constitue de manière générale une identification difficile comme nous l'évoquions dans la section 2.2.1 de notre revue de littérature.

4.2 Étude d'un premier exemple

La première structure hypothétique identifiée est représentée sur la figure 4.1. Les hypothèses sont les suivantes :

- L'activité industrielle centrale sélectionnée est l'activité industrielle ‘Fabrication de fournitures et de matériel médicaux’ (classe SCIAN ‘339110’).
- Les activités périphériques associées sont les activités ‘Fabrication de sacs en plastique’ (classe SCIAN ‘326111’) et ‘Fabrication de vêtements’ (classe SCIAN ‘315220’).
- Toutes les tailles de contenants en carton et de palettes de bois sont homogènes et peuvent prétendre à être échangées. Nous parlerons donc simplement d'unités sans différencier les gabarits.

- Les déchets plastiques générés sont homogènes et peuvent être réutilisés directement pour la fabrication de sacs en plastique (nous supposons que ces entreprises possèdent les technologies pour les convertir en matière première utilisable).

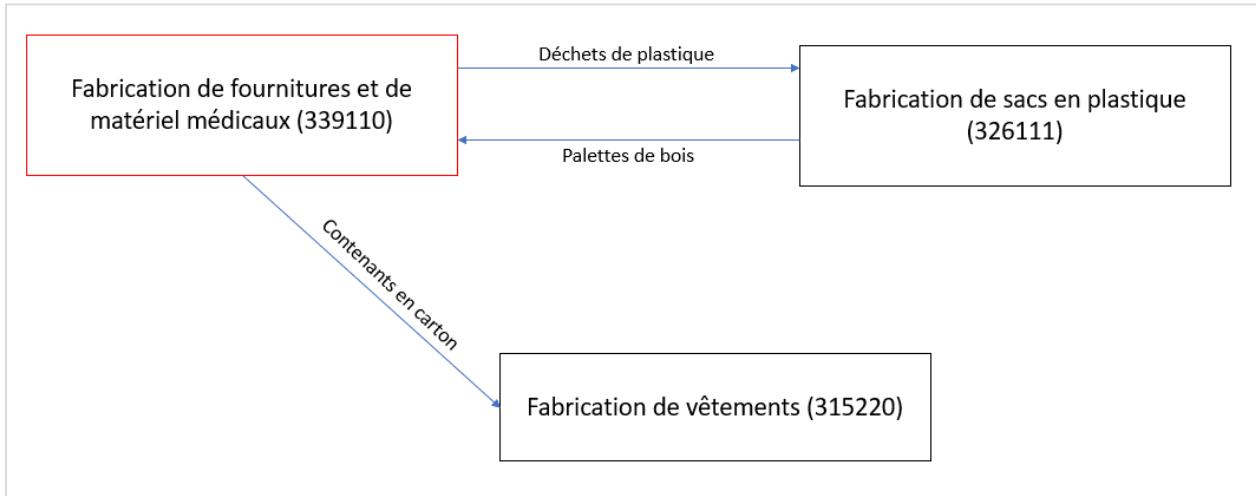


Figure 4.1 : Première structure d'étude

Les tableaux 4.1 et 4.2 résument respectivement les différentes quantités annuelles demandées et offertes pour chaque activité industrielle de notre structure. Les prix unitaires ont été relevés à partir de prix du marché pour les matières évoquées. Les offres ont été générées dans ce cas à partir des données non-publiques fournies par le CTTÉI. L'offre en palettes de bois a été déterminée à l'aide d'une régression linéaire qui a pu être effectuée à partir de 5 entreprises de cette source de données proposant effectivement ce produit (et non une seule entreprise comme pour les autres types de matières). Ainsi, nous supposerons que l'offre en palettes de bois correspond à cette quantification apportée par notre régression linéaire (tableau 4.2). Nous sélectionnons donc ensuite les entreprises appartenant à ces activités industrielles et se situant dans notre zone d'études. Ainsi, pour l'activité industrielle centrale '339110' nous relevons 14 entreprises, pour l'activité industrielle '326111' nous relevons 10 entreprises et pour l'activité industrielle '315220' nous relevons 11 entreprises.

Tableau 4.1 : Quantités annuelles de matières résiduelles demandées par activité industrielle pour la première structure

Type de matière	Activité industrielle	Quantité annuelle demandée [\$/employé]	Unité de référence	Prix unitaire d'achat [\$/unité de référence]	Quantité annuelle demandée [unité de référence/employé]
Déchets plastiques	Fabrication de sacs en plastique	200	kg	0,265 ¹	755
Contenants en carton	Fabrication de vêtements	800	unité	2,7 ²	296
Palettes de bois	Fabrication de fournitures et de matériel médicaux	300	unité	15 ³	20

Tableau 4.2 : Quantités annuelles de matières résiduelles offertes par activité industrielle pour la première structure (N correspond au nombre d'employés de l'entreprise)

Type de matière	Activité industrielle	Quantité annuelle offerte	Unité
Déchets plastiques	Fabrication de fournitures et de matériel médicaux	3 087	[kg/employé]
Contenants en carton	Fabrication de fournitures et de matériel médicaux	827	[unités/employés]
Palettes de bois	Fabrication de sacs en plastique	144 * N – 530	[unités]

¹ Tiré de : <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/municipalites/collecte-selective-municipale/indice-prix-matieres>, année 2014.

² Donnée obtenue auprès d'un fournisseur

³ Donnée obtenue auprès d'un fournisseur

4.2.1 Affectation des synergies à l'aide de l'outil mathématique

4.2.1.1 Modélisation et paramètres

Afin d'expérimenter notre modèle, nous avons utilisé le logiciel AIMMS. Pour identifier les entreprises sélectionnées, nous utiliserons trois indicatifs auxquels nous juxtaposserons des codes numériques:

- L'indicatif MED correspond aux entreprises de l'activité industrielle centrale ‘Fabrication de fournitures et de matériel médicaux’.
- L'indicatif PL correspond aux entreprises de l'activité industrielle périphérique ‘Fabrication de sacs en plastique’.
- L'indicatif VET correspond aux entreprises de l'activité industrielle périphérique ‘Fabrication de vêtements’.

L'ensemble C des entreprises de l'activité centrale et l'ensemble P des entreprises périphériques seront donc définis comme suit :

$$C = \{\text{MED01}, \dots, \text{MED14}\}$$

$$P = \{\text{PL01}, \dots, \text{PL11}, \text{VET01}, \dots, \text{VET14}\}$$

La représentation des différents réseaux proposés et les calculs des différents indicateurs relatifs à l'analyse sociale des réseaux ont été réalisés avec le logiciel UCINET 6. Un nœud correspond à une entreprise et un arc orienté correspond à une synergie proposée à laquelle est affectée une quantité annuelle de matière. La visualisation proposée par le logiciel permet une meilleure clarté des réseaux proposés en comparaison à la représentation des nœuds et des arcs du réseau sur une carte où la localisation fixe des entreprises rendra la visualisation et l'interprétation confuses. La figure 4.2 représente tout de même la localisation de toutes ces entreprises sur une carte de l'Île-de-Montréal.

Les distances entre les entreprises ont été calculées avec l'outil Google Maps. Concernant les paramètres économiques, le tableau 4.3 résume les paramètres utilisés. Par manque d'information sur l'origine des fournisseurs initiaux et sur les dispositions finales de traitement des matières résiduelles, les coûts de transports unitaires moyens à ces effets n'ont pas été considérés. Les coûts liés à ces deux dispositions seront uniquement le coût unitaire de la matière par le fournisseur initial

et la redevance unitaire de traitement de la matière résiduelle. Les quantités offertes et demandées sur la période pour chaque entreprise sont disponibles en annexe B.

Les paramètres δ_1 et δ_2 ont été fixés respectivement à 95% et 100% afin de se rapprocher convenablement des demandes exprimées par chacune des entreprises sans pour autant rendre étroite la résolution.

Tableau 4.3 : Paramètres économiques utilisés pour la première structure

Paramètre	Valeur	Unité
$t_{plastique}$ ⁴	0,007	\$/ kg.km
$t_{palettes}$	0,175	\$/ unité.km
$t_{contenants}$	0,0035	\$/ unité.km
$s_j^k, \forall (j, k)$	0	
$l_i^k, \forall (i, k)$	0	
$e_k, \forall k$	0	
$r_{palettes}$ ⁵	0,023	\$/unité
$r_{plastique}$	0	
$r_{contenants}$	0	
$p_{plastique}$	0,265	\$/kg
$p_{palettes}$	15	\$/unité
$p_{contenants}$	2,7	\$/unité

⁴ L'estimation à 7\$/tkm (World Bank, 2008) a été convertie pour les palettes et contenants sur la base d'une masse d'une palette de 25 kg et d'une masse d'un contenant en carton de 500g.

⁵ Tiré de : <http://www.environnement.gouv.qc.ca/matieres/redevances/index.htm>, les déchets plastiques et les déchets de carton sont récupérés par la collecte sélective et aucun coût direct n'est imputé aux entreprises dans cette application

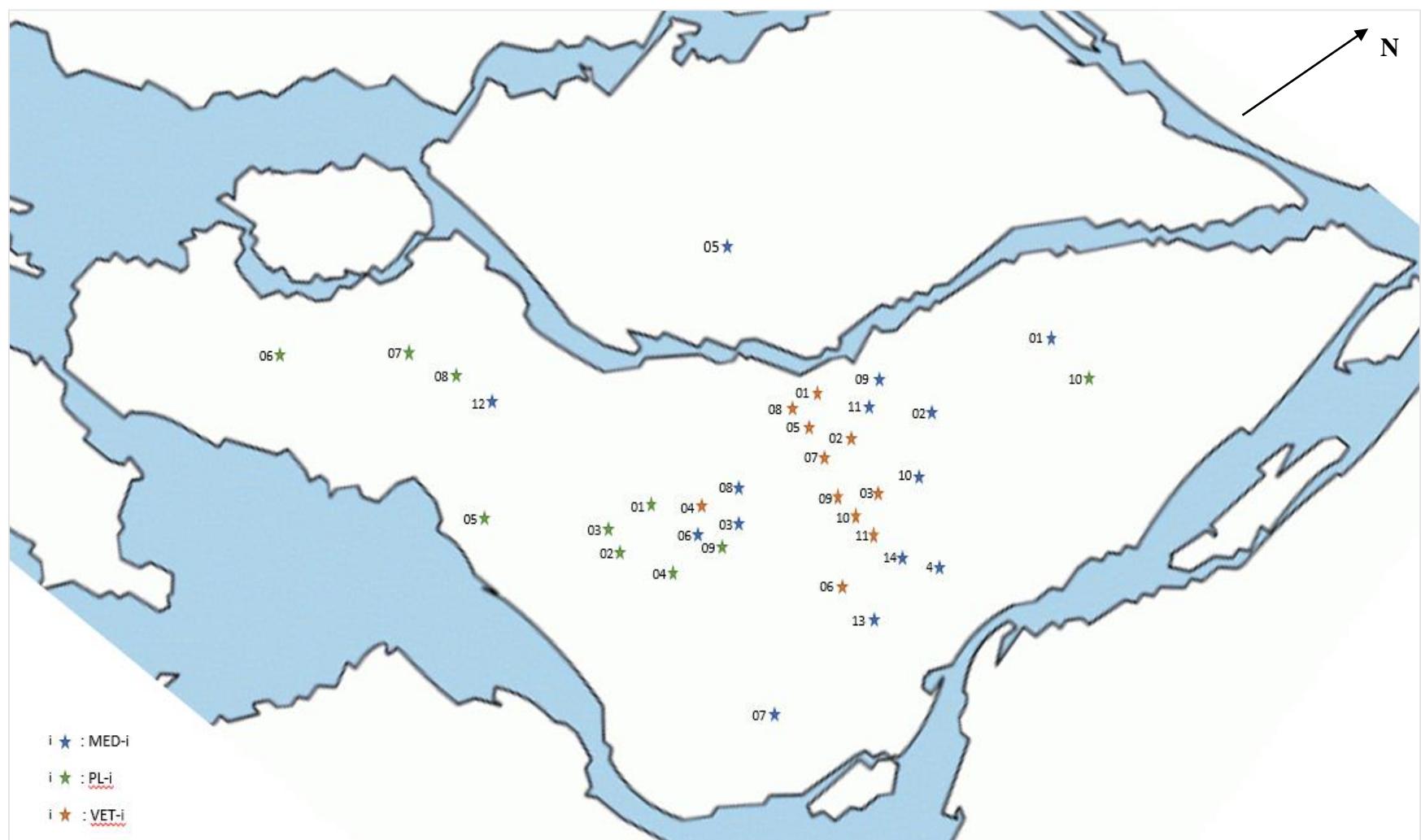


Figure 4.2 : Localisation des différentes entreprises relevées pour la première structure

4.2.1.2 Expérimentation en sélectionnant toutes les entreprises de l'activité centrale

Notre première expérimentation s'effectue avec la prise en compte des 14 entreprises de l'activité centrale. Bien que cela implique un grand nombre d'entreprises, nous voulons simplement observer le comportement du modèle sur la structure initiale au regard des objectifs évoqués. Le tableau 4.4 compare les quantités totales de matières reliées à ces entreprises, aux quantités totales proposées par les entreprises périphériques. Les contraintes (3.8) et (3.9) de notre modèle mathématique ont imposé que le flux total qui doit être distribué pour chaque matière soit supérieur ou égal au minimum de ces deux quantités. La première intuition à ce propos est que la quantité totale de demande en contenants en carton de l'ensemble des entreprises périphériques étant largement inférieure à la quantité totale offerte par les entreprises de l'ensemble des entreprises de l'activité centrale, certaines de ces dernières ne seront pas sélectionnées dans la solution pour distribuer ce produit. C'est également le cas pour la distribution des déchets de plastique où certaines entreprises de l'activité centrale ne seront pas sélectionnées pour participer à ces types de synergies. Ainsi, l'implication recherchée pour tous les types de matières par les entreprises de l'activité centrale ne sera probablement pas obtenue.

Tableau 4.4 : Comparaison des quantités totales entre les entreprises choisies de l'activité centrale et les entreprises périphériques, pour chaque matière

Palettes de bois		Contenants en carton		Déchets plastiques	
Quantité totale demandée [unités]	Quantité totale offerte [unités]	Quantité totale demandée [unités]	Quantité totale offerte [unités]	Quantité totale demandée [kg]	Quantité totale offerte [kg]
9 020	30 412	59 200	372 947	374 339	1 392 111

Nous avons expérimenté plusieurs valeurs de ε dans le but de visualiser la variation dans la sélection du nombre d'entreprises périphériques par l'outil ($\{0\%, 20\%, 50\%\}$). Nous avons analysé les réseaux ainsi formés. La visualisation des réseaux est illustrée aux figures 4.3, 4.4 et 4.5. Les entreprises de l'activité centrale sont représentées par les nœuds rouges. Visuellement, une entreprise de l'activité industrielle centrale joue son rôle clé attendu dans le réseau lorsqu'elle est concernée par tous les types de synergies potentielles. En l'occurrence, sur ces figures, chaque nœud rouge devrait avoir au moins un arc vers un nœud vert pour les synergies concernant les contenants en carton, ainsi que vers et en provenance d'un nœud bleu respectivement pour les

synergies concernant les déchets plastique et pour les synergies concernant les palettes de bois. Pour les trois valeurs de ϵ , aucune entreprise de l'activité centrale n'est concernée par les trois types de synergies.

Expéditions de contenants en carton et de déchets plastiques

Quel que soit le scénario, il est rare d'identifier une entreprise de l'activité centrale qui est utilisée pour les deux types de synergies concernant l'expédition de matières résiduelles (avec au moins un arc orienté vers un nœud vert et un arc orienté vers un nœud bleu). Nous remarquons que certaines entreprises de l'activité centrale ne sont pas sélectionnées pour distribuer ces matières résiduelles. En effet, les quantités offertes proposées par l'ensemble des entreprises de l'activité centrale étant supérieures aux quantités demandées par l'ensemble des entreprises périphériques, toutes les entreprises de l'activité centrale ne peuvent être sélectionnées pour participer à ces synergies (voir tableau 4.4). Dans les deux cas, l'application du modèle ne permet pas d'identifier des entreprises de l'activité industrielle centrale se démarquant par leur présence pour tout type de synergie. Être impliqué pour plusieurs types de matières augmente potentiellement le nombre de relations avec d'autres entreprises dans le réseau ce qui permet ainsi à une entreprise de l'activité centrale de jouer un rôle clé comme nous le préconisons.

Réceptions de palettes de bois

En revanche, toutes les entreprises de l'activité centrale reçoivent leur quantité demandée en palettes de bois. Ces synergies correspondent aux arcs orientés d'un nœud bleu vers un nœud rouge sur les figures 4.3, 4.4 et 4.5. En fonction de la valeur de ϵ , le nombre d'entreprises périphériques qui leur distribuent tend à diminuer. Pour le scénario initial ($\epsilon = 0\%$) avec la seule minimisation du coût total relié aux synergies, 5 entreprises périphériques étaient sélectionnées pour la distribution de palettes et ce nombre tombe à 2 pour les scénarios suivants. 'PL05' et 'PL10' sont sélectionnées lorsque $\epsilon = 20\%$ et 'PL05' et 'PL03' sont sélectionnées lorsque $\epsilon = 50\%$. Ce sont les entreprises périphériques avec des quantités offertes relativement élevées qui sont sélectionnées par l'outil, dans la logique de minimisation du nombre d'entreprises périphériques apportée par la deuxième fonction objectif. La sélection de ces entreprises périphériques n'est pas sans conséquence sur les coûts propres aux synergies. Le tableau 4.5 résume les coûts propres à la réception de palettes de bois ainsi pour chaque entreprise de l'activité centrale selon les valeurs de ϵ , ainsi que l'écart relatif de coût par rapport au scénario où $\epsilon = 0\%$. Pour un nœud d'une entreprise de l'activité centrale (en

rouge sur les figures 4.3, 4.4 et 4.5), ceci correspond à la somme des coûts de chaque arc provenant d'un nœud bleu. Dans les trois cas, chaque entreprise de l'activité centrale reçoit la même quantité de palettes de bois qui est sa quantité totale demandée. Pour toutes les entreprises de l'activité centrale, bien que la faisabilité économique soit respectée pour chaque synergie, l'écart relatif tend à augmenter et parfois de manière importante. Par exemple, l'écart relatif de coût est de 1000% pour l'entreprise MED1 lorsque $\epsilon = 50\%$. Dans cette situation, la synergie est effectuée avec PL03 qui se situe dans une zone de l'île-de-Montréal relativement éloignée de la sienne. Pour le scénario initial, la synergie proposée la reliait à PL10 qui est très proche d'elle géographiquement (voir figure 4.2).

Tableau 4.5 : Coûts relatifs à la réception de palettes de bois pour chaque entreprise de l'activité industrielle centrale

	$\epsilon = 0\%$		$\epsilon = 20\%$		$\epsilon = 50\%$	
	Coût (\$)		Coût (\$)	Ecart relatif	Coût (\$)	Ecart relatif
MED01	126		126	0,00%	1386	1000,00%
MED02	378		378	0,00%	756	100,00%
MED03	332,5		665	100,00%	465,5	40,00%
MED04	966		966	0,00%	1851,5	91,67%
MED05	2583		3013,5	16,67%	3013,5	16,67%
MED06	273		1365	400,00%	955,5	250,00%
MED07	2346,75		2656,5	13,20%	2656,5	13,20%
MED08	175		350	100,00%	210	20,00%
MED09	700		1050	50,00%	840	20,00%
MED10	847		924	9,09%	1232	45,45%
MED11	654,5		892,5	36,36%	892,5	36,36%
MED12	1243,9		3272,5	163,08%	3272,5	163,08%
MED13	2275		2825,55	24,20%	2625	15,38%
MED14	1001		1001	0,00%	1547	54,55%

Ces quelques observations ne permettent pas une analyse pertinente en termes de mise en place et de structure de réseau. Certaines entreprises de l'activité centrale ne peuvent jouer ce rôle central escompté au regard du nombre de types de synergies dans lesquelles elles sont impliquées. Les synergies relatives à l'expédition de contenants en carton et de déchets plastique en sont la cause directe et ce, dû aux quantités offertes en jeu supériorité par rapport aux quantités demandées par les entreprises périphériques. Il est alors nécessaire de redéfinir un contexte initial pouvant légitimer l'intérêt de l'approche, où les différentes quantités permettront aux entreprises de l'activité centrale de participer à tous les types de synergies. De plus, initier un réseau d'échanges

de matières résiduelles avec autant d'entreprises de l'activité centrale impliquées assez complexe et l'objectif initial est tout de même de mettre en place un réseau autour de quelques entreprises caractérisées à fort potentiel. A cet effet, nous nous proposons d'étudier une situation où cette sélection d'entreprises périphériques proposée par l'outil pourrait être visible pour toutes les synergies. Nous allons donc sélectionner un nombre réduit d'entreprises de l'activité centrale afin d'obtenir une application plus légitime du modèle.

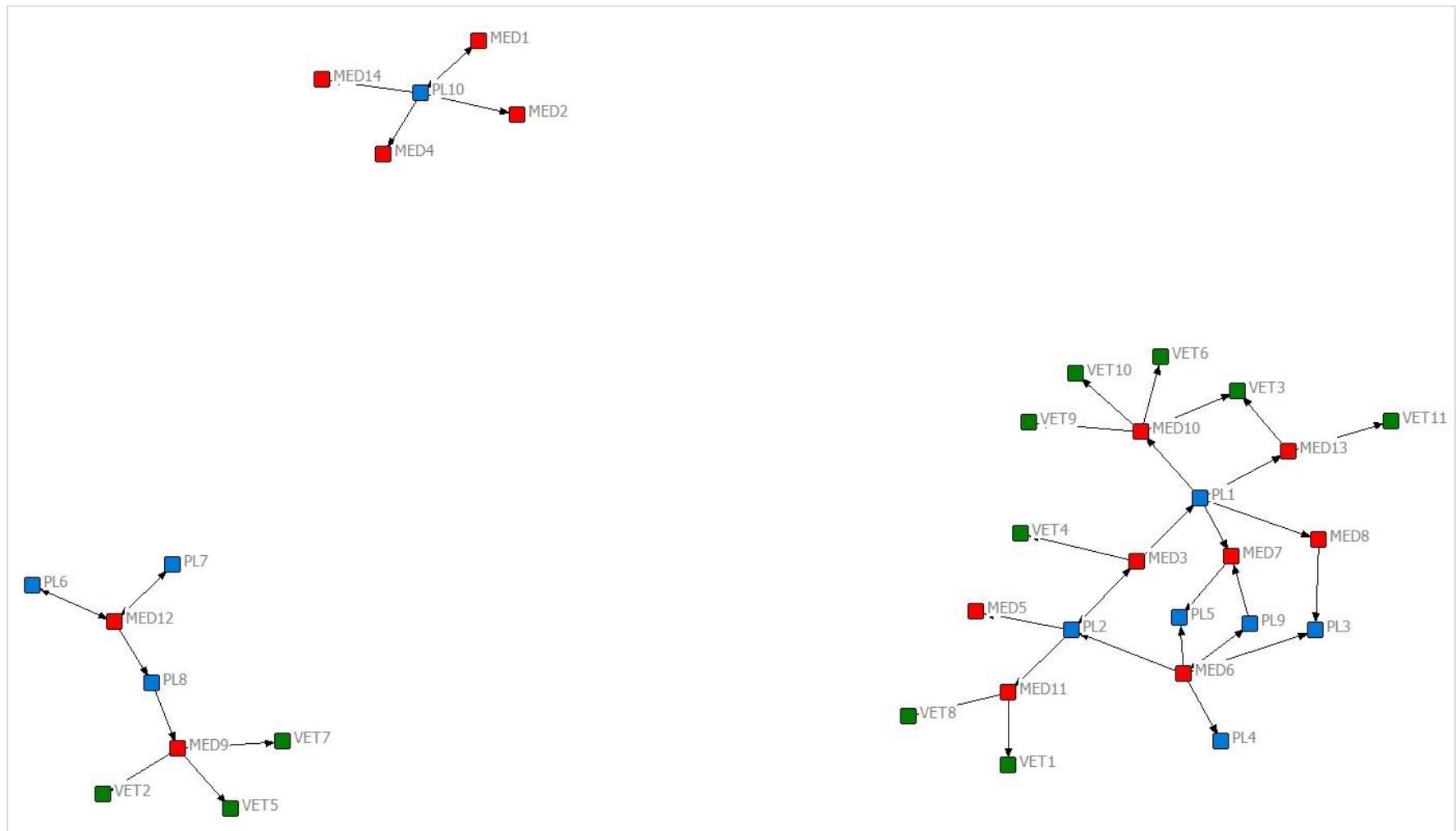


Figure 4.3 : Réseau obtenu pour la première structure avec toutes les entreprises de l'activité centrale sélectionnées ($\varepsilon=0\%$)

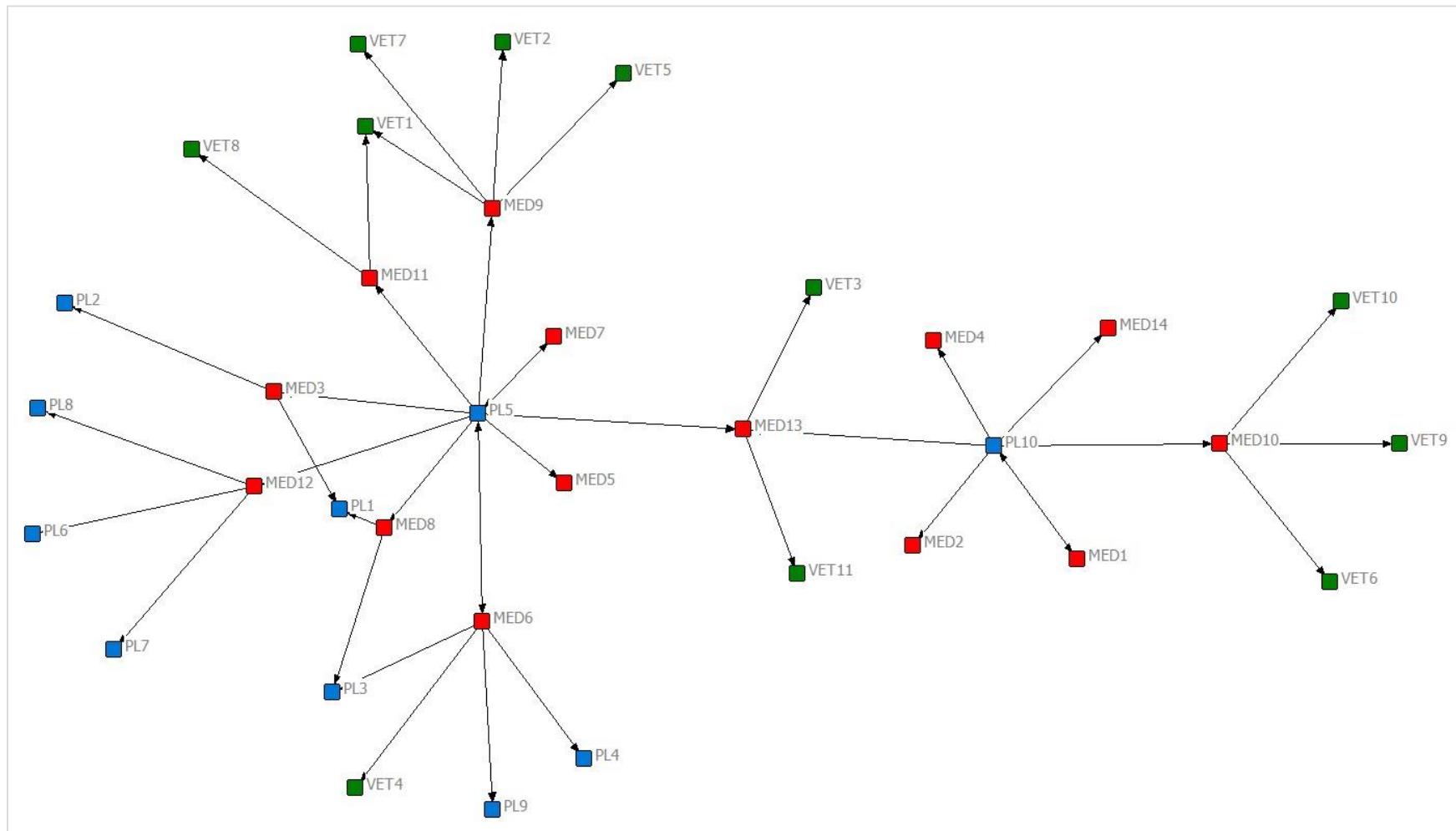


Figure 4.4 : Réseau obtenu pour la première structure avec toutes les entreprises de l'activité centrale sélectionnées ($\varepsilon=20\%$)

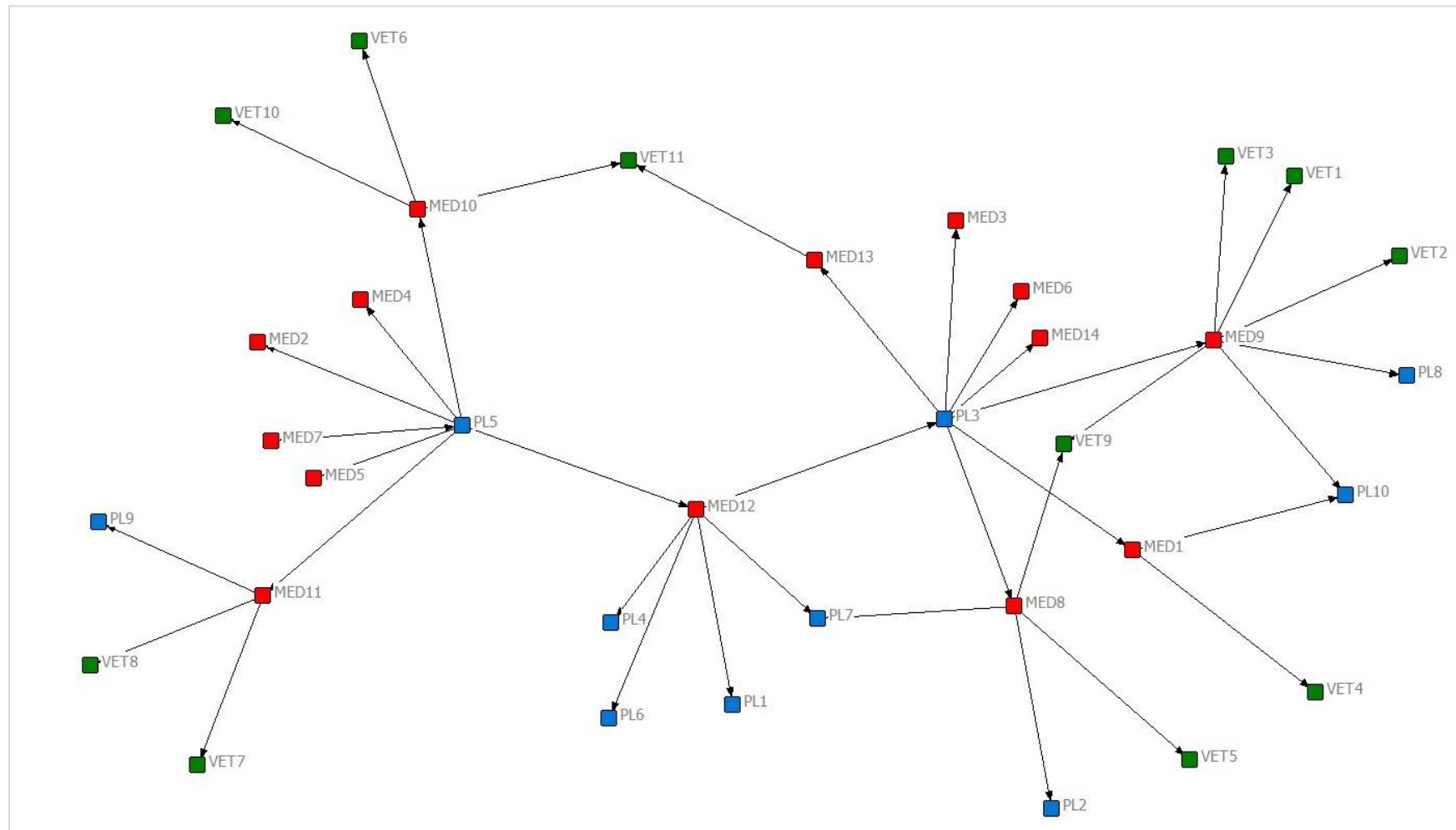


Figure 4.5 : Réseau obtenu pour la première structure avec toutes les entreprises de l'activité centrale sélectionnées ($\varepsilon=50\%$)

4.2.1.3 Expérimentation pour un nombre réduit d'entreprises de l'activité centrale

A moindre échelle, il peut être intéressant de construire un réseau autour d'un nombre restreint d'entreprises de l'activité centrale. Ceci correspond à une situation plus réaliste pour un animateur qui les aurait par exemple identifiées au préalable et sensibilisées au processus de symbiose industrielle.

Pour cette expérimentation, les trois entreprises que nous avons sélectionnées sont MED01, MED04 et MED08 car elles sont relativement espacées sur l'Île-de-Montréal et ceci retranscrit convenablement l'étendue de notre zone d'études (figure 4.2). De plus, comme nous le verrons dans cette section, la sélection de trois entreprises engendre la proposition d'un nombre de synergies et de collaborateurs non négligeable. Un animateur pourrait débuter son étude de ces trois entreprises et étudier comment mettre en place les synergies pour créer un réseau de symbiose industrielle sur cette base. Nous nous assurons tout d'abord que les quantités sont adéquates pour que ces trois entreprises de l'activité centrale puissent participer à tous les types de synergie, conformément aux conclusions établies dans la section précédente. Le tableau 4.6 compare les quantités de matières reliées à ces entreprises, aux quantités totales proposées par les entreprises périphériques. La domination de l'ensemble des entreprises périphériques pour les quantités de matières relatives à chaque type de matière nous laisse supposer qu'un choix d'entreprises périphériques pourra être effectué par le modèle pour tous les types de synergies.

Tableau 4.6 : Comparaison des quantités totales entre les entreprises choisies de l'ensemble C et l'ensemble P, pour chaque matière

Palettes de bois		Contenants en carton		Déchets plastiques	
Quantité totale demandée [unités]	Quantité totale offerte [unités]	Quantité totale demandée [unités]	Quantité totale offerte [unités]	Quantité totale demandée [kg]	Quantité totale offerte [kg]
1 020	30 412	59 200	42 173	374 339	157 423

Nous avons expérimenté plusieurs valeurs de ϵ : {0%, 5%, 20%, 40%}. Les réseaux obtenus sont visualisables respectivement sur les figures 4.6, 4.7, 4.8 et 4.9. Dans cette situation, toutes les entreprises de l'activité centrale reçoivent leur quantité demandée en matière résiduelle et distribuent chacune la totalité de leur quantité offerte pour chaque type de matière correspondante. Sur ces figures le rôle central de ces trois entreprises est effectivement visible. Elles sont

concernées par tous les types de synergies. En effet, chaque nœud rouge possède au moins un arc vers un nœud vert, un arc vers un nœud bleu et un arc provenant d'un nœud bleu. Le degré minimum d'un nœud rouge est donc de 3, ce qui en fait un acteur prépondérant en termes de nombre de relations dans le réseau.

Les résultats relatifs aux coûts des réseaux proposés, le recensement du nombre d'entreprises sélectionnées pour chaque type d'échange avec les entreprises de l'activité industrielle centrale et les calculs d'indicateurs propres à l'analyse sociale des réseaux sont représentés au tableau 4.7. Tout d'abord, le scénario 0 propose le coût total optimal pour la résolution du modèle avec ces trois entreprises de l'activité centrale. C'est le scénario qui correspond au plus grand nombre d'entreprises périphériques impliquées. Les scénarios 1, 2, et 3 réduisent effectivement le nombre d'entreprises périphériques sélectionnées pour tous les types de synergies au détriment d'un coût total plus élevé alors que la quantité totale de matières résiduelles échangées reste la même. Dans une stratégie de mise en place de réseaux, cette caractéristique peut être intéressante car le démarchage des entreprises par un animateur constitue un travail non négligeable et réduire le réseau de quelques entreprises pour la même quantité d'échange est un avantage notable. Lorsque l'on n'impose pas de plafond de limite de coût total ($\epsilon = \infty$, non représenté dans le tableau), l'écart relatif par rapport au coût optimal est de 59,84%. Dans ce scénario, la sélection d'entreprises périphériques et des synergies à mettre en place est la plus faible avec seulement 11 entreprises périphériques impliquées contre 15 au scénario 0, pour les mêmes quantités de matières échangées. Dans l'optique de mettre en place un réseau à partir de ces résultats, l'animateur doit pouvoir évaluer s'il a un intérêt à éléver les coûts totaux liés aux synergies en faveur du nombre d'entreprises impliquées, ce qui constituerait un travail plus efficace pour lui dans une optique de démarchage des entreprises sélectionnées et de mise en place des synergies. Chaque approche d'un nouvel acteur peut être coûteuse en temps de travail et en termes économiques. Dans cette situation, s'autoriser un écart de 5% du coût total diminue de 2 le nombre d'entreprises périphériques impliquées pour un type de synergie. A 20% du coût optimal, ce nombre diminue encore d'une entreprise. Rappelons également que la faisabilité économique est toujours respectée et les entreprises qui reçoivent des matières feront tout de même des bénéfices par rapport à la situation où elles étaient approvisionnées par leur fournisseur initial.

D'un point de vue structurel, les indicateurs propres à l'analyse sociale des réseaux développés à la section 2.3 de notre revue de littérature peuvent être calculés et interprétés. Du point de vue

global dans le réseau, l'augmentation de ϵ montre également que la réduction du nombre d'entreprises sélectionnées pour participer aux synergies permet d'obtenir un meilleur chemin moyen le plus court (colonne 'ASPL', tableau 4.7) et la mise en place d'un réseau avec le plus faible chemin moyen le plus court est un réseau avec une meilleure connexion entre toutes les entreprises impliquées. En guise de comparaison et de référence, le chemin moyen le plus court calculé pour le parc éco-industriel de Gujiao en Chine par Song et al. (2018) est de 1,893 et le réseau est, dans ce cas, qualifié de bien connecté. Du point de vue individuel, nous remarquons que les meilleurs indicateurs de *Betweenness Centrality* (colonne 'BC', tableau 4.7) sont obtenus de manière générale par les trois entreprises de l'activité industrielle centrale (en caractère gras dans la colonne 'BC' du tableau 4.7). La structure proposée et les quantités en jeu discutées au début de cette section justifient leur potentiel à jouer un rôle clé dans l'échange de matières résiduelles. Selon les scénarios, PL09 et PL10 apparaissent également comme des entreprises avec cet indicateur non-nul. Ceci est dû au fait que les entreprises de l'ensemble {PL01,...,PL10} puissent opérer deux types d'échanges (figure 4.1) :

- « Vers le centre du réseau » grâce à la distribution de palettes aux entreprises de l'activité centrale
- « Vers la périphérie de réseau » grâce à la réception de déchets plastiques par les entreprises de l'activité centrale

A cet effet, en raison de la direction non unique des flux, ceci leur donnera un potentiel à influencer sur l'échange de matières résiduelles dans le réseau.

Tableau 4.7 : Tableau récapitulatif premier exemple, application pour 3 entreprises de l'activité industrielle centrale

			Nombre d'entreprises périphériques ...				
Scénario	€	Coût total lié aux synergies (\$)	recevant des déchets plastiques	recevant des contenants en carton	distribuant des palettes de bois	ASPL	BC
0	0%	17 244	5	8	2	2.020	MED04 15.00
							MED08 12.00
							PL09 11.00
							PL10 8.000
							MED01 5.000
1	5%	17 960	5	7	1	1.658	MED04 12.00
							PL10 8.000
							MED01 3.500
							MED08 1.500
2	20%	19 475	4	7	1	1.606	MED04 7.500
							PL10 6.000
							MED01 5.000
							MED08 1.500
3	40%	23 667	4	7	1	1.379	MED01 6.500
							MED04 3.500
							MED08 1.000

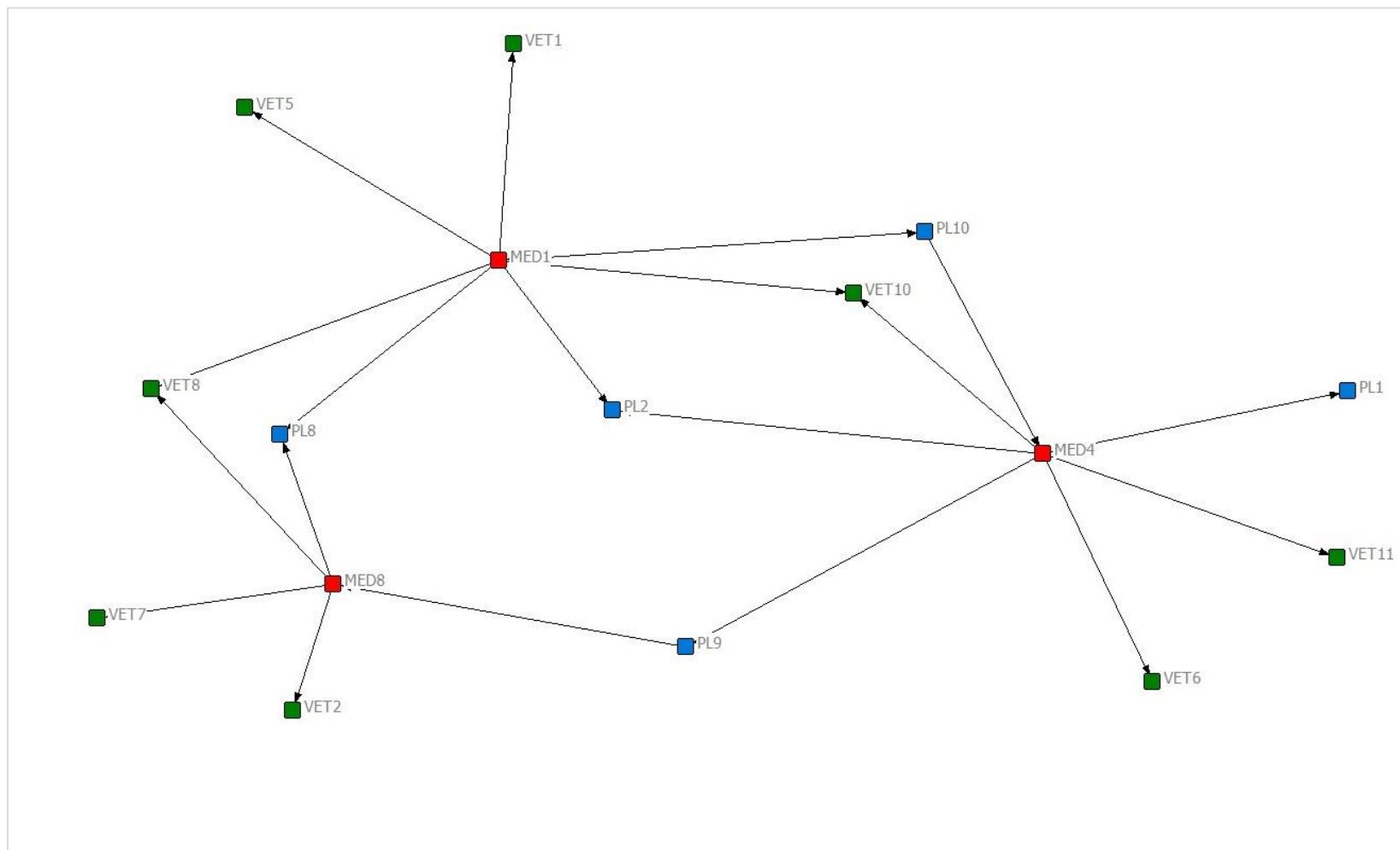


Figure 4.6 : Réseau obtenu pour la première structure avec 3 entreprises de l'activité centrale sélectionnées ($\varepsilon=0\%$)

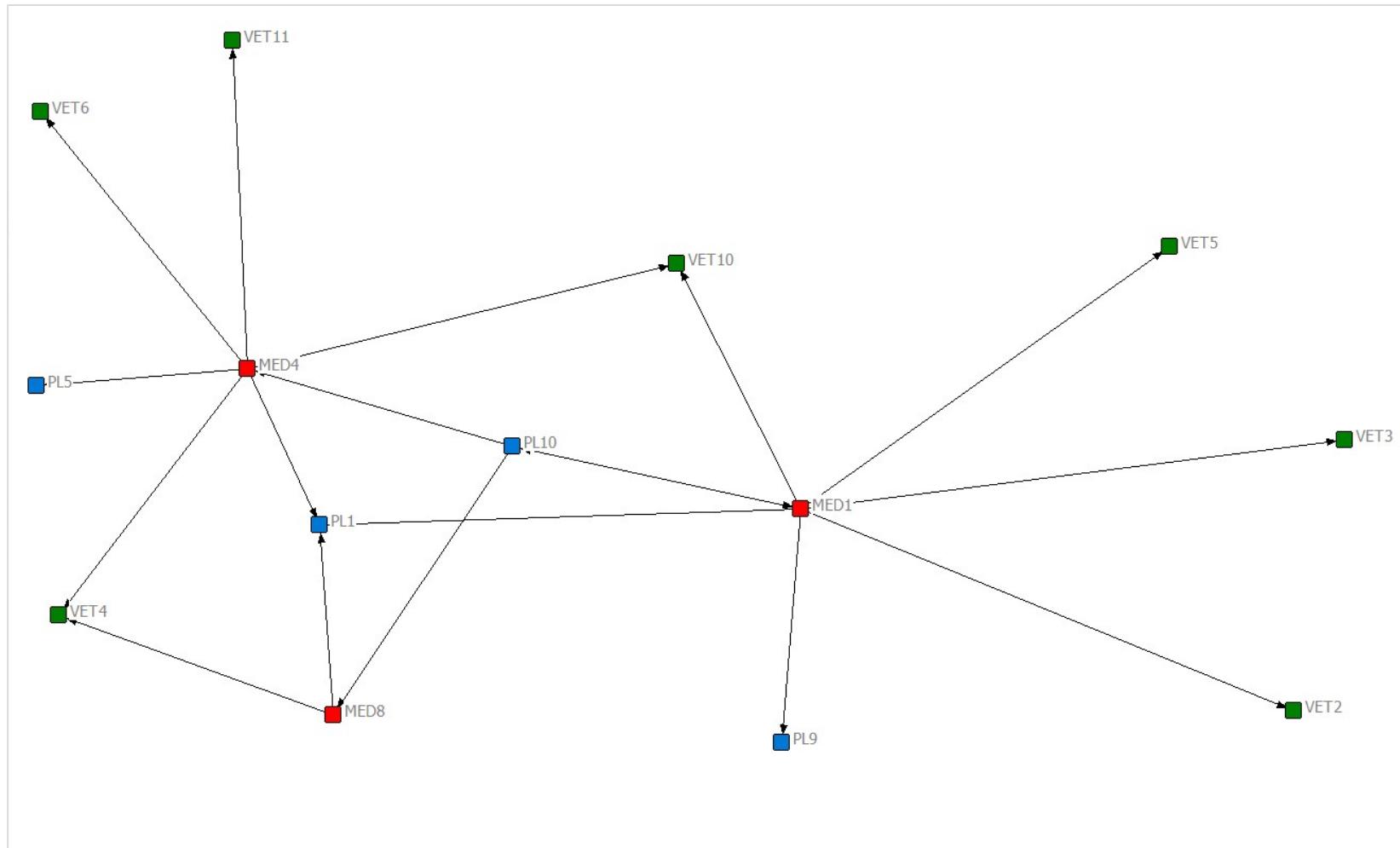


Figure 4.7 : Réseau obtenu pour la première structure avec 3 entreprises de l'activité centrale sélectionnées ($\varepsilon=5\%$)

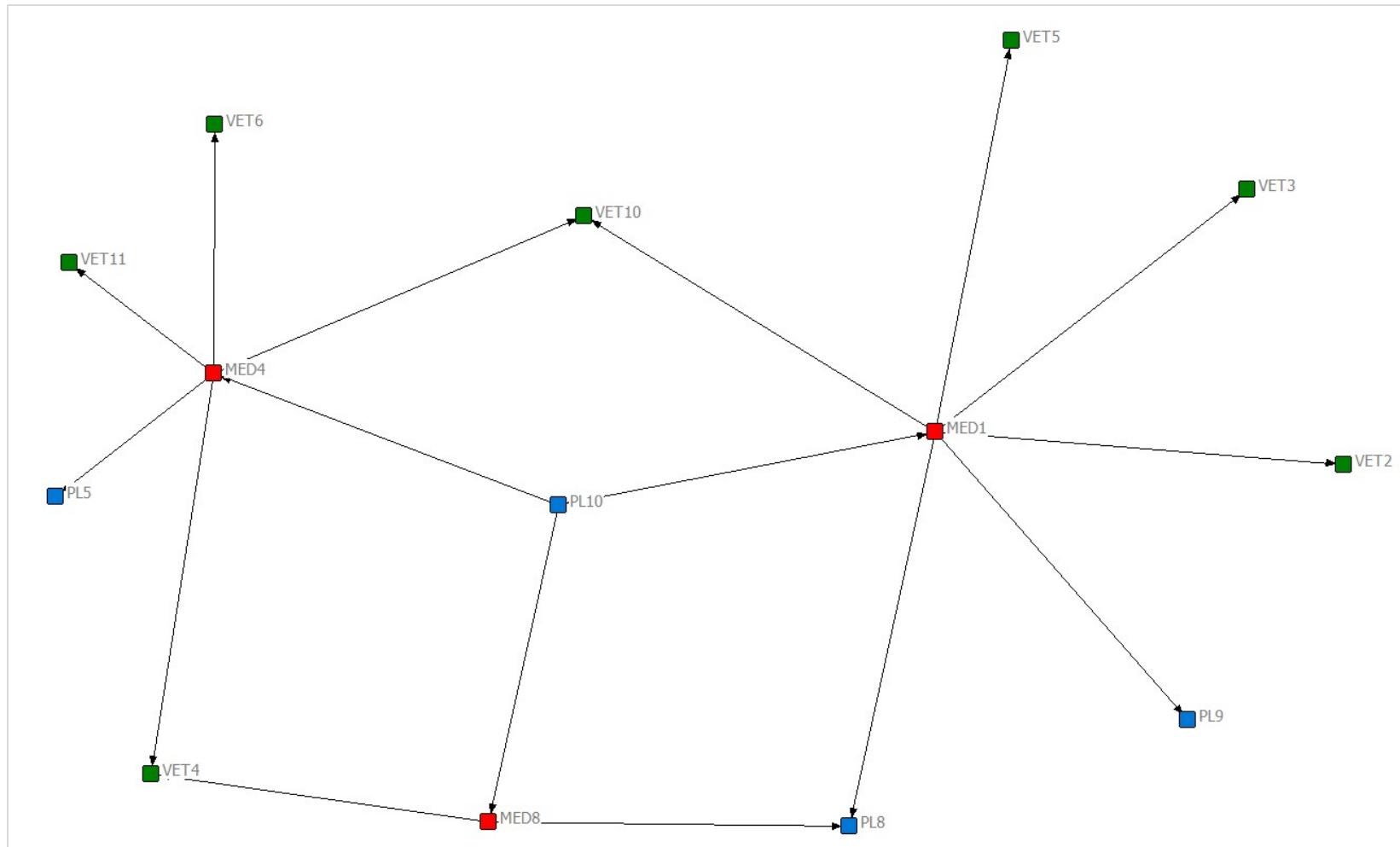


Figure 4.8 : Réseau obtenu pour la première structure avec 3 entreprises de l'activité centrale sélectionnées ($\epsilon=20\%$)

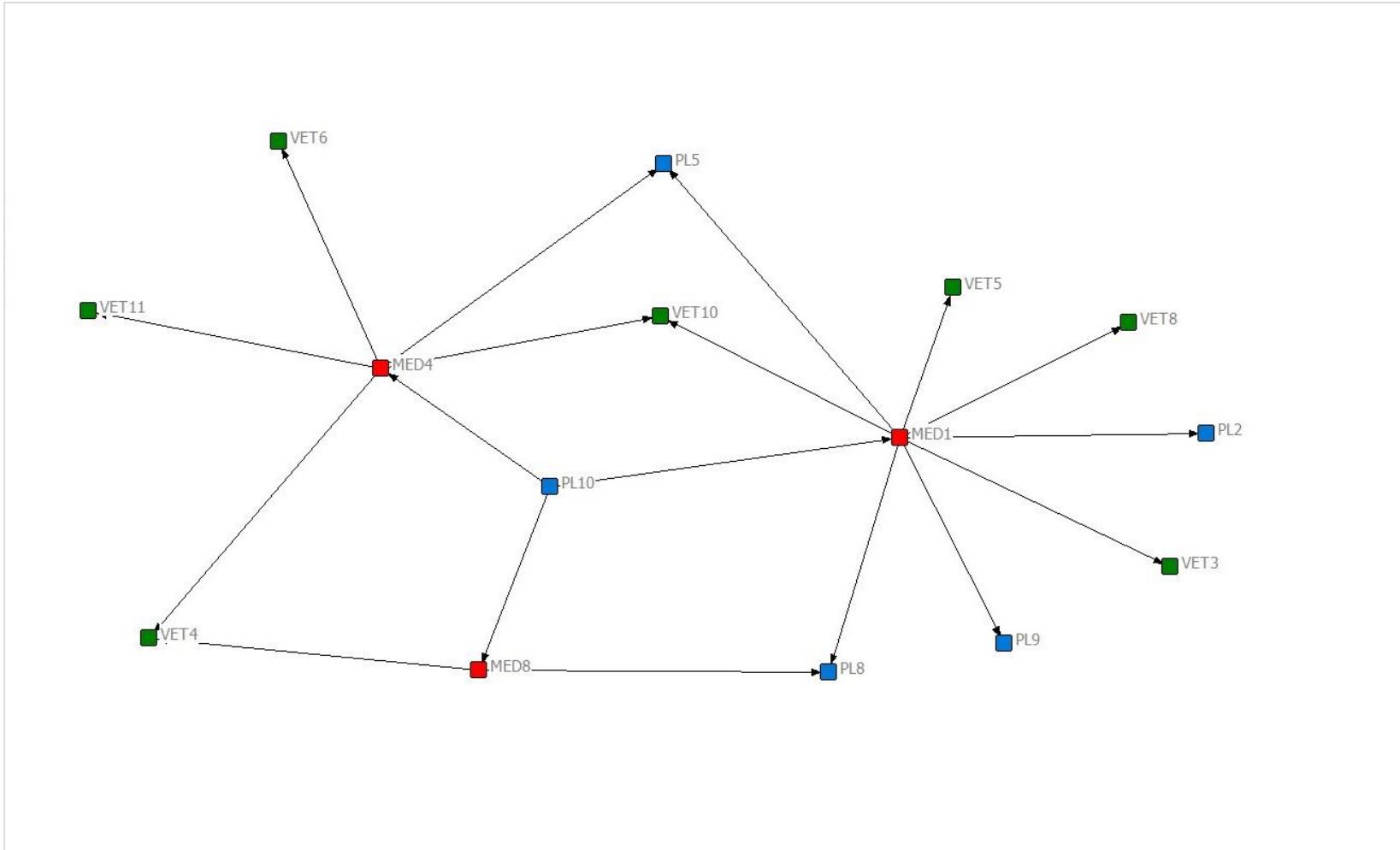


Figure 4.9 : Réseau obtenu pour la première structure avec 3 entreprises de l'activité centrale sélectionnées ($\epsilon=40\%$)

4.3 Étude d'un deuxième exemple

La deuxième structure hypothétique identifiée est représentée sur la figure 4.10. Les hypothèses sont les suivantes :

- L'activité industrielle centrale sélectionnée est l'activité industrielle ‘Fabrication de revêtements, peintures et adhésifs’ (classe SCIAN ‘325510’).
- Les activités périphériques associées sont les activités ‘Fabrication d'appareils d'éclairage’ (classe SCIAN ‘335120’), ‘Fabrication de portes et de fenêtres en métal’ (classe SCIAN ‘332321’) et ‘Fabrication de fournitures et de matériel médicaux’ (classe SCIAN ‘339110’)
- Toutes les tailles de palettes de bois sont homogènes et peuvent prétendre à être échangées. Nous parlerons donc simplement d’unités sans différencier les gabarits.
- Les déchets plastiques et d’aluminium générés sont homogènes et peuvent être réutilisés directement par les entreprises demandeuses (nous supposons que ces entreprises possèdent les technologies pour les convertir en matière première utilisable).

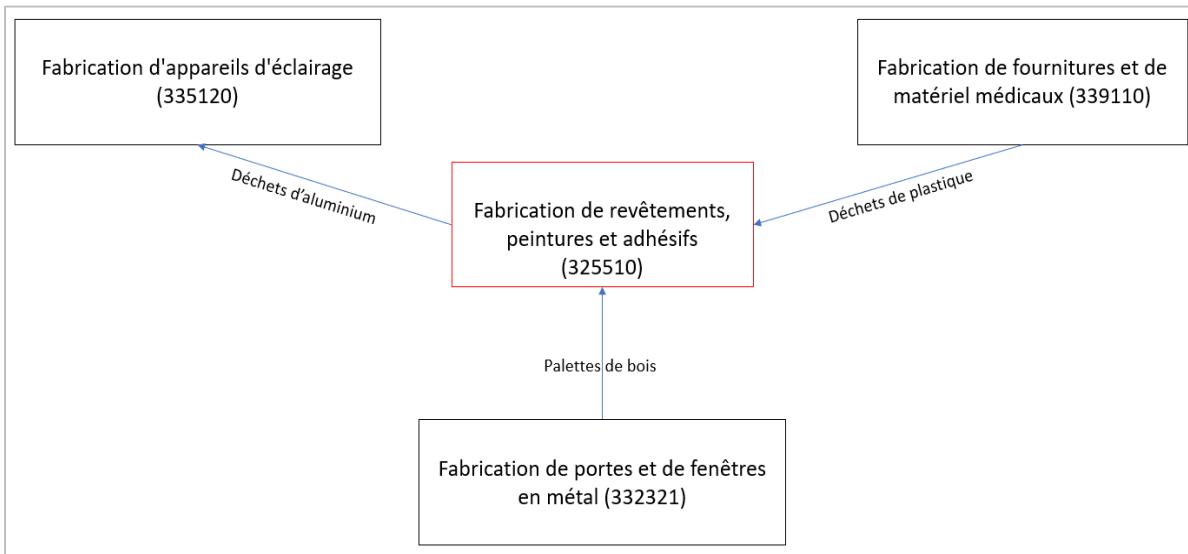


Figure 4.10 : Deuxième structure d'étude

Ce deuxième exemple diffère du premier dans la morphologie de la structure initiale car une entreprise périphérique ne peut être sollicitée que pour un type de matière.

Les tableaux 4.8 et 4.9 résument respectivement les différentes quantités annuelles demandées et offertes pour chaque activité industrielle de notre structure. Les prix unitaires ont été relevés à partir de prix du marché pour les matières évoquées. Les quantités offertes ont été générées dans ce cas à partir des données non-publiques fournies par le CTTÉI pour les déchets de plastique et les palettes de bois. Les quantités offertes pour les déchets d'aluminium ont été générées à l'aide des ressources en commodités par secteur industriel. Nous sélectionnons donc ensuite les entreprises appartenant à ces activités industrielles et se situant dans notre zone d'études. Ainsi, pour l'activité industrielle centrale '325510' nous relevons 13 entreprises, pour l'activité industrielle '335120' nous relevons 13 entreprises, pour l'activité industrielle '339110' nous relevons 14 entreprises et pour l'activité industrielle '332321' nous relevons 13 entreprises.

Tableau 4.8 : Quantités annuelles de matières résiduelles demandées par activité industrielle pour la deuxième structure

Type de matière	Activité industrielle	Quantité annuelle demandée [\$/employé]	Unité de référence	Prix unitaire [\$/unité de référence]	Quantité annuelle demandée [unité/employé]
Déchets d'aluminium	Fabrication d'appareils d'éclairage	100	kg	0,9 ⁶	111
Déchets de plastique	Fabrication de peintures, revêtements et adhésifs	400	kg	0,265	1509
Palettes de bois	Fabrication de peintures, revêtements et adhésifs	300	unités	15	20

⁶ Tiré de : <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/municipalites/collecte-selective-municipale/indice-prix-matieres>, année 2014.

Tableau 4.9 : Quantités annuelles de matières résiduelles offertes par activité industrielle pour la deuxième structure (N correspond au nombre d'employés de l'entreprise)

Type de matière	Activité industrielle	Quantité annuelle offerte [\$/employé]	Prix de revente [\$/kg]	Quantité annuelle offerte	Unité
Déchets d'aluminium	Fabrication de peintures, revêtements et adhésifs	147	0,9	163	kg
Déchets de plastique	Fabrication de fournitures et de matériel médicaux			3087	kg
Palettes de bois	Fabrication de portes et de fenêtres en métal			144 * N - 530	unités

4.3.1 Affectation des synergies à l'aide de l'outil mathématique

4.3.1.1 Modélisation et paramètres

Comme pour le premier exemple nous avons utilisé le logiciel AIMMS afin d'expérimenter notre modèle. Les réseaux formés et les différents indicateurs pertinents ont également été générés avec le logiciel UCINET 6.

Pour identifier les entreprises sélectionnées, nous utiliserons quatre indicatifs auxquels nous juxtaposserons des codes numériques:

- L'indicatif REV correspond aux entreprises de l'activité industrielle centrale ‘Fabrication de revêtements, peintures et adhésifs’.
- L'indicatif MED correspond aux entreprises de l'activité industrielle périphérique ‘Fabrication de fournitures et de matériel médicaux’.
- L'indicatif ECL correspond aux entreprises de l'activité industrielle périphérique ‘Fabrication d'appareils d'éclairage’.
- L'indicatif FEN correspond aux entreprises de l'activité industrielle périphérique ‘Fabrication de portes et de fenêtres en métal’.

Les ensembles C et P ont été définis comme suit :

$$C = \{REV01, \dots, REV13\}$$

$$P = \{MED01, \dots, MED14, ECL01, \dots, ECL13, FEN01, \dots, FEN13\}$$

La localisation géographique de ces entreprises est représentée en figure 4.11.

Les distances entre les entreprises ont été calculées avec l'outil Google Maps. Concernant les paramètres économiques, le tableau 4.10 résume les paramètres utilisés. Par manque d'information sur l'origine des fournisseurs initiaux et sur les dispositions finales de traitement des matières résiduelles, les coûts de transports unitaires moyens à ces effets n'ont pas été considérés. Les coûts liés à ces deux dispositions seront uniquement le coût unitaire de la matière par le fournisseur initial et la redevance unitaire de traitement de la matière résiduelle. Les quantités offertes et demandées sur la période pour chaque entreprise sont disponibles en annexe B.

Les paramètres δ_1 et δ_2 ont été fixés respectivement à 95% et 100% afin de se rapprocher convenablement des demandes exprimées par chacune des entreprises sans pour autant rendre trop contraignante la résolution.

Tableau 4.10 : Paramètres économiques utilisés pour la deuxième structure

Paramètre	Valeur	Unité
$t_{plastique}$	0,007	\$/ kg.km
$t_{palettes}$	0,175	\$/unité.km
$t_{aluminium}$	0,007	\$/ kg.km
$s_j^k, \forall (j, k)$	0	
$l_i^k, \forall (i, k)$	0	
$e_k, \forall k$	0	
$r_{palettes}$	0,023	\$/kg
$r_{plastique}$	0	
$r_{aluminium}$	0,023	\$/kg
$p_{plastique}$	0,265	\$/kg
$p_{palettes}$	15	\$/unité
$p_{aluminium}$	0,9	\$/kg

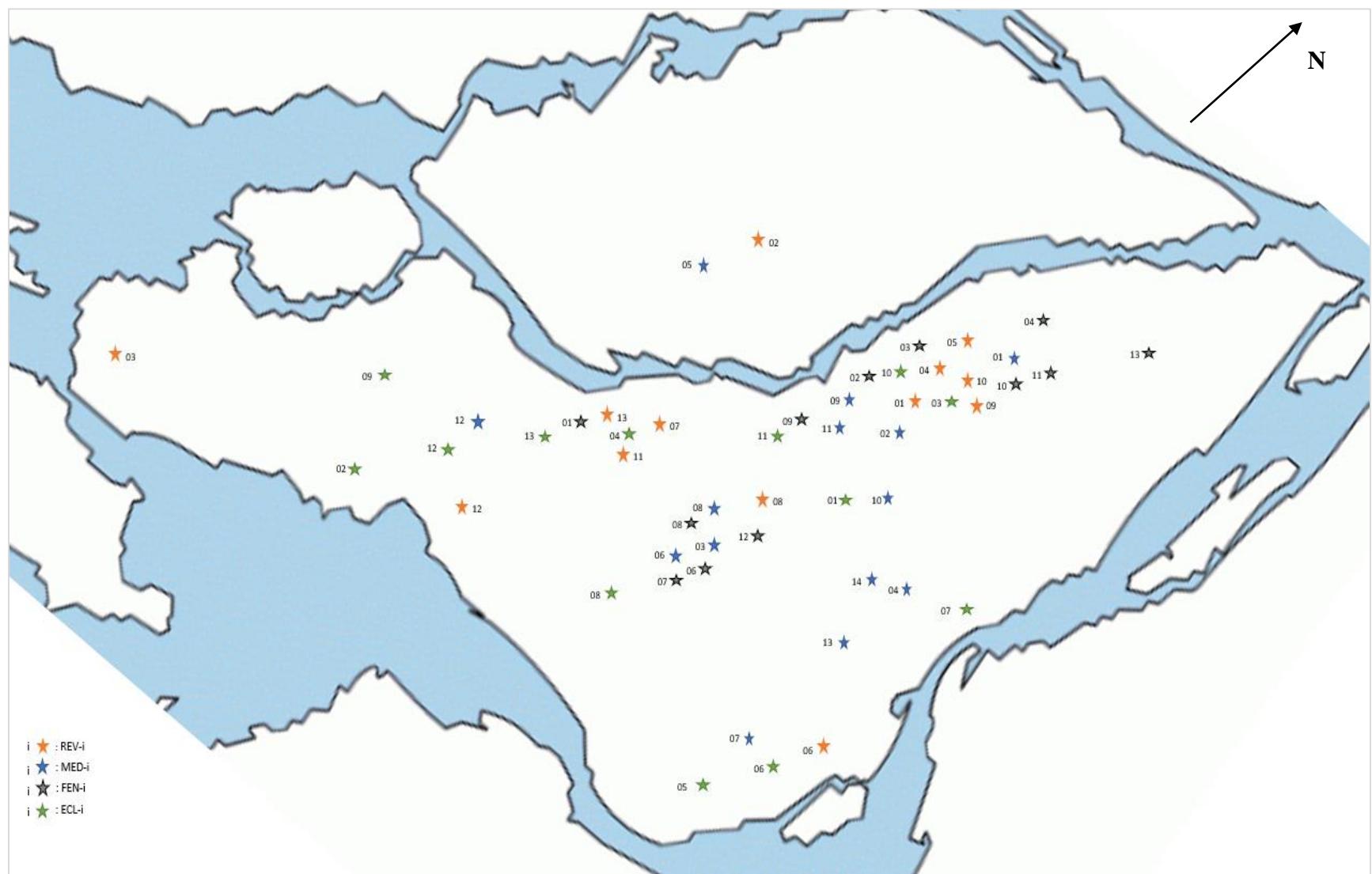


Figure 4.11 : Localisation des différentes entreprises relevées pour la deuxième structure

4.3.1.2 Expérimentation pour une sélection de quelques entreprises de l'activité centrale

Pour cette expérimentation, nous allons directement expérimenter à partir de trois entreprises de l'activité centrale afin d'imiter une situation réaliste et pour laquelle les quantités en jeu seront adéquates, conformément aux conclusions de la section 4.2.1.3. Les trois entreprises sélectionnées sont REV12, REV05 et REV06, ce qui constituera une nouvelle application où les entreprises se trouvent dans des zones relativement éloignées de l'Île-de-Montréal (figure 4.11). Le tableau 4.11 met en avant la comparaison des quantités de matières reliées à ces entreprises, et des quantités totales proposées par les entreprises périphériques. De la même manière que pour le premier exemple, nous relevons que les quantités en jeu permettront à l'outil d'effectuer une sélection d'entreprises périphériques dans un nombre plus faible que pour la solution à moindre coût.

Tableau 4.11 : Comparaison des quantités totales entre les entreprises choisies de l'ensemble C et l'ensemble P, pour chaque matière

Palettes de bois		Déchets d'aluminium		Déchets plastiques	
Quantité totale demandée [unités]	Quantité totale offerte [unités]	Quantité totale demandée [kg]	Quantité totale offerte [kg]	Quantité totale demandée [kg]	Quantité totale offerte [kg]
1 720	30 838	108 111	14 041	129 811	1 392 110

Nous avons expérimenté plusieurs valeurs de ϵ : {0%, 5%, 15%, 30%}. Les réseaux obtenus sont visualisables sur les figures 4.12, 4.13, 4.14 et 4.15. Les entreprises de l'activité centrale sont représentées par les nœuds oranges.

- Un arc orienté d'un nœud orange vers un nœud vert correspond à une synergie pour des déchets d'aluminium
- Un arc orienté d'un nœud noir vers un nœud orange correspond à une synergie pour des palettes bois
- Un arc orienté d'un nœud noir vers un nœud orange correspond à une synergie pour des déchets plastique

Sur ces figures le rôle central des trois entreprises de l'activité centrale est effectivement visible. Elles sont concernées par tous les types de synergies. En effet, chaque nœud orange possède au moins un arc orienté vers un nœud vert, un arc orienté provenant d'un nœud noir et un arc orienté

provenant d'un nœud bleu. Tous les réseaux obtenus sont bien connexes grâce à des entreprises périphériques qui permettent de faire le lien entre les entreprises de l'activité centrale.

Les résultats relatifs aux coûts des réseaux proposés, le recensement du nombre d'entreprises sélectionnées pour chaque type d'échange avec les entreprises de l'activité industrielle centrale et les calculs d'indicateurs sont représentés au tableau 4.12. Tout d'abord, le scénario 0 offre la solution à coût minimum sans prendre en compte la sélection du nombre d'entreprises périphériques. Le nombre total d'entreprises périphériques participant aux synergies dans ce cas est de 11. Lorsque nous prenons en compte la deuxième fonction objectif (scénarios 1, 2, 3 et 4), le nombre d'entreprises sélectionnées diminue au détriment du coût total des synergies au même titre que dans le premier exemple. Ainsi, dans le scénario 4, pour $\epsilon = 30\%$, le nombre d'entreprises périphériques sélectionnées par l'outil diminue à 7.

D'un point de vue structurel, les calculs d'indicateurs *Betweenness Centrality* (colonne 'BC' dans le tableau 4.12) nous montrent que les trois entreprises de l'activité centrale sélectionnée jouent effectivement ce rôle central qui leur permet d'influer sur l'échange de matières résiduelles dans le réseau. Contrairement au premier exemple (section 4.2.1.3), les entreprises périphériques sélectionnées ne peuvent intervenir que dans un seul type d'échange avec les entreprises de l'activité centrale. Ainsi, elles ne peuvent se retrouver sur un chemin entre deux entreprises du réseau. Du point de vue du réseau entier, les calculs des chemins moyens les plus courts (colonne 'ASPL' dans le tableau 4.12) nous montrent que les réseaux sont globalement bien connectés dans tous les scénarios.

Tableau 4.12 : Tableau récapitulatif deuxième exemple, application pour 3 entreprises de l'activité industrielle centrale

			Nombre d'entreprises périphériques ...					
Scénario	€	Coût total lié aux synergies (\$)	offrant des déchets plastiques	offrant des palettes de bois	distribuant des déchets d'aluminium	ASPL	BC	
0	0%	9 735	3	3	5	1.519	REV12	6.000
							REV05	4.000
							REV06	4.000
1	5%	10 222	3	3	3	1.476	REV05	6.000
							REV06	2.000
							REV12	2.000
2	15%	11 195	3	2	3	1.478	REV05	4.000
							REV06	3.500
							REV12	3.500
3	30%	12 656	2	2	3	1.455	REV05	8.333
							REV06	0.833
							REV12	0.833

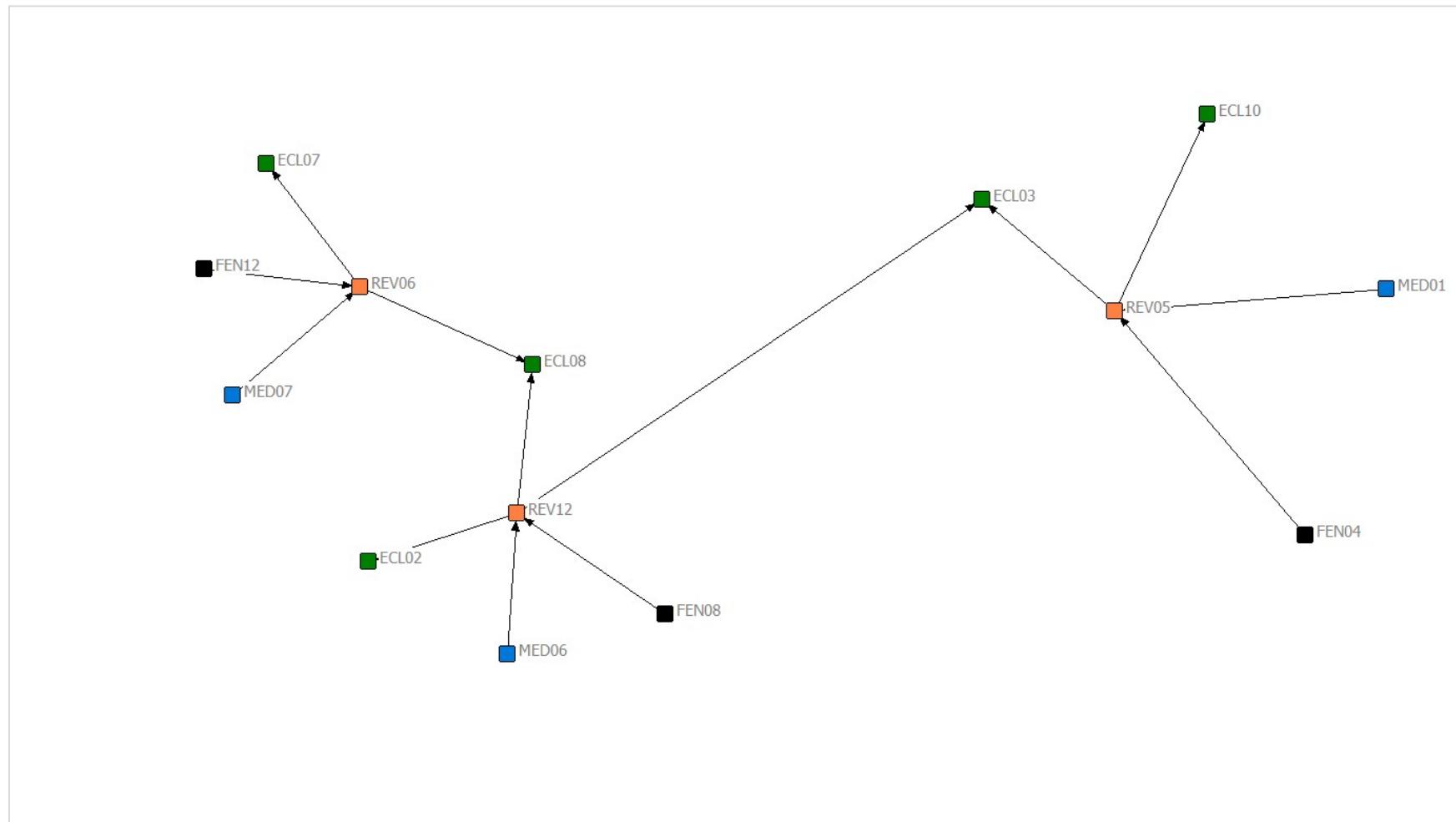


Figure 4.12 : Réseau obtenu pour la deuxième structure avec 3 entreprises de l'activité centrale sélectionnées ($\varepsilon=0\%$)

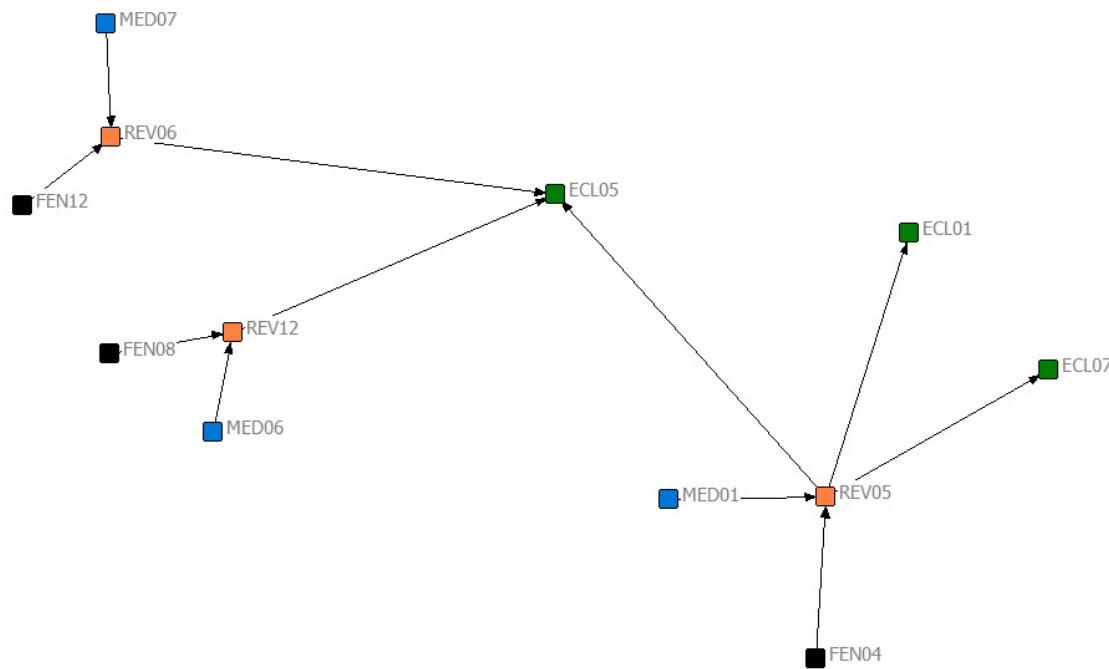


Figure 4.13 : Réseau obtenu pour la deuxième structure avec 3 entreprises de l'activité centrale sélectionnées ($\varepsilon=5\%$)

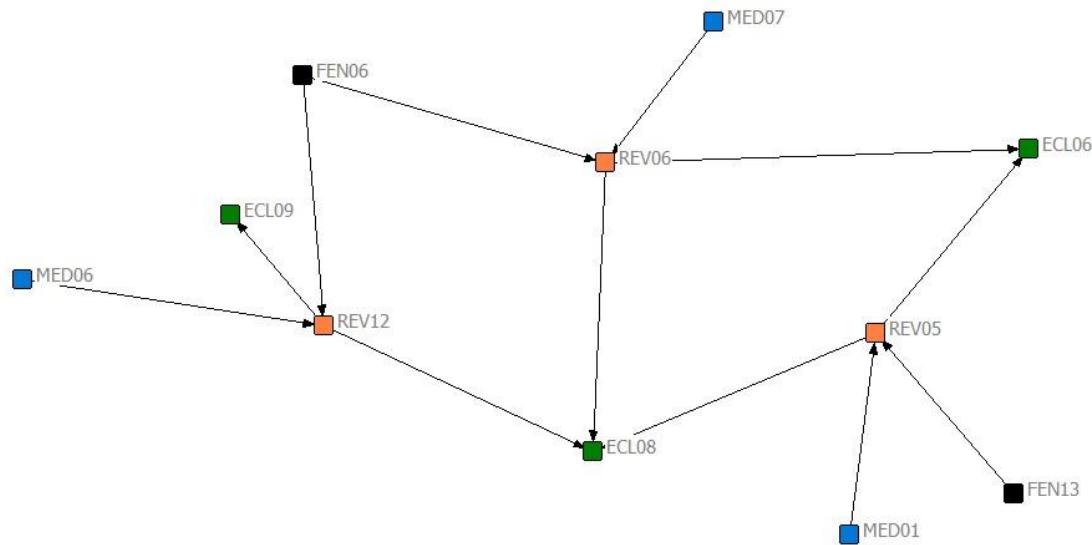


Figure 4.14 : Réseau obtenu pour la deuxième structure avec 3 entreprises de l'activité centrale sélectionnées ($\varepsilon=15\%$)

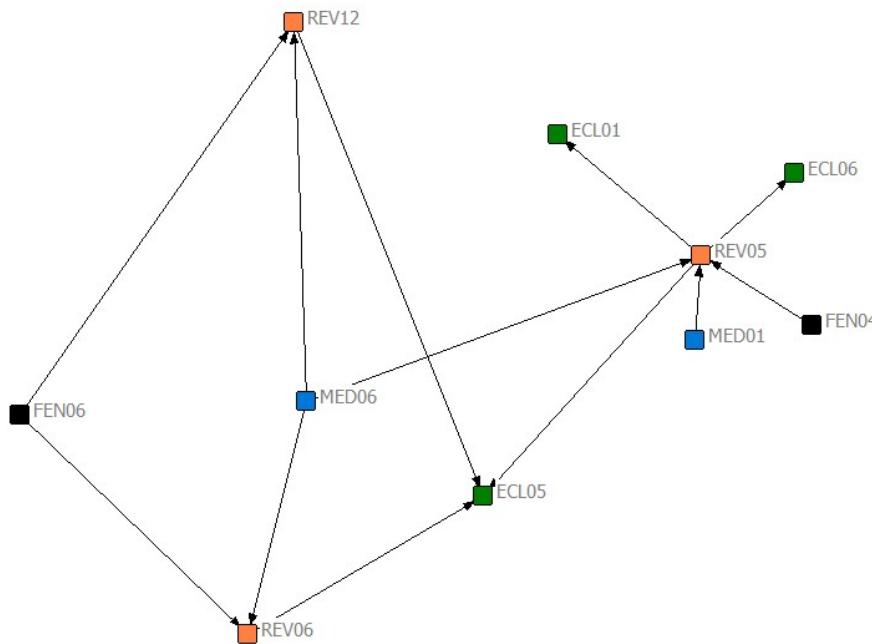


Figure 4.15 : Réseau obtenu pour la deuxième structure avec 3 entreprises de l'activité centrale sélectionnées ($\epsilon=30\%$)

4.4 Utilisation des résultats et approche itérative pour la mise en place des synergies

L'objectif de cette méthode est d'aboutir à la création d'un réseau de symbiose industrielle. Ainsi, l'approche par activité industrielle, le choix d'entreprises et la proposition de synergies grâce à l'application d'un outil mathématique constituent un potentiel de mise en place. Afin de procéder à une mise en place réelle, des précisions sur l'utilisation de cet outil sont nécessaires. Ainsi, cet outil propose une approche macro pour la mise en place de symbioses industrielles. L'objectif ici est donc de se diriger vers une approche plus fine pouvant aboutir à une solution réalisable. Cependant, la particularité de cette approche macro est que les entreprises sélectionnées (centrales ou périphériques) ne sont pas nécessairement sensibilisées au processus de symbiose industrielle. C'est pour cela que nous proposons l'utilisation de l'outil de manière itérative. Par exemple, il peut être intéressant d'approcher une première entreprise de l'activité centrale et de travailler par type de matière. Ainsi, l'animateur tenterait de combler son offre (ou sa demande, selon le type d'intérêt pour cette matière) en proposant les différentes synergies proposées par le modèle. Si une synergie est acceptée, alors il pourra la contraindre dans le modèle et passer à la suivante. Si elle est refusée pour quelque raison, il peut également la contraindre et relancer le modèle. De cette manière, quand toutes les entreprises et toutes les matières seront traitées, la solution obtenue sera la solution finale.

Notons qu'à chaque étape impliquant un dialogue avec les acteurs, il serait possible par exemple d'ajuster les paramètres qui n'ont pas été estimés correctement comme les quantités offertes ou demandées.

4.5 Conclusion sur les deux exemples

Dans ces deux exemples présentés, pour trois entreprises de l'activité centrale, le réseau de symbiose industrielle construit sur la base d'acteurs clés est bien obtenu. De cette manière, le potentiel de l'activité industrielle centrale à jouer un rôle clé est validé. Pour cela, les entreprises de l'activité industrielle centrale doivent tout d'abord participer à tous les types de synergies et aussi bien pour la distribution que pour la réception des matières résiduelles. C'est d'ailleurs cette dernière caractéristique qui leur permet de se retrouver sur des chemins les plus courts entre deux nœuds du réseau, et leur donnant ainsi la capacité d'influer sur l'échange de matières résiduelles

dans le réseau. De plus, ceci leur permet d'obtenir un nombre de relations relativement élevée avec les autres entreprises du réseau et ainsi d'acquérir de l'expérience en écologie industrielle. Ceci nous montre donc l'importance dans notre approche de vérifier au préalable les quantités de matières en jeu afin d'envisager l'intégration des entreprises de l'activité centrale dans tous les types de synergies. Certaines entreprises des activités périphériques peuvent également être impliquées pour plusieurs types de synergies, ce qui peut leur donner également un pouvoir d'influence sur le réseau. Ce n'est pas le cas pour le deuxième exemple où les entreprises périphériques sélectionnées ne peuvent intervenir que pour un type de synergie avec les entreprises de l'activité centrale.

La minimisation du nombre d'entreprises sélectionnées par l'outil permet effectivement de démarcher un nombre réduit d'entreprises périphériques, constituant un avantage pour la mise en place du réseau par un animateur externe. Cette minimisation permet également une meilleure connectivité du réseau. Ce potentiel doit être balancé par un animateur avec l'écart d'un coût optimal du réseau qui tendrait à augmenter de manière générale le coût des synergies proposées en gardant cependant la faisabilité économique. Nous remarquons également que la diminution du nombre d'entreprises périphériques sélectionnées par l'outil, diminue le nombre de liens exclusifs (une entreprise de l'activité périphérique qui n'établit qu'un seul lien avec une des entreprises de l'activité centrale). La conséquence est que certaines entreprises périphériques se retrouvent à distribuer un type de matière résiduelle pour plusieurs entreprises de l'activité industrielle centrale. Parallèlement, certaines entreprises périphériques vont recevoir leur matière demandée par plusieurs entreprises de l'activité industrielle centrale. On peut se rapprocher dans ce cas de synergies de mutualisation, c'est-à-dire plusieurs entreprises qui travaillent de manière groupée pour arriver à la mise en place des synergies. Cette conséquence peut également être bénéfique pour solidifier les liens entre les acteurs industriels et donc intégrer au mieux la symbiose industrielle dans la zone d'implantation.

CHAPITRE 5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La symbiose industrielle dans un cadre urbain offre son lot d'opportunités en termes d'entreprises présentes et de types de matières pouvant être impliquées dans des synergies. A cet effet, les possibilités d'approches pour mettre en place des réseaux de symbiose industrielle sont nombreuses. Les études déjà menées ont montré la possibilité de caractériser des opportunités de synergies en travaillant par activité industrielle. En effet, la catégorisation de flux de matières par procédé ou activité industrielle et la redondance de certaines activités industrielles ou synergies dans plusieurs exemples de réseaux existant permettent d'entrevoir cette approche pour un animateur. Traditionnellement, l'approche effectuée provient d'initiatives d'entreprises qui sollicitent des animateurs pour effectuer des recherches de potentiels. L'histoire a montré également que l'approche de Kalundborg provenait d'initiatives isolées. Dans ce mémoire, nous avons voulu procéder différemment avec une approche par activité industrielle débouchant sur des potentiels de synergies avec une sélection d'entreprises subséquente.

Nous nous sommes proposés d'étudier justement ce potentiel pour mettre en place des synergies sous forme de réseaux. Ainsi, en affirmant qu'une structure d'échanges potentielle entre plusieurs entreprises était possible, nous avons exploité la possibilité de mettre en place un réseau d'échanges autour d'une activité industrielle centrale dont les entreprises peuvent jouer un rôle clé grâce à leur implication dans plusieurs types de matières et pour plusieurs synergies. Cette mise en place est basée sur une sélection d'entreprises dites périphériques avec qui la collaboration est possible. A cet effet, cette contextualisation nous a permis d'établir des critères structurels comme une bonne connectivité du réseau et la présence d'acteurs clés. Ces critères sont pertinents au regard des analyses de symbiose industrielle faites à partir de l'analyse sociale des réseaux.

L'outil d'affectation des synergies que nous avons proposé permet justement de passer de ces structures globales à un réseau cohérent au regard des exemples évoqués. Même si la structure de base oriente les résultats vers la forme souhaitée, ceci est cependant soumis à des conditions sur les quantités relatives offertes et demandées pour chacune des matières entre l'activité industrielle centrale et les entreprises périphériques. Notre outil permet une sélection minimale d'entreprises périphériques à coût économique global contrôlé des synergies, pour obtenir une facilité de mise en place et les caractéristiques structurelles souhaitées. Une situation de mise en place réaliste nécessite initialement quelques entreprises d'une activité centrale qu'un animateur aurait

identifiées grâce à ses connaissances et recherches préalables, et beaucoup d'entreprises périphériques également identifiées et pouvant participer à des synergies. Ainsi, nous proposons l'utilisation de notre outil en une approche itérative où la prospection des synergies proposées se ferait en parallèle d'un ajustement et d'une actualisation des solutions proposées.

Limites du modèle et recommandations

Dans un premier temps, la catégorisation des flux de matière par activité industrielle telle que nous l'avons décrite influe sur la validité de la méthode. De cette manière, nous avons supposé beaucoup d'associations potentielles entre entreprises qui pourraient être discutables. Ainsi, l'hypothèse structurelle établie se doit d'être précisée et confirmée pour une exploitation réelle de la méthode.

Chaque synergie reste tout de même particulière et l'établissement d'un accord entre deux entreprises est dépendante d'un grand nombre de facteurs. Ceux-ci peuvent être d'ordre techniques, logistiques et bien évidemment humains :

- Le modèle que nous avons expérimenté est adapté à une vision globale pour des échanges simples où la compatibilité directe entre les matières est identifiée (ou du moins l'échange direct est possible), et les types de matières sont homogènes. Cependant d'un cas à l'autre, la matière peut fluctuer en termes de qualité ou de caractéristiques et nécessiter un traitement intermédiaire propre à chaque synergie. Ainsi la compatibilité doit être identifiée avec le plus de précision possible dans cette hypothèse de structure et certaines synergies que nous proposons pourraient ne pas être réalisables.
- Pour cette vision globale, une estimation des coûts de transports a seulement été considérée. D'autres coûts, davantage propres aux entreprises ou à une synergie entre deux entreprises, pourraient également être pris en compte (traitement intermédiaire de la matière, stockage, création d'emplois internes, coûts de mise en place...). Il serait judicieux d'étudier dans quelle mesure ces coûts peuvent être intégrés au modèle pour une résolution plus réaliste.
- Chaque synergie est soumise à un accord entre deux entreprises. De ce point de vue, la relation humaine reste au cœur de la faisabilité et une synergie, bien que techniquement validée, pourrait se retrouver refusée par les parties prenantes. Le progrès de l'écologie industrielle améliorera probablement les réflexions dans le sens de la confiance et pourra ainsi limiter ces situations.

Le modèle proposé est un modèle statique. La prise en compte de considérations dynamiques pourrait être également intéressante car les quantités de matières en termes de demande, d'offre mais également de stockage peuvent être amenées à varier au cours d'une période donnée. Ainsi, il serait également intéressant d'ouvrir cette possibilité dans un tel modèle tant au niveau de l'utilisation macro que du processus itératif pour la mise en place des synergies.

Enfin, une évaluation de plusieurs catégories de retombées environnementales de ces échanges pourrait être intéressante. En effet, notre seule considération fut l'utilisation des ressources naturelles avec la réutilisation directe de matières résiduelles destinées à l'enfouissement ou au recyclage externe. En plus de cet évitement, ceci inhibe également l'utilisation de matières premières vierges. D'autres catégories de retombées environnementales pourraient être analysées voire même intégrées au modèle.

BIBLIOGRAPHIE

- Aid, G., Brandt, N., Lysenkova, M., & Smedberg, N. (2015). Looplocal - A heuristic visualization tool to support the strategic facilitation of industrial symbiosis. *Journal of Cleaner Production*, 98, 328-335. doi:10.1016/j.jclepro.2014.08.012
- Álvarez, R., & Ruiz-Puente, C. (2017). Development of the Tool SymbioSyS to Support the Transition Towards a Circular Economy Based on Industrial Symbiosis Strategies. *Waste and Biomass Valorization*, 8(5), 1521-1530. doi:10.1007/s12649-016-9748-1
- Bin, S., Zhiqian, Y., Jonathan, L. S. C., Jiewei, D. K., Kurle, D., Cerdas, F., & Herrmann, C. (2015). A big data analytics approach to develop industrial symbioses in large cities. *Procedia CIRP*, 29, 450-455.
- Boons, F., Chertow, M., Park, J., Spekkink, W., & Shi, H. (2017). Industrial Symbiosis Dynamics and the Problem of Equivalence: Proposal for a Comparative Framework. 21(4), 938-952. doi:doi:10.1111/jiec.12468
- Brondi, C., Cornago, S., Ballarino, A., Avai, A., Pietraroia, D., Dellepiane, U., & Niero, M. (2018). Sustainability-based Optimization Criteria for Industrial Symbiosis: The Symbioptima Case. *Procedia CIRP*, 69, 855-860. doi:<https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.026>
- Butts, C. T. (2008). Social network analysis: A methodological introduction. *Asian Journal of Social Psychology*, 11(1), 13-41. Tiré de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1467-839X.2007.00241.x>
- Chertow, M. R. (1999). *Industrial symbiosis: a multi-firm approach to sustainability*. Communication présentée à Eighth International Conference of the Greening of Industry Network (vol. 15).
- Chertow, M. R. (2000). Industrial symbiosis: literature and taxonomy. *Annual Review of Energy and the Environment*, 25(1), 313-337.
- 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.

- Domenech, T., Bleischwitz, R., Doranova, A., Panayotopoulos, D., & Roman, L. (2019). Mapping Industrial Symbiosis Development in Europe_ typologies of networks, characteristics, performance and contribution to the Circular Economy. *Resources, Conservation and Recycling*, 141, 76-98. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.09.016>
- Domenech, T., & Davies, M. (2009). The social aspects of industrial symbiosis: the application of social network analysis to industrial symbiosis networks. *Progress in Industrial Ecology, an International Journal*, 6(1), 68-99.
- Domenech, T., & Davies, M. (2011). Structure and morphology of industrial symbiosis networks: The case of Kalundborg. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 10, 79-89.
- Ehrenfeld, J., & Gertler, N. (1997). Industrial ecology in practice: the evolution of interdependence at Kalundborg. *Journal of industrial Ecology*, 1(1), 67-79.
- Ehrenfeld, J. R., & Chertow, M. R. (2002). 27. Industrial symbiosis: the legacy of Kalundborg. *A handbook of industrial ecology*, 334.
- Ghali, M. R., Frayret, J.-M., & Ahabchane, C. (2017). Agent-based model of self-organized industrial symbiosis. *Journal of cleaner production*, 161, 452-465.
- Ghali, M. R., & Frayret, J. M. (2019). Social semantic web framework for industrial synergies initiation. *Journal of Industrial Ecology*, 23(3), 726-738.
- Graedel, T., & Allenby, B. (1995). Industrial Ecology Prentice Hall. *Englewood Cliffs, NJ*.
- Grant, G. B., Seager, T. P., Massard, G., & Nies, L. (2010). Information and Communication Technology for Industrial Symbiosis. 14(5), 740-753. doi:doi:10.1111/j.1530-9290.2010.00273.x
- Guo, B., Geng, Y., Sterr, T., Dong, L., & Liu, Y. (2016). Evaluation of promoting industrial symbiosis in a chemical industrial park: A case of Midong. *Journal of Cleaner Production*, 135, 995-1008. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.006>
- 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.

Leong, Y. T., Lee, J.-Y., Tan, R. R., Foo, J. J., & Chew, I. M. L. (2017). Multi-objective optimization for resource network synthesis in eco-industrial parks using an integrated analytic hierarchy process. *Journal of Cleaner Production*, 143, 1268-1283. doi:10.1016/j.jclepro.2016.11.147

Maillé, M., & Frayret, J. M. (2016). Industrial Waste Reuse and By-product Synergy Optimization. *Journal of Industrial Ecology*, 20(6), 1284-1294.

Martin, S. A., Weitz, K. A., Cushman, R. A., Sharma, A., Lindrooth, R. C., & Moran, S. R. (1996). Eco-industrial parks: A case study and analysis of economic, environmental, technical, and regulatory issues.

Raabe, B., Low, J. S. C., Juraschek, M., Herrmann, C., Tjandra, T. B., Ng, Y. T., . . . Tan, Y. S. (2017). Collaboration Platform for Enabling Industrial Symbiosis: Application of the By-product Exchange Network Model. *Procedia CIRP*, 61, 263-268. doi:<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.225>

Song, X. Q., Geng, Y., Dong, H. J., & Chen, W. (2018). Social network analysis on industrial symbiosis: A case of Gujiao eco-industrial park. *Journal of Cleaner Production*, 193, 414-423. doi:10.1016/j.jclepro.2018.05.058

Wasserman, S., & Faust, K. (1994). *Social network analysis: Methods and applications* (vol. 8): Cambridge university press.

Yazan, D. M., & Fraccascia, L. (2019). Sustainable operations of industrial symbiosis: an enterprise input-output model integrated by agent-based simulation. doi:10.1080/00207543.2019.1590660

Yu, F., Han, F., & Cui, Z. (2015). Evolution of industrial symbiosis in an eco-industrial park in China. *Journal of Cleaner Production*, 87, 339-347. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.058>

ANNEXE A – DÉCLINAISONS DU GROUPE « FABRICATION » SCIAN

Tableau A.1. Sous-secteur du secteur de fabrication 31

Sous-secteur	Intitulé
311	Fabrication d'aliments
312	Fabrication de boissons et de produits du tabac
313	Usines de textiles
314	Usines de produits textiles
315	Fabrication de vêtements
316	Fabrication de produits en cuir et de produits analogues
321	Fabrication de produits en bois
322	Fabrication du papier
323	Impression et activités connexes de soutien
324	Fabrication de produits du pétrole et du charbon
325	Fabrication de produits chimiques
326	Fabrication de produits en plastique et en caoutchouc
327	Fabrication de produits minéraux non métalliques
331	Première transformation des métaux
332	Fabrication de produits métalliques
333	Fabrication de machines
334	Fabrication de produits informatiques et électroniques
335	Fabrication de matériel, d'appareils et de composants électriques
336	Fabrication de matériel de transport
337	Fabrication de meubles et de produits connexes
339	Activités diverses de fabrication

Pour la suite, les déclinaisons ne seront effectuées qu'à partir de la première ligne du tableau par souci de lisibilité. Cette annexe est seulement destinée à ce que le lecteur comprenne la structure de la classification SCIAN à partir d'un exemple.

Tableau A.2. Groupes du sous-secteur 311

Groupe	Intitulé
3111	Fabrication d'aliments pour animaux
3112	Mouture de grains céréaliers et de graines oléagineuses
3113	Fabrication de sucre et de confiseries
3114	Mise en conserve de fruits et de légumes et fabrication de spécialités alimentaires
3115	Fabrication de produits laitiers
3116	Fabrication de produits de viande
3117	Préparation et conditionnement de poissons et de fruits de mer
3118	Boulangeries et fabrication de tortillas
3119	Fabrication d'autres aliments

Tableau A.3. Classe à 5 chiffres du sous-secteur 3111

Classe	Intitulé
31111	Fabrication d'aliments pour animaux

Tableau A.4. Classes canadiennes à 6 chiffres du sous-secteur 31111 (code SCIAN)

Classe CAN	Intitulé
311111	Fabrication d'aliments pour chiens et chats
311119	Fabrication d'aliments pour autres animaux

ANNEXE B – QUANTITÉS ANNUELLES OFFERTES ET DEMANDÉES PAR ENTREPRISE POUR NOS DEUX EXEMPLES

Tableau B.1. Première structure – Activité industrielle centrale

ID entreprise	Quantité annuelle offerte de plastique (kg)	Quantité annuelle offerte de contenants (unités)	Quantité annuelle demandée de palettes (unités)
MED01	55 561	14 885	360
MED02	37 041	9 923	240
MED03	58 648	15 712	380
MED04	70 995	19 019	460
MED05	126 556	33 904	820
MED06	120 382	32 250	780
MED07	212 984	57 058	1380
MED08	30 867	8 269	200
MED09	61 734	16 539	400
MED10	67 908	18 193	440
MED11	52 474	14 058	340
MED12	262 371	70 289	1700
MED13	154 336	41 347	1000
MED14	80 255	21 500	520
Total	1 392 111	372 947	9020

Tableau B.2. Première structure – Entreprises périphériques

ID entreprise	Quantité annuelle demandée en contenants en carton (unités)
VET01	4 440
VET02	2 960
VET03	3 552
VET04	8 880
VET05	7 400
VET06	8 880
VET07	4 440
VET08	3 552
VET09	3 256
VET10	5 920
VET11	5 920
Total	59 200

ID entreprise	Quantité annuelle offerte de palettes (unités)	Quantité annuelle demandée de déchets plastiques (kg)
PL01	3 502	42 264
PL02	2 350	30 189
PL03	5 518	63 396
PL04	766	13 585
PL05	6 382	72 453
PL06	3 790	45 283
PL07	1 198	18 113
PL08	3 358	40 755
PL09	910	15 094
PL10	2 638	33 208
Total	30 412	374 339

Tableau B.3. Deuxième structure – Activité industrielle centrale

ID entreprise	Quantité annuelle demandée de déchets plastiques (kg)	Quantité annuelle demandée de palettes de bois (unités)	Quantité annuelle offerte de déchets d'aluminium (kg)
REV01	89 056,60	1 180,00	9 633,39
REV02	36 226,42	480,00	3 918,67
REV03	72 452,83	960,00	7 837,33
REV04	19 622,64	260,00	2 122,61
REV05	34 716,98	460,00	3 755,39
REV06	34 716,98	460,00	3 755,39
REV07	279 245,28	3 700,00	30 206,39
REV08	12 075,47	160,00	1 306,22
REV09	13 584,91	180,00	1 469,50
REV10	55 849,06	740,00	6 041,28
REV11	7 547,17	100,00	816,39
REV12	60 377,36	800,00	6 531,11
REV13	120 754,72	1 600,00	13 062,22
Total	836 226,42	11 080,00	90 455,89

Tableau B.4. Deuxième structure – Entreprises périphériques

ID entreprise	Quantité annuelle offerte en déchets plastiques (kg)	ID entreprise	Quantité annuelle demandée en déchets d'aluminium (kg)	ID entreprise	Quantité annuelle offerte de palettes de bois (unités)
MED01	55 560,96	ECL01	1 111	FEN01	2 782
MED02	37 040,64	ECL02	1 444	FEN02	910
MED03	58 647,68	ECL03	1 667	FEN03	1 054
MED04	70 994,56	ECL04	4 444	FEN04	622
MED05	126 555,52	ECL05	11 111	FEN05	190
MED06	120 382,08	ECL06	2 111	FEN06	3 790
MED07	212 983,68	ECL07	2 222	FEN07	1 198
MED08	30 867,20	ECL08	6 111	FEN08	1 198
MED09	61 734,40	ECL09	6 556	FEN09	622
MED10	67 907,84	ECL10	2 889	FEN10	5 662
MED11	52 474,24	ECL11	20 889	FEN11	4 510
MED12	262 371,20	ECL12	18 889	FEN12	4 510
MED13	154 336,00	ECL13	28 667	FEN13	3 790
MED14	80 254,72	Total	108 111	Total	30 838
Total	1 392 110,72				