

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE
CONCENTRATION GÉNIE DE L'ENVIRONNEMENT
M. Ing.

PAR
Paola CAMACHO

DÉVELOPPEMENT D'UNE APPROCHE MULTIFILIÈRE D'AIDE À LA DÉCISION EN
GESTION DES MATIÈRES RÉSIDUELLES

MONTRÉAL, LE 29 AOÛT 2012

©Tous droits réservés, Paola Camacho, 2012

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CETTE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉE

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Robert Hausler, directeur de mémoire
Département Génie de la Construction à l'École de technologie supérieure

M. Mathias Glaus, codirecteur de mémoire
Département Génie de la Construction à l'École de technologie supérieure

M. Alan Carter, président du jury
Département Génie de la Construction à l'École de technologie supérieure

Mme Valérie Laforest, membre du jury
École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne

ELLE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 21 AOÛT 2012

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Chaque fois qu'on arrive au bout du chemin, on se retourne sur ses traces et on rassemble ses souvenirs. On pense à toutes les personnes qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à faire que le rêve devienne réalité. D'abord, je tiens à remercier mon codirecteur, Mathias et directeur Robert. Vous avez su me guider et grâce à vos conseils, mon parcours universitaire a été plus facile et merci d'avoir toujours cru que j'arriverais à la fin du chemin. Merci aussi à Maria, tu as toujours trouvé le temps de me donner un coup de main, même si la tâche était hors de tes fonctions.

Également, je ne serais pas où je suis sans le support de mes parents, malgré la distance ils ont été toujours à mes côtés et ont encouragé chacun de mes pas, merci à vous deux. Merci aussi à ma joie : mes enfants, Mateo et Violeta. Vous deux êtes l'énergie qui alimente mon âme et mon corps, je vous aime à la folie.

Depuis longtemps, je ne veux pas me souvenir combien d'années, tu as été mon complice, mon collègue et surtout mon support, merci pour ton encouragement constant et aussi pour toutes les fois où je n'ai pas pu être là et où tu as su offrir de bons moments à nos enfants.

DÉVELOPPEMENT D'UNE APPROCHE MULTIFILIÈRE D'AIDE À LA DÉCISION EN GESTION DES MATIÈRES RÉSIDUELLES

Paola CAMACHO

RÉSUMÉ

L'augmentation des niveaux de consommation et l'accroissement démographique, génèrent chaque jour volumes élevés des résidus dans notre société. Dans cette prémisse, la gestion des matières résiduelles devient un précepte fondamental face aux volumes croissants de déchets.

Malgré leur développement technique, les filières de valorisation des résidus sont souvent incapables de recevoir l'ensemble de matières à récupérer. Par ailleurs, les outils d'aide à la prise de décision sont insuffisants pour analyser les variations des quantités des déchets générés. Ils ne tiennent pas compte, à court ou long terme, de ces flux croissants de matières résiduelles. Dans cette démarche, le projet développé porte sur une nouvelle approche multifilière d'aide à la prise de décision qui vise à évaluer les différents scénarios de gestion responsable des matières résiduelles, ainsi que la dynamique de la génération de résidus et la variation de la demande en sous-produits générés.

Les résultats obtenus montrent qu'une gestion de déchets qui est aperçue comme un ensemble de relations mutuelles permet une meilleure compréhension du système et facilite la prise de décision.

Mots-clés : Gestion des déchets, approche multifilière d'aide à la décision, filières de valorisation, vermicompostage, compostage, digestion anaérobie, gazéification.

DÉVELOPPEMENT D'UNE APPROCHE MULTIFILIÈRE D'AIDE À LA DÉCISION EN GESTION DES MATIÈRES RÉSIDUELLES

Paola CAMACHO

ABSTRACT

The increase of consumption levels and the demographic growth contribute significantly to the daily generation of large volumes of waste in our society. Within this context, residual material management becomes a fundamental principle to cope with ever-increasing amounts of waste.

Despite their technical development, valorization processes are often unable to receive all materials to be recovered. In addition, tools for decision making are insufficient to analyze changes in generated waste quantities. They don't take into account, in the short or long-term, the increasing flows of residual materials. Along this same line of thinking, the project focuses on developing a new multi technology approach in order to support decision-making processes, aimed at assessing different waste management scenarios, the dynamics of waste generation and changes in by-product demand.

The results obtained show that waste management, considered as a set of mutual relations, allows a better understanding of the system and facilitates decision-making process.

Keywords: Waste management, multi subject approach to decision support, recovery processes, vermicomposting, composting, anaerobic digestion, gasification.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 ÉTAT DE CONNAISSANCES	3
1.1 Contexte national et Québécoise des matières résiduelles.....	3
1.1.1 Les politiques et réglementations sur les matières résiduelles	3
1.1.2 Production de matières résiduelles	5
1.2 Filières de valorisation de matières résiduelles	10
1.2.1 Le compostage en système fermé.....	12
1.2.1.1 Technologie sélectionnée	13
1.2.1.2 Évaluation de la charge environnementale.....	14
1.2.2 Le vermicompostage.....	14
1.2.2.1 Technologie sélectionnée	17
1.2.2.2 Évaluation de la charge environnementale.....	18
1.2.3 La digestion anaérobie.....	18
1.2.3.1 Technologie sélectionnée	20
1.2.3.2 Évaluation de la charge environnementale.....	21
1.2.4 La gazéification	21
1.2.4.1 Technologie sélectionnée	22
1.2.4.2 Évaluation de la charge environnementale.....	24
1.2.5 Synthèse des filières référées.....	25
1.3 Processus de gestion intégrée.....	26
1.3.1 L'analyse multicritère.....	27
1.3.2 Les systèmes d'information géographique	28
1.3.3 L'analyse de cycle de vie (ACV)	28
1.3.4 L'écologie industrielle.....	29
1.4 Problématique de la gestion des matières résiduelles	31
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE.....	35
2.1 Définition du système	35
2.1.1 Description du scénario de gestion des matières résiduelles proposé	35
2.1.2 Frontières du scénario.....	36
2.2 Détermination du système.....	36
2.2.1 Distribution des flux	37
2.3 Filières de traitement.....	39
2.3.1 Performances techniques des filières de valorisation utilisées.....	40
2.4 Scénario de gestion	41

CHAPITRE 3	RÉSULTATS	45
3.1	Développement de l'algorithme.....	45
3.2	Génération des matières résiduelles.....	48
3.2.1	Flux de référence	49
3.2.2	Variation saisonnière	51
3.3	Présentation des résultats	53
3.4	Analyse comparative de scénarios	58
CHAPITRE 4	DISCUSSION	63
4.1	Exemple d'application	63
4.2	Limites de la démarche	65
4.3	Développement de l'approche	66
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....		67
ANNEXE I.....		71
ANNEXE II		76
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		81

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 Règlements nationaux et québécois de la gestion des matières résiduelles	4
Tableau 1.2 Variation saisonnière à la moyenne annuelle pour la collecte des matières résiduelles.....	9
Tableau 2.1 Filières disponibles.....	38
Tableau 2.2 Paramètres techniques des filières de valorisation de matières résiduelles	39
Tableau 2.3 Analyse comparative des scénarios.....	40
Tableau 3.1 Quantités de matières résiduelles générées dans la municipalité.....	45
Tableau 3.2 Besoins de la municipalité en 2008.....	46
Tableau 3.3 Quantité des matières résiduelles à valoriser en 2008.....	47
Tableau 3.4 Distribution des matières résiduelles aux filières (t).....	49
Tableau 3.5 Quantités de produits obtenus	51
Tableau 3.6 Quantité de sous produits générés (t)	57
Tableau– A I- 1 Distribution des matières résiduelles aux filières (t) scénario 2.....	65

XIV

Tableau– A I- 2 Quantités de produits obtenus Scénario 2.....67

Tableau– A I- 3 Distribution des matières résiduelles aux filières (t) scénario 3.....68

Tableau– A I- 4 Quantités de produits obtenus Scénario 369

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Bilan de la gestion des matières résiduelles de 1998 à 2008 (en tonnes).....7
Figure 1.2	Génération, récupération, mise en valeur et élimination des matières résiduelles par secteur en 2008.....7
Figure 1.3	Composition de matières résiduelles générées d'origine résidentielle (kg/personne/année).8
Figure 1.4	Variation mensuelle à la moyenne annuelle selon la strate, pour la collecte des matières résiduelles.....10
Figure 1.5	Filières de traitement de matières résiduelles.11
Figure 1.6	Résumé des filières et technologies de traitement de matières résiduelles.25
Figure 2.1	Schéma global du système37
Figure 3.1	Algorithme de distribution des flux de matières résiduelles dans l'approche..42
Figure 3.2	Variations de matières résiduelles produites en 2008.52
Figure 3.3	Distribution des matières résiduelles aux filières.....49
Figure 3.4	Flux des matières résiduelles dans le réservoir.55
Figure 3.5	Quantité de sous produits générés.....57

Figure 3.6	Analyse comparatif des scénarios.	57
Figure 3.7	Quantité de matières traitées dans le scénario 1	55
Figure-A I- 1	Quantité des matières traitées dans le scénario 2.....	66
Figure-A I- 2	Quantité des matières traitées dans le scénario 2.....	68
Figure-A II- 1	Types de matières résiduelles (Qd	70
Figure-A II- 2	Besoins du système (Bs)	70
Figure-A II- 3	L'onglet «Paramètres» de l'approche	71
Figure-A II- 4	L'onglet «Quantité de matières résiduelles à traiter (Qt)» de l'approche	71
Figure-A II- 5	L'onglet «Quantité de produit généré (Qg)» de l'approche	72

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ACV	Analyse de cycle de vie
ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
BAPE	Bureau d'audiences publiques sur l'environnement
Bs	Besoins du système
CI	Combustion interne
CRC.	Capacité du réservoir complet
CRD	Construction, rénovation et démolition)
CSC.	Capacité du système complet
Dt	Disponibilité technologique
EPA	<i>Environmental Protection Agency (États-Unis)</i>
GES	Gaz à effet de serre
ICI	Secteur industriel, commercial et institutionnel
PGMR	Plan de gestion des matières résiduelles
PRRS	Plasma Resource Recovery System

XVIII

Qb	Quantité de déchets nécessaires pour les besoins
Qd	Type de déchets
Qg	Quantité de produit généré
QID.	Quantité insuffisante des déchets
Qt	Quantité de déchets à traiter
Re	Déchets à redistribuer
Rtr	Rendements des déchets
SIG	Systemes d'information géographique

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

UNITÉS DE BASE

m mètre (unité de longueur)
kg kilogramme (unité de masse)
A ampère (unité d'intensité de courant électrique)

UNITÉS DE QUANTITÉ DE MATIÈRE

Force magnétomotrice
A ampère

Aire

m² mètre carré

Volume

m³ mètre cube

UNITÉS GÉOMÉTRIQUES

Longueur

m mètre

UNITÉS DE MASSE

Masse

t tonne (= 1 000 kg)
kg kilogramme

UNITÉS DE TEMPS

h heure
a année
d jour

PUISSANCE

MW mégawatt
kW kilowatt
W watt
VA voltampère (puissances apparentes)

UNITÉS CALORIFIQUES

°C degré Celsius

Source : Bureau de normalisation du Québec (1977), *Système international d'unités (SI) principes d'écriture des unités et des symboles* (BNQ 9990-911) Québec : ministère de l'Industrie et du Commerce.

INTRODUCTION

Les développements technologiques des dernières années ont contribué à améliorer le niveau de vie de nos sociétés. Cette amélioration s'est traduite par une hausse de la consommation de biens et de services. La concentration de la population en milieux urbains associée à cette consommation engendre une quantité importante de matières résiduelles à gérer. Cette gestion est l'un des plus grands défis pour la société afin de préserver l'environnement et la santé publique.

Dans une vision intégrée propice à une évolution responsable, la problématique environnementale reliée aux matières résiduelles ne peut être traitée de façon isolée, ni se limiter aux aspects de valorisation et d'élimination. Elle doit être placée dans une perspective systémique de gestion des sources potentielles. Dans le cadre du projet de recherche, l'approche proposée vise à déterminer un équilibre entre l'approvisionnement de filières, les besoins des générateurs des déchets, les produits générés et la capacité du système, tout en minimisant l'empreinte environnementale associée à la gestion des déchets.

L'objectif du projet est de développer une approche multifilière d'aide à la prise de décision qui permet d'évaluer les avantages et inconvénients offerts par les différents scénarios de gestion responsable des matières résiduelles (filières de valorisation), la dynamique de la génération de déchets (variations de flux) et la variation de la demande en produits générés.

Le présent mémoire se divise en quatre chapitres principaux. Le premier chapitre aborde la revue de littérature sur le sujet d'étude. Cette partie énonce les politiques et la réglementation sur les déchets au Québec et au Canada, de même qu'une approche de la problématique de gestion des déchets, par rapport aux outils d'aide à la prise de décision. Sont présentés également, un aperçu du concept d'écologie industrielle et sa relation avec la gestion des déchets ainsi qu'une description des filières de valorisation des déchets et ses produits.

Le deuxième chapitre décrit la méthodologie utilisée pour développer l'approche multifilière de gestion des flux des matières résiduelles. D'abord, un scénario est établi à l'aide d'une base de données des types de matières résiduelles à valoriser et ses variations de flux. De plus, un schéma global de l'approche et les filières de valorisation envisagées dans le projet sont présentés (le vermicompostage, le compostage en système fermé, la digestion anaérobie et la gazéification). Également, les performances techniques et les charges environnementales des filières de valorisations sélectionnées sont évaluées, ainsi que les sous-produits générés.

La dernière partie du deuxième chapitre présente les calculs et fondements mathématiques pour développer l'approche multifilière. Le troisième chapitre porte d'abord sur la présentation des résultats obtenus lors de la mise en œuvre de l'approche avec un exemple d'application. Le quatrième chapitre aborde la discussion des résultats obtenus et finalement, le mémoire se termine avec les conclusions sur le sujet de recherche.

CHAPITRE 1

ÉTAT DE CONNAISSANCES

Ce chapitre porte sur la revue de littérature associée au sujet d'étude. Dans un premier temps, un contexte des matières résiduelles au Canada et au Québec est énoncé. Un portrait de la génération de matières résiduelles est ensuite présenté. Dans un deuxième temps, une description de principales filières de valorisation de matières résiduelles de même que les technologies associées aux filières est proposée. Le processus de gestion intégrée à la gestion des matières résiduelles avec les différents outils et modèles de gestion est présenté à la troisième section. Une approche de la problématique de gestion des matières résiduelles sera abordée dans une dernière section.

1.1 Contexte national et Québécoise des matières résiduelles

Cette première partie présente les principales politiques et règlements retenus par le gouvernement canadien et québécois en gestion des matières résiduelles. De plus, un portrait de la production des matières résiduelles au niveau national et provincial est abordé.

1.1.1 Les politiques et réglementations sur les matières résiduelles

Les politiques, lois et réglementations deviennent plus exigeantes avec le temps suite à la pression des citoyens, à la volonté des gouvernements de restaurer l'environnement ou à cause de la pression des pays étrangers (Galvez-Cloutier, 2010). Au Canada, la loi canadienne sur la protection de l'environnement vise à prévenir la pollution et la protection de l'environnement, pour ainsi éviter des risques posés par les polluants nocifs sur la santé humaine (Gouvernement du Canada, 2012). Au Québec, les politiques gouvernementales font la promotion d'une meilleure gestion des matières résiduelles.

Un résumé des règlements nationaux et québécois correspondants à la gestion des matières résiduelles est présenté au tableau 1.1

Tableau 1.1 Règlements nationaux et québécois de la gestion des matières résiduelles

CANADA	
Loi canadienne sur la protection de l'environnement (Gouvernement du Canada, 2012).	Elle vise à prévenir la pollution et la protection de l'environnement, pour ainsi éviter des risques posés par les polluants nocifs sur la santé humaine. Elle reconnaît aussi l'importance d'adopter une approche basée sur les écosystèmes en vue de contribuer au développement durable
QUÉBEC	
Loi sur la qualité de l'environnement (Québec, 2012a).	Vise à préserver la qualité de l'environnement, à promouvoir son assainissement et à prévenir sa détérioration. Elle décrit aussi les fonctions et les pouvoirs du ministre et du BAPE. La section VII parle spécifiquement de la gestion de matières résiduelles.
Loi sur la Société québécoise de récupération et de recyclage (Québec, 2012b).	Cette loi précise la mission et les mandats de la Société, aussi appelée RECYC-QUÉBEC. La loi vise également à promouvoir, développer et favoriser la réduction, le réemploi, la récupération et le recyclage de contenants, d'emballages, de matières ou de produits ainsi que leur valorisation dans une perspective de conservation des ressources.
Loi sur les cités et villes (Québec, 2012c). Loi sur l'aménagement et l'urbanisme (Québec, 2012d).	Elles confient aux municipalités des pouvoirs pour faire la gestion des matières résiduelles sur leurs territoires.
Règlement sur les déchets solides (Québec, 2012e).	Il donne les paramètres pour l'obtention des certificats et permis d'exploitation d'un lieu d'entreposage ou d'élimination des déchets solides ainsi que pour les procédés de dépôt, de récupération et de valorisation des matières tels que l'incinération, le compostage, la pyrolyse, etc.

QUÉBEC	
Règlement sur les matières dangereuses (Québec, 2012f).	Nouveau projet de règlement sur les matières dangereuses (1995 - Gazette officielle du Québec): Ce règlement établit les exigences par rapport au transport, à la disposition et à l'utilisation pour des fins énergétiques des matières dangereuses.
Règlement sur l'évaluation et l'examen des impacts sur l'environnement (Québec, 2012g).	Il vise à définir les projets soumis à la procédure d'évaluation et d'examen des impacts sur l'environnement autant qu'à décrire les paramètres pour la préparation et la présentation d'une étude d'impact sur l'environnement.
Politique québécoise de gestion de matières résiduelles (Québec, 2012h).	La Politique propose une gestion plus respectueuse de l'environnement qui contribue en même temps au développement social et économique du Québec. L'objectif général de la politique est de mettre en valeur plus de 65 pour cent des 7,1 millions de tonnes de matières résiduelles pouvant être mises en valeur annuellement.
Plan d'action québécois sur les matières résiduelles (2011-2015) (Gouvernement du Québec, 2010).	Le Plan prévoit la mise en œuvre de mesures telle que : i) ramener à 700 kilogrammes par habitant la quantité de matières résiduelles éliminées soit une réduction de 110 kilogrammes par habitant par rapport à 2008; ii) recycler 70 % du papier, du carton, du plastique, du verre et du métal résiduels; iii) recycler 60 % de la matière organique putrescible résiduelle; iv) recycler ou valoriser 80 % des matières résiduelles de béton, de brique et d'asphalte; v) trier à la source ou acheminer vers un centre de tri 70 % des matières résiduelles de construction, de rénovation et de démolition du segment du bâtiment.

1.1.2 Production de matières résiduelles

La production mondiale de matières résiduelles a tendance à augmenter autant que la consommation. Effectivement, quatre milliards de tonnes de matières résiduelles sont

produites chaque année. Comparativement, à peine un quart est valorisé ou recyclé (Chalmin et Gaillochet, 2009). L'augmentation de la population indique que cette croissance de la consommation mondiale et de la production des matières résiduelles devrait accélérer encore dans le futur si rien ne change.

En 2008, chaque Canadien a produit en moyenne 1 tonne de matières résiduelles provenant de sources résidentielles et non résidentielles. De ces matières résiduelles, 0.75 tonne était destinée à l'élimination (enfouissement ou incinération), et 0.25 tonne a été récupérée. Au total, l'industrie de la gestion des matières résiduelles a pris en charge plus de 34 millions de tonnes de matières résiduelles, dont environ 26 millions de tonnes ont été enfouies ou incinérées. Puis, plus de 8 millions de tonnes ont été récupérées ou traitées dans les installations de récupération de matières ou dans le cadre de programmes centralisés de compostage (Statistique Canada, 2008). Les matières résiduelles de sources non résidentielles constituent la plus grande partie de matières résiduelles destinées à l'élimination. En effet, en 2008, les matières résiduelles non résidentielles constituaient 67 % des matières résiduelles à l'élimination, contre 33 % pour les matières résiduelles de sources résidentielles (Statistique Canada, 2008).

La quantité de matières récupérées (traitées à des fins de recyclage ou de compostage) a augmenté d'environ 10 % par rapport à celle de 2006, pour atteindre presque 8,5 millions de tonnes en 2008. Un peu moins de la moitié (49 %) des matières récupérées proviennent de sources non résidentielles. Les provinces dont la proportion de matières récupérées provenant de sources non résidentielles est supérieure à la moyenne nationale (49 %) sont le Nouveau-Brunswick (77 %), la Colombie-Britannique (59 %), le Québec (58 %) et le Manitoba (56%) (Statistique Canada, 2008).

Au Québec, la gestion des matières résiduelles est divisée en trois secteurs : secteur municipal, secteur industriel, commercial et institutionnel (ICI) et secteur de la construction, de la rénovation et de la démolition (CRD). Dans la province, en 2008, un peu plus de 13 millions de tonnes de matières résiduelles ont été générées (RECYC-QUÉBEC, 2008).

Bien qu'en 2008 le taux de récupération global ait augmenté de cinq points par rapport à 2006 (57% sur le potentiel valorisable), le Québec n'a pas atteint l'objectif global de récupération et de mise en valeur fixé à 65% par la Politique québécoise de gestion des matières résiduelles pour 2008 (RECYC-QUÉBEC, 2008). La figure 1.1 présente un bilan de la gestion des matières résiduelles (génération, élimination et récupération) pour l'ensemble des secteurs de 1998 à 2008.

Bilan de la gestion des matières résiduelles de 1998 à 2008 (en tonnes)							
	1998	2000	2002	2004	2006	2008	Différence (%)
Génération	8 886 000	10 664 000	11 183 000	11 389 000	12 952 000	13 033 000	1%
Élimination	5 537 000	6 908 000	6 510 000	6 454 000	6 717 000	6 219 000	-7%
Récupération	3 351 000	3 756 000	4 673 000	4 935 000	6 235 000	6 814 000	9%
Taux de récupération							
sur génération	38%	35%	42%	43%	48%	52%	9%
sur potentiel	42%	39%	47%	49%	52%	57%	9%
POPULATION							
	7 334 094	7 372 448	7 455 206	7 547 728	7 651 531	7 725 830	1%
Taux par personne par année (en tonnes)							
Génération	1,21	1,45	1,50	1,51	1,69	1,69	0%
Élimination	0,75	0,94	0,87	0,86	0,88	0,81	-8%
Récupération	0,46	0,51	0,63	0,65	0,91	0,88	8%

Figure 1.1 Bilan de la gestion des matières résiduelles au Québec de 1998 à 2008 (en tonnes).

Tirée de RECYC-QUEBEC (2008)

Selon le bilan des matières résiduelles du Québec (RECYC-QUÉBEC, 2008), 41 % des matières résiduelles proviennent des ICI (secteur industriel, commercial et institutionnel), 35% du secteur CRD (construction, rénovation et démolition) et 24 % du secteur municipal, les taux de récupération et de valorisation respectifs sont de 36% pour des ICI, 48% pour des CRD et 16% pour le secteur municipal. La figure 1.2 présente un portrait de la génération, la récupération, la mise en valeur et l'élimination des matières résiduelles en 2008 au Québec.



Figure 1.2 Génération, récupération, mise en valeur et élimination des matières résiduelles par secteur au Québec en 2008.

Tirée de RECYC-QUEBEC (2008)

Dans le secteur municipal ou résidentiel, chaque Québécois génère annuellement 412 kg de matières résiduelles. Ce total est composé à 44 % de matières organiques et à 35 % de matières recyclables (papier/carton, verre, plastique et métal). Le reste (21 %) représente les encombrants, les résidus de CRD, les RDD, le textile et les autres matières générées (RECYC-QUÉBEC, 2007). Ces quantités sont illustrées dans la figure 1.3.

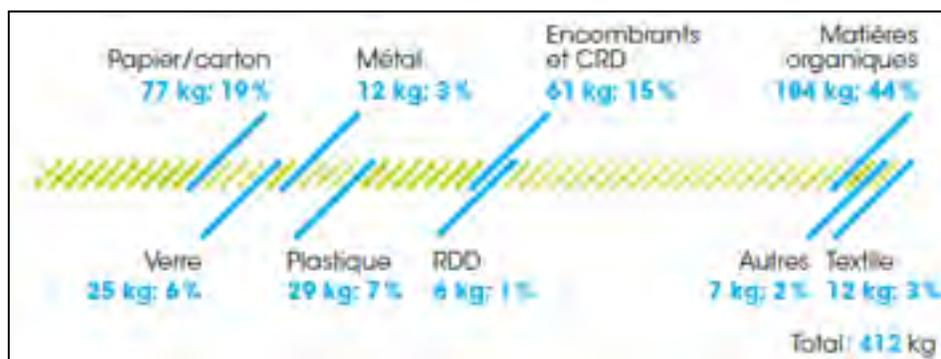


Figure 1.3 Composition de matières résiduelles générées d'origine résidentielle au Québec (kg/personne/année).

Tirée de RECYC-QUEBEC (2007)

Deux des principaux paramètres de la variation de la quantité de matières résiduelles générées sont le secteur générateur et la période de l'année. La variation saisonnière de la

génération par matière spécifique peut être évaluée par un ratio des masses mensuelles par rapport à la masse annuelle. Ces ratios expriment les facteurs de saisonnalité associés à la masse de matières résiduelles générées. Le tableau 1.2 exprime ces facteurs de saisonnalité pour différentes régions du Québec.

Tableau 1.2 Variation saisonnière à la moyenne annuelle pour la collecte des matières résiduelles

Tirée de RECYC-QUÉBEC (2007b)

Mois	Région géographique						
	MTL	QCA	LLL	Montérégie	Centre	Éloignées	Moyenne
Janvier	0,71	0,90	0,74	0,71	0,76	0,78	0,77
Février	0,77	0,79	0,68	0,65	0,69	0,74	0,72
Mars	0,91	0,85	0,75	0,80	0,80	0,84	0,83
Avril	1,07	1,02	1,14	0,99	1,06	1,05	1,06
Mai	1,16	1,23	1,24	1,29	1,25	1,22	1,23
Juin	1,23	1,23	1,29	1,32	1,33	1,25	1,28
Juillet	1,08	0,95	1,08	1,12	1,02	1,04	1,05
Août	1,11	1,03	1,15	1,15	1,09	1,10	1,11
Septembre	1,07	1,01	1,08	1,08	1,08	1,05	1,06
Octobre	0,98	1,07	1,18	1,13	1,16	1,10	1,10
Novembre	1,05	1,13	1,06	1,06	1,10	1,07	1,08
Décembre	0,85	0,80	0,61	0,70	0,66	0,74	0,73

Les différentes régions exprimées dans le tableau 1.2 correspondent à :

- MTL Montréal;
- Q-C.A. Québec/Lévis et Chaudières Appalaches;
- L.L.L. Laval, Laurentides et Lanaudière;
- Montérégie;
- Régions centrales Outaouais, Estrie, Centre-du-Québec et Mauricie;
- Régions éloignées Abitibi-Témiscamingue, Nord-du-Québec, Saguenay-Lac-Saint-Jean, Côte-Nord, Bas- Saint-Laurent et Gaspésie-Îles-de-la- Madeleine.

Ces facteurs exprimés sous forme graphique (Figure 1.4) permettent de rendre compte des fluctuations liées à la saisonnalité.

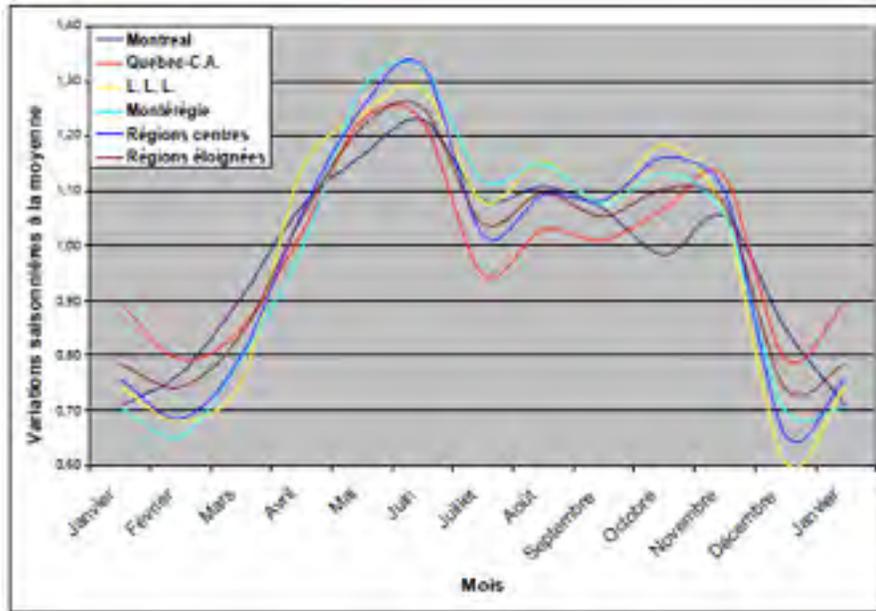


Figure 1.4 Variation mensuelle à la moyenne annuelle selon la strate, pour la collecte des matières résiduelles.

Tirée de RECYC-QUEBEC (2007b)

Si nous observons la figure 1.4, il est possible d'apercevoir les fluctuations des matières résiduelles des différentes régions au Québec. Selon cette figure, la période où la génération d'une plus grande quantité des matières résiduelles s'est produite à la fin du printemps et au début de l'été. Un écart significatif qui grimpe jusqu'à 1.35 entre juin et juillet se présente entre la mi-février qui est à 0.5 et à la mi-décembre qui revient également à 0.5.

1.2 Filières de valorisation de matières résiduelles

La valorisation des matières résiduelles consiste à exploiter et à obtenir des éléments, des produits utiles ou de l'énergie à partir de matières résiduelles qui ne peuvent être ni employées ni recyclées (CRE, 2002). Cette activité permet de réduire ou d'éliminer les coûts liés à la disposition des résidus tout en générant des revenus supplémentaires (Desrochers,

2009). Aujourd'hui, les méthodes pour produire de nouvelles ressources à partir de matières résiduelles sont diverses et nombreuses. Les filières de traitement peuvent être classées en deux grandes catégories, soit biologique ou thermique. La figure 1.5 présente les différentes filières biologiques et thermiques de traitement de matières résiduelles.

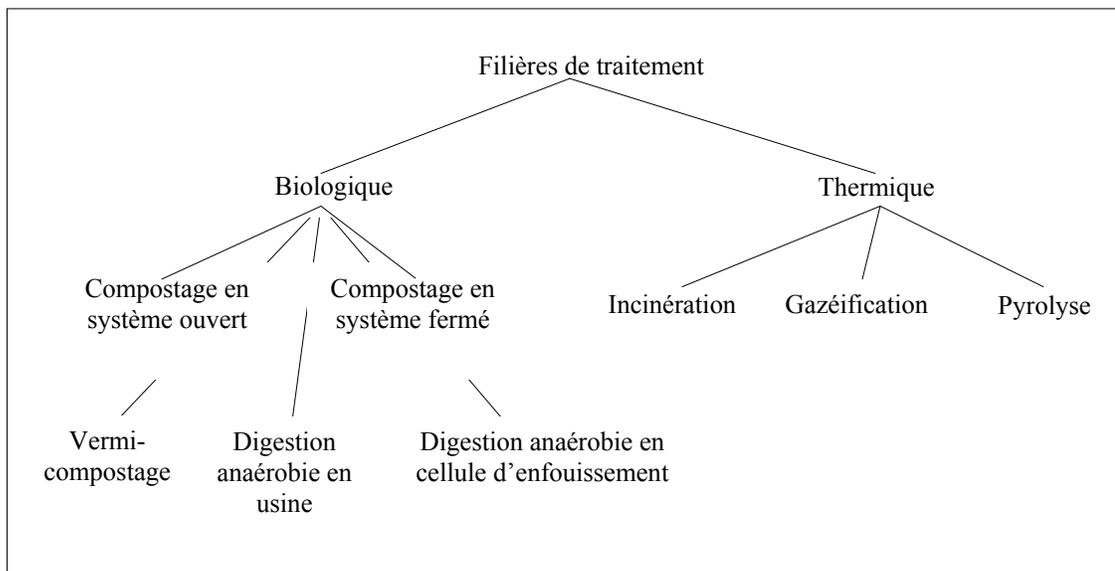


Figure 1.5 Filières biologiques et thermiques de traitement de matières résiduelles.

Parmi les différentes filières de valorisation des matières résiduelles qui existent, le présent travail aborde quatre filières de valorisation: le vermicompostage, le compostage (spécifiquement le compostage en système fermé), la digestion anaérobie et la gazéification.

Pour toute étape de traitement, l'étape préliminaire consiste à conditionner la matière résiduelle afin d'assurer le bon fonctionnement des différents procédés. Pour obtenir un mélange ayant les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques appropriées au traitement biologique, les matières résiduelles destinées au compostage en système fermé et à la digestion anaérobie sont mélangées avec des agents structurants et des inoculants comme le copeau de bois qui est par la suite déchiqueté et acheminé vers la technologie sélectionnée. Dans le cas du vermicompostage, les matières résiduelles sont seulement déchiquetées.

1.2.1 Le compostage en système fermé

Le compostage est un procédé de transformation biologique des résidus organiques, dans des conditions aérobiques, dont le produit final est le compost, engrais organique qui améliore les caractéristiques du sol. Au cours du compostage, plusieurs microorganismes, dont des bactéries et des champignons, décomposent la matière organique en éléments plus simples (RECYC-QUEBEC, 2006).

Le compostage est un procédé biologique aérobie qui sous des conditions contrôlées d'aération d'humidité et de température en des phases mésophiles (température et humidité inférieures à 40°C) et thermophiles (température supérieure à 45°C) transforment les matières résiduelles organiques dégradables en un produit stable, qui ressemble à de l'humus (RECYC-QUEBEC, 2006).

Le compost est une source importante de matière organique. La matière organique du sol joue un rôle important dans la durabilité de la fertilité, et donc pour une production agricole durable. En plus d'être une source d'éléments nutritifs pour les cultures, la matière organique améliore les propriétés biologiques et physico-chimiques du sol (FAO, 2005).

Les systèmes de compostage sont destinés à réduire les nuisances associées aux matières résiduelles fraîches afin d'obtenir un produit final de qualité suffisante tant du côté de la santé que de sa valeur d'engrais. Les systèmes de compostage peuvent être classés en deux groupes: ouvert et fermé (RECYC-QUÉBEC, 2011). Dans le premier groupe, le compostage est effectué à l'extérieur en piles et peut être à l'air libre ou dans les bâtiments. L'aération de la matière organique peut être faite par des procédés mécaniques ou par une cheminée de ventilation forcée. Ce dernier a l'avantage de contrôler le niveau d'oxygène ainsi que l'humidité et la température. Dans le compostage en système fermé, la fermentation a lieu dans les réacteurs qui sont généralement utilisés pour le compostage des matières résiduelles de moyennes ou de grandes villes. Dans ces systèmes, la phase initiale de la fermentation est faite dans des réacteurs qui peuvent être de deux types: horizontaux ou verticaux, tandis que

la phase finale de maturation est à l'extérieur ou dans des cuves ouvertes. Ces systèmes sont développés pour réduire considérablement les surfaces et obtenir un meilleur contrôle des paramètres comme la fermentation et ainsi minimiser les odeurs. Un avantage du compostage fermé est qu'il est plus rapide et qu'il nécessite moins d'espace que le compostage ouvert (FAO, 2005).

Le traitement de l'air vicié du procédé de compostage constitue donc, dans ce type de système fermé, une composante importante qui favorise un bon contrôle des nuisances potentielles liées aux odeurs.

1.2.1.1 Technologie sélectionnée

La technologie de traitement des matières résiduelles choisie pour cette filière est celle de tunnels fixes, utilisée par des fabricants tels que Komptech (Komptech, 2009). Les technologies de compostage en système fermé sous bâtiment avec traitement de l'air offrent un meilleur contrôle des odeurs que les systèmes ouverts et ne génèrent aucune eau de lixiviation si toutes les opérations, incluant la phase de maturation, sont réalisées sous bâtiment.

La première étape consiste à gérer la réception des intrants au site de compostage et à séparer les résidus organiques des corps étrangers qui sont susceptibles de nuire au processus de compostage. Les matières sont inspectées visuellement pour retirer les corps étrangers facilement repérables et pouvant endommager les équipements. Dans la deuxième étape, les résidus organiques sont mélangés avec des agents structurants et inoculants comme copeaux de bois ou des résidus verts. Ensuite, les matières sont triées à l'aide d'un aimant magnétique pour l'enlèvement des métaux puis déchiquetées en particules fines pour être enfin acheminées par convoyeur à l'unité d'alimentations des tunnels fixes (Komptech, 2009).

Le procédé de compostage en tunnels utilise une ventilation contrôlée pour le captage et le conditionnement des émissions. À cette étape, le matériel est acheminé automatiquement aux

tunnels avec des bandes transporteuses. C'est dans ces tunnels que le processus de décomposition se déroule. Les temps de compostage des matières résiduelles dans la première série de tunnels varient de 7 à 10 jours, le temps de rétention dans la seconde série de tunnels est aussi d'environ 7 à 10 jours et la phase de maturation requiert environ 30 à 45 jours. Après cette dernière étape, le compost est prêt à être mis sur le marché (Komptech 2009).

1.2.1.2 Évaluation de la charge environnementale

Selon l'USEPA (2006), le compostage, lorsqu'il est géré correctement, ne génère pas d'émission de CH₄. Cependant, des émissions de méthane peuvent résulter du stockage de carbone (associé à l'application de compost sur les sols) et les émissions de CO₂ résultent des activités de transport et de retournement mécanique des tas de compost. L'EPA estime que les émissions de GES nettes du compostage centralisé sont de 0,05 teq.C/tonne humide des intrants organiques compostés et appliqués dans les sols agricoles.

Deux types potentiels d'émissions de GES sont associés avec le compostage: la première est le CH₄ provenant de la décomposition anaérobie, et la deuxième est le CO₂ provenant du transport des matières compostables et la rotation des tas de compost (USEPA, 2006).

Selon Paul (2001), le compostage semble avoir un bon potentiel pour réduire les émissions de GES provenant de l'agriculture. L'avantage supplémentaire est que le compostage aborde également un certain nombre de préoccupations environnementales comme la qualité des agents pathogènes, des surfaces, des eaux souterraines et les émissions d'ammoniac.

1.2.2 Le vermicompostage

Le vermicompostage comprend la transformation de diverses matières organiques et la production de deux types de produits valorisables: les vers de terre et le vermicompost. Les vers peuvent être utilisés pour l'alimentation de certains animaux comme les porcins et les

volailles. Le vermicompost est utilisé comme un engrais qui permet d'accroître la fertilité des sols (Ndegwa et Thompson, 2001). Le vermicompostage, aussi appelé lombricompostage, repose sur un processus aérobie naturel et idéalement inodore qui désigne la transformation des matières résiduelles organiques par les vers de terre. Ces petits animaux ingèrent des matières résiduelles organiques puis elles excrètent du fumier, lequel constitue un excellent amendement pour le sol. La transformation des matières résiduelles par les vers forme un humus plus riche que les autres types de compostage et sans éléments pathogènes (Chaoui, 2010).

Le vermicompostage peut se faire à petite échelle avec des matières résiduelles organiques ménagères, ou bien à grande échelle. Il représente une méthode de traitement des matières résiduelles qui produit peu ou pas d'odeurs et réduit de 30 % la masse de matières résiduelles (Chaoui, 2010). Les vers de terre produits sont utilisés soit pour réensemencer de nouveaux volumes de substrats organiques (Francis *et al.*, 2005).

Les vers de terre peuvent être épigés (ceux qui vivent à la surface du sol), endogés (ceux qui s'enfoncent jusqu'à 15 cm de profondeur) ou anéciques (ceux qui creusent des galeries verticales, d'environ 1 m de profondeur). Les vers de terre épigés comme l'*Eisenia Fœtida* sont les mieux adaptés pour ingérer des matières résiduelles organiques (Chaoui, 2010). Ces vers qui sont les mieux adaptés à la captivité mesurent entre 3,5 cm et 8,5 cm de long et peuvent aller dans de rares cas jusqu'à 13 cm. Son poids se situe entre 0,4 et 0,6 gr. Dans des conditions d'élevage appropriées, des spécimens peuvent atteindre jusqu'à 1 gramme (Röben, 2002).

Selon Munroe (2005), dans des conditions allant de bonnes à parfaites, les vers comme l'*Eisenia Fœtida* se reproduisent très rapidement. On peut s'attendre à voir doubler leurs populations tous les 60 à 90 jours, mais uniquement si les conditions suivantes sont remplies:

- nourriture adéquate;
- litière bien aérée et taux d'humidité entre 70 et 90 %;

- température maintenue entre 15°C et 30°C;
- densité de peuplement de départ supérieure à 2,5 kg/m² sans dépasser 5 kg/m².

Un système de vermicompostage bien conçu permet de transformer des matières résiduelles organiques en fumier de vers dans le délai de 22 à 30 jours (Chaoui, 2010). Ce procédé ne nécessite pas d'aération ni de mélange mécanique. Le taux d'humidité des matières résiduelles de 75 % est idéal pour le procédé. Les vers de terre ont besoin d'une température allant de 0°C à 35°C, idéalement de 20°C. Le processus ne produit pas de chaleur. Les litières couramment utilisées dans les bacs peuvent être remplacées par un grillage surélevé placé au fond du contenant avec suffisamment de fumier de vers pour éviter une densité de vers excessive et favoriser un bon drainage. Une aération et un drainage adéquat préviennent les odeurs et les mouches, et ils empêchent les vers de sortir des matières résiduelles. Le vermicompostage peut se faire à la maison, à la ferme ou à l'échelle industrielle dans des installations de traitement des matières résiduelles (Munroe, 2005).

Le vermicompostage est une technologie appropriée pour la conversion de différents types de matières résiduelles (organiques et industrielles) en matériaux à valeur ajoutée (Garg *et al.*, 2006). L'analyse de l'humus obtenu à partir de différents substrats organiques indique son utilité comme conditionneur de sol et de bonne source pour les éléments nutritifs des plantes dans l'agriculture (Ndegwa et Thompson, 2001).

L'espérance de vie des vers est de 2 ans dans des systèmes industriels, s'ils ne sont pas utilisés que pour la production d'humus. Un kilogramme de vers digère un kilogramme de matières résiduelles putrescibles entre une demi-journée et deux jours (Doré, 2006). Ce système est actuellement adapté à moyenne et grande échelle avec des systèmes automatisés, dans lesquelles sont contrôlés plusieurs paramètres tels que l'humidité, la température et la récolte mécanique du compost.

1.2.2.1 Technologie sélectionnée

La technologie sélectionnée pour la filière de vermicompostage a été développée par l'entreprise Tat-G Corp. Le modèle à utiliser est le "Eco-Verm Tat-G Tandem commercial ", système de traitement des matières résiduelles capable de traiter jusqu'à 750 kg/semaine (Vermiculture Canada, 2012).

L'Eco-Verm Tat-G Tandem Commercial est le seul système de traitement des matières résiduelles organiques conçu pour traiter une variété de matériaux organiques, en combinaison avec les emballages en carton. Un système traditionnel exige 1m² de surface de travail (zone active disponible pour que les vers puissent traiter les matières résiduelles) par 20 kg de capacité de traitement par semaine. Le vermidigesteur Eco-Verm Tat-G Tandem Commercial a adopté une approche en trois dimensions. Cette conception unique à double triangle optimise la capacité de traitement pour une zone donnée. Cela accélère le processus de conversion. L'excès d'eau qui est pulvérisé sur la masse organique se déplace vers le bas par gravité à l'arête inférieure de la cage triangulaire et est renvoyé vers le réservoir par l'intermédiaire d'un plateau de collecte de liquide. Le plateau inclut un filtre qui veille à empêcher toute matière étrangère de pénétrer dans le réservoir et d'endommager la pompe qui extrait l'eau dans le processus (Vermiculture Canada, 2012).

Le milieu intérieur du vermidigesteur est maintenu dans des conditions optimales grâce à l'énergie solaire. Un panneau solaire de 5 w alimente une batterie de 7 A/h d'un panneau solaire de 5 w qui alimente une batterie de 7 A/h. Cette batterie veille à ce que le système de contrôle d'humidité puisse fonctionner jusqu'à deux semaines dans le cas où de mauvaises conditions météorologiques arriveraient (Vermiculture Canada, 2012).

L'accès au vermidigesteur se fait par l'intermédiaire d'une manivelle amovible placée dans le haut. Cet accès permet l'utilisation de machinerie lourde tout comme l'application manuelle de matériaux lors de l'alimentation. Le retrait de la poignée offre une sécurité de piégeage accidentel. La partie extérieure est complètement amovible afin de donner accès à la masse

interne pour fournir une inspection visuelle rapide et offrir des possibilités éducatives (Vermiculture Canada, 2012).

1.2.2.2 Évaluation de la charge environnementale

Le système de vermicompostage à l'échelle industrielle produit un volume important de lixiviats. Ce type de lixiviats est moins polluant en comparaison aux lixiviats typiques des sites de compostage (Frederickson *et al*, 2003).

Des mesures préliminaires effectuées au Worm Research Centre (Angleterre) indiquent que le lombricompostage à grande échelle produit des taux élevés de NO₂. Les taux rapportés dans leur étude étaient sensiblement plus élevés que dans des opérations comparables en andains ou systèmes ouverts. Des études plus poussées sont nécessaires afin de déterminer l'ampleur de ce risque potentiel tout en évaluant des moyens de l'atténuer, s'il est prouvé qu'il existe bel et bien (Frederickson et Ross-Smith, 2004).

1.2.3 La digestion anaérobie

La digestion anaérobie ou méthanisation en usine ou en système fermé, est la transformation de la matière organique en biogaz principalement sous la forme du méthane et du gaz carbonique par une communauté microbienne qui fonctionne en absence d'oxygène. Cet enchainement constitue un processus naturel présent dans une multitude d'environnements tels que dans les marais, dans les intestins d'animaux, d'insectes et plus généralement, lors du stockage de la matière organique en absence d'oxygène (Moletta, 2008). La biodégradation des matières organiques par la digestion anaérobie produit du digestat et du biogaz, un gaz similaire au gaz naturel, formé principalement de méthane et de CO₂ (Görish et Helm, 2008). Une estimation évaluée à près de 1/3 de l'énergie primaire est produite par le biogaz qui, à son tour, est utilisé pour réchauffer et maintenir en température le digesteur (à température mésophile ou thermophile) (ADEME).

Le processus complet se produit en quatre étapes. L'hydrolyse, étape dans laquelle les molécules complexes sont décomposées en monomères constitutifs; l'acidogénèse, dans laquelle les acides sont formés; l'acétogénèse, où les substances de processus antérieures sont transformées en acétate, et la méthanogénèse, étape dans laquelle le méthane est produit à partir de l'acétate ou d'un atome d'hydrogène. La digestion n'est pas complète jusqu'à ce que le substrat ait subi toutes ces étapes, dont chacune a une population physiologiquement unique de bactéries responsables qui nécessitent des conditions environnementales diverses (Ostrem, 2004).

On distingue deux types de fermentation en fonction de la teneur en eau. La fermentation humide. C'est-à-dire, lorsque la teneur en matière sèche est inférieure à 20 %. Et la fermentation sèche, surtout lorsque la teneur est entre 20 et 50 %. Elles peuvent être réalisées à des températures mésophiles (35 à 40°C) ou thermophiles (environ de 55°C) (Moletta, 2008).

L'aspect le plus important du processus de digestion anaérobie est la production de biogaz qui contient entre 50 et 70% de méthane. Le biogaz est composé principalement de méthane et de dioxyde de carbone avec quelques composés d'autres gaz comme le sulfure d'hydrogène (H_2S). Avant d'être utilisés pour la production d'électricité, la vapeur d'eau et le sulfure d'hydrogène doivent être supprimés afin de protéger les machines contre la corrosion. L'ammoniac est souvent enlevé aussi. Le gaz résultant est un mélange de méthane et de dioxyde de carbone qui peut être utilisé directement en tant que combustible dans des appareils de génération d'électricité (Ostrem, 2004).

La digestion anaérobie produit le biogaz et le digestat – la partie résiduelle du processus. Si le biogaz a une importante fonction comme source d'énergie, le digestat, quant à lui, peut être utilisé comme amendement des sols (Lima Amarante, 2010).

Cette technologie a eu un plus grand développement sur le continent européen. Actuellement, les usines ont une capacité de traiter de 5000 à 300 000 tonnes de résidus par année (Lima

Amarante, 2010). Au Canada, la digestion anaérobie est surtout utilisée pour le traitement des boues municipales, provenant des stations d'épuration, des boues industrielles et des lisiers et fumiers. L'application de cette technologie au traitement des résidus organiques résidentiels est relativement limitée (Communauté métropolitaine de Montréal, 2006).

1.2.3.1 Technologie sélectionnée

Dans le cadre de cette étude, une installation de digestion anaérobie qui traite les résidus organiques par un procédé sec a été sélectionnée, plus exactement celui développé par Valorga international. Le procédé Valorga est un procédé biologique anaérobie de traitement de la fraction organique issue de matières résiduelles ménagères issues d'une collecte sélective ou non (Valorga, 2006a).

Cette technologie consiste dans un premier temps, en la mise en place d'une chaîne de tri mécanique, qui sépare la fraction biologique des métaux et d'autres matières résiduelles (Valorga, 2006d). Ensuite, la fraction organique est malaxée et hydratée, avec une siccité se situant entre 23 et 30 % (Moletta, 2008). Postérieurement, cette fraction organique est introduite dans le réacteur, où elle séjourne pendant environ trois semaines. Ce temps de séjour est permis par la présence d'une paroi médiane verticale qui divise le digesteur en deux héli sections et qui oblige les matières en fermentation à effectuer un cheminement circulaire pour le contourner, de sorte que les matières résiduelles introduites ne peuvent être extraites qu'après avoir parcouru toute la surface du digesteur (Valorga, 2006a). Finalement, après la sortie du réacteur, le digestat passe par une étape de maturation et d'hygiénisation d'une durée d'environ deux semaines (Valorga, 2006c). L'eau extraite du digestat est réchauffée et réutilisée dans le système pour humidifier les nouveaux intrants (Valorga, 2006c). Une autre possibilité est le traitement du digestat dans le processus de gazéification, c'est le cas dans l'étude présente, c'est-à-dire que pour l'approche, il est donc considéré comme un rejet de plus à éliminer à l'aide de la filière gazéification.

Le biogaz produit est utilisé pour la production de vapeur, pour la production d'électricité et de chaleur, ou après sa purification et il peut être utilisé de la même façon que le gaz naturel (Valorga, 2006b).

1.2.3.2 Évaluation de la charge environnementale

La digestion anaérobie contrôlée de la matière organique avec la récupération du biogaz empêche l'émission de méthane dans l'atmosphère. Également, dans le cas où le compost et le digestat sont utilisés comme amendements pour les sols, la pollution causée par la lixiviation des matières putrescibles dans le sol et dans les eaux souterraines est évitée (Lima Amarante, 2010).

Étant donné que l'humidification des matières résiduelles se fait en partie par la récupération et la recirculation d'une partie de l'effluent, l'utilisation de l'eau dans le processus est un facteur important dans la charge environnementale de cette technologie (Lima Amarante, 2010).

1.2.4 La gazéification

La gazéification est un procédé chimique qui permet de convertir la portion organique des matières résiduelles comme, entre autres, des résidus de nourriture, de papier, de carton et de plastique en un gaz combustible, dénommé syngas ou gaz de synthèse. Les composants principaux du syngas sont l'hydrogène (H_2) et le monoxyde de carbone (CO) (Carabin, 2008). Le pouvoir calorifique du syngas dépend du type de déchet traité (Antonini, 2005). La gazéification permet d'obtenir des rendements élevés à partir de biomasse. La performance électrique obtenue en génératrices entraînées par un moteur alimenté d'un gaz de synthèse peut atteindre jusqu'à 30-32% (IDEA, 2007). Dans le procédé de gazéification, la quasi-totalité des matières résiduelles est traitée. Le résidu du procédé est de la cendre blanche. La température élevée appliquée lors de l'oxydation secondaire contribue à réduire les émissions atmosphériques (Khoo, 2009).

La vitrification est un processus de fusion lors duquel la fraction inorganique des matières résiduelles est emprisonnée dans une matrice de verre. La roche qui en résulte, aussi appelée vitrifiât, est complètement stable et peut être utilisée comme agrégat dans des bétons (Carabin, 2008). Le procédé de vitrification permet d'encapsuler les métaux lourds qui pourraient être présents dans les matières résiduelles en les emprisonnant dans une matrice de verre.

1.2.4.1 Technologie sélectionnée

La technologie utilisée pour le scénario, dans le procédé de gazéification, est celle développée par l'industrie PyroGenesis Canada Inc. Cette entreprise a travaillé depuis plusieurs années avec un prototype qui permet de traiter thermiquement des matières résiduelles, des ordures ménagères, des matières résiduelles ultimes et de matières résiduelles spéciales. Elle permet de relier à la fois la vitrification et la gazéification avec une torche plasma à arcs non transférés qui inclut également la production électrique (Carabin et Holcroft, 2005).

Dans le procédé développé par PyroGenesis Canada Inc., les matières résiduelles sont d'abord broyées à la taille de particules convenant à l'alimentation dans le four ainsi que pour accélérer les réactions de gazéification (moins de 50 mm). Après le broyage, les matières résiduelles sont introduites dans le four à travers une série de convoyeurs et d'un chargeur hermétique. Une opération hermétique garantit que la réduction l'atmosphère du four peut être totalement contrôlée (Carabin et Holcroft, 2005). Ensuite, commence le traitement par plasma thermique, le but du système de traitement est de convertir la partie organique des matières résiduelles en gaz de synthèse. Dans cette étape, nous retrouvons trois composants principaux (Carabin et Holcroft, 2005). :

- un four à arc électrique, où les oxydes inorganiques se vitrifient dans les matières résiduelles, les matières résiduelles organiques se vaporisent et les métaux fusionnent;
- un cyclone chaud, parmi lequel se retirent les matières solides du gaz de synthèse;

- un gazogène secondaire, qui est utilisé pour assurer les réactions de gazéification et pour permettre de purifier le gaz brut qu'il peut contenir.

À partir de la gazéification secondaire, le gaz de synthèse contient un certain nombre de polluants, y compris des particules fines, des métaux lourds volatils, des chlorures et du soufre. Dans le système PRRS (Plasma Ressource Recovery System), ces polluants sont enlevés avant la combustion du gaz de synthèse dans un des moteurs à gaz. L'humidité contenue dans le gaz de synthèse est également supprimée afin d'améliorer ses propriétés de combustion. Le nettoyage de gaz de synthèse comprend les étapes suivantes (Carabin et Holcroft, 2005). :

- chambre de Quench, utilisée pour le refroidissement rapide des gaz;
- laveur Venturi, utilisé pour l'extraction des particules;
- paniers Bed laveur, utilisé pour l'acide soluble gaz à effet de suppression (par exemple HCl);
- absorbeur d'H₂S (sulfure d'hydrogène), utilisé pour l'élimination de H₂S;
- le filtre HEPA et le lit de charbon actif, pour les particules fines de déménagement et pour l'enlèvement des métaux lourds.

Après avoir été nettoyé, le gaz de synthèse est utilisé comme combustible dans un moteur à gaz. L'énergie du gaz est répartie de la façon suivante (Carabin et Holcroft, 2005). :

- perte : 10 à 15%;
- électricité : 35 à 40%;
- vapeur 25%;
- eau chaude 25%.

Le procédé PRRS développé par PyroGenesis Canada Inc. permet de n'avoir aucun rejet liquide et solide malgré des rejets atmosphériques respectant les réglementations en vigueur (Carabin et Holcroft, 2005).

Les composants inorganiques des matières résiduelles sont faits d'oxyde métallique, venant d'articles tels que le verre ou les cendres contenus dans les matières résiduelles organiques. Ces matériaux se mêlent dans le bain de métal en fusion avec des métaux lourds formant une couche sur le bas du four. Les oxydes de densité inférieure forment une couche distincte au-dessus de la couche de métal. La couche de métal est utilisée régulièrement et il est commercialisé comme de l'acier recyclé (Carabin et Holcroft, 2005).

Un moteur à combustion interne (CI) peut être alimenté par le gaz de synthèse une fois épuré. Nous estimons qu'un système traitant des matières résiduelles à haut pouvoir calorifique pourrait générer près d'un mégawattheure d'électricité par tonne de matières résiduelles traitées (1 MWh/t de production nette). (Carabin, 2008).

1.2.4.2 Évaluation de la charge environnementale

La technologie de gazéification par torche à plasma est caractérisée par une densité d'énergie élevée. Cela permet le traitement de la même quantité de matières résiduelles, mais dans des installations de plus petite dimension que celles utilisées pour les autres méthodes classiques thermiques. La gazéification présente de faibles émissions en comparaison aux autres technologies. Elle peut être utilisée comme une alternative de traitement des matières résiduelles grâce à d'importantes améliorations pour l'environnement au niveau des émissions atmosphériques et de la toxicité des lixiviats (Moustakas *et al.*, 2005). Les émissions atmosphériques liées à la combustion du syngas sont inférieures à celles émises lors de la combustion des matières résiduelles en incinérateur à grille (CIRAIG, 2007).

Les sous-systèmes de la gazéification comme l'épuration et le refroidissement de l'eau contiennent aussi de la chaleur sensible. Cela signifie que cette technologie permet la conversion d'un pourcentage élevé des matières résiduelles en produits utilisables. Par ailleurs, les procédés de combustion traditionnels exigent une quantité élevée d'air. En ce qui concerne la technologie du plasma, la réduction de l'air nécessaire entraîne une réduction notable des volumes des fumées épuisées. (Moustakas *et al.*, 2005.)

Dans un contexte où la réduction des volumes à enfouir est un enjeu majeur, la gazéification est une avenue technologique particulièrement intéressante due au fait que le vitrifiât produit est totalement inerte et peut être employé pour remplacer des matériaux de construction granulaires. L'évaluation d'impact dans un contexte du cycle de vie a montré que pour la plupart des matières résiduelles l'option pyrolyse / gazéification a un meilleur score de l'environnement. (Jan Saft, 2007).

1.2.5 Synthèse des filières référées

Chaque filière de traitement comprend plusieurs technologies de traitement dont l'objectif final est le même, la valorisation des matières résiduelles. Un résumé des filières de traitement des matières résiduelles, des technologies de traitements et des technologies sélectionnées pour la présente étude sont présentés à la figure 1.6.

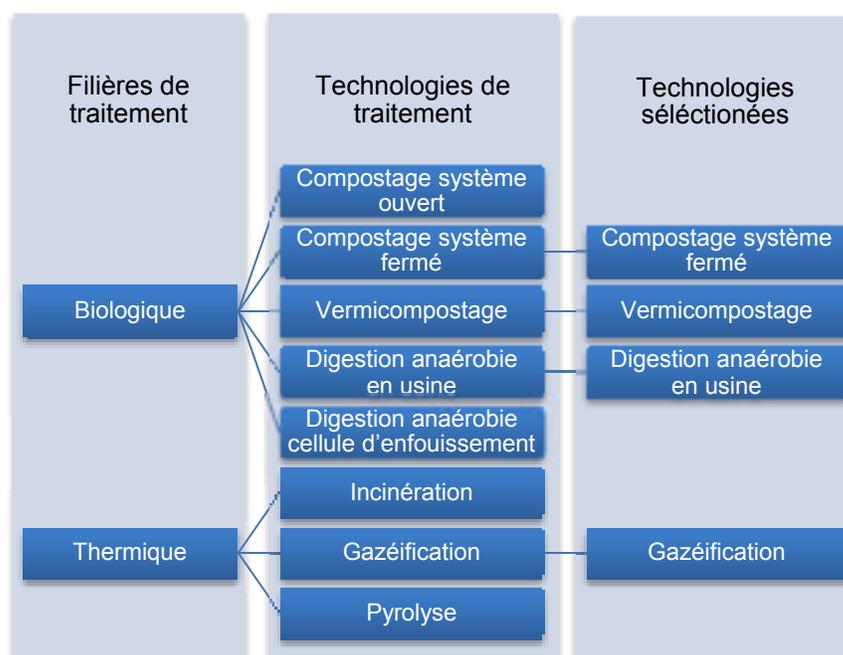


Figure 1.6 Résumé des filières et technologies de traitement de matières résiduelles.

1.3 Processus de gestion intégrée

La «gestion intégrée des territoires et de l'environnement» repose sur l'idée d'intégrer – ou de faire intégrer – les processus et résultats du développement, du maintien ou du rétablissement de certaines qualités des systèmes écologiques (Mermet *et al.*, 2005). Cependant, dans une gestion des matières résiduelles, le processus d'intégration est facilement sectorisé. La politique de gestion sélectionnée regroupe les divers programmes de traitement et valorisation des matières. Cependant, il n'existe pas de lien entre ceux qui coordonnent cette gestion, car elle est le résultat de programmes ou de projets isolés.

À ce jour, grâce aux nouvelles filières et techniques de gestion des matières résiduelles, les gestionnaires sont maintenant confrontés à une large gamme toujours croissante d'alternatives ayant des profils environnementaux, sociaux et économiques différents. L'éventail des outils et modèles de gestion de matières résiduelles proposé est si vaste, que pour les décideurs et les gestionnaires, prendre une décision devient à chaque fois de plus en plus complexe (Environnement Canada, 2007).

Pour résoudre les problèmes liés aux prises de décisions environnementales, des outils et modèles de simulation de l'environnement sont utilisés. Ils sont employés pour traiter l'information disponible et fournir une évaluation des scénarios envisagés afin de faciliter le choix auprès des décideurs.

Un modèle est une version simplifiée d'une partie de la réalité qui offre une description compréhensible d'une situation problématique (Qureshi *et al.*, 1999). Les modèles de simulation de l'environnement peuvent être utilisés pour déterminer les effets environnementaux, les implications de l'adoption d'une politique ou des mesures spécifiques. Ils peuvent être utilisés pendant le processus de prise de décision se référant au développement régional et urbain, à la pollution, à la gestion des matières résiduelles, au développement durable, à la gestion des ressources, etc.

Traditionnellement, les modèles fondés sur des outils d'aide à la prise de décision ont été utilisés pour l'identification et la quantification des impacts environnementaux ainsi que pour aider à déterminer lequel des sous-ensembles d'alternatives de gestion peut être considéré comme optimal (Ascough *et al.*, 2008). Au moment où un objet devient une matière résiduelle, plusieurs voies sont envisageables. En fonction des filières, des contraintes et des disponibilités, il peut parfois s'avérer complexe de déterminer quelle option est la plus «durable» (Jagielska, 1998). Pour appuyer une gestion durable des matières résiduelles, une large gamme des mécanismes est proposée; on trouve ainsi des actions présentant des analyses multicritères, des systèmes d'information géographique et des modèles de simulation, des modèles d'analyse de cycle de vie (ACV) ou des modèles basés sur des concepts de l'écologie industrielle.

1.3.1 L'analyse multicritère

L'analyse multicritère se compose d'une série de techniques (tels que la somme pondérée ou l'analyse de concordance) qui octroient un rang ou une série de critères relative à une question en particulier, laquelle doit être marquée, pondérée et par la suite, classée par différents groupes d'experts ou des intervenants (Qureshi *et al.*, 1999). Bien que l'attribution des poids des critères relève d'une certaine subjectivité, la démarche menée dans un cadre participatif des différents acteurs impliqués permet de conduire à un certain degré de consensus permettant l'intégration des multiples points de vue (Delgado et Sendra, 2004).

Lorsque le nombre d'alternatives proposées est limité, l'analyse multicritère est souvent utilisée pour arriver à une mesure de performance unique pour chaque alternative (Ascough *et al.*, 2008). Il existe également un besoin d'envisager des systèmes environnementaux, sociaux et économiques de manière intégrée, en particulier pour faire face aux problèmes communautaires ou régionaux de l'environnement ou les problèmes touchant à la variabilité des écosystèmes. Le domaine de l'analyse multicritère tente de combiner des critères sociaux, environnementaux et économiques dans une mesure de performance unique (Qureshi *et al.*, 1999).

1.3.2 Les systèmes d'information géographique

Le système d'information géographique (SIG), permet à partir de diverses sources de rassembler et d'organiser, d'analyser, d'élaborer et de présenter des informations localisées géographiquement, contribuant notamment à la gestion de l'espace. Dans les systèmes d'information géographique, le but ultime est l'aide à la décision, appuyée sur des connaissances géographiques et des moyens de traitement, de représentation et de communication de celles-ci. (Denègre et Salgé, 2004).

Le SIG est un outil puissant dans plusieurs phases du processus de planification telles que la phase de description et d'analyse du territoire, l'observation des interrelations existantes entre les différentes variables impliquées dans le processus, la génération d'alternatives, ou l'évaluation de celles proposées (Delgado et Sendra, 2004). Dans un système de gestion des matières résiduelles, les SIG ont le potentiel d'accélérer le processus de recherche de sites appropriés pour les installations de matières résiduelles et de permettre une analyse de sensibilité qui examinera les impacts de certains critères dans une zone cartographique (Higgs, 2006).

1.3.3 L'analyse de cycle de vie (ACV)

L'analyse de cycle de vie (ACV), vise à prendre en considération toutes les étapes du cycle de vie d'un produit, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à l'élimination finale (sous forme de matières résiduelles, d'énergie ou de produit recyclé), en passant par les étapes de la première et de la seconde transformation, du transport et de l'utilisation (Environnement Canada, 2007). Cette analyse aidera les décideurs à tenir compte des fardeaux environnementaux directs et indirects résultant des activités qui ont lieu tout au long du cycle de vie de ce produit (Ekvall *et al.*, 2007).

L'ACV calcule le poids environnemental par kilogramme ou tonne de matières résiduelles générées, mais elle est insuffisante face aux variations des quantités de matières résiduelles

généérées (Thériault, 2011). Également, elle ne tient pas compte des défis importants posés par les flux de matières résiduelles et de ses variations à court et à long terme. Par conséquent, l'ACV ne fournit pas d'informations sur la façon de traiter les matières résiduelles. Les modèles traditionnels de l'ACV sont également statiques. Dans le contexte de la gestion des matières résiduelles, cela implique qu'ils ne peuvent pas donner des informations sur le moment appropriées pour des investissements dans les usines de gestion des matières résiduelles. (Finnveden *et al.*, 2007).

1.3.4 L'écologie industrielle

L'écologie industrielle peut se définir comme «une approche intégrée d'analyse et de réduction des flux de matière et d'énergie visant à améliorer l'éco-efficience des métabolismes industriels par la promotion de filières, de valeurs et de pratiques destinées à assurer la protection, la durabilité ainsi que le renouvellement des ressources nécessaires au développement» (Boiral et Croteau, 2001). Ce concept promeut l'optimisation de l'usage des ressources, la réduction de la production des matières résiduelles dans les systèmes de production et de consommation en réintroduisant les matières comme matières premières dans d'autres procédés de production.

Selon Erkman *et al.* (2001) le concept d'écologie industrielle repose sur trois idées principales:

- «une vision d'ensemble, systémique et intégré, de toutes les composantes du système économique industriel et de leurs relations avec la biosphère est nécessaire;
- le substrat biophysique du système industriel, c'est-à-dire, la totalité des flux et stocks de matières et d'énergie liés aux activités humaines constitue le champ d'études de l'écologie industrielle;
- une dynamique technologique intégrative constitue un facteur crucial – mais non exclusif – pour favoriser l'évolution du système industriel actuel vers un système

vable, un écosystème industriel inspiré par le fonctionnement de la biosphère» (Erkman *et al.*, 2001).

L'écologie industrielle vise à modifier les modes de production et de consommation, en réduisant la quantité de matière et d'énergie employée dans les processus industriels tout en intégrant, dès la conception des produits, l'objectif de maîtrise des matières résiduelles et la réutilisation de leurs composantes (Tranchant *et al.*, 2004).

Un avantage de l'écologie industrielle est qu'elle représente un modèle adéquat pour tout système de gestion des matières résiduelles (municipal, industriel, institutionnel, etc.) (Rojo, 2009). Par l'écologie industrielle, il est possible d'établir un bilan des flux de matières et d'énergie nécessaires au fonctionnement des différentes activités économiques, ce qui pourrait aider les décideurs à répondre à certains défis environnementaux de même qu'évaluer les actions en cours (Evangelista, 2006).

Actuellement, un des obstacles pour les décideurs, qui visent à appliquer le principe de l'écologie industrielle à un système, est d'harmoniser les notions d'économie, d'environnement et de société dans leur prise de décision (Rojo, 2009). Le système industriel actuel est immature ou primitif dans sa relation avec la nature. C'est - à dire, est un système caractérisé par un faible taux de recyclage de la matière et des flux rapides d'énergie et de matières. Ce système doit être mené à maturité pour le rendre compatible avec le fonctionnement «normal» des écosystèmes naturels, lesquels se caractérisent entre autres pour avoir des taux élevés de recyclage de matières (Erkman, 1998).

Enfin, le développement de l'écologie industrielle offre des alternatives efficaces au problème de la croissance rapide de la quantité de matières résiduelles générée par l'industrie (Boiral et Kabongo, 2005). Le principal défi est d'avoir une bonne connaissance des filières industrielles et commerciales qui rendent possible la valorisation de matériaux normalement mis de côté dans les réseaux de distribution. Ainsi, un des enjeux de l'écologie industrielle repose sur la capacité à identifier des partenariats non seulement entre des acteurs présents

sur le territoire, mais également identifier des partenariats potentiels basés sur la valorisation des rejets solides, liquides ou gazeux dans l'environnement. (Thomas *et al.*, 2003).

1.4 Problématique de la gestion des matières résiduelles

Un système de gestion de matières résiduelles comme tout autre système est évolutif. Pour la plupart des décideurs, professionnels et législateurs, cette prémisse n'est pas prise en compte au moment de prendre une décision, c'est-à-dire que les décisions qu'ils prennent ne représentent pas les meilleures solutions face aux conditions futures. Même, si dans les dernières années plusieurs filières de gestion de matières résiduelles ont eu un accroissement grâce au développement technologique, ces filières sont souvent incapables de recevoir l'ensemble de matières à récupérer (Rojo, 2009). Hélas, les volumes de matières résiduelles non valorisés sont souvent détournés vers l'enfouissement.

Cet énoncé est supporté par des organisations comme RECYC-QUEBEC, qui affirme :

«Bien que l'industrie du compostage soit bien implantée au Québec, il est reconnu que les centres de compostage actuels ne pourront répondre à toute la demande que créera la mise en application des PGMR adoptés par les municipalités québécoises. Dans plusieurs régions du Québec, il y a un besoin d'implanter de nouvelles installations de traitement afin d'éviter que les matières ne soient transportées sur de grandes distances et ainsi augmenter indûment les coûts de la récupération et les impacts environnementaux liés au transport. En particulier, les régions où l'on retrouve les plus grandes concentrations de population et d'entreprises du secteur ICI productrices de matières compostables n'ont pratiquement pas, sur leur territoire, d'installations de traitement pouvant répondre à leurs besoins». (RECYC-QUEBEC, 2006)

De plus, les outils d'aide à la prise de décision ont souvent une tendance statique : ils sont déficients pour analyser les variations des quantités des matières résiduelles générées de même qu'ils ne tiennent pas en compte des tendances, à court et à long terme, des flux de matières résiduelles en augmentation.

Dans la gestion des matières résiduelles et surtout dans le choix de filières de valorisation, les outils opérationnels d'aide à la prise de décision sont indispensables pour l'évaluation du flux et de la composition des matières résiduelles, pour les éléments variables des systèmes ou des filières de traitement des matières résiduelles (compostage, digestion anaérobie, gazéification), pour l'établissement des contraintes minimales d'élimination et pour la mesure des impacts environnementaux.

Selon Rojo *et al* (2008) :

«Le développement des outils de gestion des matières résiduelles devrait notamment s'appuyer d'une part sur les lois dynamiques du marché spécifiques à chaque débouche (produits générés par les activités de la filière) et, d'autre part, les contraintes associées à leur approvisionnement qui portent tant sur la diversité des sources que sur les caractéristiques (quantités et qualités) des matières résiduelles qui y sont associées» (Rojo *et al*, 2008).

Aujourd'hui, voit émerger une nouvelle approche de la gestion des matières résiduelles selon les principes d'analyses systémiques est privilégiée au lieu de traiter les matières résiduelles selon un type spécifique de matière. (Rojo 2009). Il existe également un besoin d'envisager des systèmes environnementaux, sociaux et économiques de manière intégrée, en particulier pour faire face à la variabilité des écosystèmes. C'est le cas de l'approche systémique) de l'écologie industrielle qui représente un modèle approprié pour tout système de gestion des matières résiduelles.

Alors que la recherche fondamentale en écologie industrielle aborde des questions de la façon dont le système industriel peut évoluer pour réduire les impacts environnementaux, la recherche appliquée se concentre sur les méthodes et les données nécessaires pour évaluer les produits spécifiques, des installations ou des industries (Thomas. *et al.*, 2003). Dans la gestion de matières résiduelles, les systèmes étudiés ont pour fonction principale de gérer une quantité donnée de matières. Toutefois, parmi les processus évalués se trouvent des filières qui, en plus de gérer les matières résiduelles, fournissent un produit valorisable.

Dans cette approche, il n'est pas convenable d'opter pour une méthode traditionnelle de valorisation ou élimination qui repose seulement sur la hiérarchisation des filières ou sur le choix préalable du mode de disposition. Une option plus durable serait d'adopter une approche de gestion capable d'évoluer et de s'adapter aux changements de l'ensemble du système qui repose sur la dynamique des débouchés (produits générés par les activités de la filière), la diversité de sources et les caractéristiques des générateurs.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

Le présent chapitre présente la méthodologie développée pour la conception de l'approche dynamique de gestion des matières résiduelles. La première étape vise à définir le système à étudier. Une base de données des types de matières résiduelles à valoriser sera établie à partir d'un scénario proposé. De plus, les frontières de ce scénario seront également établies.

Ensuite, dans une deuxième étape, un schéma global sera présenté, il concerne l'approche et la distribution des flux des matières résiduelles et des produits et sous-produits de chaque technologie. Sous le même ordre d'idée, les calculs mathématiques développés seront décrits afin d'explicitier la distribution des flux dans le système.

Puis, au sein de la troisième étape seront présentées les quatre performances techniques des filières de valorisations sélectionnées dans le projet : le compostage en système ferme, le vermicompostage, la digestion anaérobie et la gazéification. Enfin, l'approche multifilière sera évaluée à partir de critères explicités et d'une analyse comparative des scénarios envisagés.

2.1 Définition du système

Dans la définition du système sont établies les conditions dans lesquelles l'approche a été développée, autant que les limites qui déterminent son fonctionnement.

2.1.1 Description du scénario de gestion des matières résiduelles proposé

À des fins de démonstration, le scénario proposé est fictif, cependant, ce dernier a été élaboré sur la base de conditions réelles. Le scénario établi porte sur la gestion de matières résiduelles produites par une municipalité québécoise de 100 000 habitants. Le scénario porte

également sur la valorisation des matières résiduelles organiques et ultimes dont une collecte à trois voies est faite tout en considérant la quantité de matières résiduelles par personne générées au Québec en 2008. Voir figure 1.1 Bilan de la gestion des matières résiduelles de 1998 à 2008.

2.1.2 Frontières du scénario

Les frontières établies du scénario concernent notamment le traitement des matières résiduelles dans le cas d'une collecte à 3 voies où les matières résiduelles organiques sont collectées de manière indépendante des matières résiduelles recyclables et des ordures ménagères. Ces frontières envisagent également le traitement des filières disponibles, sa capacité de traitement et les besoins de la municipalité par rapport aux produits de chacune. Les matières résiduelles recyclables sont nommées à titre indicatif seulement. Par ailleurs, le scénario est établi spécifiquement sur la phase d'opération du traitement des matières résiduelles. Ainsi, les phases de construction et de démantèlement des bâtiments infrastructures et équipements ne sont pas prises en compte.

2.2 Détermination du système

Le système de l'approche comprendre la municipalité, ses besoins, la quantité des matières résiduelles qu'elle génère et les technologies de valorisations des matières résiduelles. Partant des données et frontières du scénario, une simulation des besoins en intrant vers les filières de valorisation de matières résiduelles de la municipalité est réalisée. À partir de ces besoins et des flux des matières résiduelles disponibles, les lois qui gouvernent l'équilibre entre l'approvisionnement de filières et les produits générés sont établies. Un schéma global du système est présenté à la figure 2.1

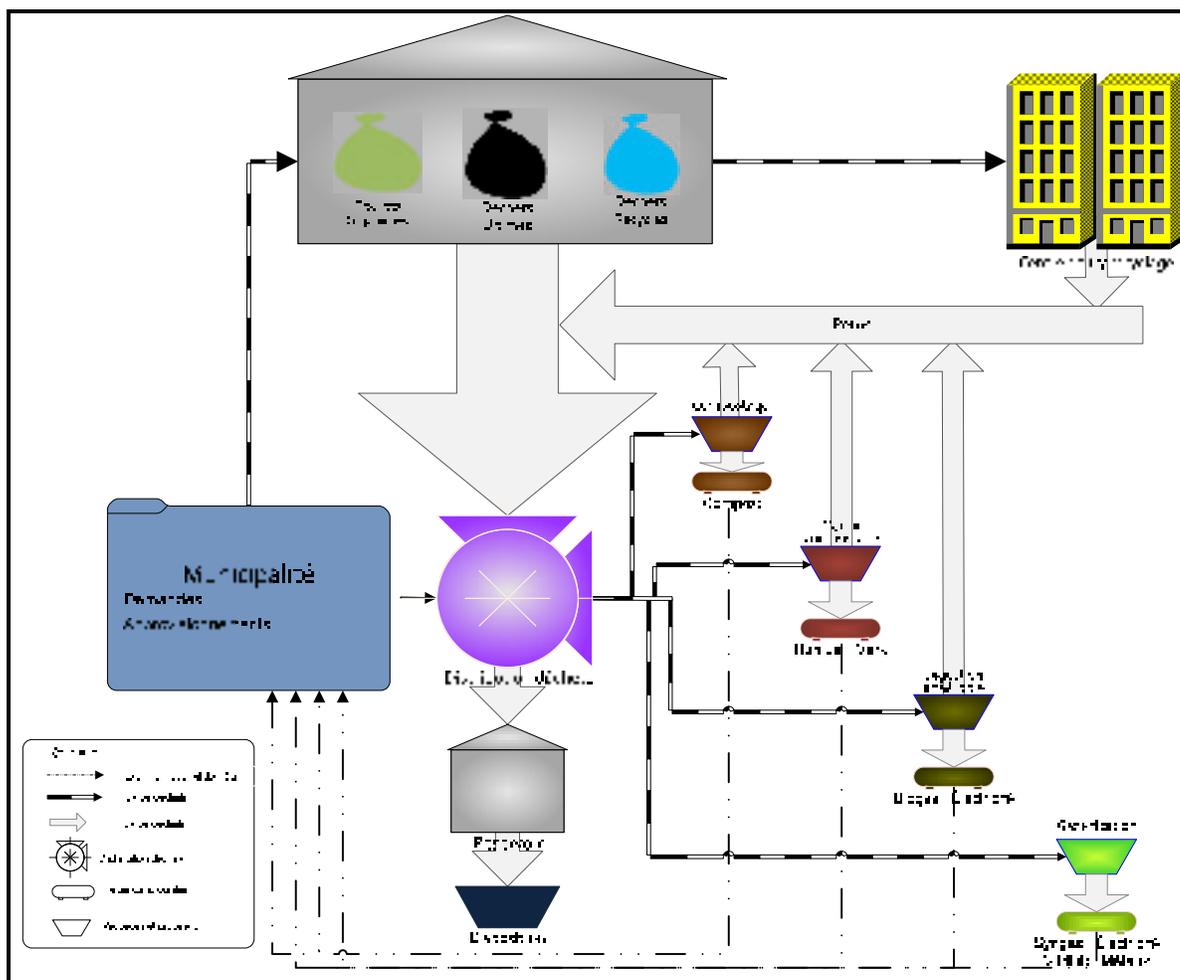


Figure 2.1 Schéma global du système.

2.2.1 Distribution des flux

La distribution des flux de matières résiduelles vers les filières de valorisation a été réalisée selon un ordre préétabli et prend en compte l’empreinte environnementale que la gestion de matières résiduelles peut générer dans un système lors de son implantation. La hiérarchisation des technologies dans l’approche est donc faite principalement en fonction des types de matières générées, de la charge environnementale de la technologie utilisée et du coût économique de l’implantation de la technologie.

À partir du calcul de différentes variables comme les rendements de matières résiduelles, les quantités de matières résiduelles nécessaires pour les besoins, la quantité de matières résiduelles à traiter selon sa fréquence, l'approche est alors développée. Les variables qui interviennent dans le développement de l'approche multifilière sont présentées ci-dessous.

Quantité de matières résiduelles (Qd)

C'est la quantité des matières résiduelles qui entre dans le système. Dans notre scénario, des types de matières résiduelles générés par la municipalité les seules traitées seront les matières résiduelles organiques et ultimes.

Besoins du système (Bs)

Cet élément correspond aux différents produits que chaque technologie offre telle que le compost, l'humus, l'énergie électrique, le biogaz et le syngas.

Rendements des matières résiduelles (Rtr)

Ce rendement peut être calculé à partir de la quantité de matières résiduelles nécessaire pour produire un certain produit. Par exemple, la quantité de matières résiduelles nécessaire pour produire une tonne de compost. Cette donnée dépend du grade de la technologie utilisée.

Ratio de matières résiduelles nécessaires pour les besoins (Qb)

C'est la quantité de matières résiduelles qui est nécessaire pour combler les besoins et sa valeur s'obtient à partir des rendements des matières résiduelles (Rtr) et des besoins du système (Bs).

$$Qb = \frac{Rtr}{Bs} \quad (2.1)$$

Matières résiduelles à redistribuer (Re)

Cette variable correspond à la quantité de matières résiduelles à distribuer aux autres filières du système, tout en déterminant la quantité de matières résiduelles à envoyer au réservoir.

Disponibilité technologique (Dt)

C'est une option qui est implémentée pour activer ou non la technologie dans le système. Par exemple, s'il y a une technologie que nous ne souhaitons pas utiliser contrairement à d'autres, la technologie est alors automatiquement désactivée et nous pouvons poursuivre avec les autres.

Quantité de matières résiduelles à traiter (Qt)

Ce paramètre représente la quantité de matières résiduelles qui va être distribuée dans chaque technologie selon les caractéristiques techniques des filières et la disponibilité des matières résiduelles. Cette valeur a été calculée à l'aide du logiciel Excel, en développant une série de fonctions conditionnelles pour déterminer un flux des matières résiduelles selon les paramètres techniques préétablis des filières de valorisation. Son principe est explicité dans la figure 3.1.

Quantité de produits générés (Qg)

C'est la quantité de produits générés à partir de la technologie utilisée. Cette valeur est obtenue à partir du rendement des matières résiduelles (Rtr) et la quantité de matières résiduelles à traiter (Qt).

$$Qg = Rtr * Qt \quad (2.2)$$

Capacité maximale (Cm)

Est la capacité maximale de traitement des matières résiduelles qu'offre la technologie à utiliser dans un temps déterminé, par exemple la quantité de matières qui reçoit une technologie par journée.

2.3 Filières de traitement

La municipalité a le choix entre quatre filières qui ont une capacité de traitement différente et une capacité de réserve maximale. Pour les filières de valorisation des matières résiduelles, la

municipalité a aussi le choix entre les produits de chaque technologie parmi lesquelles se trouvent l'électricité, le biogaz, le syngas, l'humus et le compost. Quant aux procédés de valorisation, il est possible d'obtenir des sous-produits comme les vers, le digestat, le vitrifiât et les métaux. La capacité annuelle, les produits et sous-produits des filières sont présentés au tableau 2.1.

Tableau 2.1 Filières disponibles

Filières à utiliser	Produits	Sous-produits
Vermicompostage	Humus	Vers
Compostage système fermé	Compost	NA ¹
Digestion anaérobie	Biogaz	Digestat
Gazéification	Syngas Électricité	Vitrifiât Métaux

¹ N/A : Non applicable

2.3.1 Performances techniques des filières de valorisation utilisées

Dans l'application des filières de valorisation pour le scénario exposé, les données relatives aux types de traitement ont été issues de technologies particulières choisies pour des fins d'exactitude de l'étude.

Partant de l'hypothèse d'une collecte à trois voies, c'est-à-dire que les matières résiduelles alimentaires et vertes sont triées à la source, nous pouvons établir une composition des matières résiduelles organiques de 90% et des rejets du procédé de 10% (pourcentage valide uniquement pour les filières de traitement biologique). Au travers des matières résiduelles organiques, 50% sont des matières résiduelles vertes et 50% des matières résiduelles alimentaires.

Les paramètres techniques des filières de valorisation de matières résiduelles utilisés pour le développement de l'approche multifilière sont présentés au tableau 2.2.

Tableau 2.2 Paramètres techniques des filières de valorisation de matières résiduelles¹

VERMICOMPOSTAGE						
Entrée				Sortie		
Électricité (w/t)	Temps de rétention (jours)	Température (°C)	Densité de départ (kg vers)	Rejets solides à éliminer (t/t)	Densité (kg vers à 90 jours)	Humus (t/t)
5	30	15-25	900	0,1	1800	0,4
COMPOSTAGE						
Entré			Sortie			
Électricité (kWh/t)	Temps de rétention (jours)	Agents structurants (t/t)	Rejets solides à éliminer (t/t)	Compost (t/t)		
80	45	0,15	0,1	0,4		
DIGESTION ANAÉROBIE						
Entrée			Sortie			
Eau ajoutée (m3/t)	Électricité (MWh/t)	Agents structurants (t/t)	Rejets solides à éliminer (t/t)	Eaux usées (m3/t)	Digestat (kg/t)	Biogaz (m3/t)
0,3	0.12	0,09	0,1	0,27	0,2	120
GAZÉIFICATION						
Entrée		Sortie				
Eau ajoutée (m3/t)	Électricité (MWh/t)	Syngas (Nm3/t)	Vitrifiât (kg/t)	Métaux (kg/t)	Électricité (MWh/t)	
3,8	0,39	843	145	64	0,483	

¹Tiré de (Arquin 1985) (Munroe 2005) (Misra. *Et al.* 2005) (Vermiculture Canada) (Roben 2002) (Communauté métropolitaine de Montréal, 2006.) (Communauté métropolitaine de Montréal, 2007) (RECY-QUÉBEC, 2011.) (ADEME, 2009) (Valorga, 2006) (Carabin P. et Gillian H, 2005)

2.4 Scénario de gestion

Dans la chaîne de gestion des matières résiduelles, l'enfouissement est le dernier maillon. Effectivement, il concerne la fraction des matières résiduelles qui ne peut pas être valorisée par réemploi ou recyclage dans des conditions techniques du moment. Pour la présente étude, le critère d'évaluation choisi est la quantité de matières résiduelles qui doit être envoyée au

centre d'enfouissement selon l'utilisation ou non des filières de valorisation des matières résiduelles.

Selon les données exposées auparavant, il est possible de réaliser une analyse comparative des scénarios selon les technologies disponibles. Dans les trois scénarios présentés, la quantité de matières résiduelles valorisées est calculée tout comme celle envoyée au centre d'enfouissement selon la disponibilité des technologies. Selon la technologie utilisée dans chaque scénario, une certaine quantité des matières résiduelles va être valorisée et la quantité restante sera envoyée au site d'enfouissement. Le tableau 2.3 présente les scénarios et la disponibilité technologique de chacun.

Tableau 2.3 Analyse comparative des scénarios

	Vermicompostage	Compostage système fermé	Digestion anaérobie	Gazéification
Scénario 1	X	X	X	X
Scénario 2		X	X	
Scénario 3			X	X

Il est aujourd'hui possible d'affirmer que presque toutes les matières résiduelles enfouies sont perdues. L'analyse des scénarios établis permet alors d'avoir un aperçu des matières résiduelles qui sont perdues à cause de leur non-valorisation.

Le choix des technologies dans chaque scénario correspond à différents critères, dont l'introduction des nouvelles technologies plus performantes et la facilité d'implantation. Notamment, dans le scénario 1, la municipalité prend en charge toutes les technologies pour visualiser l'ensemble des éléments dans le système et leur comportement. Au scénario 2, une sélection des deux des technologies les plus utilisées au Québec pour offrir un portrait réaliste au système est présentée et finalement sous le troisième scénario, une introduction

d'une nouvelle technologie qui offre une gamme plus grande des produits est offerte tout en démontrant une pleine expansion actuelle.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS

Au regard du scénario, l'approche à développer permet de déterminer un équilibre dynamique entre l'approvisionnement de filières et les produits générés tout en évaluant leur capacité à absorber les variations des flux associés à la gestion des matières résiduelles. Les calculs répondants à cette prémisse sont exprimés dans la première partie de ce chapitre avec le développement de l'algorithme.

Ce chapitre porte aussi sur la présentation des résultats obtenus avec l'exemple d'application dans le système proposé. Les données comme la quantité de matières résiduelles générées, les filières disponibles, ses capacités techniques et les produits offerts seront également exposées.

Finalement, la partie finale de ce chapitre présente l'analyse comparative des scénarios, selon les technologies disponibles, les quantités de matières résiduelles générées, valorisées ou enfouies.

3.1 Développement de l'algorithme

En tenant compte des paramètres présentés auparavant, comme la quantité des matières résiduelles à valoriser, les besoins de la municipalité et les paramètres techniques des filières de traitement, dont, entre autres, la capacité maximisée du traitement et la quantité de produits générés par tonne de déchet, il est possible de déterminer l'approvisionnement équilibré des procédés. Les variables qui interviennent dans le développement de l'approche permettent de distribuer les flux de matières dans le système, même si une ou plusieurs filières ne sont pas utilisées. La figure 3.1 présente l'algorithme de distribution des flux de matières résiduelles.

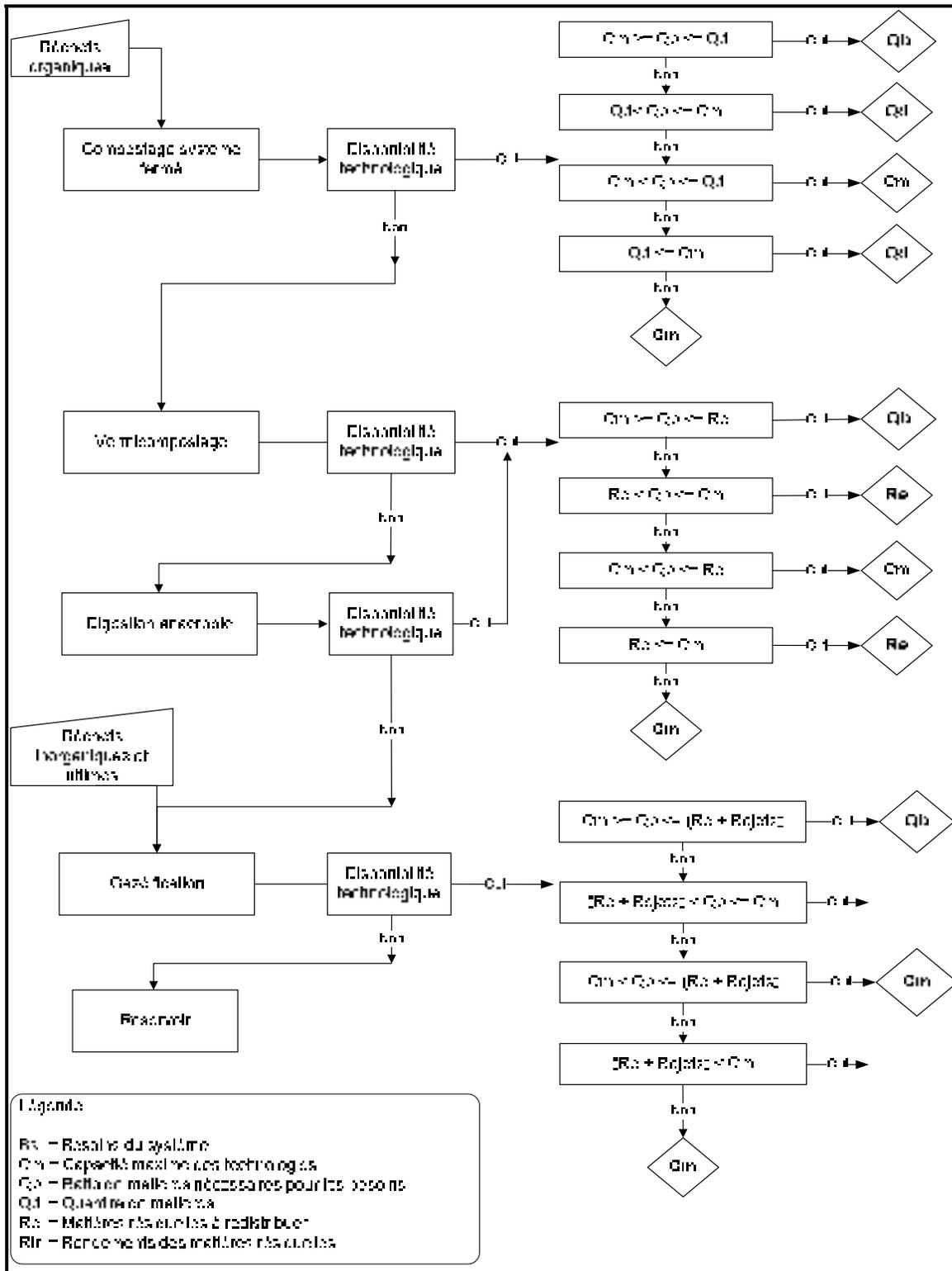


Figure 3.1 Algorithme de distribution des flux de matières résiduelles dans l'approche.

La distribution des flux dans l'approche prend en compte d'abord de la disponibilité technologique (Dt). Si les technologies sont disponibles, l'approche peut ensuite envoyer des matières vers ses technologies, car sous le cas contraire, l'approche saute vers la technologie suivante.

Dans la figure 3.1, la première technologie est le vermicompostage. Si la municipalité a besoin de leur produit et que cette technologie est disponible, il sera alors possible de continuer vers des analyses logiques conditionnelles comme :

$$Cm \geq Qb \leq Qd$$

(3.1)

Si le ratio de matières résiduelles nécessaires pour les besoins (Qb) est inférieur ou égal à la capacité maximale de cette technologie (Cm) et supérieure ou égal à la quantité des matières résiduelles, l'approche envoie alors le ratio des matières résiduelles nécessaires pour les besoins (Qb) à la technologie. Cependant, si cette hypothèse n'est pas vraie alors l'approche continue vers la prochaine affirmation :

$$Qd < Qb \leq Cm$$

(3.2)

Si le ratio de matières résiduelles nécessaires pour les besoins (Qb) est inférieur à la quantité de matières résiduelles (Qd) et qu'il est également supérieur ou égal à la capacité maximale de la technologie (Cm), l'approche envoie alors le ratio des matières résiduelles nécessaires pour les besoins (Qb) à la technologie. Nonobstant, si l'affirmation antérieure n'est pas correcte alors, l'approche continue vers la suivante, laquelle est :

$$Cm < Qb \leq Qd$$

(3.3)

Si le ratio de matières résiduelles nécessaires pour les besoins (Q_b) est inférieur à la capacité maximale de la technologie (C_m) et qu'il est supérieur ou égal à la quantité de matières résiduelles (Q_d), l'approche envoie alors la quantité maximale (C_m) à la technologie. Si l'affirmation antérieure n'est pas exacte, l'approche continue vers l'affirmation suivante:

$$Q_d \leq C_m$$

(3.4)

Si la quantité de matières résiduelles (Q_d) est inférieure ou égale à la capacité maximale de la technologie alors l'approche utilise la quantité de matières résiduelles (Q_d). Toutefois, si cette affirmation n'est pas exacte, l'approche envoie alors la capacité maximale (C_m) de la même vers la technologie.

Dans le cas du compostage en système fermé et de la digestion anaérobie, l'approche utilise la même analyse logique qu'auparavant. L'unique variable qui se modifie au sein de ses deux technologies est la quantité des matières résiduelles (Q_d), laquelle est remplacée pour la variable des matières résiduelles à distribuer (Re).

Pour ce qui a trait à la technologie de gazéification, l'approche inclut les rejets des autres technologies et il les somme à la variable des matières résiduelles à distribuer (Re).

3.2 Génération des matières résiduelles

Pour avoir un aperçu de la capacité du système à s'adapter aux fluctuations, nous implanterons une variation mensuelle de la quantité de matières résiduelles à valoriser (notamment les résidus organiques, recyclables et ultimes) ainsi que des variations des besoins de produits pour la municipalité de 100 000 habitants, tout au long de l'année.

Les données qui seront exposées dans cette section correspondent aux résultats de l'approche dans le premier scénario (voir section 2.2 Scénario de gestion). Celles des scénarios 2 et 3 seront présentes dans l'annexe I.

3.2.1 Flux de référence

Les flux de référence correspondent aux tonnages annuels de matières résiduelles à gérer. Pour les matières résiduelles qui sont récupérées (selon le taux de 52% de récupération présente en la figure 1.1 Bilan de la gestion des matières résiduelles au Québec de 1998 à 2008), il est possible d'estimer une composition de 45% de matières résiduelles organiques et de 35% de matières résiduelles recyclées. Pour les matières résiduelles ultimes, 90% des matières résiduelles seront traitées dans le scénario. Le 10% restant des matières ultimes est des matières qui sont disposées en dehors du système de collecte, comme les piles, les batteries, les lampes, etc. C'est-à-dire que pour l'année 2008, 169 000 tonnes des matières résiduelles ont été générées, dont 81 000 tonnes récupérées (desquelles, 36 450 tonnes correspondent à matières organiques et 28 350 tonnes à matières recyclables) et 88 000 tonnes éliminées (dont, 79 200 tonnes seront traitées dans le scénario). Les données utilisées pour l'établissement des scénarios de gestion des matières résiduelles sont présentées au tableau 3.1.

Tableau 3.1 Quantités de matières résiduelles à valoriser dans la municipalité

Types de matières résiduelles générés	Quantités à valoriser 2008 (t/an)
Matières résiduelles organiques	36 450
Matières résiduelles recyclables	28 350
Matières résiduelles ultimes	79 200
Sous total à valoriser	144 000
Autres types de matières résiduelles générés	16 200
Matières résiduelles ultimes non traitées dans le système	8 800
TOTAL	169 000

Parmi les produits offerts par les filières de valorisation des matières résiduelles, la municipalité a le choix entre l'électricité, le biogaz, le syngas, l'humus et le compost. Les sous-produits des filières (les vers, le vitrifiât et les métaux) sont incorporés aux procédés, en conséquence l'approche a inclus ces quantités dans les calculs seulement comme un extrait du procédé. Le tableau 3.2 présente un scénario potentiel des besoins mensuels des produits que la municipalité désire obtenir.

Tableau 3.2 Besoins de la municipalité en 2008

	Électricité (MWh)	Biogaz (m ³)	Syngas (Nm ³)	Compost (t)	Humus (t)
Janvier	5 600	50 000	2 500	200	3,0
Février	5 100	59 000	3 000	225	2,8
Mars	5 850	65 000	2 800	240	3,0
Avril	7 600	75 000	3 000	270	3,4
Mai	8 080	115 000	3 500	338	3,5
Juin	8 100	120 000	3 500	340	3,5
Juillet	7 400	90 000	3 400	310	3,4
Août	7 850	95 000	3 000	300	3,3
Septembre	7 600	90 000	2 300	255	3,3
Octobre	8 000	95 000	3 000	225	3,3
Novembre	7 900	90 000	3 500	170	2,7
Décembre	5 400	70 000	1 400	150	2,0
TOTAL	84 480	1 014 000	34 900	3 023	37,15

3.2.2 Variation saisonnière

Pour mesurer la variation saisonnière de la génération des matières, le facteur de saisonnalité appliqué a été calculé parmi les données recensées pour la collecte des déchets dans la caractérisation des matières résiduelles du secteur résidentiel au Québec 2006-2007 (se référer à la figure 1.4 Variation saisonnière à la moyenne annuelle pour la collecte des déchets). Le tableau 3.3 et la figure 3.2 présentent le scénario d'évolution de la variation des matières résiduelles et le facteur de saisonnalité calculé pour la municipalité en 2008.

Tableau 3.3 Quantité des matières résiduelles à valoriser en 2008

	Facteur de saisonnalité	Matières résiduelles organiques (t)	Matières résiduelles ultimes (t)	Matières résiduelles recyclables (t)
Janvier	0,77	2 339	5 082	1 819
Février	0,72	2 187	4 752	1 701
Mars	0,83	2 506	5 445	1 949
Avril	1,06	3 205	6 963	2 492
Mai	1,23	3 741	8 129	2 910
Juin	1,28	3 873	8 415	3 012
Juillet	1,05	3 184	6 919	2 477
Août	1,11	3 356	7 293	2 611
Septembre	1,06	3 225	7 007	2 508
Octobre	1,10	3 351	7 282	2 607
Novembre	1,08	3 275	7 117	2 548
Décembre	0,73	2 207	4 796	1 717
TOTAL		36 450,00	79 200,0	28 350,0
			144 000	

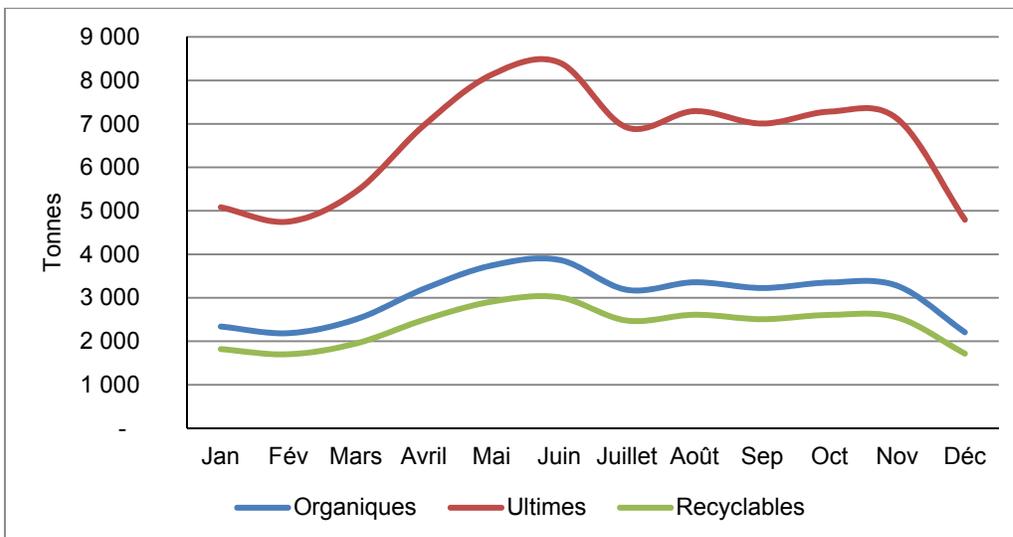


Figure 3.2 Variations de matières résiduelles produites en 2008.

Au regard de la figure 3.2, on observe une ressemblance dans la variation saisonnière des différents types de matières, c'est-à-dire que la variation annuelle des quantités produites pour chaque type de matière est similaire. Cependant, la quantité des matières résiduelles ultimes est beaucoup plus représentative (environ 4 700 et 8 200 tonnes) que les quantités des matières résiduelles organiques et recyclables (environ 1 500 et 4 000 tonnes).

Également, dans la figure s'observe le décalage entre les périodes de basse génération et haute génération des matières résiduelles, soit environ 4000 tonnes de différence entre février et juin pour les matières ultimes, environ 1 000 tonnes pour les matières recyclées et 1 800 tonnes pour les matières organiques.

3.3 Présentation des résultats

À l'aide de l'algorithme, l'approche multifilière permet de distribuer les matières résiduelles vers les différentes filières afin de satisfaire la demande. La distribution des matières résiduelles organiques et ultimes dans les filières et ses variations des flux pour l'année 2008 sont présentées dans le tableau 3.3 et à la figure 3.4. Elle est calculée grâce à l'approche multifilière à partir des données insérées de la municipalité et la totalité des matières résiduelles produites.

Les valeurs présentées sur la colonne « Matières générées » sont la quantité des matières résiduelles organiques et ultimes générées et récupérées en 2008 par la municipalité. Dans les colonnes des technologies de valorisation se trouvent les quantités des matières à distribuer vers chaque technologie, les autres deux colonnes, sont la quantité des matières valorisée et non valorisée parmi la disponibilité technologique (vermicompostage, digestion anaérobie, compostage en système fermé et gazéification).

Tableau 3.4 Distribution des matières résiduelles aux filières (t)

	Matières générées	Technologies de valorisation				Matières Valorisées	Matières non valorisées
		Vermi compostage	Compostage sys. fermé	Digestion anaérobie	Gazéification		
Janvier	7 597	7,5	500	417	6 669	7 593	3
Février	7 143	7,0	563	492	6 074	7 135	8
Mars	8 174	7,5	600	542	6 967	8 116	58
Avril	10 423	8,5	675	625	9 050	10 359	65
Mai	12 243	8,6	845	958	9 622	11 434	809
Juin	12 663	8,6	846	964	9 627	11 446	1 216
Juillet	10 407	8,5	775	750	8 813	10 346	60
Août	10 963	8,3	750	792	9 348	10 898	65
Septembre	10 521	8,3	638	750	9 050	10 446	76
Octobre	10 928	8,3	563	792	9 527	10 889	39
Novembre	10 661	6,8	425	750	9 408	10 590	71
Décembre	7 216	5,0	375	583	6 253	7 216	0
Total	118 393					116 469	2 470

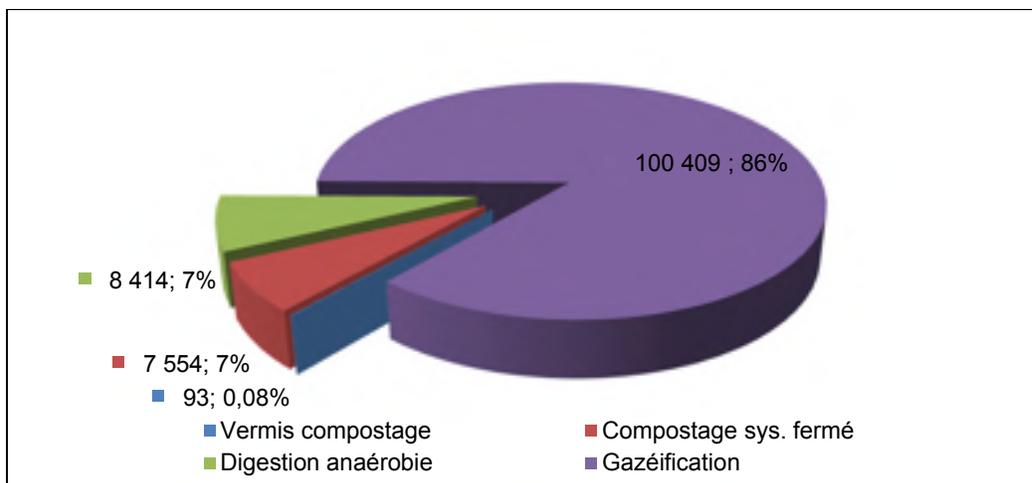


Figure 3.3 Distribution des matières résiduelles aux filières.

Ainsi en 2008 pour cette municipalité, 116 469 tonnes (81%) de matières résiduelles ont été valorisées sur 144 000 tonnes produites. Parmi l'ensemble des matières résiduelles traitées, la

filière de vermicompostage a permis de valoriser 93 tonnes (0,08%), la filière de compostage en système fermé en a valorisé 7 554 tonnes (7%), la filière digestion anaérobie pour 8 814 tonnes (7%) et la filière gazéification pour 10 409 tonnes de matières résiduelles (86%).

Si la municipalité valorise uniquement les matières recyclables, 65% des matières résiduelles (93 600 tonnes) seraient transférées vers le centre d'enfouissement. Cependant, si elle décide d'ajouter à la valorisation des matières recyclées; les déchets organiques (le 15% - 16 461 tonnes), presque le 50% (44 811 tonnes) des matières résiduelles serait exploité. Par ailleurs, si elle valorise seulement les matières résiduelles ultimes, environ 55% (79 200 tonnes) des matières résiduelles seront évitées du centre d'enfouissement.

D'autre part, la capacité du réservoir a été dépassée pour les mois de mai et juin. C'est-à-dire que pendant ces mois, une certaine quantité de matières résiduelles a dû être acheminée vers l'enfouissement. Cependant, et selon la variation des flux des matières résiduelles et la capacité du réservoir, ce bâtiment semble être approprié pour la quantité de matières résiduelles produites par la municipalité. La variation des flux des matières résiduelles dans le réservoir est présentée dans la figure 3.4.

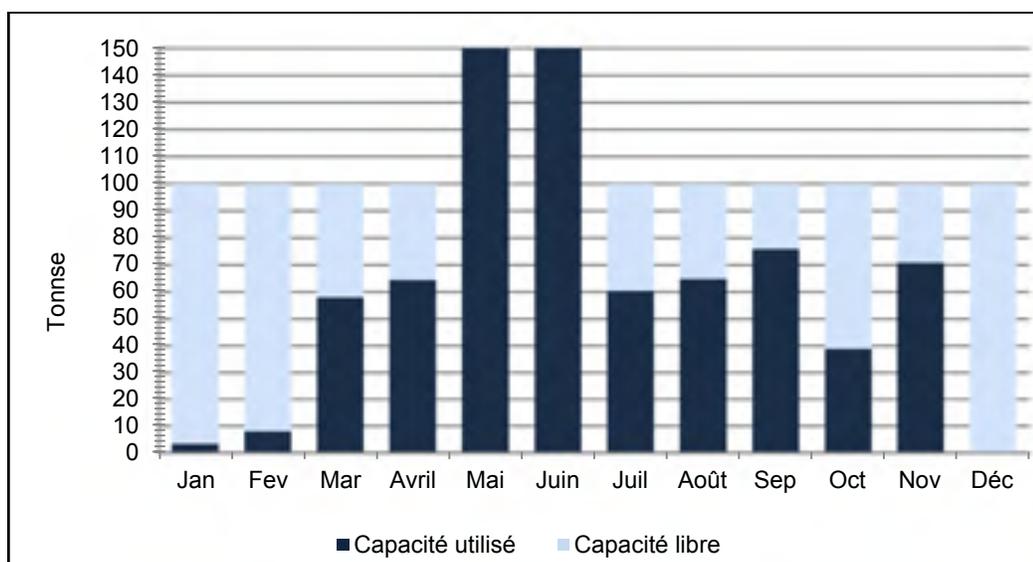


Figure 3.4 Flux des matières résiduelles dans le réservoir.

En relation avec les produits obtenus de l'utilisation des filières de valorisation, les quantités d'engrais organiques, le biogaz, le syngas et l'électricité produits et ses demandes sont présentés dans le tableau 3.5.

Tableau 3.5 Quantités de produits obtenus

	Humus (t)		Compost (t)		Biogaz (m ³)		Syngas (Nm ³)		Électricité produite (MWhe)	
	Demande	Produit obtenue	Demande	Produit obtenue	Demande	Produit obtenue	Demande	Produit obtenue	Demande	Produit obtenue
Jan.	3,0	3,0	200	200	50 000	50 000	2 500	2 500	5 600	5 600
Fév.	2,8	2,8	225	225	59 000	59 000	3 000	3 000	5 100	5 100
Mars	3,0	3,0	240	240	65 000	65 000	2 800	2 800	5 850	5 850
Avril	3,4	3,4	270	270	75 000	75 000	3 000	3 000	7 600	7 600
Mai	3,5	3,5	338	338	115 000	115 000	3 500	3 500	8 080	8 080
Juin	3,5	3,5	340	339	120 000	115 700	3 500	3 500	8 100	8 084
Juil.	3,4	3,4	310	310	90 000	90 000	3 400	3 400	7 400	7 400
Août	3,3	3,3	300	300	95 000	95 000	3 000	3 000	7 850	7 850
Sep.	3,3	3,3	255	255	90 000	90 000	2 300	2 300	7 600	7 600
Oct.	3,3	3,3	225	225	95 000	95 000	3 000	3 000	8 000	8 000
Nov.	2,7	2,7	170	170	90 000	90 000	3 500	3 500	7 900	7 900
Déc.	2,0	2	150	150	70 000	70 000	1 400	1 400	5 400	5 251
Total	37	37	3 023	3022	1 014 000	1 009 700	34 900	34 900	84 480	84 566

Par rapport aux produits qui offrent les technologies de valorisation, les demandes ont été couvertes presque en sa totalité. Dans chaque scénario, la variation entre la demande et le produit obtenu est minime. Les technologies où nous pouvons apercevoir des écarts sont, le compost (par 1 tonne), le biogaz (par 4 300 m³) et l'électricité produite (par 16 MWhe) qui sont d'ailleurs toute rapportée dans le mois de juin.

Dans la catégorie des sous-produits, les quantités générées tout au long de l'année peuvent être utilisées comme surplus du procédé de valorisation. Ces quantités sont présentées dans le tableau 3.6 et la figure 3.5.

Tableau 3.6 Quantité de sous-produits générés (t)

	Vitrifiât	Métaux	Vers
Janvier	967	427	0,60
Février	881	389	0,60
Mars	1 010	446	0,60
Avril	1 312	579	0,60
Mai	1 395	616	0,60
Juin	1 396	616	0,60
Juillet	1 278	564	0,60
Août	1 356	598	0,60
Septembre	1 312	579	0,60
Octobre	1 381	610	0,60
Novembre	1 364	602	0,60
Décembre	907	400	0,60
Total	14 559	6 426	7,20

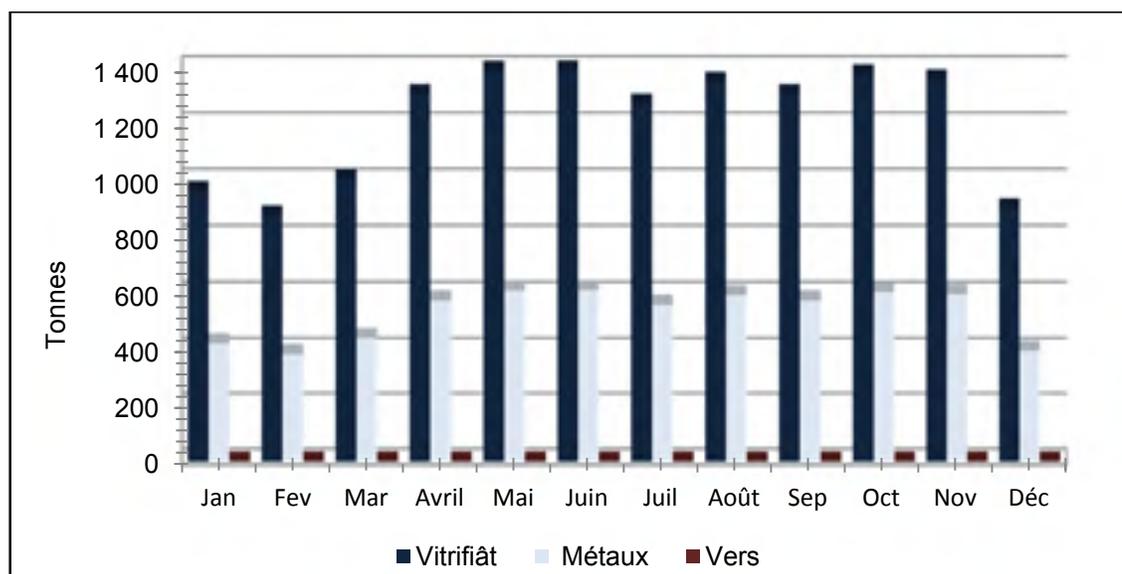


Figure 3.5 Quantité de sous-produits générés.

Les calculs faits par l'approche en lien à la reproduction des vers sont théoriques. En effet, dans la filière vermicompostage la valeur donnée du taux de reproduction des vers dépend en grande partie du type de substrat de l'humidité et de la température dans le vermicomposteur.

Dans l'exemple proposé, nous partons du fait que la prémisses de la filière de vermicompostage a été déjà installée. Les trois unités avec les 900 kg de vers ont donc été implantées auparavant. Quant à la technologie de vermicompostage, il est possible d'obtenir chaque mois en moyenne 1800 kg de vers.

3.4 Analyse comparative de scénarios

En appliquant le critère d'évaluation, nous pouvons déterminer la quantité de matières résiduelles qui est valorisée et la quantité qui est acheminée au centre d'enfouissement, selon les scénarios proposés dans le chapitre 2.

La figure 3.6 présente les résultats de l'application de l'approche dans l'analyse comparative de scénarios, selon la disponibilité technologique.

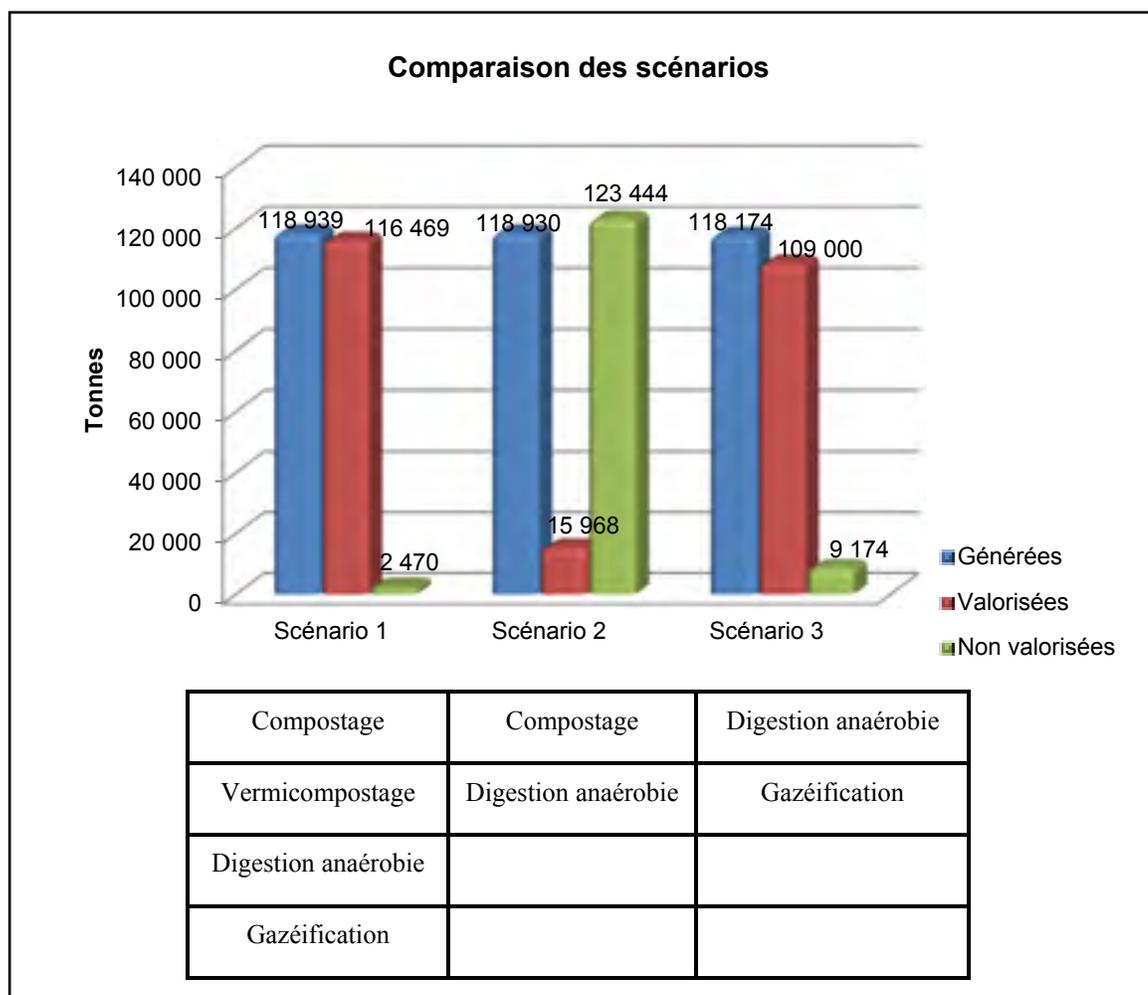


Figure 3.6 Analyse comparative des scénarios

Dans la figure 3.6, se retrouve, selon le scénario proposé, la quantité de matières résiduelles valorisées parmi les filières de valorisation. Les valeurs de la "Quantité des matières générées" varient parce que chaque technologie produit elle-même ses propres résidus et ces résidus sont ajoutés au système et sont valorisés à travers la technologie de gazéification. Les quantités des matières valorisées et enfouies prennent une autre valeur selon la technologie utilisée.

Dans le premier scénario et avec l'utilisation de toutes les filières, 97% (116 469 tonnes) des matières résiduelles sont valorisées et 2% (2 470 tonnes) des matières résiduelles sont acheminées vers l'enfouissement. Dans le deuxième scénario, où il y a une valorisation des

matières résiduelles alimentaires et vertes parmi l'utilisation des filières de compostage en système fermé et digestion anaérobie, 11% (15 968 tonnes) des matières résiduelles sont valorisées et 89% (123 444 tonnes) sont envoyées à l'enfouissement. Pour le dernier scénario, où l'on utilise des filières comme la digestion anaérobie et la gazéification, 92% (109 000 tonnes) des matières résiduelles sont valorisées et 8% (9 174 tonnes) des matières résiduelles sont dirigées vers l'enfouissement.



Figure 3.7 Quantité de matières traitées dans le scénario 1

Dans la figure 3.7 s'observe le scénario 1 qui valorise le 98% des matières générés, le 86% des matières ont été traitées parmi la gazéification, le 6 % et 7% des matières ont été valorisés par les technologies de compostage et digestion anaérobie respectivement et le vermicompostage est le responsable de la valorisation de 0.1% des matières.

Les données résultantes des scénarios donnent un portrait global des différents procédés de gestion des matières résiduelles dans cette communauté. Grâce à la comparaison de ces scénarios, il est possible de déduire parmi les technologies utilisées celles qui valorisent le

moins ou le plus de matières résiduelles. C'est le cas du premier scénario, où se trouve l'ensemble des technologies. On ne tient pas compte néanmoins des coûts économiques d'installations et maintenance ou de son acceptation sociale.

CHAPITRE 4

DISCUSSION

Le développement de l'approche a été réalisé avec les données de génération, récupération et valorisation des matières résiduelles de la population québécoise aussi que sur quelques technologies de valorisations envisagées ou utilisées dans la région du Québec. Les usagers visés sont donc les gestionnaires et les personnes travaillant au sein d'une entreprise de gestion des matières résiduelles. Néanmoins, les retombées de la démarche se trouvent au sein de la population elle-même. L'interaction entre l'industrie, les gouvernements et la communauté favorise le développement collectif et durable. Le présent chapitre analyse les retombées de l'approche développée pour la communauté et pour les gestionnaires respectivement.

4.1 Exemple d'application

Il s'agit d'un exemple d'application, le scénario proposé est fictif. Il est localisé dans une municipalité québécoise, avec une population d'environ 100 000 habitants et se base sur des données de génération et de valorisation des matières résiduelles de la province. Ainsi, l'approche est pragmatique et le scénario a une portée générale qui permet l'application de cette approche multifilière dans des systèmes et politiques de gestion de matières résiduelles des municipalités du Québec.

La mise en œuvre de l'approche dans l'exemple d'application proposée a montré une façon plus systémique de gérer les matières résiduelles. En abordant la gestion des matières résiduelles comme un ensemble de relations mutuelles entre les filières de valorisation et les produits générés, l'utilisateur peut se baser sur des besoins particuliers pour valoriser certains types et quantités de matières résiduelles et minimiser l'empreinte environnementale avec un approvisionnement équilibré des procédés.

Comme les résultats ont été obtenus par un logiciel de type Excel, les distributions des flux fonctionnent par une méthodologie de calcul dont les valeurs réagissent les unes sur les autres. Ainsi, le degré de précision dépend des données utilisées et les résultats ne doivent pas être interprétés comme des résultats absolus. Dans la réalité, les facteurs comme la génération irrégulière des matières résiduelles, les variations dans la qualité de l'engrais organique généré ou la croissance des vers dans le cas de vermicompostage, peuvent influencer la prise de décision.

Suite à l'exemple d'application proposé, les résultats obtenus montrent que l'approche multifilière peut s'appliquer à un ou plusieurs types de matières résiduelles prenant en compte les différents types de collecte, les filières de valorisation et les produits générés. L'approche permet aussi de considérer les besoins des usagers et de leur disponibilité technologique. De plus, l'approche multifilière permet de modéliser des scénarios et d'analyser l'influence des technologies et leur degré d'intégration dans le système.

Le critère d'évaluation donne un aperçu de la quantité de matières résiduelles qui peuvent être envoyées vers l'enfouissement selon la filière sélectionnée. Donc, avant de choisir une ou plusieurs technologies de valorisation des matières résiduelles il est précis de réaliser une analyse comparative des scénarios et ainsi, déterminer le type et la quantité de matières résiduelles et les filières disponibles, pour prendre une décision basée sur les conditions locales.

En intégrant le concept d'analyse et de réduction des flux des matières et d'énergie dans la démarche du système et afin d'assurer l'approvisionnement équilibré des procédés, l'approche d'aide à la prise de décision permet de favoriser le choix du mode de valorisation «le plus durable» selon les critères énoncés auparavant tels que le type et les quantités de matières résiduelles à traiter et les variations des flux, la capacité des filières de valorisation et les sous-produits générés. Le concept de base amène une gestion systémique qui serait favorable à l'écologie industrielle.

L'approche proposée peut être intégrée à un système d'information géographique (SIG) afin d'évaluer le degré optimal de la décentralisation des infrastructures (le centre de répartition, les procédés de valorisation et la localisation spatiale de sa génération) et de profiter des caractéristiques qu'offre un tel système, le décideur peut identifier et quantifier les impacts associés aux transports d'un scénario de gestion des matières résiduelles et ainsi avoir plus de critères pour prendre une décision.

4.2 Limites de la démarche

Même si pour le projet, l'exemple d'application a été développé pour les matières résiduelles organiques et ultimes seulement, l'approche inclut d'autres types de matières résiduelles comme les déchets ménagers ou dangereux et les mélanges. Ces types de matières résiduelles ont été inclus dans le cas qu'il n'existe pas une collecte à trois voies. En conséquence, ils sont valorisés à travers la filière gazéification dans l'approche.

L'option d'employer les quatre filières de valorisation des matières résiduelles n'est pas fixe dans l'approche et donc, l'utilisateur peut choisir la meilleure qui s'ajuste à ses critères, dont le volume et le profil des matières résiduelles à traiter, le budget disponible et l'applicabilité régionale. Un avantage de l'approche est qu'il permet de connaître le comportement du système même lorsqu'une ou plusieurs filières sont désactivées.

Dans l'approche il existe une particularité quant à la variation des matières résiduelles. Les technologies comme le compostage en système fermé et la digestion anaérobie sont des procédés qui ont besoin d'additifs pour faire le traitement des résidus. Également, chaque technologie produit elle-même ses propres résidus, ces résidus qu'ils soient des intrants ou extrants augmentent la quantité des matières à traiter dans le système. C'est aux décideurs, aux gestionnaires et/ou à la population même de prendre compte de cette sensibilité du système selon les types de résidus générés et ses besoins.

4.3 Développement de l'approche

L'approche développée possède les caractéristiques suffisantes pour que les décideurs puissent l'utiliser selon ses besoins. Elle prend en compte les deux filières de valorisation les plus répandues au Québec, le compostage et la digestion anaérobie ainsi qu'une filière en pleine croissance, le vermicompostage, et une filière thermique, la gazéification. Chaque filière offre un ou plusieurs produits et sous-produits valorisables comme le compost, l'humus, l'électricité, le biogaz, le syngas, les vers, le vitrifiât et les métaux. Dans les paramètres techniques de chaque filière se trouvent les données de base, des intrants et des extrants, pour établir selon la quantité et le type de matière résiduelle un nombre déterminé des produits et sous-produits à obtenir. Ces données de base peuvent être manipulées selon les caractéristiques techniques des technologies que l'utilisateur utilise.

La présentation visuelle informatisée et l'explication de chaque fenêtre de l'approche développée sont présentées à l'annexe II.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Malgré le fait que les progrès technologiques aient contribué au développement de nombreuses filières de gestion, elles demeurent encore insuffisantes pour accueillir l'ensemble de matières à valoriser. L'approche multifilière développée atteint l'objectif proposé, car elle propose une méthode de prévention, d'aide à la prise de décision et de gestion des matières résiduelles. Elle offre aux gestionnaires un éventail de solutions possibles parmi lesquelles ils peuvent estimer laquelle est la plus appropriée à leurs besoins. Il offre aussi un équilibre au système dans l'approvisionnement de filières selon les flux de matières résiduelles et les besoins de gestionnaires en sous-produits.

En ce qui a trait à la gestion des matières résiduelles, des outils et des modèles de simulations sont fréquemment utilisés pour résoudre les problèmes rattachés. Néanmoins, pour certains outils la notion de stabilité dans le réseau n'est pas incluse dans ses priorités. L'ACV par exemple, calcule le poids environnemental direct et indirect résultant des activités qui sont liées à la gestion des matières résiduelles. L'analyse multicritère combine la durée de vie des systèmes avec des critères sociaux, économiques et environnementaux dans une mesure de performance unique. Les SIG permettent de rassembler, d'organiser, d'analyser, d'élaborer et de présenter les informations localisées géographiquement, contribuant notamment à la gestion de l'espace. Cependant, aucun d'entre eux n'a pas pris en compte les problèmes d'une filière ou de ses interactions. Dans l'approche proposée, l'utilisateur a l'option de créer un système selon ses besoins, dont le fait de prioriser une filière de valorisation par rapport à l'autre repose sur un besoin à combler sans que les interactions ou l'absence d'une filière interfèrent avec les opérations des autres.

Dans le scénario étudié à l'aide de l'approche, des filières de valorisation très connues au Québec s'intègrent tout comme des taux de génération de matières résiduelles très similaires à ceux de la région. Grâce au scénario et selon les résultats obtenus, l'approche s'avère nouvelle pour une gestion qui favorise l'adaptation aux conditions évolutives d'un système et qui peut être appliquée ici au Québec ou ailleurs. Également, les conséquences potentielles

d'un type de gestion systémique, comme celui de l'approche développée, seraient positives tant pour les utilisateurs que pour l'ensemble de la société.

Même si l'approche permet d'évaluer les avantages et les inconvénients des différents scénarios de gestion (filères de valorisation) responsables de la valorisation des matières résiduelles ainsi que la dynamique de la génération de matières résiduelles (variations de flux) et la variation de la demande en sous-produits générés, il n'en reste pas moins que c'est le gestionnaire qui doit lier la totalité des flux et stocks de matières et d'énergie aux activités humaines, au système économique et industriel dans un contexte de gestion orientée vers un développement durable et qui repose sur une vision d'ensemble, systémique et intégré. En conséquence, s'il identifie d'abord les sources potentielles et quantifie leur impact dans l'ensemble d'un système, les options de gestion appropriées ne peuvent être identifiées avec certitude.

Tel qu'elle a été illustrée dans l'exemple d'application développé dans les chapitres précédents, la méthode proposée est basée sur une approche multifilière dynamique de la modélisation d'un système de gestion des matières résiduelles d'une communauté d'environ 100 000 habitants, tout en prenant en compte la quantité des matières résiduelles générées par cette communauté, les technologies de valorisation des matières résiduelles qu'elle dispose et les besoins en produits générés par ces technologies de valorisation. Les résultats de l'exemple d'application offrent une meilleure distribution des flux des matières, des alternatives environnementales à l'enfouissement et des retombées économiques potentielles.

Dans le domaine de la gestion des matières résiduelles, avant de considérer un éventail de modes de gestion pour répondre aux besoins des différentes régions et permettre une mise en valeur accrue de tous les types de matières, une réduction à la source doit être privilégiée, tout en considérant les principes du développement durable et de l'écologie industrielle. C'est-à-dire, intégrer le concept que toute matière résiduelle peut être réduite avant qu'il n'existe une filière pour la valoriser.

Le nouveau concept de gestion des matières résiduelles repose sur la prémisse de minimiser les impacts dus à l'extraction et à l'utilisation de matières premières non renouvelables, d'utiliser des technologies d'élimination, de valoriser des matières à faible impact et de lier et distribuer les flux des matières des divers acteurs dans l'ensemble d'un système. Bien que l'approche développée s'inscrive dans une telle démarche, c'est aux législateurs, aux industries et la société en général, de mener un comportement collectif compatible avec les fondements du développement durable et de l'écologie industrielle et identifier les meilleures solutions de gestion pour répondre aux enjeux locaux.

ANNEXE I

RÉSULTATS SCÉNARIOS 2 ET 3

Tableau-A I- 1 Distribution des matières résiduelles aux filières (t) scénario 2

	Matières générées	Technologies de valorisation		Matières Valorisées	Matières non valorisées
		Compostage sys. fermé	Digestion anaérobie		
Janvier	7 596	500.00	416.67	916.67	8 101
Février	7 143	562.50	491.67	1 054.17	7 221
Mars	8 173	600.00	541.67	1 141.67	8 396
Avril	10 423	675.00	625.00	1 300.00	11 027
Mai	12 242	845.00	958.33	1 803.33	12 377
Juin	12 662	846.15	964.17	1 810.32	12 914
Juillet	10 406	775.00	750.00	1 525.00	10 540
Août	10 962	750.00	791.67	1 541.67	11 235
Septembre	10 521	637.50	750.00	1 387.50	10 970
Octobre	10 927	562.50	791.67	1 354.17	11 570
Novembre	10 660	425.00	750.00	1 175.00	11 585
Décembre	7 216	375.00	583.33	958.33	7 506
Total	118 930	7 553.65	8 414.18	15 967.83	123 443.98

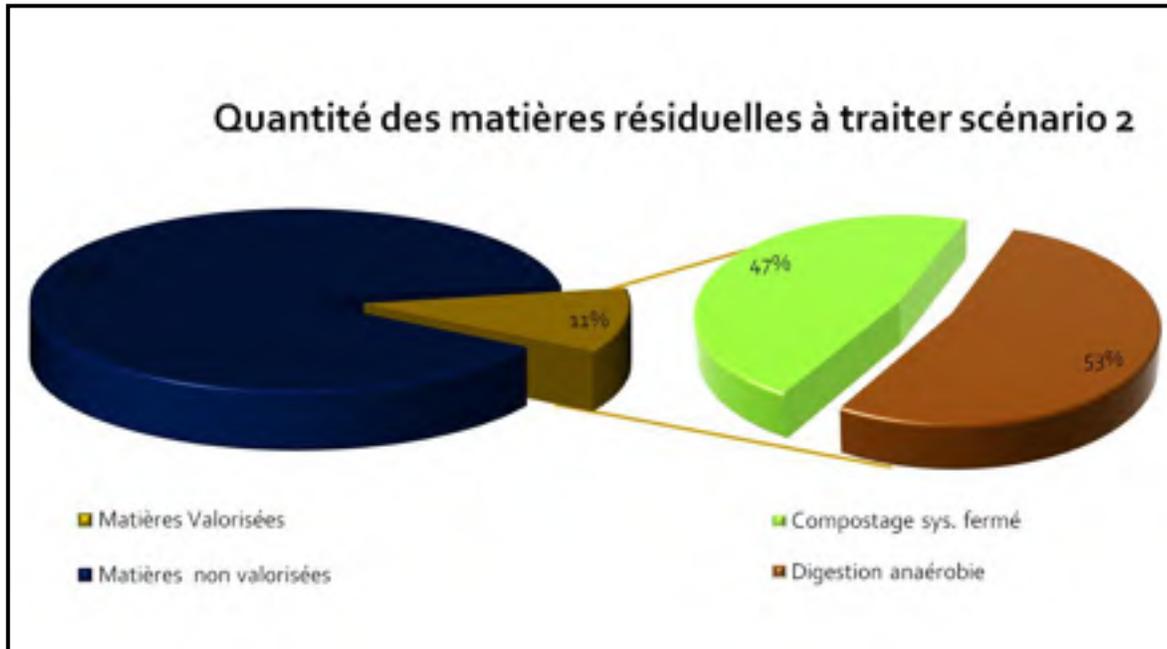


Figure-A I- 1 Quantité des matières traitées dans le scénario 2

Dans le scénario 2 est valorisé le 11% de matières générées. Le responsable de la valorisation du 53% des matières valorise a été la digestion anaérobie, le compostage en système fermé valorise 47 % résidus.

Tableau-A I- 2 Quantités de produits obtenus Scénario 2

	Compost (t)		Biogaz (m ³)	
	Demande	Produit obtenue	Demande	Produit obtenue
Janvier	200	200	50 000	50 000
Février	225	225	59 000	59 000
Mars	240	240	65 000	65 000
Avril	270	270	75 000	75 000
Mai	338	338	115 000	115 000
Juin	340	339	120 000	115 700
Juillet	310	310	90 000	90 000
Août	300	300	95 000	95 000
Septembre	255	255	90 000	90 000
Octobre	225	225	95 000	95 000
Novembre	170	170	90 000	90 000
Décembre	150	150	70 000	70 000
Total	3 023	3022	1 014 000	1 009 700

Par rapport aux produits qui offrent les technologies de valorisation, les demandes ont été couvertes presque en sa totalité, dans chaque scénario la variation entre la demande et le produit obtenu a été minime.

Tableau-A I- 3 Distribution des matières résiduelles aux filières (t) scénario 3

	Matières générées	Technologies de valorisation		Matières Valorisées	Matières non valorisées
		Digestion anaérobie	Gazéification		
Janvier	7 546	417	6 669	7 086	460.2
Février	7 087	492	6 074	6 566	520.6
Mars	8 113	542	6 967	7 509	604.8
Avril	10 355	625	9 050	9 675	679.6
Mai	12 158	958	9 622	10 581	1 577.0
Juin	12 577	964	9 627	10 592	1 985.5
Juillet	10 328	750	8 813	9 563	765.6
Août	10 887	792	9 348	10 140	747.2
Septembre	10 457	750	9 050	9 800	657.0
Octobre	10 871	792	9 527	10 318	552.6
Novembre	10 617	750	9 408	10 158	459.4
Décembre	7 178	583	6 430	7 013	165
Total	118 174	8 414	100 586	109 000	9 174

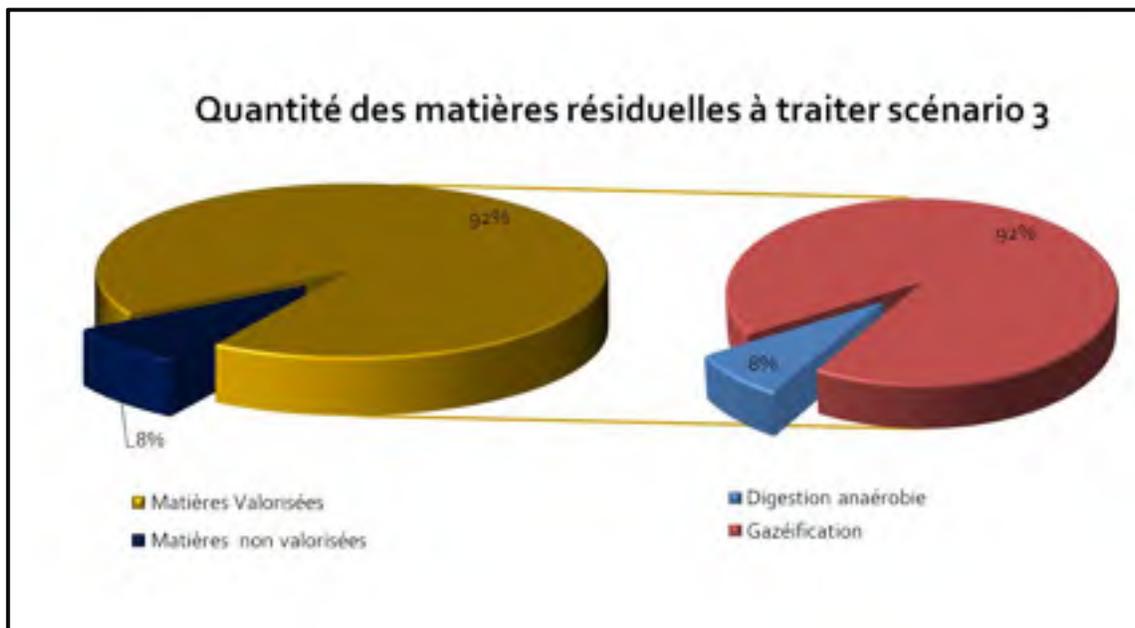


Figure-A I- 2 Quantité des matières traitées dans le scénario 2

Tableau-A I- 4 Quantités de produits obtenus Scénario 3

	Biogaz (m ³)		Syngas (Nm ³)		Électricité (Mwhe)	
	Demande	Produit obtenue	Demande	Produit obtenue	Demande	Produit obtenue
Janvier	50 000	50 000	2 500	2 500	5 600	5 600
Février	59 000	59 000	3 000	3 000	5 100	5 100
Mars	65 000	65 000	2 800	2 800	5 850	5 850
Avril	75 000	75 000	3 000	3 000	7 600	7 600
Mai	115 000	115 000	3 500	3 500	8 080	8 080
Juin	120 000	115 700	3 500	3 500	8 100	8 084
Juillet	90 000	90 000	3 400	3 400	7 400	7 400
Août	95 000	95 000	3 000	3 000	7 850	7 850
Septembre	90 000	90 000	2 300	2 300	7 600	7 600
Octobre	95 000	95 000	3 000	3 000	8 000	8 000
Novembre	90 000	90 000	3 500	3 500	7 900	7 900
Décembre	70 000	70 000	1 400	1 400	5 400	5 400
Total	1 014 000	1 009 700	34 900	34 900	84 480	84 464

ANNEXE II

PRÉSENTATION VISUELLE INFORMATISÉE DE L'APPROCHE DÉVELOPPÉE

Types des déchets (Qd)		Besoins du système (Bd)							Quantité de déchets à traiter (Qd)	Quantité du produit généré (Qg)
		Générateur 1	Générateur 2	Générateur 3	Générateur 4	Générateur 5	Générateur 6	Générateur 7	Valeurs Totales	
Organiques	Tonne/journaliers	2 916,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2 916,00	
Ménager	Tonne/journaliers	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Mélangés	Tonne/journaliers	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Recyclables	Tonne/journaliers	2 262,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2 262,00	
Ultimes	Tonne/journaliers	4 926,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4 926,00	
Dangereux	Tonne/journaliers	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Total	Tonne/journaliers	10 104,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10 104,00	

Figure-A II- 1 Types de matières résiduelles (Qd)

Dans cette première fenêtre, on peut voir les quantités des matières résiduelles à traiter selon leur type, elles peuvent être introduites selon la fréquence, par jour, semaine ou mois. Également, l'approche a été conçue pour qu'elle puisse être utilisée par un ou plusieurs usagers en même temps.

		Générateur 1	Générateur 2	Générateur 3	Générateur 4	Générateur 5	Générateur 6	Générateur 7	Valeurs Totales Journalières
Électricité	Mwh	5 100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5 100,00
Biogaz	m3	3 000,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3 000,00
Syngas	m3	2 300,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2 300,00
Compost	Tonne	255,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	255,00
Humus	Tonne	3,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,30

Figure-A II- 2 Besoins du système (Bs)

Dans cette fenêtre on peut voir les besoins du système parmi les différents produits. Cette fenêtre donne aussi la possibilité d'introduire les besoins d'un ou plusieurs usagers en même temps.

Technologies		Active	Inactive
Compostage aye.fermé	T1	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
Vermi Compostage	T2	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
Digestion Anaérobie	T3	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
Gazéification	T4	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>

Figure-A II- 3 L'onglet «Paramètres» de l'approche

Dans la barre d'outils d'accès rapide se trouve l'onglet «Paramètres», dans laquelle il est possible manipuler les données de l'approche. À travers de cet onglet, l'utilisateur peut réaliser différents changements dans l'approche et ses filières. Il peut par exemple activer ou désactiver les filières, changer les caractéristiques techniques des filières (données d'entrée et

de sortie), ou modifier les capacités maximales autant que la fréquence d'utilisation (par journée, hebdomadaire, mensuelle ou annuelle). L'approche a été préfixée pour une utilisation journalière. Par rapport à l'activation ou désactivation des filières, l'utilisateur peut sélectionner le type de technologie qu'il souhaite utiliser, c'est-à-dire, que cette technologie peut être désactivée sans affecter le système.

		Vermi Compostage	Compostage Sys.Fermé	Digestion Anaérobie	Gazéification	TOTAL
Quantité à Traiter	Tonne/Journalière	0.45	38.61	96.53	490.00	615.60

Réservoir		
Capacité maximale	Tonne	100.00
Capacité utilisée	Tonne	5581.60
Capacité libre	Tonne	-9481.60

***Capacité insuffisante

Figure-A II- 4 L'onglet «Quantité de matières résiduelles à traiter (Qt)» de l'approche

Les résultats de la distribution des matières résiduelles aux différentes filières et au réservoir se trouvent dans la fenêtre. «Quantité de matières résiduelles à traiter (Qt)»

		Vermi Compostage	Compostage Sys Fermé	Digestion Anaérobie	Gazéification	TOTAL
Électricité	MWh			13,03	481,37	494,40
Biogaz	m ³			3,000,00		3,000,00
Syngas	Nm ³				2,303,17	2,303,17
Humus	Tonne	0,18				0,18
Vers	kg vers	20,00				20,00
Compost	Tonne		15,44			15,44
Vitrifiât	Tonne				69,600,00	69,600,00
Métaux	Tonne				30,720,00	30,720,00
Digestat	Tonne			19,31		19,31
Rejets Solides à éliminer	Tonne	0,04	3,66	9,65		13,35

CSC
CSC
CSC
CSC

QID = Quantité insuffisante de matières résiduelles
 CSC = Capacité du système complet
 CR = Capacité du réservoir

Figure-A II- 5 L'onglet «Quantité de produit généré (Qg)» de l'approche

La quantité des produits et sous-produits obtenus se trouvent dans la quatrième fenêtre de l'approche, «Quantité de produits générés (Qg)».

Par rapport aux erreurs affichées dans cette fenêtre, le système propose des avis en relation à la quantité de matières résiduelles, la capacité des filières et du réservoir. En conséquence, les sigles pour identifier ces annonces sont établis dans l'approche. Par exemple:

- QID. Quantité insuffisante des matières résiduelles. C'est – à – dire qu'il y a un déficit des matières résiduelles pour satisfaire la demande.
- CSC. Capacité du système complet. Dans ce cas, le besoin ne peut être comblé à cause de la capacité technique de la technologie qui est complète.
- CRC. Capacité du réservoir complète. Ce sigle annonce que la capacité du réservoir est à sa limite.

Dans cette fenêtre on trouve les produits et sous-produits générés par l'approche ainsi que la quantité de rejets solides des filières et la quantité de digestat produit. Dans le système, les quantités de rejets et de digestat sont envoyées vers la filière de gazéification.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) (s.d.). Méthanisation. In Site de l'ADEME, Déchets, Traitements biologiques, Méthanisation. En ligne. <<http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=1&cid=96&m=3&catid=15556>>. Consultée le 07 juillet 2010.
- Antonini, Gérard. 2005. «Traitements thermiques des déchets : Procédés et technologies associés». *Les Techniques de l'Ingénieur*, vol.G2, n° G2050, p. G2050.1-G2050.16.
- Ascough, J., H. Maier, J. Ravalico, et M. Strudley. 2008. «Future research challenges for incorporation of uncertainty in environmental and ecological decision-making». *Ecological Modelling*, vol. 219, n° 3-4, p. 383-399.
- Boiral, O. et G. Croteau. 2001. «Du développement durable à l'écologie industrielle, ou les métamorphoses d'un concept caméléon». In Actes X^e Conférence de l'Association internationale de management stratégique. (Québec, 11-13 juin 2001). Faculté des sciences de l'administration, Université Laval.
- Boiral, O. et J. Kabongo. 2005. «Le management des savoirs au service de l'écologie industrielle», *Lavoisier - Revue Française de Gestion*, vol. 5, n° 158, p. 163-186.
- Carabin, P. et G. Holcroft. 2005. «Plasma resource recovery technology-converting waste to energy and valuable products». In *13th North American Waste to Energy Conference*. (Orlando, Florida USA, May 23-25 2005). P. 71-79. Orlando: Engineering Standards, News and Resources for Engineers - ASME.
- Carabin, Pierre. 2008. «La valorisation des déchets par plasma: un procédé d'avenir». *La Maîtrise de l'Énergie*, Volume 23, Numéro 3, p. 25-26.
- Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits procédés et Services (CIRAIG). 2007. *Évaluation et comparaison des technologies et des scénarios de gestion des matières résiduelles applicables à la CMM selon une approche de cycle de vie*. Coll. «Rapport final du bureau de la recherche et du développement technologique (B.R.C.D.T.) École Polytechnique de Montréal», Montréal (Qc): Université de Montréal, 70 p.
- Chalmin, Philippe et Catherine Gaillochet. 2009. *Du rare à l'infini: Panorama mondial des déchets 2009*, 3rd ed. Paris : Economica 2009, 441p.
- Chaoui Hala. 2010. *Vermicompostage (ou lombricompostage) : Le traitement des déchets organiques par les vers de terre*. Fiche Technique N° 10-010 AGDEX 743/537. Ontario : Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales.

- Communauté métropolitaine de Montréal. 2006. *Étude de faisabilité des filières de traitement des matières organiques applicables aux territoires de l'Agglomération de Montréal*. «Rapport final», RT04-19605. Montréal (Qc.) : SOLINOV, 254 p.
- Communauté métropolitaine de Montréal. 2007. *Comparaison des filières et des scénarios de gestion des matières résiduelles réalisée dans le cadre du PMGMR*. «Rapport final», N/Ref. : 604615. Montréal (Qc.) : SNC LAVALIN - SOLINOV, 342p.
- Conseil régional de l'environnement de la Montérégie (CRE). 2002. «Guide sur la gestion des matières résiduelles comme outil pour supporter la démarche de consensus informé en Montérégie». En ligne. 78 p.
<http://www.crem.qc.ca/pdf/gmr_guide.pdf>. Consulté le 05 novembre 2010.
- Delgado, M.G. et J. B. Sendra. 2004. «Sensitivity analysis in multicriteria spatial decision-making: A review». *Human and Ecological Risk Assessment*, vol.10, n° 9, p. 1173-1187.
- Denègre Jean et François Salgé. 2004. *Les systèmes d'information géographique*, 2^e ed. «Que sais-je ?», Paris : Presses Universitaires de France, 128 p.
- Desrochers Pierre. 2009. «Et si la main invisible avait le pouce vert ? Aperçu historique sur le développement de "boucles industrielles" dans les économies de marché». *Management international*, vol. 13, n° 4, p. 103-114.
- Doré Aude. 2006. *Étude de faisabilité du compostage à la cafétéria de l'École Polytechnique*. Coll. «Rapport de Stage de laboratoire de l'École Polytechnique de Montréal». Montréal (Qc.) : École Polytechnique Montréal, 48 p.
- Ekvall, T., G. Assefa, A. Bjorklund, O. Eriksson et G. Finnveden. 2007. «What life-cycle assessment does and does not do in assessments of waste management». *Waste Management*, vol. 27, n° 8, p. 989-996.
- Environnement Canada. 2007. *Examen des outils d'analyse du cycle de vie (ACV) pour la gestion des déchets solides municipaux (DSM)*. «Rapport technique d'Environnement Canada». Toronto (On.) : Environnement Canada, 54 p.
- Erkman, S. 1998. *Vers une écologie industrielle*, 2^e ed. Paris : Éditions-Diffusion Charles Léopold Mayer, 99 p.
- Erkman, S. et R. Ramaswamy. 2001. «Cleaner production at the system level: Industrial ecology as a tool for development planning (Case studies in India)». In United Nations Environment Programme UNEP's 6th International High-level Seminar on Cleaner Production. (Montréal, October 16–17), p. 64-67. Paris: United Nations Environment Programme Division of Technology, Industry and Economics.

- Evangelista Reynald. 2006. «L'écologie industrielle dans les filières cotonnières». *Cahiers Agricultures* vol. 15, n° 1, p. 123-127.
- Francis Frédéric, Pham Tat Thang, Philippe Lebailly, Charles Gaspar et Eric Haubruge. 2005. «Perspectives de développement de la lombriculture au Sud Vietnam». *Notes fauniques de Gembloux*, vol. 58, p.7-10.
- Frederickson J. et Howell G. 2003. «Large-scale vermicomposting: emission of nitrous oxide and effects of temperature on earthworm populations». *Pedobiologia*, vol. 47, p. 724-730.
- Frederickson, J. et S. Ross-Smith. 2004. «Vermicomposting of Pre-composted Mixed Fish/Shellish and Green Waste». En ligne. 17 p.
<<http://www.wormresearchcentre.co.uk/scientific/Vermicomposting%20of%20Fish%20waste.pdf>>. Consulté le 04 octobre 2010.
- Galvez-Cloutier Rosa. 2010. *Gestion intégrée de déchets solides Municipaux*. [Notes du cours GCI-20539 Gestion intégrée des déchets solides municipaux]. Québec : Université de Laval.
- Garg, P., Gupta, A. et Satya, S. 2006. «Vermicomposting of different types of waste using *Eisenia foetida*: A comparative study». *Bioresource Tech.*, vol. 97, n° 3, p. 391-395.
- Görish, U. et Helm, M. 2008. *La production de Biogaz*. 1^{er} ed. Paris, Les Éditions Eugen Ulmer, 120 p.
- Gouvernement du Canada. À jour au 20 mars 2012. *Loi canadienne sur la protection de l'environnement (1999)*. L.C. 1999, ch. 33. En ligne. Ottawa: Ministre de la Justice <<http://laws-lois.justice.gc.ca/fra/lois/C-15.31/>> Consulté le 26 mars 2012.
- Gouvernement du Québec. Ministre du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. 2010. *Projet de politique québécoise de gestion des matières résiduelles Plan d'action 2010-2015*. En ligne.
<http://www.mddep.gouv.qc.ca/matieres/pgmr/plan-action.pdf>. Consulté le 10 Juin 2010.
- Higgs, G. 2006. «Integrating multi-criteria techniques with geographical information systems in waste facility location to enhance public participation». *Waste Management and Research*, vol. 24, n° 2, p. 105-117.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía IDEA. 2007. *Biomasa: Gasificación*. Coll. «Energías renovables: Energía de la biomasa», Madrid: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 36 p.

- Jagielska, I. 1998. «Hybrid rough sets/neural network approach to the development of a decision support system». In. *Neural Networks Proceedings, 1998. IEEE World Congress on Computational Intelligence. The 1998 IEEE International Joint Conference.* (New York, May 4-8 1998), vol 1, p. 24-28. Anchorage, (AK): IEEE.
- Jan Saft Robert. 2007. «Life Cycle Assessment of a Pyrolysis/Gasification Plant for Hazardous Paint Waste» *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 12, n° 4, p. 230-238.
- Khoo, Hsien H. 2009. «Life cycle impact assessment of various waste conversion technologies». *Waste Management*. Vol. 29, n° 6, p. 1892 – 1900.
- Komptech, Technologie for a better environment. 2009. «Composting. Method for composting organic waste». Brochure E-06-2009. En ligne. <http://www.pon-cat.com/PageFiles/35631/composting_eng_0609%5B1%5D.pdf>. Consulte le 15 avril 2011.
- Lima Amarante João Alberto. 2010. «Biométhanisation des Déchets Putrescibles Municipaux Filières Disponibles et Enjeux pour le Québec». Mémoire de maîtrise en environnement, Sherbrooke, Université de Sherbrooke, 99 p.
- Mermet Laurent, Raphaël Billé, Maya Leroy, Jean-Baptiste Narcy et Xavier Poux. 2005. «L'analyse stratégique de la gestion environnementale : un cadre théorique pour penser l'efficacité en matière d'environnement». *Natures Sciences Sociétés*, vol. 13, n° 2, p. 127-137.
- Moletta, R. 2008. *La méthanisation*, 2^e ed. Paris, Éditions Tec & Doc., 532 p.
- Moustakas K., D. Fatta, S. Malamis, K. Haralambous et M. Loizidou. 2005. «Demonstration plasma gasification/vitrification system for effective hazardous waste treatment». *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 123, n° 1– 3, p. 120–126.
- Munroe Glenn. 2005. «Guide du lombricompostage et de la lombriculture à la ferme». En ligne. 37 p. <http://www.organicagcentre.ca/Docs/Vermiculture_FarmersManual_gm_fr.pdf> Consulte le 15 mai 2011.
- Ndegwa P.M. et S.A. Thompson. 2001. «Integrating composting and vermicomposting in the treatment and bioconversion of biosolids». *Bioresource Technology* vol. 76, n° 2, p. 107-112.
- Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO). 2005. «Méthodes de compostage au niveau de l'exploitation agricole». En ligne. 51 p. <ftp://ftp.fao.org/agl/agll/docs/lwdp2_f.pdf>. Consulté le 10 septembre 2011.

- Ostrem, K. 2004. «Greening waste: anaerobic digestion for treating the organic fraction of municipal solid wastes». MSc Report, Department of Earth and Environmental Engineering, New York, Foundation of School of Engineering and Applied Science, Columbia University, 59 p.
- Paul, J.W., Claudia Wagner-Riddle, A. Thompson, Ron Fleming et M. MacAlpine. 2001. «Composting as a strategy to reduce greenhouse gas emissions». In *Climate Change 2: Canadian Technology Development Conference*. (Toronto, Oct. 3-5 2001), p. 1-14. Toronto (ON): Canadian Nuclear Society.
- Qureshi, M.E., Harrison S.R. et Wegener M.K. 1999. «Validation of multicriteria analysis models». *Agricultural Systems*, vol. 62, n° 2, p. 105–116.
- Québec (Province). À jour au 1 avril 2012a. *Loi sur la qualité de l'environnement*, L.R.Q. cQ-2. En ligne. Québec (Qc.) : Éditeur officiel du Québec.
<http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=/Q_2/Q2.htm>. Consulté le 10 avril 2012.
- Québec (Province). À jour au 1 avril 2012b. *Loi sur la Société québécoise de récupération et de recyclage* L.R.Q., chapitre S-22.01. En ligne. Québec (Qc.) : Éditeur officiel du Québec.
<http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=%2F%2FS_22_01%2FS22_01.htm>. Consulté le 10 avril 2012.
- Québec (Province). À jour au 1 avril 2012c. *Loi sur les cités et villes* L.R.Q., chapitre C-19. En ligne. Québec (Qc.): Éditeur officiel du Québec.
<http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=%2F%2FC_19%2FC19.htm>. Consulté le 10 avril 2012.
- Québec (Province). À jour au 1 avril 2012d. *Loi sur l'aménagement et l'urbanisme* L.R.Q., chapitre A-19.1. En ligne. Québec (Qc.): Éditeur officiel du Québec.
<http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=%2F%2FA_19_1%2FA19_1.htm>. Consulté le 10 avril 2012.
- Québec (Province). À jour au 1 avril 2012e. *Règlement sur les déchets solides* c. Q-2, r. 13. En ligne. Québec (Qc.): Éditeur officiel du Québec
<http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=%2F%2FQ_2%2FQ2R13.htm>. Consulté le 10 avril 2012.
- Québec (Province). À jour au 1 avril 2012f. *Règlement sur les matières dangereuses*, c. Q-2, r. 32. En ligne. Québec (Qc.): Éditeur officiel du Québec.
<http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=3&file=/Q_2/Q2R32.HTM>. Consulté le 10 avril 2012.
- Québec (Province). À jour au 1 avril 2012g. *Règlement sur l'évaluation et l'examen des impacts sur l'environnement*, c. Q-2, r. 23. En ligne. Québec (Qc.): Éditeur officiel

du Québec.
 <http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=3&file=/Q_2/Q2R23.htm>. Consulté le 10 avril 2012.

Québec (Province). À jour au 1 avril 2012h. *Politique québécoise de gestion des matières résiduelles* c. Q-2, r. 35.1. En ligne. Québec (Qc.) : Éditeur officiel du Québec.
 <http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=3&file=/Q_2/Q2R35_1.HTM>. Consulté le 10 avril 2012.

RECYC-QUEBEC. 2006. «Guide sur la collecte et le compostage des matières organiques du secteur municipal». En ligne. 129p. <<http://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/upload/publications/MICI/GuideCollCompostMatOrgMun.pdf>>. Consulté le 10 octobre 2010.

RECYC-QUÉBEC. 2007. «Caractérisation des matières résiduelles du secteur résidentiel au Québec 2006-2007 Rapport projet». En ligne.126 p <<http://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/upload/Publications/Rapport-projet-caract.pdf>> Consulté le 10 juin 2011.

RECYC-QUÉBEC. 2007b. «Caractérisation des matières résiduelles du secteur résidentiel au Québec 2006-2007 Annexes». En ligne. 270 p <<http://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/upload/Publications/Rapport-annexes-caract.pdf>> Consulté le 10 juin 2011.

RECYC-QUEBEC. 2008. «Bilan 2008 de la gestion des matières résiduelles au Québec». En ligne. 24 p.
 <<http://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/Upload/Publications/MICI/Rendez-vous2009/Bilan2008.pdf>> Consulté le 5 juillet 2010.

RECYC-QUÉBEC. 2011. «Le Compostage, les matières organiques en fiches techniques». En ligne.10 p. <<http://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/upload/Publications/Fiche5-compostage.pdf>>. Consulté le 3 mars 2011.

Röben Eva. 2002. «Manual de compostaje para municipios». En ligne 68 p. <<http://www.resol.com.br/Cartilha7/ManualCompostajeparaMunicipios.pdf>>. Consulté le 4 septembre 2011.

Rojo Gabriel. 2009. «La Gestion Dynamique des Déchets (GDD): Élaboration d'une approche intégrée d'aide à la décision visant à soutenir une gestion systémique et évolutive des déchets». Mémoire du doctorat en génie, Montréal, l'École de Technologie Supérieure et l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 217 p.

Rojo, G., V. Laforest, M. Glaus, J. Bourgois et R. Hausler. 2008. «Dynamic Waste Management (DWM): A new step towards Industrial Ecology». In *International Conference on Waste Management and the Environment IV*. (Granada, Spain, June

- 2-4 2008), p. 541-550. Granada: University of Granada: The Wessex Institute of Technology.
- Statistique Canada. 2008. «Enquête sur l'industrie de la gestion des déchets : secteur des entreprises et des administrations publiques 2008». En ligne. 83 p. <<http://www.statcan.gc.ca/pub/16f0023x/16f0023x2010001-fra.pdf>>. Consulté le 05 mars 2010.
- Thomas V, Theis T, Lifset R, Grasso D, Kim B, Koshland C et Pfahl R. 2003. «Industrial ecology: policy potential and research needs». *Environmental Engineering Science*, vol. 20, n° 1, p. 1-9.
- Thériault, Nicolas. 2011. «Dans le cadre d'une ACV, conception d'un outil d'aide à la sélection d'un jeu de catégories d'impact pour les entreprises européennes et nord-américaines du secteur textile» Mémoire de maîtrise en environnement, Sherbrooke, Université de Sherbrooke, 126 p.
- Tranchant, Carole, L. Vasseur, I. Ouattara et J.-P. Vanderlinden. 2004. «L'écologie industrielle : Une approche écosystémique pour le développement durable» In *Actes du colloque «Développement durable : Leçons et perspectives»*. (Ouagadougou, Burkina Faso, 1-4 juin 2004), p. 457-464. Montréal (Qc.): Organisation International de la Francophonie.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA), 2006. «Solid Waste Management and Greenhouse Gases: A Life Cycle Assessment of Emissions and Sinks». En ligne. 170 p. <<http://www.epa.gov/climatechange/wycd/waste/downloads/fullreport.pdf>>. Consulté le 5 septembre 2011.
- Valorga. 2006a. Unité de Méthanisation. In *Le site de Valorga International. La valorisation optimale des déchets organiques. Mise en œuvre. Le procédé Valorga*, En ligne. <http://valorgainternational.siteo.com/technologie/usine_fset_unite2.htm>. Consultée le 20 mars 2011.
- Valorga. 2006b. Unité de valorisation de biogaz. In *Le site Valorga International*. En ligne. <http://valorgainternational.siteo.com/technologie/usine_fset_unite3.htm>. Consultée le 20 mars 2011.
- Valorga. 2006c. Unité de méthanisation. In *Le site Valorga International*. En ligne. <http://valorgainternational.siteo.com/technologie/usine_fset_unite2.htm>. Consultée le 20 mars 2011.
- Valorga. 2006d. Unité de réception et préparation des déchets organiques. In *Le site Valorga International*. En ligne.

<http://valorgaininternational.siteo.com/technologie/usine_fset_unite1.htm>.

Consultée le 20 mars 2011.

Vermiculture Canada. 2012. «Eco-Verm On-Site Organic Digester, Tandem Commercial».

En ligne. 3 p.

<<http://www.vermica.com/tat-g/Detailed%20Product%20Description.pdf>>.

Consultée le 22 juillet 2011.

