

POTENTIEL ÉNERGÉTIQUE ET GAINS ENVIRONNEMENTAUX
GÉNÉRÉS PAR LA BIOMÉTHANISATION
DES MATIÈRES ORGANIQUES RÉSIDUELLES AU QUÉBEC

par

François Perron

Essai présenté au Centre Universitaire de Formation en Environnement
en vue de l'obtention du grade de maître en environnement (M.Env.)

CENTRE UNIVERSITAIRE DE FORMATION EN ENVIRONNEMENT
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Sherbrooke, Québec, Canada, novembre 2010

IDENTIFICATION SIGNALÉTIQUE

POTENTIEL ÉNERGÉTIQUE ET GAINS ENVIRONNEMENTAUX GÉNÉRÉS PAR LA BIOMÉTHANISATION DES MATIÈRES ORGANIQUES RÉSIDUELLES AU QUÉBEC

François Perron

Essai effectué en vue de l'obtention du grade de maître en environnement (M.Env.)

Sous la direction de Marc J. Olivier

Université de Sherbrooke

Novembre 2010

Mots clés : biogaz, biométhanisation, bioréacteur, digestion anaérobie, matières organiques résiduelles, potentiel énergétique, traitement, valorisation.

En novembre 2009, le dévoilement du *Projet de politique québécoise de gestion des matières résiduelles* et du *Programme de traitement des matières organiques par biométhanisation et compostage*, jumelé à un fonds de 650 M\$, a clairement indiqué la volonté politique du gouvernement québécois de mettre en valeur les matières organiques résiduelles d'ici 10 ans. La biométhanisation offre des opportunités très intéressantes et au 25 août 2009, déjà huit municipalités avaient démontré leur intention d'utiliser ce procédé, contre seulement une pour le compostage. La biométhanisation permet la génération de grandes quantités de biogaz qui constitue une forme d'énergie verte et renouvelable. Il devient donc intéressant d'identifier le potentiel énergétique et les gains environnementaux générés par la biométhanisation des résidus organiques en fonction du rendement des technologies et des usages employés.

SOMMAIRE

Le traitement des matières organiques résiduelles par la digestion anaérobie était jusqu'à présent très peu répandu en Amérique du Nord et au Québec. Les faibles coûts des énergies et de l'enfouissement en sont les principales causes. La situation européenne est tout à fait différente, avec des coûts énergétiques beaucoup plus élevés et l'incinération comme méthode de prédilection pour l'élimination des matières résiduelles. Dans ce contexte, la plupart des gouvernements européens ont mis en place des mécanismes pour encourager la production d'énergies renouvelables, dont la production de biogaz à partir des matières organiques résiduelles et des biosolides agricoles. À elle seule, l'Allemagne possède plus de 4 000 biodigesteurs, alors que seulement 18 projets ont été répertoriés au Québec. L'Europe a également vu l'implantation de plus de 90 usines de traitement par biométhanisation des résidus organiques municipaux et mixtes. Ces projets ont permis de développer les technologies, de démontrer leur fiabilité et leur rendement économique. Plus de 4 Mt/an de matières organiques sont ainsi traitées sur le vieux continent.

Avec le dévoilement de son nouveau *Projet de politique québécoise de gestion des matières résiduelles*, en novembre 2009, et de l'annonce de la mise en place du *Programme de traitement des matières organiques par biométhanisation et compostage*, le gouvernement du Québec venait de démontrer sa volonté de suivre l'exemple européen. Alors que le taux de mise en valeur de la matière organique résiduelle s'élevait seulement à 12 % en 2008, les objectifs sont de 60 % pour 2015 et de 100 % pour 2020. Le nouveau programme, assorti d'un fonds de 650 M\$, permettra d'encourager la mise en valeur de cette matière dans le respect des 3RV, ainsi que d'atteindre les objectifs du *Plan d'action sur les changements climatiques* et ceux de la *Stratégie énergétique du Québec*. C'est pourquoi la biométhanisation semble être tout à fait adaptée à l'atteinte conjointe de ces trois grandes stratégies gouvernementales. Les sommes disponibles dans la première phase de financement pourraient d'ailleurs permettre le traitement de 50 % des matières organiques résiduelles avec l'incorporation de 10 % de biosolides agricoles.

L'analyse des bilans de mise en valeur et d'élimination des matières résiduelles a démontré la disponibilité de plus de 3,5 millions de tonnes de matières organiques résiduelles en provenance des municipalités, des ICI et des boues de stations de traitement des eaux municipales et industrielles. À ce nombre s'ajoutent les 30 millions de tonnes de fumiers et de lisiers qui sont annuellement générées.

L'analyse des coûts de traitement par biométhanisation a démontré la compétitivité de cette solution avec un coût de revient de 107 \$/t, par rapport à des coûts d'enfouissement de plus en plus élevés variant entre 50 et 150 \$/t et à ceux du compostage évalués à environ 85 \$/t pour la ville de Montréal. La majoration annoncée de la redevance à l'enfouissement de 9,50 \$/t et l'augmentation appréhendée des coûts énergétiques sont d'autres facteurs qui jouent en faveur de la biométhanisation. Les différents paliers gouvernementaux ont également mis en place différents mécanismes de financement afin d'encourager plus particulièrement les projets de biométhanisation.

Cinq scénarios ont été élaborés afin d'évaluer les potentiels de production de biogaz et d'énergie ainsi que les gains environnementaux. Ces scénarios ont permis d'estimer qu'entre 98 et 1 917 millions de mètres cubes de biogaz pourraient être générés au Québec avec les matières organiques résiduelles. La valeur maximale correspond à la biométhanisation de tous les résidus organiques disponibles, alors que la valeur minimale correspond à un scénario où 25 % des matières organiques résiduelles municipales, des ICI et des boues serait biométhanisé avec l'incorporation d'un maximum de 10 % de biosolides agricoles par rapport aux autres matières. Ce scénario, avec le traitement de 981 000 tonnes de résidus organiques, est en fait très proche du potentiel de production de biogaz de l'ensemble des neuf projets annoncés depuis l'automne 2009.

Suite à l'implantation des projets de biométhanisation et à la génération d'importantes quantités de biogaz, ce dernier pourra être employé dans différents procédés. Le contexte particulier du Québec, avec une production électrique axée sur l'hydroélectricité, fait en sorte qu'il est important de statuer sur les usages les plus efficaces du biogaz et les types d'énergie à substituer qui génèrent les meilleurs gains environnementaux.

L'étude a démontré que la production thermique par combustion du biogaz et l'injection dans le réseau de Gaz Métro sont les usages les plus efficaces avec des rendements de 85 % par rapport à l'énergie initialement contenue dans le biogaz. La cogénération et la production de carburant suivent avec des rendements de 80 %. La production d'électricité sans récupération de la chaleur résiduelle et la production d'électricité à l'aide de piles à combustible ont démontré des rendements moyens nettement inférieurs de 33 et 50 %. Les différents scénarios démontrent un potentiel de production énergétique variant de 400 à 8 342 GWh/an, pour les quatre usages les plus efficaces.

Suite à l'analyse économique réalisée sur les revenus de vente de l'énergie, il est surprenant de constater que l'un des meilleurs usages, soit l'injection dans le réseau de gaz naturel, est l'alternative qui offre les revenus les moins intéressants avec 0,11 \$/m³ de biogaz. De l'autre côté, malgré de faibles rendements énergétiques, la production d'électricité devient intéressante si le prix de vente utilisé est celui fixé par Hydro-Québec lors de l'appel d'offres de 2009 pour la production d'énergie à partir de la biomasse, soit 0,112 \$/kWh. La cogénération, qui lie la production d'électricité et de chaleur, est la grande gagnante avec des revenus potentiels de 0,41 \$/m³, suivi de la production d'électricité à l'aide de piles à combustible (0,36 \$/m³), de la production d'énergie électrique à l'aide de turbines à gaz ou à vapeur (0,24 \$/m³), de la production thermique par combustion (0,22 \$/m³) et de la production de carburant (0,21 \$/m³). Les revenus potentiels selon les différents scénarios et les usages varient entre 8 et 632 M\$/an.

Finalement, l'analyse des impacts environnementaux a démontré que la biométhanisation est le mode de traitement des résidus organiques qui génère le moins de gaz à effet de serre (GES). Le seul impact majeur que peut représenter la biométhanisation est le traitement et la mise en valeur du digestat. L'utilisation du biogaz comme source d'énergie de substitution aux hydrocarbures génère les gains d'émissions en GES les plus intéressants alors que ceux pour le remplacement de l'électricité sont minimes dans le contexte québécois. Selon les scénarios, les gains d'émissions de GES peuvent représenter de 45 000 à 1 964 000 t_{eqCO2}/an en excluant la production d'électricité sans récupération de chaleur. Pour ce qui est des polluants atmosphériques, tels que les NO_x, SO_x, CO, PM₁₀ et COV, l'analyse a démontré que la production de carburant de substitution au diesel et à l'essence représentait la meilleure option.

La digestion anaérobie est certes un mode de valorisation des résidus organiques très intéressant. Cependant, les contextes politiques, régionaux, techniques et financiers doivent s'y prêter pour voir au bon succès de ces projets. Il en est de même pour les usages du biogaz qui doivent prendre en considération une multitude de paramètres spécifiques à chaque projet. Il n'est donc pas approprié de sélectionner la meilleure combinaison de modes de traitement de la matière organique résiduelle et des usages du biogaz. La réalité consiste en fait à un amalgame de divers modes de traitement des résidus organiques et des différents usages du biogaz qui permettra de concilier environnement, société et économie, les trois fers de lance du développement durable.

REMERCIEMENTS

Pour commencer, j'aimerais remercier tous mes amis qui ont réalisé la maîtrise en environnement à l'Université de Sherbrooke avant même que je songe à m'y inscrire et qui, par la force des choses, m'ont motivé et encouragé à accomplir cette grande étape. Je pense particulièrement, à Maryève Charland-Lallier, Alexis Lautard, Mélanie McDonald, Hélène Gervais et Joëlle Muyldermans.

Je tiens également à remercier tout le personnel du CUFE et particulièrement ma conseillère, Bénédicte Thérien, qui a su m'orienter dans ma démarche et me soutenir dans les situations les plus complexes.

J'aimerais également remercier mon directeur d'essai, Marc J. Olivier qui a su adapter sa tâche en fonction de mon style et de ma technique de travail.

Finalement, un merci énorme à tous mes professeurs et collègues de classe sans qui mon passage à la maîtrise en environnement n'aurait pas été le même. Un merci particulier à Alexandre Demers pour son soutien informatique dans les temps de crises et à Régis Goulet pour son encouragement continu.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|----|
| INTRODUCTION | 1 |
| 1 POLITIQUE QUÉBÉCOISE DE GESTION DES MATIÈRES RÉSIDUELLES | 4 |
| 1.1 Règlement sur les déchets solides (1978)..... | 4 |
| 1.2 Politique de gestion intégrée des déchets solides (1989) | 5 |
| 1.3 Politique de gestion des matières résiduelles 1998-2008 | 6 |
| 1.3.1 Principes et orientations | 6 |
| 1.3.2 Objectifs | 7 |
| 1.4 Projet de politique québécoise de gestion des matières résiduelles | 9 |
| 1.4.1 Plan d'action 2010-2015..... | 10 |
| 1.4.2 Programme de traitement de matières organiques par biométhanisation et compostage..... | 12 |
| 2 BILAN MASSIQUE DES MATIÈRES ORGANIQUES RÉSIDUELLES AU QUÉBEC..... | 14 |
| 2.1 Bilan massique des matières organiques résiduelles municipales..... | 15 |
| 2.2 Bilan massique des matières organiques résiduelles du secteur des ICI..... | 15 |
| 2.3 Bilan massique de la production de boues municipales et industrielles | 17 |
| 2.4 Secteur de la construction, de la rénovation et de la démolition (CRD) | 19 |
| 2.5 Bilan massique des résidus agricoles..... | 19 |
| 2.6 Résumé du bilan massique des matières organiques résiduelles..... | 20 |
| 3 BIOMÉTHANISATION DES MATIÈRES ORGANIQUES RÉSIDUELLES | 22 |
| 3.1 Mécanismes de fonctionnement de la digestion anaérobie | 22 |
| 3.1.1 Phase I : Hydrolyse | 24 |
| 3.1.2 Phase II : Acidogénèse..... | 24 |
| 3.1.3 Phase III : Acétogénèse | 24 |
| 3.1.4 Phase IV : Méthanogénèse | 24 |
| 3.1.5 Produits de la digestion anaérobie | 25 |
| 3.2 Conditions nécessaires au bon fonctionnement des biodigesteurs..... | 26 |
| 3.2.1 Le pH | 26 |
| 3.2.2 La température..... | 26 |
| 3.2.3 Les éléments nutritifs | 27 |
| 3.2.4 Le temps de rétention..... | 30 |
| 3.3 Classification des principales technologies de digestion anaérobie..... | 30 |
| 3.3.1 Classification selon la température d'opération | 30 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.3.2 | Classification selon la siccité des intrants..... | 32 |
| 3.3.3 | Classification selon le mode d'alimentation | 32 |
| 3.3.4 | Classification selon le nombre d'étapes..... | 33 |
| 3.4 | Identification des principales technologies de digestion anaérobie..... | 34 |
| 3.5 | Limites et contraintes de la digestion anaérobie..... | 36 |
| 4 | ANALYSE ÉCONOMIQUE ET COMPARATIVE DE LA DIGESTION ANAÉROBIE | 38 |
| 4.1 | Coûts d'implantation et d'exploitation de la digestion anaérobie..... | 38 |
| 4.1.1 | Montpellier..... | 39 |
| 4.1.2 | État de Washington | 40 |
| 4.1.3 | New York..... | 40 |
| 4.1.4 | Montréal | 40 |
| 4.2 | Comparaison des modes de gestion de la matière organique résiduelle | 42 |
| 4.2.1 | Enfouissement | 43 |
| 4.2.2 | Compostage..... | 43 |
| 4.2.3 | Épandage direct au sol..... | 44 |
| 4.2.4 | Production de biodiesel | 45 |
| 4.2.5 | Équarrissage | 46 |
| 4.3 | Aides financières et prix de l'énergie produite par la biométhanisation..... | 48 |
| 4.3.1 | Programme de traitement des matières organiques par biométhanisation et compostage..... | 49 |
| 4.3.2 | Fonds pour l'infrastructure verte | 50 |
| 4.3.3 | Fonds municipal vert | 50 |
| 4.3.4 | Programme Prime-Vert..... | 50 |
| 4.3.5 | Fonds écoÉNERGIE pour l'électricité renouvelable..... | 51 |
| 4.3.6 | Hydro-Québec..... | 51 |
| 4.3.7 | Gaz Métro | 52 |
| 4.3.8 | Synthèse des aides financières | 52 |
| 5 | POTENTIEL QUÉBÉCOIS DE PRODUCTION DE BIOGAZ | 53 |
| 5.1 | La biométhanisation au Québec..... | 53 |
| 5.1.1 | Projets de biométhanisation implantés au Québec..... | 54 |
| 5.1.2 | Projets de biométhanisation en réalisation ou potentiels au Québec | 57 |
| 5.2 | Entreprises œuvrant dans le secteur de la biométhanisation au Québec | 60 |
| 5.3 | Évaluation du potentiel de production de biogaz par la biométhanisation des matières organiques résiduelles au Québec..... | 61 |
| 5.3.1 | Éléments de calculs et hypothèses | 62 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 5.3.2 | Potentiel de production de biogaz au Québec selon cinq scénarios | 64 |
| 5.4 | Financement de la biométhanisation au Québec..... | 68 |
| 6 | UTILISATION DU BIOGAZ | 70 |
| 6.1 | Utilisation thermique..... | 71 |
| 6.2 | Production d'électricité par combustion du biogaz..... | 72 |
| 6.3 | Cogénération | 73 |
| 6.4 | Injection dans le réseau de gaz naturel | 74 |
| 6.5 | Carburant pour les véhicules..... | 75 |
| 6.6 | Production d'électricité par réaction chimique (pile à combustible)..... | 76 |
| 6.7 | Résumé des usages du biogaz et les potentiels énergétiques | 76 |
| 6.8 | Revenus potentiels de la vente d'énergie | 78 |
| 7 | GAINS ENVIRONNEMENTAUX | 80 |
| 7.1 | Impacts environnementaux des différents modes de gestion de la matière organique résiduelle..... | 80 |
| 7.1.1 | Enfouissement | 81 |
| 7.1.2 | Compostage..... | 82 |
| 7.1.3 | Épandage direct au sol..... | 82 |
| 7.1.4 | Production de biodiesel | 82 |
| 7.1.5 | Incinération..... | 83 |
| 7.1.6 | Digestion anaérobie | 83 |
| 7.2 | Gains environnementaux liés à la substitution d'énergie par le biogaz | 85 |
| 7.3 | Gains d'émissions de GES selon les différents usages du biogaz..... | 88 |
| | CONCLUSION..... | 90 |
| | RÉFÉRENCES | 93 |
| | BIBLIOGRAPHIE | 106 |
| | ANNEXE 1 LISTE DES SOUMISSIONS RETENUES SUITE À L'APPEL D'OFFRES D'HYDRO-QUÉBEC POUR LES PROJETS DE COGÉNÉRATION À LA BIOMASSE | 109 |
| | ANNEXE 2 TABLEAUX DES POTENTIELS DE PRODUCTION DE BIOGAZ SELON LES SCÉNARIOS B, C ET D..... | 111 |

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

| | |
|---|----|
| Figure 3.1 : Chaîne trophique de la méthanisation..... | 23 |
| Tableau 2.1 : Génération et récupération des matières résiduelles par secteurs en 2008 | 14 |
| Tableau 2.2 : Répartition des matières organiques récupérées par les ICI en 2008..... | 16 |
| Tableau 2.3 : Bilan massique et utilisation des MRF en 2007 | 17 |
| Tableau 2.4 : Filières de gestion des boues municipales | 18 |
| Tableau 2.5 : Matières organiques résiduelles disponibles pour la biométhanisation..... | 21 |
| Tableau 3.1 : Ratio C/N de différentes matières organiques | 28 |
| Tableau 3.2 : Potentiel de production de biogaz de différentes matières organiques..... | 29 |
| Tableau 3.3 : Familles de microorganismes responsables de la biométhanisation..... | 31 |
| Tableau 3.4 : Synthèse des technologies de digestion anaérobie..... | 34 |
| Tableau 4.1 : Coûts d'investissement et de traitement des résidus organiques..... | 42 |
| Tableau 4.2 : Synthèse des coûts de traitement de la matière organique résiduelle | 47 |
| Tableau 4.3 : Prix de vente de l'électricité générée à partir de biogaz en Europe | 49 |
| Tableau 4.4 : Synthèse des aides financières..... | 52 |
| Tableau 5.1 : Synthèse des projets de biométhanisation implantés au Québec..... | 56 |
| Tableau 5.2 : Synthèse des projets de biométhanisation potentiels au Québec..... | 59 |
| Tableau 5.3 : Entreprises membres de Biogaz Québec et leurs secteurs d'activités..... | 60 |
| Tableau 5.4 : Données de base pour les calculs de production de biogaz | 63 |
| Tableau 5.5 : Fractions des matières organiques biométhanisées selon les scénarios.... | 65 |
| Tableau 5.6 : Production de biogaz selon le scénario A..... | 66 |
| Tableau 5.7 : Production de biogaz selon le scénario E..... | 66 |
| Tableau 5.8 : Volumes de biogaz produits selon les cinq scénarios..... | 67 |
| Tableau 6.1 : Rendements énergétiques moyens des différents usages du biogaz | 77 |
| Tableau 6.2 : Potentiels de production d'énergie selon les usages et scénarios | 77 |
| Tableau 6.3 : Revenus potentiels selon les usages du biogaz et les scénarios..... | 78 |
| Tableau 7.1 : Impacts environnementaux des différents modes de gestion de la matière organique résiduelle..... | 84 |
| Tableau 7.2 : Facteurs d'émission de GES de différentes sources d'énergie..... | 85 |
| Tableau 7.3 : Facteurs d'émissions de différents contaminants atmosphériques selon les sources d'énergie et les équipements..... | 87 |
| Tableau 7.4 : Gains d'émission de GES selon les usages du biogaz et les scénarios | 88 |

LISTE DES ACRONYMES, DES SYMBOLES ET SIGLES

| | |
|-------------|--|
| ACM | Amendements calciques et magnésiens |
| ADEME | Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie |
| AEE | Agence de l'efficacité énergétique du Québec |
| AIE..... | Agence internationale de l'énergie |
| APESA | Association pour l'environnement et la sécurité aquitaine |
| BAPE | Bureau d'audience publique sur l'environnement |
| BNQ..... | Bureau de normalisation du Québec |
| BPR | Beaulieu, Poulin et Robitaille |
| CEFS..... | Center for Environmental Farming Systems |
| CEMR..... | Centre d'expertise sur les matières résiduelles |
| CEPAF | Centre d'expertise sur les produits agroforestiers |
| CIRAIG..... | Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services |
| CMM..... | Communauté métropolitaine de Montréal |
| C/N | Ratio de carbone sur l'azote |
| CNGVA..... | Canadian natural gas vehicle alliance |
| CNRC | Conseil national de recherches du Canada |
| COV..... | Composés organiques volatils |
| CRAAQ..... | Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec |
| CRD..... | Construction, rénovation et démolition |
| CRIQ | Centre de recherche industrielle du Québec |
| DCO | Demande chimique en oxygène |
| DDACE..... | Detroit Diesel-Allison Canada Est |
| DET | Dépôts en tranchés |
| DMS | Dépôt de matériaux secs |
| EDF | Énergie de France |
| FCM..... | Fédération canadienne des municipalités |
| FIV..... | Fonds pour l'infrastructure verte |
| FMV..... | Fonds municipal vert |
| g | Gramme |
| GES..... | Gaz à effet de serre |
| GIEC..... | Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat |

GJ..... Gigajoule
 GWh Gigawattheure (10⁹ Wattheures)
 ICI..... Industries, commerces et institutions
 IRDA..... Institut de recherche et de développement agroenvironnement
 kt..... Kilotonne (10³ tonnes)
 ktep..... Milliers de tonnes équivalent pétrole
 kW Kilowatt (10³ Watt)
 kWh Kilowatttheure (10³ Wattheures)
 l Litre
 LEDCD Lieux d'enfouissement de débris de construction ou de démolition
 LES..... Lieux d'enfouissement sanitaire
 LET..... Lieux d'enfouissement techniques
 LQE Loi sur la qualité de l'environnement
 m³ Mètre cube
 MAPAQ..... Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec
 MDDEP..... Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs
 MFQ Ministère des Finances du Québec
 Mm³ Million de mètres cubes
 MOR Matières organiques résiduelles
 MRC Municipalité régionale de comté
 MRF..... Matières résiduelles fertilisantes
 MRNF Ministère des Ressources naturelles et de la Faune
 Mt Mégatonne (10⁶ tonnes)
 Mtep Million de tonnes équivalent pétrole
 MW Mégawatt (10⁶ Watt)
 MWh..... Mégawattheure (10⁶ Wattheures)
 M\$ Million de dollars
 NA Non applicable
 n.d. Non défini
 PMGMR..... Plan métropolitain de gestion des matières résiduelles
 PM₁₀..... *Particulate matter* : Particule en suspension plus petite que 10 microns
 REC..... Réseau des entreprises canadiennes
 REIMR Règlement sur l'enfouissement et l'incinération des matières résiduelles
 RNCan..... Ressources naturelles Canada

SOFC Solid oxyde fuel cell
t Tonne
tep Tonne équivalent pétrole
t_{eqCO2} Tonne équivalent CO₂
TWh..... Térawattheures (10¹² Wattheures)
€.....Euros (taux de change au 5 août 2010 : 1 € =1,341 \$)
\$ Dollar
\$US Dollar américain (taux de change au 5 août 2010 : 1 \$US = 1,017 \$)
°C Degré Celsius
% Pourcentage
3RV-E..... Réduction à la source, Réemploi, Recyclage, Valorisation et Élimination

LEXIQUE

Amendements calciques et magnésiens (ACM) : Constitués de cendres de bois et autres résidus ligneux, de poussières de cimenteries et de résidus industriels alcalins divers allant de coquilles d'œufs aux résidus d'aciers chaulés.

Anaérobie : Absence d'oxygène.

Biogaz : Gaz produit par la décomposition de déchets organiques dans un milieu privé d'oxygène. Le biogaz est principalement composé de méthane et de dioxyde de carbone, avec des traces d'autres composés organiques.

Chaîne trophique : Ensemble de chaînes alimentaires reliées entre elles au sein d'un écosystème et par lesquelles l'énergie et la matière circulent.

Compost : Résidus putrescibles décomposés par l'action de micro-organismes, en présence d'oxygène pour atteindre une stabilisation plus ou moins avancée. De couleur brun foncé, le compost a l'apparence et l'odeur d'un terreau.

Demande chimique en oxygène (DCO) : Unité de mesure qui présente la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder toute la pollution organique ou minérale d'un échantillon d'eau.

PM₁₀ : Particules en suspension plus petite que 10 microns. Elles sont responsables du smog, ainsi que de nombreuses maladies pulmonaires (Environnement Canada, 2003).

Putrescible : Qui peut pourrir et se décomposer.

Siccité : État de ce qui est sec. Le pourcentage de siccité d'une boue est la quantité de matière sèche. Cette valeur est le complémentaire du pourcentage d'eau.

Tonne équivalent pétrole (tep) : Unité de mesure de l'énergie qui correspond à l'énergie produite par la combustion d'une tonne de pétrole. 1 tep représente environ 11,63 MWh ou 41,87 GJ (Europétrole, s. d.).

INTRODUCTION

La consommation énergétique mondiale ne cesse d'augmenter depuis le début de l'ère industrielle. Cette croissance exponentielle suit le rythme effréné de la croissance démographique et économique. La consommation énergétique en provenance de toutes sources est passée de 4 675 à 8 286 Mtep entre 1973 et 2007 (Agence internationale de l'énergie (AIE), 2009).

La croissance de la production des énergies renouvelables, telles que l'hydroélectricité, la biomasse et l'énergie éolienne est quant à elle passée de 142 Mtep à 281 Mtep entre 1970 et 2003 dans les 28 pays membres de l'AIE. Malgré cette augmentation importante, la part des énergies renouvelables sur l'ensemble de la production énergétique pour les pays de l'AIE n'a crue que de 4,6 % à 5,5 % dans ces mêmes années (AIE, 2006).

Le Québec ne fait pas exception à cette croissance de la consommation énergétique qui est passée de 31 Mtep en 1982 à 43 Mtep en 2007. Une croissance de 39 %, alors que la population n'a cru que de 16 % durant cette même période (ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF), 2009; ISQ, 2006). Une statistique qui n'est certes pas étrangère à notre société de consommation ainsi qu'à l'augmentation de la génération des matières résiduelles. En effet, il est étonnant de constater que lors de la mise en place de la *Politique de gestion intégrée des déchets solides* en 1989, les Québécois généraient près de 7 millions de tonnes de matières résiduelles. Cette quantité est passée à plus de 13 millions de tonnes en 2008, soit une augmentation de 86 % en moins de 20 ans.

Le 16 novembre 2009, le gouvernement du Québec dévoilait son nouveau *Projet de politique québécoise de gestion des matières résiduelles* assorti d'un *Plan d'action quinquennal (2010-2015)*. Le projet de politique vise essentiellement à créer une société sans gaspillage où seulement les déchets ultimes se retrouvent à l'élimination. Une priorité particulière est mise de l'avant pour bannir l'enfouissement de la matière organique. En 2008, le Québec récupérait moins de 12 % de la matière organique résiduelle. La majeure partie de cette matière finissait dans les lieux d'enfouissement, générant d'importantes quantités de gaz à effet de serre (GES). Selon le nouveau projet de politique, il est prévu de mettre en valeur plus de 60 % de la matière organique résiduelle d'ici 2015 et d'interdire complètement son enfouissement d'ici 2020 (ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP), 2010a; MDDEP, 2008a).

Afin d'atteindre ces objectifs ambitieux, le projet de la politique contient quatre volets majeurs dont le principal vise à mettre en place un *Programme de traitement des matières organiques par biométhanisation et compostage*. Le gouvernement du Québec prévoit y investir 650 millions de dollars. Par cette stratégie, le MDDEP veut également contribuer à l'atteinte des objectifs du *Plan d'action sur les changements climatiques* et à ceux de la *Stratégie énergétique du Québec*. En effet, la biométhanisation a le potentiel d'être appliqué à la gestion des matières organiques résiduelles tout en contribuant à produire une source d'énergie propre et renouvelable.

Suite à l'annonce, du *Programme de traitement des matières organiques par biométhanisation et compostage*, huit municipalités ont démontré leur intérêt à implanter des centres de traitement de la matière organique résiduelle par digestion anaérobie. Durant la même période, une seule ville a fait l'annonce de l'implantation d'un centre de compostage pour ses résidus organiques, alors qu'une autre ville a fait l'annonce de l'implantation d'un projet pilote de gazéification. Ces tendances démontrent bien l'engouement actuel pour la valorisation des matières organiques résiduelles par la biométhanisation.

Les faibles débouchés pour le compost et la possibilité de produire de l'énergie à l'aide du biogaz sont quelques-uns des facteurs qui influencent grandement le choix des municipalités et entreprises à investir dans les technologies de biométhanisation. Il devient alors intéressant d'évaluer, dans le cadre de cet essai, le potentiel énergétique et les gains environnementaux qui peuvent être générés par la biométhanisation des matières organiques résiduelles au Québec.

Pour commencer, une analyse de l'évolution des lois et politiques concernant la gestion des matières résiduelles au Québec sera réalisée. Cette analyse permettra de comprendre la raison d'être du nouveau *Projet de politique québécoise de gestion des matières résiduelles* et de déterminer les lignes directrices et les orientations du gouvernement québécois concernant la gestion des matières résiduelles organiques au Québec pour les dix prochaines années.

Par la suite, le bilan massique des matières organiques résiduelles potentiellement disponibles pour la biométhanisation sera effectué. Ce bilan est en fait la base de travail

de cet essai. Divers secteurs seront mis à l'étude, tels que le secteur municipal, le secteur des industries, commerces et institutions (ICI), le secteur de la construction, rénovation et démolition (CRD) et le secteur agricole.

La biométhanisation des matières organiques résiduelles est une science relativement complexe. Le troisième chapitre exposera les mécanismes microbiologiques qui permettent la production de biogaz ainsi que les paramètres importants à prendre en considération. Puis, l'inventaire des différentes technologies disponibles et leurs caractéristiques seront présentés.

Malgré le fait que la biométhanisation soit un mode de gestion de la matière organique intéressant au point de vue environnemental, elle doit également démontrer un bon rendement économique. Le chapitre quatre permettra de faire l'analyse économique de différents projets implantés ou étudiés dans le monde. De plus, ce mode de traitement sera comparé économiquement aux autres alternatives de gestion des matières organiques résiduelles. Finalement, l'inventaire des aides financières disponibles pour ce type de projets sera élaboré.

Le chapitre cinq permettra, quant à lui, d'identifier les projets de digestion anaérobie déjà implantés au Québec, ceux qui ont été annoncés dans les derniers mois ainsi que les entreprises œuvrant dans ce secteur, sur le territoire québécois. Viendra ensuite le cœur de l'essai, c'est-à-dire l'évaluation du potentiel de production de biogaz par la biométhanisation contrôlée au Québec en fonction de divers hypothèses et scénarios.

Alors que les volumes de biogaz pouvant être générés auront été évalués, les divers usages du biogaz seront exposés afin de déterminer les rendements et les quantités d'énergie pouvant être produites. Les différents scénarios seront également utilisés pour quantifier le potentiel de production d'énergie à l'aide du biogaz au Québec.

Finalement seront présentés les gains environnementaux que génère la biométhanisation des matières organiques résiduelles par rapport aux autres modes de gestion, ainsi que les impacts de la substitution d'autres sources d'énergie. Encore une fois, les scénarios élaborés au chapitre cinq permettront de quantifier les gains environnementaux en fonction des usages du biogaz.

1 POLITIQUE QUÉBÉCOISE DE GESTION DES MATIÈRES RÉSIDUELLES

Ce chapitre présente l'évolution des politiques, des objectifs et des cibles concernant la gestion des matières résiduelles au Québec dans les dernières décennies. Un effort particulier sera mis sur l'identification des points abordant les matières organiques résiduelles dans le *Projet de politique québécoise de gestion des matières résiduelles* qui a été déposé le 16 novembre 2009, ainsi que sur le *Plan d'action quinquennal*.

Avec l'entrée en vigueur de la *Loi sur la qualité de l'environnement* (LQE), le 21 décembre 1972, le Québec venait de mettre en place la base lui permettant de réglementer, à l'aide de la section VII, la gestion des matières résiduelles sur son territoire. En 1978, le ministère de l'Environnement du Québec se dotait du *Règlement sur les déchets solides* afin de resserrer les normes de gestions des résidus (Association des organismes municipaux de gestion des matières résiduelles, 2001). Il fallut cependant attendre en 1989, pour voir apparaître la première *Politique québécoise de gestion intégrée des déchets solides*. Cette politique énonçait des objectifs devant être atteints en l'an 2000. Cependant, la commission d'enquête sur la gestion des matières résiduelles, du Bureau d'audience publique sur l'environnement (BAPE), s'étant déroulée de 1995 à 1997, amena la création de la *Politique québécoise de gestion des matières résiduelles 1998-2008*. Cette dernière fut à son tour révisée dans les derniers mois, ce qui permit l'élaboration du *Projet de politique québécoise de gestion des matières résiduelles*. La compréhension de ce projet de loi permettra de déterminer les lignes directrices et les orientations du gouvernement québécois en ce qui concerne la gestion des matières organiques résiduelles au Québec pour les dix prochaines années.

1.1 Règlement sur les déchets solides (1978)

Avant l'adoption du *Règlement sur les déchets solides* en 1978, le pouvoir de réglementer la gestion des déchets était dispersé dans diverses lois, telles que la *Loi sur l'aménagement et l'urbanisme* et la *Loi sur l'organisation territoriale municipale*. Le règlement de 1978 vint donc concrétiser ce pouvoir de réglementation en matière de gestions des déchets. Il visait également la fermeture et la désaffectation des dépotoirs entre 1978 et 1982 et limitait le nombre de lieux d'élimination. C'est ainsi que le nouveau règlement permit de faire passer le nombre de lieux d'enfouissement de 555 à 70. Finalement, le règlement normalisait les différents modes d'éliminations (Olivier, 2007).

1.2 Politique de gestion intégrée des déchets solides (1989)

Alors que le *Règlement sur les déchets solides* de 1978 orientait les efforts sur l'enfouissement contrôlé des déchets, la *Politique de gestion intégrée des déchets solides* de 1989 prend une tout autre approche. Elle fait prendre conscience que les déchets peuvent devenir des ressources et que de les enfouir et de les incinérer revient à les gaspiller. À partir de ce moment, le terme déchet commence à céder la place au terme matière résiduelle et le concept des 3RV-E (Réduction à la source, Réemploi, Recyclage, Valorisation et Élimination) commence à s'implanter. Cette politique visait également à contrer le problème du comblement accéléré des lieux d'enfouissement, à prolonger leur durée de vie utile et à restreindre la création de nouveaux. De plus, le constat est que sans mécanisme de financement pour la valorisation des matières résiduelles, il serait difficile de concurrencer les faibles coûts de l'enfouissement et de l'incinération (BAPE, 1997). La *Politique de gestion intégrée des déchets solides* possédait deux objectifs :

- Réduire de 50 % le volume de déchets envoyés à l'élimination en l'an 2000, par rapport à 1988;
- Mise en place de moyens d'élimination adéquats et sécuritaires.

Lors de l'adoption de la *Politique de gestion intégrée des déchets solides* en 1989, le Québec générait près de 7 millions de tonnes de matières résiduelles, alors que seulement 1,3 million de tonnes étaient mises en valeur (18,6 %). Ce qui signifie que 5,7 millions de tonnes étaient éliminées. En 1999, malgré le fait que 3 millions de tonnes de matières résiduelles étaient valorisées (36,1 %), la quantité générée avait augmenté à 8,3 millions de tonnes, ce qui représente donc 5,3 millions de tonnes éliminées. La politique visait une réduction de 50 % du volume des déchets envoyés à l'élimination par rapport à 1988, alors que le taux de réduction réel n'était que d'environ 11 % après 10 ans (MDDEP, 2002).

La *Politique de gestion intégrée des déchets solides* privilégiait l'application du principe du « pollueur-payeur », cependant aucune redevance à l'élimination n'a été mise en place dans la décennie qui a suivi l'adoption de la politique. Les seuls tarifs mis en place étaient fixés pour les services d'enlèvement des ordures et ne constituaient pas une incitation à l'application du principe des 3RV-E (BAPE, 1997).

1.3 Politique de gestion des matières résiduelles 1998-2008

En 1994, cinq ans après l'entrée en vigueur de la *Politique de gestion intégrée des déchets solides*, le taux de valorisation des matières résiduelles, par rapport à 1988 n'atteignait que 17 %, ce qui laissait bien peu de temps pour atteindre la cible des 50 %. Suite à ce constat, le gouvernement du Québec, par l'entremise du ministre de l'Environnement de l'époque, M. Jacques Brassard, mandata le BAPE de tenir une enquête et une audience publique sur l'ensemble de la gestion des matières résiduelles au Québec (BAPE, 1997; Olivier 2007). Deux ans plus tard, en 1997, le BAPE remettait son rapport, intitulé : *Déchets d'hier, ressources de demain*. Ce rapport allait devenir le fondement du *Plan d'action québécois sur la gestion des matières résiduelles 1998-2008*.

En septembre 2000, le gouvernement du Québec confirmait son engagement et sa volonté de passer à l'action en publiant dans la *Gazette officielle du Québec* la *Politique québécoise de gestion des matières résiduelles 1998-2008* qui venait compléter le plan d'action du même nom dévoilé en 1998 (MDDEP, 2002).

1.3.1 Principes et orientations

La politique adoptée en 2000 repose sur cinq principes fondamentaux :

- Priorisation dans l'ordre des 3RV-E pour la gestion des matières résiduelles;
- La responsabilité élargie des producteurs tout au long du cycle de vie des produits;
- La participation des citoyens à la mise en œuvre et à la prise de décisions;
- La régionalisation de la prise de décisions;
- Le partenariat des différents intervenants.

La politique possède également quatre orientations qui visent à :

- Prévenir ou réduire la production de matières résiduelles, notamment en agissant sur la fabrication et la mise en marché des produits;
- Promouvoir la récupération et la valorisation des matières résiduelles;
- Réduire la quantité de matières résiduelles à éliminer et assurer une gestion sécuritaire des installations d'élimination;
- Obliger la prise en compte par les fabricants et importateurs de produits des effets environnementaux et des coûts afférents à la récupération, à la valorisation et à l'élimination des matières résiduelles générées par leurs produits.

1.3.2 Objectifs

Un changement important dans les objectifs de la nouvelle politique, par rapport à l'ancienne mouture, vient du fait qu'on ne vise plus à éviter qu'un certain pourcentage des matières résiduelles ne se retrouve à l'élimination, mais plutôt de mettre en valeur une fraction de ce qui peut être mis en valeur annuellement. Cette petite nuance peut sembler anodine, mais dorénavant, elle ne limite plus la croissance de la génération de matières résiduelles. Elle a également l'effet de ne pas inciter les intervenants du milieu à trouver de nouveaux débouchés pour les matières considérées déchets ultimes, puisque le cas échéant, la quantité de matière résiduelle pouvant être mise en valeur augmenterait.

L'objectif général de la politique est de mettre en valeur 65 % de l'ensemble des matières résiduelles pouvant être mises en valeur. Cet objectif doit cependant être analysé par secteur, puisque chacun des secteurs principaux possède des cibles distinctes. Ces cibles sont de 60 % pour le secteur municipal, 80 % pour le secteur des industries, commerces et institutions (ICI) et de 60 % pour le secteur de la construction, rénovation et démolition (CRD) (MDDEP, 2002). Encore une fois, ces cibles ne sont que des moyennes faites de l'ensemble des objectifs selon les secteurs et les matières.

Pour les municipalités :

- 60 % du verre, du plastique, du métal, des fibres, des encombrants, de la matière putrescible et des résidus domestiques dangereux;
- 75 % des huiles, des peintures et des pesticides;
- 50 % des textiles;
- 80 % des contenants à remplissage unique de bière et de boissons gazeuses.

Pour les industries, les commerces et les institutions :

- 85 % des pneus;
- 95 % des métaux et du verre;
- 70 % du plastique et des fibres, y compris le bois;
- 60 % de la matière putrescible.

Pour l'industrie de la construction, de la rénovation et de la démolition :

- 60 % de chacune des matières pouvant être mises en valeur.

Pour l'ensemble des secteurs, l'objectif de la mise en valeur des matières putrescibles est fixé à 60 %. Il est intéressant de mentionner que dans la politique, seul le volet du compostage des matières putrescibles est abordé pour la mise en valeur de cette matière (MDDEP, 2002).

Afin de mettre en œuvre plusieurs actions prévues dans la *Politique québécoise de gestions des matières résiduelles 1998-2008*, le *Règlement sur l'enfouissement et l'incinération des matières résiduelles* (REIMR) fut adopté en janvier 2006. Ce règlement avait pour objectif de remplacer graduellement, sur une période de trois ans, le *Règlement sur les déchets solides*, datant de 1978. Le REIMR cible les nouvelles installations d'élimination de matières résiduelles ou l'agrandissement de ces dernières, les lieux d'enfouissement, les incinérateurs et les centres de transfert utilisés à des fins d'élimination (MDDEP, 2010d).

Les points importants du REIMR sont :

- La fermeture des opérations dans les lieux d'enfouissement sanitaire (LES) et l'obligation d'opérer des lieux d'enfouissement techniques (LET);
- L'agrandissement d'un lieu d'enfouissement sanitaire existant est considéré comme un projet d'établissement d'un LET;
- L'interdiction d'agrandir ou d'établir un dépôt de matériaux secs (DMS);
- Les DMS existants peuvent poursuivre leur exploitation à condition que les matières admissibles répondent à la nouvelle définition de « débris de construction ou de démolition ». De plus, Les DMS seront assimilés à des lieux d'enfouissement de débris de construction ou de démolition (LEDCD);
- L'obligation de remettre, en juillet 2008, un avis d'intention au ministre pour indiquer l'abandon ou la poursuite d'exploitation au-delà du délai transitoire de trois ans pour les exploitants des LES, DMS, dépôts en tranchés (DET) et les lieux d'élimination existants nouvellement régis;
- En janvier 2009, tous les lieux d'élimination existants doivent s'être conformés aux nouvelles normes ou clore immédiatement leurs opérations (MDDEP, 2010d; Olivier, 2007).

1.4 Projet de politique québécoise de gestion des matières résiduelles

Le 16 novembre 2009, le gouvernement du Québec dévoilait son *Projet de politique québécoise de gestion des matières résiduelles* assorti d'un *Plan d'action quinquennal* (MDDEP, 2010a). L'élaboration de la politique fut inspirée du rapport de la *Commission des transports et de l'environnement sur la gestion des matières résiduelles au Québec*, suite à un mandat d'initiative amorcé en février 2008. Suite au dépôt de la politique et du plan d'action, une consultation publique de 90 jours fut mise en place. Cette consultation s'est terminée le 24 janvier 2010 pour les projets de règlements, et le 23 février 2010 pour le projet de politique. À ce jour, aucune modification n'a été apportée au projet de politique et ce dernier n'a pas encore été adopté.

Le *Projet de politique québécoise de gestion des matières résiduelles* vise essentiellement à créer une société sans gaspillage où seulement les déchets ultimes se retrouvent à l'élimination. Une priorité particulière est mise de l'avant pour bannir l'enfouissement de la matière organique.

Il est important de mentionner que la portée du nouveau projet de politique n'atteint pas certaines catégories de matières autrement régies, dont certaines matières organiques, telles que les fumiers et les résidus de coupes forestières qui demeurent en forêt.

Dans le raffinement de son approche, le MDDEP, propose un cadre de gestion dont les principes et orientations sont énoncés dans le *Projet de politique québécoise de gestion des matières résiduelles*. Aucune grande innovation n'a été apportée aux principes et orientations du projet de politique, puisque ces points ont pratiquement été repris intégralement de la politique en place depuis 1998. Les objectifs et les actions sont, quant à eux, consignés dans un premier *Plan d'action quinquennal (2010-2015)*.

Les trois enjeux de la politique sont de :

- Mettre un terme au gaspillage des ressources;
- Contribuer aux objectifs du *Plan d'action sur les changements climatiques* et à ceux de la *Stratégie énergétique du Québec*;
- Responsabiliser l'ensemble des acteurs concernés par la gestion des matières résiduelles (MDDEP, 2010a).

Afin d'appuyer ces trois enjeux majeurs, le MDDEP a également élaboré dix stratégies d'intervention (MDDEP, 2010a) :

- Respecter la hiérarchie des 3RV-E;
- Prévenir et réduire la production de matières résiduelles;
- Décourager et contrôler l'élimination;
- Bannir l'enfouissement de la matière organique;
- Responsabiliser les producteurs;
- Soutenir la planification et la performance régionales;
- Améliorer la performance des ICI et des CRD;
- Choisir le système de collecte le plus performant;
- Connaître, informer, sensibiliser et éduquer;
- Rendre compte des résultats.

Bien entendu dans le cadre de la réalisation de cet essai, la quatrième stratégie d'intervention, qui consiste à bannir l'enfouissement de la matière organique, sera davantage analysée. En 2008, le Québec récupérait et valorisait moins de 12 % de la matière organique résiduelle. La majeure partie de cette matière finissait dans les lieux d'enfouissement, générant d'importantes quantités de gaz à effet de serre. Par cette stratégie, le MDDEP veut également contribuer à l'atteinte des objectifs du *Plan d'action sur les changements climatiques* et à ceux de la *Stratégie énergétique du Québec* (MDDEP, 2010a; MDDEP, 2008a).

1.4.1 Plan d'action 2010-2015

Alors que la *Politique québécoise de gestion des matières résiduelles* aura pour objectif de mettre en place les lignes directrices, les plans d'action quinquennaux permettront de fixer les objectifs intermédiaires et à élaborer une série d'action à mettre en œuvre. Ces plans d'action doivent décrire les actions, fixer les échéances, indiquer les objectifs ou cibles ainsi que la responsabilité des différents acteurs.

Le premier plan d'action qui couvre la période 2010-2015 possède cinq objectifs quantitatifs (MDDEP, 2010a) :

- Ramener la quantité de matières résiduelles éliminées à 700 kg/habitant;
- Recycler 70 % du papier, du carton, du plastique, du verre et du métal résiduels;

- Traiter 60 % de la matière organique putrescible résiduelle, autre que le papier et le carton, au moyen de procédés biologiques, à savoir l'épandage, le compostage ou la biométhanisation;
- Recycler ou valoriser 80 % des résidus de béton, de brique et d'asphalte;
- Acheminer vers un centre de tri 70 % des résidus de construction, de rénovation et de démolition du secteur du bâtiment.

Encore une fois, certains des objectifs n'ont pas la même base de calcul que la politique de 1998. Il devient donc difficile pour les citoyens qui n'ont pas les connaissances de base dans ce domaine de pouvoir comparer l'évolution du rendement des différents objectifs.

Afin de mettre en œuvre les dix stratégies du nouveau projet de politique et d'atteindre les objectifs fixés dans le *Plan d'action 2010-2015*, une série de 36 actions a été élaborée dans ce même plan d'action. Cinq de ces actions ont des incidences sur la gestion des matières organiques résiduelles (MDDEP, 2010a) :

- Action 8 : Augmenter les redevances pour l'élimination des matières résiduelles afin notamment de financer les mesures du plan d'action. Dans ce contexte, une nouvelle redevance supplémentaire de 9,50 \$/t sera prélevée de 2010 à 2015;
- Action 11 : Interdiction d'ici 2013 de l'enfouissement du papier et du carton;
- Action 12 : Élaborer en 2010 une stratégie afin d'interdire, d'ici dix ans, l'enfouissement de l'ensemble des matières organiques putrescibles;
- Action 13 : Mise en place d'un programme d'infrastructures pour la biométhanisation et le compostage des matières putrescibles à l'intention des municipalités et des promoteurs privés. Ce programme permettra la réalisation de projets d'une valeur totale de 650 millions de dollars;
- Action 14 : Adopter un règlement exigeant des garanties financières de la part des exploitants d'une installation de traitement de matières organiques.

Le plan d'action fait également mention de la manière de traiter la matière organique afin d'en optimiser la valeur. La règle des 3RV-E étant l'un des principes du projet de la politique, l'herbicyclage et le compostage domestique ou communautaire doivent être priorités comme étant des mesures de réduction à la source. Pour ce qui des matières organiques recyclables, telles que le papier, le carton et le bois, elles doivent être recyclées plutôt que valorisées énergétiquement. De plus, les techniques de traitement

telles que l'épandage, le compostage et la biométhanisation, qui réintroduisent les matières organiques dans le cycle naturel doivent être privilégiées par rapport aux procédés thermiques qui dénaturent les matières organiques. Finalement, lorsque les matières organiques seront traitées de façon à fournir de l'énergie, une attention particulière sera accordée afin que cette énergie se substitue aux carburants fossiles, dans les cas où les conditions environnementales, sociales et économiques le permettent (MDDEP, 2010a).

1.4.2 Programme de traitement de matières organiques par biométhanisation et compostage

De toutes les stratégies du *Projet de politique québécoise de gestion des matières résiduelles* et des actions du *Plan d'action 2010-2015*, la lutte contre l'enfouissement des matières organiques est probablement la mesure la plus importante. Le budget de 650 M\$ pour cette simple mesure, par rapport au budget total de 700 M\$, ne fait que confirmer les efforts mis de l'avant par le gouvernement du Québec pour récupérer et mettre en valeur les matières organiques. Tel que mentionné précédemment, cette mesure permet également de répondre à l'atteinte des objectifs du *Plan d'action 2006-2010 sur les changements climatiques* et à ceux de la *Stratégie énergétique du Québec*. C'est dans ce contexte que fut créé le *Programme de traitement de matières organiques par biométhanisation et compostage* (MDDEP, 2010b). Le programme entré en vigueur, le 16 novembre 2009, soit le jour du dévoilement du nouveau *Projet de politique québécoise de gestion des matières résiduelles* et se terminera le 30 septembre 2013.

Les objectifs du programme sont de :

- Réduire les émissions de GES au Québec afin de contribuer à l'atteinte de l'objectif québécois de réduction des émissions de GES inscrit dans le *Plan d'action 2006-2012 sur les changements climatiques*;
- Réduire la quantité de matières organiques destinée à l'élimination afin de favoriser la réalisation des objectifs environnementaux prévus à la *Politique québécoise de gestion des matières résiduelles*.

Pour le volet de biométhanisation, les matières organiques visées par le programme sont les matières organiques d'origine domestique et du secteur des ICI, les résidus verts traitables dans un digesteur anaérobie, les boues d'origine municipale et industrielle, les

boues de fosses septiques et les matières organiques d'origine agricole, telles que les fumiers et les lisiers, jusqu'à un maximum de 10 % du volume total des matières organiques traitées (MDDEP, 2010b).

Les demandeurs admissibles en vertu du programme sont les demandeurs municipaux et les demandeurs privés. Cette distinction est importante, puisque le financement diffère en fonction du demandeur. Pour le volet biométhanisation, le gouvernement du Québec s'engage à déboursier 67 % des coûts admissibles pour les projets municipaux et 25 % pour les projets privés. Pour le volet compostage, l'aide financière sera respectivement de 50 et 20 % (MDDEP, 2010b).

Pour ce qui est des retombées environnementales, le biogaz généré par les projets de biométhanisation devra substituer des combustibles fossiles afin que les projets soient admissibles au financement public. Les projets de cogénération, à l'aide de biogaz provenant des procédés de biométhanisation, devront également substituer de façon significative les combustibles fossiles afin d'être financés. Les projets admissibles au programme devront également inclure une déclaration de réduction des émissions GES validée par une tierce partie selon la norme ISO-14064-III. De plus, un rapport annuel présentant les réductions d'émissions de GES devra être remis lors des cinq premières années d'exploitation. Les crédits de GES générés par les projets demeureront la propriété des demandeurs (MDDEP, 2010b).

2 BILAN MASSIQUE DES MATIÈRES ORGANIQUES RÉSIDUELLES AU QUÉBEC

La base de ce travail repose sur le potentiel de biométhanisation des matières organiques résiduelles au Québec. Il est donc crucial de réaliser le bilan massique de ces matières sur l'ensemble du territoire. Divers secteurs seront mis à l'étude, tels que le secteur municipal, celui des industries, commerces et institutions (ICI), ainsi que les boues de traitement des eaux générées par ces deux secteurs. Le secteur de la construction, rénovation et démolition (CRD) et le secteur agricole seront également analysés afin de déterminer les quantités de matières organiques qui pourraient potentiellement être biométhanisées. Le secteur forestier ne sera pas pris en compte lors de cette analyse, puisque les résidus forestiers, composés principalement de matière ligneuse sont difficilement biométhanisables et possèdent des débouchés ayant de meilleurs potentiels.

Les objectifs et les bilans concernant les matières résiduelles sont généralement sous-divisés en trois catégories, soient le secteur municipal, le secteur industriel, commercial et institutionnel (ICI) ainsi que le secteur de la construction, de la rénovation et de la démolition (CRD). Tous les deux ans, la société Recyc-Québec a pour mission de réaliser un bilan complet de la gestion des matières résiduelles au Québec pour ces trois secteurs. L'année 2010 n'étant pas encore terminée et le bilan n'étant pas encore réalisé, les données seront tirées du bilan 2008.

En 2008, les Québécois ont généré 13 033 kt de matières résiduelles, dont 6 814 ont été récupérées et mises en valeur. Ce qui représente un taux de récupération de 52 % sur le total et de 57 % sur le potentiel des matières résiduelles pouvant être mis en valeur (Recyc-Québec, 2009). Le tableau 2.1 présente les résultats par secteurs.

Tableau 2.1 : Génération et récupération des matières résiduelles par secteurs en 2008

| Secteur | Générées | Potentiel | Objectif | Récupérées | Taux de récupération | Objectif |
|--------------|---------------|---------------|--------------|--------------|----------------------|-------------|
| | (kt) | (kt) | (kt) | (kt) | (%) | (%) |
| Municipal | 3 150 | 2 864 | 1 719 | 1 118 | 36 % | 60 % |
| ICI | 5 314 | 4 806 | 3 845 | 2 479 | 53 % | 80 % |
| CRD | 4 569 | 4 342 | 2 605 | 3 217 | 74 % | 60 % |
| Total | 13 033 | 12 012 | 8 169 | 6 814 | 57 % | 65 % |

Modifié de Recyc-Québec (2009, p. 7)

2.1 Bilan massique des matières organiques résiduelles municipales

En 2006, Recyc-Québec et Éco Entreprises Québec, en collaboration avec DESSAU et NI Environnement, ont effectué une vaste caractérisation des matières résiduelles du secteur résidentiel et de certains lieux publics au Québec. Cette caractérisation démontre que chaque citoyen vivant dans un logement privé (7 470 878 personnes) génère annuellement près de 412 kg de matières résiduelles. De cette quantité, 44 % est constituée de matière organique, soit 184 kg par année, pour un total annuel de 1 375 kt (Recyc-Québec, 2009; Recyc-Québec et al., 2009). Tel que le démontre le bilan 2008 de Recyc-Québec, de ces 1 375 kt de résidus organiques seulement 167 kt furent récupérées pour un taux de récupération de 12 %. La grande majorité des résidus organiques municipaux finit donc dans les sites d'enfouissement du Québec ou est incinérée. Les impacts environnementaux de l'élimination de ces résidus sont présentés au chapitre sept. Ce faible taux de mise en valeur de la matière organique s'explique par le fait que seulement 6 % des ménages québécois ont accès à une collecte de résidus organiques. Il peut s'agir de collectes de troisième voie ou encore de collectes spéciales de résidus verts tels que les feuilles et branches (Recyc-Québec, 2009).

Sur les 167 kt de matières organiques récupérées, 122 kt proviennent d'une collecte de troisième voie, ce qui inclut autant les matières putrescibles que les résidus verts. Les collectes spéciales ont, quant à elles, permis de récolter 45 kt de résidus verts (Recyc-Québec, 2010).

2.2 Bilan massique des matières organiques résiduelles du secteur des ICI

Dans le secteur des ICI, 217 kt de matières organiques furent récupérées et mises en valeur. Il est important de prendre en considération que cette quantité inclue les résidus de bois de 2^e et 3^e transformation (Recyc-Québec, 2009). Ces résidus de bois, représente près de 80 % des résidus organiques des ICI. Ils sont principalement utilisés comme matériel structurant pour la fabrication de compost ou comme paillis. Tel que précisé précédemment, ces résidus de bois ne seront pas pris en considération dans le bilan des matières organiques potentiellement disponibles puisqu'ils ont déjà des marchés bien établis et leur potentiel de production de biogaz est faible. Les autres matières organiques du secteur des ICI sont en majorité des résidus de transformation du secteur agroalimentaire, des résidus marins ainsi que d'autres résidus provenant des marchés

d'alimentation et des restaurants. Le tableau 2.2 présente la répartition des matières organiques récupérées et mises en valeur dans le secteur des ICI.

Tableau 2.2 : Répartition des matières organiques récupérées par les ICI en 2008

| Catégories | Quantité | Pourcentage |
|---|------------|--------------|
| | (kt) | (%) |
| Résidus de bois | 176 | 81 % |
| Boues agroalimentaires | 13 | 6 % |
| Résidus agroalimentaires | 12 | 6 % |
| Résidus organiques ICI | 4 | 2 % |
| Résidus marins | 10 | 4 % |
| Résidus agricoles (excluant les fumiers et lisiers) | 2 | 1 % |
| Total | 217 | 100 % |

Modifié de Recyc-Québec (2010, p. 11)

En 2006, le secteur industriel a également utilisé pour l'épandage agricole ou l'intégration dans l'alimentation animale près de 80 kt de résidus organiques provenant de la préparation d'aliments. Ces quantités ne sont pas comptabilisées dans le bilan de Recyc-Québec, puisqu'elles ne sont pas incluses dans la politique (Recyc-Québec, 2010).

Pour ce qui est des institutions, une enquête réalisée en 2009 a démontré que les matières organiques représentent près de 28 % des matières résiduelles, pour un total de 74 kt par année. De ce nombre 35 kt proviennent uniquement du secteur de la santé (Recyc-Québec, 2010).

Les données disponibles pour le secteur des ICI ne considèrent que les quantités qui ont été récupérées et malheureusement il existe peu de données sur la génération totale de matières résiduelles pour ce secteur et encore moins pour les matières organiques. Il serait cependant estimé que sans les résidus de papeteries et de bois, ce secteur générerait annuellement plus de 300 kt de matière organique résiduelle (Recyc-Québec, 2010). Cette quantité sera utilisée pour le bilan massique de cette section et les calculs dans les chapitres cinq, six et sept.

2.3 Bilan massique de la production de boues municipales et industrielles

En 2007, près de deux millions de tonnes humides de boues municipales et industrielles ont été générées. Ces boues constituent, dans la grande majorité des cas, des matières résiduelles fertilisantes (MRF) et sont mises en valeur par épandage agricole ou par compostage. Tel que présenté au tableau 2.3, 1 013 kt de MRF ont été épandues sur les sols agricoles du Québec, alors qu'environ 730 kt ont été compostées. Le reste des MRF a été utilisé pour la végétalisation de sites dégradés ou encore la fabrication de terreaux horticoles (Recyc-Québec 2009; MDDEP, 2008b).

Tableau 2.3 : Bilan massique et utilisation des MRF en 2007

| MRF/Résidus | Épandage agricole | Sites dégradés | Autres | Compostage | Total |
|--|-------------------|----------------|------------|------------|--------------|
| | (kt)* | (kt)* | (kt)* | (kt)* | (kt)* |
| Biosolides de papetières | 588 | 62 | 34 | 186 | 870 |
| Biosolides municipaux | 144 | 17 | 1 | 85 | 247 |
| Biosolides et résidus agroalimentaires | 92 | | | 88 | 180 |
| Cendres | 81 | 34 | 26 | 9 | 151 |
| Poussières de cimenteries | 50 | | | | 50 |
| ACM** - certifié par le BNQ | 18 | | | | 18 |
| ACM** - autres | 6 | 0,5 | 4 | | 11 |
| Autres | 34 | 11 | 75 | 361 | 481 |
| Total | 1 013 | 125 | 141 | 730 | 2 008 |

* Tonnage humide

** Amendements calciques et magnésiens

Modifié de MDDEP (2008b, p. 5)

Dans les données présentées au tableau 2.3, les biosolides en provenance des industries agroalimentaires ont déjà été comptabilisés dans la section précédente et devront donc être soustraits. De plus, les cendres, les poussières de cimenteries et les amendements calciques et magnésiens (ACM) ont des intérêts certes pour l'épandage agricole grâce à leurs apports en minéraux ou au contrôle du pH, mais ne présentent aucun intérêt pour la biométhanisation. Ces quantités doivent également être soustraites. Quant à la catégorie « autres », le bilan 2007 de la valorisation des MRF mentionne qu'il s'agit de résidus de bois, tels que les écorces et qu'elle inclut les matières organiques municipales

compostées. Encore une fois ces données ne seront pas retenues, afin d'éviter de les comptabiliser en double. Par élimination, seuls les biosolides provenant des papetières et des municipalités seront pris en considération.

Le secteur municipal produit annuellement une quantité considérable de boues en provenance des stations d'épuration et des fosses septiques. En 2008, 218 kt sèches de boues municipales ont été générées (773 kt humides). De ce nombre, 126 kt de boues municipales furent incinérées alors que 53 kt furent enfouies et 40 kt mises en valeur par compostage, épandage sur les terres agricoles ou encore utilisées pour restaurer des sites dégradés (Recyc-Québec, 2010). Ces données sont conciliées dans le tableau 2.4.

Tableau 2.4 : Filières de gestion des boues municipales

| Filières de gestion des boues municipales | Quantité sèche | Quantité humide | Taux de siccité |
|---|----------------|-----------------|-----------------|
| | (kt) | (kt) | (%) |
| Compostage | 23 | 138 | 16 % |
| Épandage agricole | 14 | 144 | 10 % |
| Restauration de lieux dégradés | 3 | 17 | 20 % |
| Enfouissement | 53 | 160 | 33 % |
| Incinération | 126 | 314 | 40 % |
| Total | 218 | 773 | 28 % |

Modifié de Recyc-Québec (2010, p. 10)

Pour ce qui est des papetières, il est bien entendu qu'elles produisent une quantité beaucoup plus importante de boues que ce qui est présenté au tableau 2.4. Le *Bilan 2007 de conformité environnementale pour le secteur des pâtes et papiers* du MDDEP mentionne que près de 1,8 million de tonnes de boues ont été générées par ce secteur en 2007. De ce nombre, 30 % (533 kt) a été composté ou valorisé à des fins agricoles, 37 % (652 kt) a été traité par combustion, 30 % (520 kt) a été enfoui et 3 % (50 kt) a été traité par d'autres moyens. Les papetières valorisent énergétiquement une partie de leurs boues dans des unités de cogénération et il est peu probable qu'elles puissent être utilisées pour la biométhanisation vu l'importance de cet apport énergétique dans leurs opérations. En soustrayant les boues valorisées énergétiquement, une masse de 1 083 kt humides serait potentiellement disponible pour la production de biogaz. Le taux de siccité des boues diffèrent d'une papetière à l'autre. Cependant, les données recueillies dans le *Bilan 2007 de conformité environnementale pour le secteur des pâtes et papiers*, permettent d'estimer

à environ 40 % le taux de siccité moyen, soit 421 kt sèches de matières organiques disponibles (MDDEP, 2007).

À première vue, il peut paraître insensé de biométhaniser des boues qui sont actuellement utilisées comme matières résiduelles fertilisantes (MRF). Il faut cependant considérer que le procédé de biométhanisation, tel qu'il le sera présenté au prochain chapitre, produit un digestat boueux qui devient lui aussi une MRF. De plus, ces boues, déjà partiellement décomposées, sont moins complexes et sont plus facilement assimilables par les organismes végétaux (N'Dayegamiye, 2006).

En résumé, les biosolides des papetières et municipaux qui seraient disponibles pour la biométhanisation représentent 1 856 kt humides ou encore 639 kt sur une base sèche.

2.4 Secteur de la construction, de la rénovation et de la démolition (CRD)

Les matières organiques générées dans le secteur de la CRD sont principalement constituées de bois, palettes, sciures et copeaux. En 2008, 497 tonnes de résidus de bois ont été récupérées et mises en valeur par ce secteur (Recyc-Québec, 2009). La quantité de matières organiques putrescibles étant infime et les résidus de bois n'étant pas propices aux divers procédés de biométhanisation, la matière organique générée par le secteur de la CRD ne sera pas considérée dans les hypothèses de calculs.

2.5 Bilan massique des résidus agricoles

En 2007, les agriculteurs du Québec ont épandu près de 30 millions de tonnes humides de fumiers et lisiers sur les terres du Québec (MDDEP, 2008b). De cette quantité, environ 30 %, soit près de 9 millions de tonnes, était constitué de lisiers de porcs (N'Dayegamiye, 2006). Cette distinction est importante, puisque le lisier de porc est beaucoup plus liquide et possède une siccité d'environ 3 à 4 % alors que les fumiers bovins et de volailles ont des taux de siccité respectifs d'environ 25 et 80 % (Institut de recherche et de développement agroenvironnement (IRDA), 2003). Les cultivateurs du Québec ont également épandu, tel que discuté précédemment, 1 013 kt de MRF ainsi que des engrais et de la chaux agricole.

En plus des fumiers et des lisiers, le secteur agricole a bien plus à offrir en ce qui concerne les matières organiques biométhanisables. Le maïs et d'autres graminées telles que le blé pourraient être utilisés dans les procédés de biométhanisation. Cependant, le débat est déjà bien lancé au Québec et ailleurs dans le monde sur la pertinence d'utiliser des terres agricoles pour produire de l'énergie. Néanmoins, la mise en valeur de grains déclassés impropres à la consommation humaine ou animale pourrait être une option intéressante. De plus, les matières organiques laissées au champ et le foin ont des potentiels de production de biogaz très intéressants tel qu'il le sera présenté au chapitre trois. Malgré les recherches auprès des divers intervenants, aucune donnée n'a pu être collectée concernant les résidus organiques laissés aux champs ou encore sur les volumes de grains déclassés.

2.6 Résumé du bilan massique des matières organiques résiduelles

Le nouveau *Projet de politique québécoise de gestion des matières résiduelles* et le *Plan d'action 2010-2015* visent d'ici 2015 à mettre en valeur 60 % des matières putrescibles et à éviter complètement l'enfouissement de celles-ci d'ici 2020. Les résultats actuels montrent bien à quel point la tâche sera grande afin d'atteindre ces objectifs. En effet, en 2008 le secteur municipal possédait un taux de récupération de 12 %, alors que celui des ICI était d'environ 14 %, sans considérer les résidus de bois. Il en est de même avec la mise en valeur des boues municipales qui est de 18 % alors que des pays comme la France et les États-Unis utilisent à plus de 50 % les boues municipales comme matières résiduelles fertilisantes (MDDEP, 2007b).

Les données recueillies démontrent bien la disponibilité de la matière organique pour les projets biométhanisation. La façon dont cette matière devra être récupérée est un tout autre débat. Dans le cadre de cet essai, seulement les quantités potentiellement disponibles seront utilisées comme base de calcul. Il est bien entendu que malgré les efforts qui seront mis de l'avant, il sera impossible de récupérer 100 % de la matière organique disponible. De plus, d'autres filiales en développement telles que l'éthanol cellulosique, le biodiesel, la pyrolyse, la gazéification et le compost feront compétition à la biométhanisation comme mode de gestion des matières organiques. Il faut cependant considérer que l'éthanol cellulosique est produit à partir de matière ligneuse, alors que le biodiesel nécessite des huiles végétales ou animales. Pour ce qui est de la valorisation par pyrolyse ou par gazéification, ils ne sont pas prioritaires dans la hiérarchie des 3RV,

tel que stipulé dans le nouveau *Projet de politique québécoise de gestion des matières résiduelles*. Les bases de calcul seront fondées sur la disponibilité potentielle des matières organiques résiduelles présentée dans le tableau 2.5.

Tableau 2.5 : Matières organiques résiduelles disponibles pour la biométhanisation

| Secteurs | Masse | Récupération actuelle |
|---------------------|---------------|-----------------------|
| | (kt) | (%) |
| Municipal | 1 375 | 12 % |
| ICI | 300 * | 14 % |
| Boues municipales | 773 ** | 18 % |
| Boues de papetières | 1 083 *** | 49 % |
| Agricole | 30 000 | 100 % |
| Total | 33 531 | |

* Ne prend pas en considération les résidus de bois

** Taux de siccité de 28 % ou 218 kt sur une base sèche

*** Taux de siccité de 40 % ou 639 kt sur une base sèche

(Recyc-Québec, 2009; Recyc-Québec, 2010; MDDEP, 2007; MDDEP, 2008b)

Il est important de prendre en considération que les matières organiques résiduelles ont des potentiels de production de biogaz différents en fonction de leur constitution. Le potentiel de production de biogaz doit être calculé selon les origines et les caractéristiques propres à chacune des catégories analysées dans ce chapitre. Ces potentiels seront présentés dans le prochain chapitre.

3 BIOMÉTHANISATION DES MATIÈRES ORGANIQUES RÉSIDUELLES

La biométhanisation ou la digestion anaérobie de la matière organique n'est pas nouvelle. Ce phénomène se produit lorsque des microorganismes décomposent la matière organique en mode anaérobie, c'est-à-dire sans oxygène et dans des conditions spécifiques telles que la température et le pH. Ces réactions se produisent de façon naturelle dans l'environnement. Les marais et les lieux d'enfouissement qui produisent des biogaz en sont de bons exemples. Les technologies de biométhanisation ne tentent que de reproduire ces réactions dans des conditions optimales.

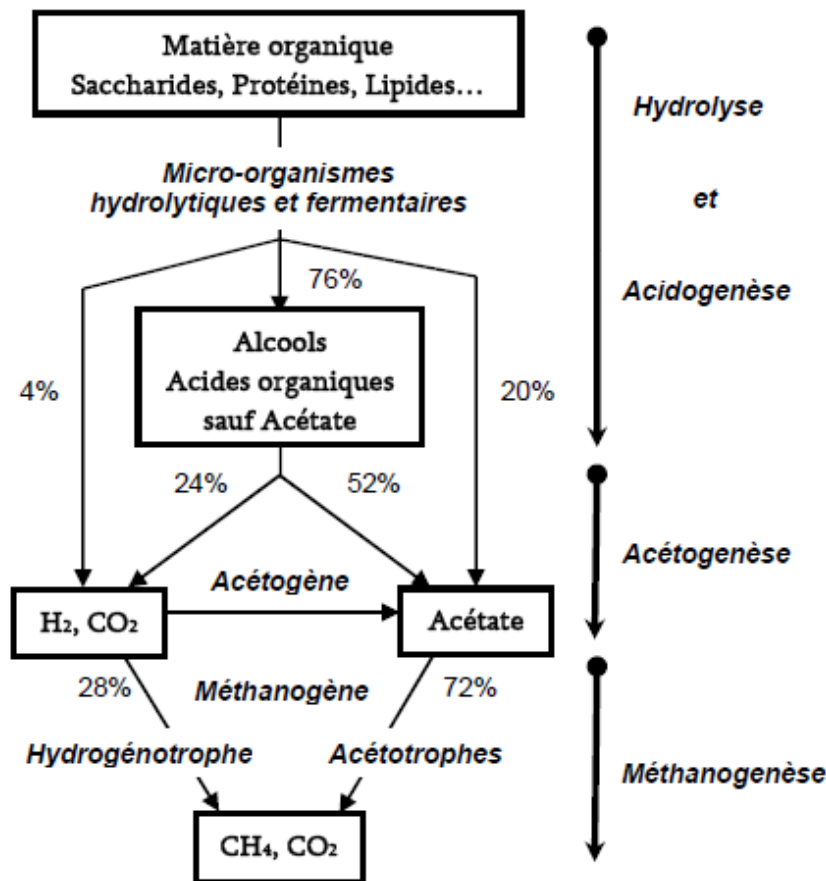
Le présent chapitre permettra de comprendre les mécanismes en cause lors de la digestion anaérobie ainsi que les intrants nécessaires et les extrants produits. Par la suite, les conditions essentielles à prendre en considération pour le bon fonctionnement de la biométhanisation seront présentées. Suivra, une brève description des diverses technologies de biométhanisation disponibles sur le marché. Le but de cette section n'est pas d'analyser et de comparer chacune des technologies, mais plutôt des les identifier et d'établir un rendement moyen pour ensuite évaluer le potentiel québécois de production d'énergie à l'aide de la matière organique résiduelle. Finalement, les limites et les contraintes de la digestion anaérobie seront exposées.

3.1 Mécanismes de fonctionnement de la digestion anaérobie

Toutes les matières organiques ont le potentiel de se décomposer en mode anaérobie si les conditions sont propices. Cependant, certaines matières organiques prendront plus de temps que d'autres, c'est le cas de la matière ligneuse contenant de la lignine, comme le bois et les écorces. En effet, la matière ligneuse est plus difficilement biodégradable et est donc désavantagée dans les procédés de digestion anaérobie qui ont des temps de résidence relativement courts. Les matières ayant le meilleur potentiel sont les matières putrescibles, comme les résidus de tables, les résidus de procédés agroalimentaires, l'herbe, les boues municipales et les boues de papetières (Zaher et al., 2007; Rapport et al., 2008; Ricard, 2010).

Comprendre les mécanismes réactionnels menant au processus de biométhanisation permet de saisir l'importance de connaître les caractéristiques des intrants et de prévoir les sous-produits de ces réactions. Encore aujourd'hui, la synergie qui règne entre les

microorganismes dans les biodigesteurs n'est pas tout à fait maîtrisée. Il s'agit, en effet, d'interrelations complexes entre différentes communautés microbiennes. Ces communautés divergent en fonction des intrants et des conditions dans le bioréacteur. Une étude a même démontré la présence, dans un seul bioréacteur, de près de 140 espèces différentes impliquées dans le processus de biodigestion (Cresson, 2006). Les réactions peuvent néanmoins être classées en quatre grandes étapes qui sont menées à terme par différents groupes de microorganismes. Chacune de ces étapes produit des extrants qui deviendront des intrants pour les prochaines étapes, jusqu'à la formation du biogaz et du digestat. Les diverses étapes microbiennes de la biométhanisation et la chaîne trophique menant à la production de biogaz sont présentées à la figure 3.1.



Tirée de Cresson (2006, p. 18)

Figure 3.1 : Chaîne trophique de la méthanisation

3.1.1 Phase I : Hydrolyse

La première étape à survenir dans les digesteurs anaérobies est l'hydrolyse. Elle consiste à la dégradation des molécules organiques complexes, par des enzymes, en molécules plus simples. Les polysaccharides, glucides, lipides, protéines et acides nucléiques sont transformés en molécules plus simples telles que les monosaccharides, sucres, acides aminés, acides gras et bases azotées (Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), 2008; Cresson, 2006).

3.1.2 Phase II : Acidogénèse

La deuxième étape, appelée acidogénèse, est également décrite dans certains ouvrages comme l'étape de la fermentation puisqu'elle est due à l'action des microorganismes fermentaires. Ces microorganismes métabolisent les extrants de la phase I en alcools, en acides gras volatils, en sulfure d'hydrogène (H_2S), en dioxyde de carbone et en hydrogène. Les acides gras volatils sont, entre autres, constitués d'acétate, de propionate, de butyrate, d'isobutyrate, de valérate et d'isovalérate. L'acidogénèse est la phase la plus rapide de toutes les étapes. Par conséquent, en présence d'une trop grande quantité de matière organique, il peut y avoir accumulation de molécules intermédiaires telles que l'hydrogène et les acétates qui ont des effets inhibiteurs sur les phases suivantes et peuvent mener à l'arrêt de la biométhanisation (CRAAQ, 2008; Cresson, 2006).

3.1.3 Phase III : Acétogénèse

La troisième étape met en scène deux types de microorganismes qui vont permettre de transformer les composés extrants de la phase II en acétate, en dioxyde de carbone et en hydrogène. Sans entrer dans les détails, les microorganismes du premier groupe sont appelés les « bactéries productrices obligées d'hydrogène » et bien entendu vont produire de l'hydrogène et de l'acétate. Le deuxième groupe, nommé « bactéries homo-acétogènes » utilise l'hydrogène et le dioxyde de carbone pour produire l'acétate (CRAAQ, 2008; Cresson, 2006).

3.1.4 Phase IV : Méthanogénèse

La dernière étape est celle qui mène à la production du méthane. Cette étape est également la plus sensible et demande un bon contrôle de la température, du brassage et du pH. De plus, alors que les étapes précédentes peuvent tolérer la présence en faible

quantité d'oxygène, cette étape est dite anaérobie stricte. Encore une fois, cette phase est réalisée grâce à deux grandes catégories de microorganismes. Les méthanogènes hydrogénophiles (ou hydrogénotrophes) qui produisent le méthane en réduisant le dioxyde de carbone ou l'acide formique par l'hydrogène. Ces microorganismes travaillent donc en étroite collaboration avec celles de la phase II qui leur fournissent dioxyde de carbone et hydrogène. Ces également eux qui permettent de régulariser le taux d'hydrogène dans le biodigesteur. Le deuxième groupe de microorganismes de la phase IV est composé des méthanogènes acétoclastes (ou acétotrophes) qui utilisent le dioxyde de carbone, l'acétate, l'acide acétique, le méthanol et la méthylamine pour produire le méthane. Le deuxième groupe de microorganismes génère normalement près de 70 % du méthane dans un biodigesteur (CRAAQ, 2008; Cresson, 2006).

3.1.5 Produits de la digestion anaérobie

Les sous-produits de la digestion anaérobie sont bien entendu le biogaz, ainsi que le digestat. Le biogaz est constitué de 50 à 75 % de méthane, de 25 à 45 % de dioxyde de carbone et de quelques gaz mineurs (moins de 2 %), tels que le sulfure d'hydrogène (H_2S), l'hydrogène, l'eau, l'oxygène, l'ammoniac (NH_3) et l'azote. Typiquement la production de méthane se situe à environ 60 % (CRAAQ, 2008). Le biogaz peut par la suite être utilisé afin de produire de la chaleur, de l'électricité, être injecté dans un réseau de gaz naturel ou encore être liquéfié. Ces divers usages sont présentés au chapitre six.

La biométhanisation produit également le digestat, une boue qui possède une phase solide et une phase liquide. La phase solide peut être mise en valeur par épandage sur les terres agricoles ou encore être transformée en compost. Quant à la phase liquide, elle peut également être épandue dans les champs comme fertilisant ou encore être traitée pour abaisser la charge en matière organique et être rejetée de façon conventionnelle dans les réseaux d'égouts (Recyc-Québec, 2008). Le digestat contient approximativement la même quantité d'éléments fertilisants que les intrants, tels que l'azote, le phosphore et le potassium. Il va de soit que la charge en carbone est considérablement réduite, puisque le carbone est à la base de la composition de la molécule de méthane (CH_4). Il est intéressant de constater que la biométhanisation transforme la plupart des composés azotés organiques en ammonium soluble (NH_4^+) alors que le phosphore organique se transforme en phosphore minéral, lié aux particules de la fraction solide, sous diverses formes chimiques telles que les phosphates (PO_4^{3-}). Ces formes minérales sont facilement

assimilables par les végétaux. La phase solide du digestat est donc riche en matière organique et en phosphore alors que la phase liquide est riche en ammonium et potassium. Ces caractéristiques fertilisantes des deux phases du digestat permettent une meilleure gestion de leur utilisation. Ce mécanisme de minéralisation se produit normalement dans la nature par biodégradation, la digestion anaérobie ne fait qu'accélérer ce processus (CRAAQ, 2008; Etchart, 2009; Buffière et al., 2009).

3.2 Conditions nécessaires au bon fonctionnement des biodigesteurs

Plusieurs paramètres interviennent dans le bon fonctionnement des biodigesteurs. Tel que mentionné précédemment, plus de 140 espèces différentes de microorganismes peuvent se retrouver dans un digesteur anaérobie. Il existe donc un équilibre fragile liant chacune de ces communautés qui peut être modifié à tout moment et mener jusqu'à l'inhibition de la réaction de biométhanisation.

3.2.1 Le pH

L'un des paramètres les plus importants est sans contredit le pH de la matière organique à l'intérieur du bioréacteur. Le pH est sujet à des changements suite aux diverses étapes de la chaîne trophique de la méthanisation (figure 3.1). Les perturbations du pH peuvent aussi bien provenir des matières organiques introduites dans le biodigesteur que d'un changement de température favorisant un groupe de microorganismes produisant des acides ou des bases. Les auteurs ne s'entendent pas sur le pH idéal. Ceci s'explique par le fait que chaque bioréacteur est unique en fonction du type de biométhanisation (base, moyenne ou haute température), des intrants et des communautés de microorganismes qui le peuplent. Il est cependant estimé que le pH doit se situer entre 5,5 et 8,5 et que l'optimum se situe entre 7,0 et 7,2. La plus grande problématique dans le procédé de biométhanisation est l'accumulation d'acides menant à une baisse du pH. Sous un pH de 6, il y a un risque d'inhibition de la réaction et de la perte du contrôle de la biométhanisation (Ostrem, 2004; Zaher et al., 2007).

3.2.2 La température

Tel que décrit ci-haut, la température est très importante, puisqu'elle affecte les cinétiques de réaction et la vitesse de transformation des matières. Encore une fois, la stabilité de la température est gage de succès lors de la biométhanisation. En fonction de la température

du biodigesteur, trois catégories distinctes de microorganismes peuvent être responsables du processus de biométhanisation. La première catégorie met en jeu les microorganismes psychrophiles qui opèrent typiquement entre des températures de 10 à 30 °C avec un optimum entre 12 et 18 °C. La deuxième catégorie est constituée des microorganismes mésophiles qui se développent entre 20 et 50 °C, avec un optimum près de 35 °C. Finalement, les microorganismes thermophiles vivent à des températures variant de 50 à 75 °C avec un optimum entre 55 et 60 °C. En Europe, les réactions thermophiles ont souvent été priorisées, dues au temps de séjour plus court et à une plus grande destruction des bactéries pathogènes (Cresson, 2006; Ostrem, 2004; Zaher et al., 2007).

3.2.3 Les éléments nutritifs

Le processus qui mène à la production de méthane dans un digesteur anaérobie est réalisé grâce à des microorganismes vivants. Ces microorganismes ont besoin d'éléments nutritifs essentiels à leur survie. Il est donc important de toujours bien contrôler les intrants qui sont ajoutés dans un bioréacteur. Le type de technologie choisi aura une influence sur les besoins de ces microorganismes. De plus, certains intrants, comme les matières organiques résiduelles municipales et les lisiers, peuvent contenir ces éléments essentiels, mais ne les libéreront pas de la même manière ou à la même vitesse. Les nutriments les plus importants pour les microorganismes sont le carbone et l'azote. L'apport de ces nutriments est exprimé en ratio de carbone sur l'azote (C/N). Le ratio idéal se situe entre 20 et 30 (Ostrem, 2004; Zaher et al., 2007; Ricard, 2010). La quantité de carbone et d'azote introduite dans le bioréacteur est d'une très grande importance. Tout d'abord, le carbone est la source d'énergie des microorganismes et est à la base même de la molécule de méthane (CH₄), alors que l'azote en trop grande concentration peut provoquer la formation d'ammoniac et/ou d'ammonium et inhiber le procédé de biométhanisation (Ricard, 2010).

Les matières organiques végétales contiennent normalement de longues chaînes carbonées leur donnant un taux de carbone élevé, alors que les lisiers contiennent de fortes concentrations d'azote. À titre d'exemple, les matières organiques résiduelles municipales ont des ratios C/N variant, selon leur constitution, entre 15 et 40, alors que le lisier de porc a un ratio variant de 8 à 20 et que celui de la sciure de bois est d'environ 300 (Center for Environmental Farming Systems (CEFS), 2005; Gautam, 2010). Cette situation explique pourquoi la digestion des matières organiques résiduelles municipales est

souvent jumelée à celle des fumiers et lisiers. Pour ce qui est des boues municipales, elles ont un ratio C/N assez faible de 10 (Perron et Hébert, 2007), alors que les boues mixtes de papetières ont un ratio idéal de 25 (Bipfubusa et al., 2004). Les boues primaires des papetières ont quant à elles un ratio C/N de près de 300 (CRAAQ, 2006).

Le tableau 3.1 présente les ratios moyens de C/N pour diverses matières organiques. Ces valeurs seront utilisées lors des calculs du potentiel de production de biogaz pour déterminer si le mélange des matières organiques disponibles est adéquat. En plus du carbone et de l'azote, d'autres éléments sont nécessaires à la survie des microorganismes, tels que l'oxygène, l'hydrogène, le phosphore et des éléments traces tels que le fer, le nickel, le magnésium, le calcium, le sodium et le cobalt. La déficience en un ou plusieurs éléments nutritifs peut occasionner une limitation de la croissance de certains microorganismes et affecter la performance du biodigesteur (Cresson, 2006).

Tableau 3.1 : Ratio C/N de différentes matières organiques

| Matières organiques | Ratio C/N | Siccité |
|---|--------------------|---------------------|
| Boues municipales | 10 ⁽³⁾ | 28 % ⁽⁷⁾ |
| Litière de volaille | 13 ⁽¹⁾ | 74 % ⁽⁶⁾ |
| Lisier de porc | 14 ⁽¹⁾ | 4 % ⁽⁶⁾ |
| Déchets de légumes | 15 ⁽¹⁾ | n.d. |
| Herbe | 17 ⁽¹⁾ | n.d. |
| Fumier de vache | 23 ⁽¹⁾ | 24 % ⁽⁶⁾ |
| Boues mixtes de papetières | 25 ⁽⁴⁾ | 40 % ⁽⁸⁾ |
| Matières organiques résiduelles municipales | 30 ⁽⁵⁾ | 28 % ⁽⁹⁾ |
| Feuilles sèches | 55 ⁽¹⁾ | n.d. |
| Paille | 70 ⁽¹⁾ | n.d. |
| Boues primaires de papetières | 290 ⁽²⁾ | 40 % ⁽⁸⁾ |
| Copeaux de bois | 300 ⁽¹⁾ | n.d. |
| Journaux | 600 ⁽¹⁾ | n.d. |

(1) CEFS (2005, p.3)

(2) CRAAQ (2006, p. 20)

(3) Perron et Hébert (2007, p.50)

(4) Bipfubusa et al. (2004, p. 49)

(5) Centre de recherche industrielle du Québec (CRIQ) (2009, p.34)

(6) IRDA (2003, p. 12 et 13)

(7) Recyc-Québec (2010, p.10)

(8) MDDEP (2007)

(9) Guiot et Frigon (2008, p. 11)

Mis à part le ratio C/N, qui permet aux microorganismes de bien se développer dans le bioréacteur, il est possible d'estimer la production de biogaz selon les types d'intrants. Les données présentées au tableau 3.2, permettent de connaître le potentiel de production de biogaz en fonction de l'origine des matières organiques. Ces potentiels sont exprimés en fonction de la masse brute, c'est-à-dire en fonction de la siccité initiale (ex. une tonne de lisier à 5 % de siccité, correspond à 50 kg de matière sèche et 950 kg d'eau). Certaines valeurs trouvées dans la littérature sont exprimées en potentiel de production de méthane (potentiel méthanogène) par tonne de matière brute. Ces valeurs ont été ramenées sur un volume de biogaz contenant 60 % de méthane afin d'homogénéiser les données du tableau 3.2.

Tableau 3.2 : Potentiel de production de biogaz de différentes matières organiques

| Matières organiques | Potentiel de production de biogaz |
|---|-------------------------------------|
| | m ³ biogaz / tonne brute |
| Lisier de porcs | 15 ⁽¹⁾ |
| Lisier de bovins | 33 ⁽³⁾ |
| Fumier de bovins | 67 ⁽³⁾ |
| Fumier de volailles | 87 ⁽¹⁾ |
| Boues secondaires et mixtes de papetières | 87 ⁽²⁾ |
| Boues mixtes municipales | 103 ⁽⁴⁾ |
| Drêche (brasseries) | 125 ⁽³⁾ |
| Déchets domestiques | 126 ⁽¹⁾ |
| Ensilage de foin | 145 ⁽¹⁾ |
| Ensilage de blé | 162 ⁽¹⁾ |
| Ensilage de maïs | 197 ⁽¹⁾ |
| Tonte de pelouse | 208 ⁽³⁾ |
| Gras | 238 ⁽¹⁾ |
| Carton ondulé | 413 ⁽⁵⁾ |
| Résidus de céréales | 500 ⁽³⁾ |
| Papier de bureau | 590 ⁽⁵⁾ |
| Cellulose (sèche) | 600 ⁽⁵⁾ |

(1) Ricard et al. (2010, p. 13)

(2) Mahmood (2010) et calcul dans la section 5.3.1

(3) Biogaz Énergie Renouvelable (2009a)

(4) Laloe (2003, p. 22)

(5) Rouez (2008, p. 73)

3.2.4 Le temps de rétention

Le temps de rétention ou de résidence est défini comme la durée moyenne durant laquelle la matière réside dans le biodigesteur avant d'être extraite sous forme de gaz ou de digestat. Le temps de rétention est dépendant du type de microorganismes qui contrôle la biométhanisation et du type de procédé utilisé. Typiquement, pour la digestion anaérobie de matières organiques résiduelles municipales le temps de rétention est de 12 jours pour les réactions thermophiles et de 15 jours pour les réactions mésophiles (Zaher et al., 2007). Lors de la conception d'un biodigesteur, la matière introduite, le procédé utilisé, la température d'opération et l'abaissement désiré de la charge organique sont autant de facteurs qui devront être pris en considération pour évaluer le temps de rétention. Par exemple, plus le temps de résidence sera court, plus le volume du bioréacteur sera petit, mais par contre l'abaissement de la charge organique sera moindre. L'étude des projets existants démontre cependant des temps de séjours moyens de trois semaines (Lima Amarante, 2010).

3.3 Classification des principales technologies de digestion anaérobie

Il existe sur le marché une multitude de technologies et de types de biodigesteur, en passant par le simple cylindre fixe jusqu'à l'unité industrielle entièrement automatisée pouvant accueillir plusieurs centaines de milliers de tonnes de matières organiques par année. Le choix de la technologie doit tenir compte de divers paramètres, tels que la capacité nécessaire, la caractérisation des matières à traiter et l'utilisation finale du biogaz et du digestat.

Les familles de technologies peuvent être divisées selon quatre critères distincts. Ces critères sont la température d'opération de la réaction de biométhanisation, le taux de siccité des intrants (procédé sec ou humide), le mode d'alimentation du biodigesteur (en continu ou en lot) et le nombre d'étapes menant à la production de méthane. Malgré ces distinctions, certaines technologies peuvent combiner plusieurs de ces critères, ce qui rend encore plus difficile leur classement.

3.3.1 Classification selon la température d'opération

Tel que présenté dans la section précédente, il existe trois plages de températures où la biométhanisation en milieu contrôlé est possible. À chacune de ces plages de est

associée une famille de microorganismes responsables de transformer la matière organique introduite en biogaz et en digestat. Le tableau 3.3 résume ces trois familles et leurs températures d'opération.

Tableau 3.3 : Familles de microorganismes responsables de la biométhanisation

| Familles de microorganismes | Plages de températures | Température optimale |
|------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Psychrophiles | 10 à 30 °C | 12 à 18 °C |
| Mésophiles | 20 à 50 °C | 35 °C |
| Thermophiles | 50 à 75 °C | 55 à 60 °C |

(Cresson, 2006; Ostrem, 2004; Zaher, 2007)

Les microorganismes psychrophiles sont les moins complexes à contrôler dans un biodigesteur, puisqu'ils ne nécessitent pas un contrôle de la température très précis. Par contre, les réactions sont plus lentes, donc exigent un biodigesteur plus grand. De plus, des trois familles, elle est celle qui possède le rendement en production de méthane le plus faible (Cresson, 2006).

La famille des mésophiles est la plus souvent utilisée dans la biodigestion des matières organiques. Son rendement pour la production de biogaz et son besoin de chaleur modéré en font le choix d'un grand nombre de constructeurs et d'opérateurs de biodigesteurs. Les microorganismes mésophiles sont également plus résistants aux écarts de températures que la famille des thermophiles.

Finalement, la famille des microorganismes thermophiles est celle qui possède le meilleur rendement. Cependant, son besoin élevé en chaleur fait en sorte qu'une bonne partie du biogaz produit sert au chauffage du biodigesteur. Malgré ce fait, en réduisant le temps de résidence des matières organiques dans ce type de biodigesteur, il est possible d'obtenir un rendement supérieur aux biodigesteurs fonctionnant à moyenne température. Par contre, ce rendement de production de biogaz (par rapport au volume du biodigesteur) se fait au détriment du rendement d'abaissement de la charge organique des extrants. Les procédés thermophiles nécessitent donc des solutions pour traiter le digestat plus riche en matière organique. Néanmoins, les technologies thermophiles sont régulièrement le choix des fabricants, puisque les biodigesteurs sont plus petits, possèdent de bons rendements de production de biogaz et la destruction des microorganismes pathogènes est plus efficace (Cresson, 2006; Ostrem, 2004; Zaher et al., 2007).

3.3.2 Classification selon la siccité des intrants

Les différents procédés de biométhanisation peuvent également être divisés en fonction de la siccité des matières organiques à l'intérieur des bioréacteurs. Il existe deux grandes approches, soit la biodigestion par voie humide et par voie sèche.

La première catégorie contient des matières organiques dont la siccité ne dépasse pas 15 % et peut parfois être aussi faible que 2 %. Ce type de procédé est largement utilisé pour la biodigestion des lisiers (siccité d'environ 5 %). Les matières organiques plus solides peuvent néanmoins être biométhanisées dans ces biodigesteurs, en étant diluées avec des lisiers ou d'autres matières liquides. Ce type de procédé a l'inconvénient d'exiger des biodigesteurs plus volumineux, ce qui demande un besoin accru en chaleur.

Pour ce qui est de la matière organique présente dans les procédés à voie sèche, elle possède généralement une siccité de 20 à 50 %. La concentration typique en matière sèche se situe toutefois entre 25 et 30 %. Malgré le nom donné à cette catégorie, la matière y est présente sous forme pâteuse ou semi-solide. Un taux de siccité élevé permet de réduire le volume des biodigesteurs, mais exige des équipements adaptés au transfert et au mélange de la matière organique à l'intérieur de ceux-ci. Finalement, la surface de contact des microorganismes avec la matière à transformer y est réduite par rapport à un procédé humide (Ostrem, 2004, Lima Amarante, 2010).

3.3.3 Classification selon le mode d'alimentation

Le mode d'alimentation est également un paramètre important dans la classification des technologies de biométhanisation. Deux modes d'alimentation sont généralement rencontrés : l'alimentation en continu et en lot. L'alimentation en lot consiste à mettre dans le biodigesteur une masse de matière organique fraîche qui sera par la suite biométhanisée à l'aide des différentes étapes décrites en début de chapitre. À la fin des réactions, le biodigesteur est vidé et la séquence est reproduite. Le désavantage principal de ce mode d'opération est la production d'un flux inégale de biogaz (Ostrem, 2004).

L'alimentation en continu est la plus souhaitable pour la biométhanisation de quantités importantes de matière organique. Elle consiste à introduire en continu la matière organique, ainsi qu'à extraire au même rythme le biogaz et le digestat. Cette technique

permet une stabilité des paramètres d'opération et surtout de la production de biogaz. Ce critère est très important lorsque le biogaz est utilisé par des procédés de production de chaleur ou d'électricité, car ces équipements doivent généralement fonctionner sans arrêt. Le désavantage majeur de cette technique réside dans le fait que l'effluent retiré contient aussi bien des matières digérées que des matières organiques semi-digérées. Pour contrer cette situation, des chicanes ou d'autres techniques peuvent être mises en place pour obtenir des temps de résidence plus égaux (Ostrem, 2004).

3.3.4 Classification selon le nombre d'étapes

Finalement, la classification des procédés de biométhanisation peut se faire selon le nombre d'étapes. On retrouve deux grandes catégories, soit les procédés à une étape et ceux à deux étapes. Ces catégories ne tiennent pas compte des étapes de prétraitement des intrants et de traitement des extrants.

Le procédé en une étape est le plus répandu dans les technologies existantes. Dans ce type de procédé, toutes les réactions, de l'hydrolyse jusqu'à la méthanogénèse sont réalisées dans le même biodigesteur. Il se crée alors un équilibre entre l'ensemble des réactions qui permet le bon fonctionnement de la digestion anaérobie. Le procédé en une étape a le désavantage de ne pas optimiser les conditions des diverses familles de microorganismes, mais d'être un compromis pour chacune d'elles.

Le procédé en deux étapes consiste, quant à lui, à séparer l'étape de la méthanogénèse des autres étapes. Les premières étapes ont de meilleurs rendements à un faible pH, alors que la méthanogénèse est plus efficace à un pH plus élevé. Il existe également des procédés qui possèdent plus de deux étapes dans le but d'optimiser chacune des phases de la transformation de la matière organique en méthane. La biométhanisation à plusieurs étapes permet également d'opérer les différentes étapes de biodigestion à des plages de températures distinctes. Par exemple, en mode thermophile pour l'étape d'hydrolyse et en mode mésophile pour le reste des opérations. Généralement, plus le nombre d'étapes sera élevé, plus la transformation de la matière organique se fera rapidement et efficacement. Cependant les coûts d'implantation, d'opération et de contrôle sont beaucoup plus élevés dans ce type de procédé (Ostrem, 2004).

3.4 Identification des principales technologies de digestion anaérobie

Le but de cette section n'est pas d'identifier la meilleure technologie disponible pour la production de biogaz au Québec. D'ailleurs, parallèlement à la réalisation de cet essai, M. Joao Lima Amarante, également dirigé par M. Marc J. Olivier, s'est consacré à cette question dans le cadre de son essai. Afin d'optimiser les travaux à accomplir sur le potentiel de production d'énergie au Québec, les recherches et recommandations de M. Lima Amarante sont résumées dans cette section.

Le tableau 3.4, présente la synthèse des principales technologies d'envergure utilisées dans le monde pour la biodigestion des matières organiques résiduelles municipales ou mixtes. Les matières organiques résiduelles mixtes peuvent contenir à la fois, les matières en provenance des municipalités, des fumiers, des lisiers, des boues et diverses autres matières résiduelles, telles que les résidus du secteur agroalimentaire. Puisque les fabricants ont adapté leur technologie pour les différents projets réalisés et que les données peuvent diverger pour une même technologie, le tableau 3.4 présente des valeurs moyennes pour faciliter la compréhension et l'analyse.

Tableau 3.4 : Synthèse des technologies de digestion anaérobie.

| Technologie | Nb * | Capacité max. (kt) | Siccité (%) | Mode ** | Étape | Temps séjours (jours) | Biogaz | |
|-------------|---------|--------------------------|----------------|------------|-------|-----------------------------|---------------------|--------------------|
| | | | | | | | (m ³ /t) | (CH ₄) |
| Kompogas | 50 | 275 | 26 % | T | 1 | 20 | 120 | 60 % |
| Valorga | 19 | 300 | 28 % | M / T | 1 | 21 | 120 | 55 % |
| DRANCO | 20 | 180 | 40 % | T | 1 | 20 | 150 | n.d. |
| Cambi THP | 19 | 50 | 13 % | M / TT | 4 | n.d. | 125 | 65 % |
| Lipp | 700 | n.d. | 10 % | M | 1 | 20 | 120 | 64 % |
| BTA | 40 | 150 | 25 % | M / T | 2 | 15 | 120 | n.d. |
| Linde | 50 | 150 | 30 % | M / T | 1 / 2 | n.d. | 100 | n.d. |
| Waasa | 10 | 92 | 13 % | M / T | 1 | 21 | 125 | n.d. |
| Bekon | 16 | 40 | 50 % | M | 1 | 34 | 125 | 80 % |
| ArrowBio | 2 | 100 | 15 % | M | 2 | 75 | 150 | 75 % |

* Nb : Nombre d'usines fonctionnelles à ce jour dans le monde

** Les modes correspondent à :

M : Mésophile (35 à 40 °C)

T : Thermophile (55 °C)

TT : Très haute température (170 °C)

Inspiré de Lima Amarante (2010, p. 19-34; 37-38; 61-62)

Plusieurs entreprises se disputent le marché de la digestion anaérobie dans le monde. Mis à part la technologie ArrowBio, originaire d'Israël, les technologies présentées dans le tableau 3.4 sont toutes européennes. Les capacités maximales de traitement varient entre 40 et 300 kt de matières organiques par années. Le tableau 3.4 permet également d'observer que les fabricants optent aussi bien pour des procédés secs ou humides opérant en mode mésophile (35 à 40 °C) ou thermophile (55 °C). En fait, le choix de ces paramètres est souvent déterminé en fonction de la spécificité des intrants, des besoins d'abaissement de la charge organique et des exigences réglementaires locales.

Il est intéressant de constater que les technologies de digestion anaérobie sont assez matures pour s'adapter aux différents contextes régionaux. Il en est de même pour le nombre d'étapes, qui peut être modulaire pour une même technologie. Cependant, les procédés à une étape sont plus répandus. Le temps de séjours moyen pour les principales technologies présentées est d'environ trois semaines (21 jours), alors que la production typique de biogaz est d'environ 120 m³/t de matière organique brute (humides). La concentration de méthane de ce biogaz est d'environ 60 % (Zaher et al., 2007; Lima Amarante, 2010; Rapport et al., 2008). Ces valeurs seront celles utilisées pour le calcul du potentiel de production de biogaz des matières organiques résiduelles municipales.

Les recherches de M. Lima Amarante n'ont pas permis d'identifier une technologie spécifique pour le contexte québécois. En effet, comme mentionné précédemment, chaque projet de biométhanisation comporte ses spécificités qui font en sorte qu'il est unique. Il en ressort cependant que les technologies les plus intéressantes pour la biodigestion des matières résiduelles organiques municipales peuvent être aussi bien sèches qu'humides et que les modes de biodigestion mésophiles et thermophiles sont les plus avantageux. M. Lima Amarante résume bien la situation en ces mots :

« Les procédés en mode sec et thermophile procurent des gains économiques, sociaux et environnementaux grâce à leurs réacteurs plus petits, à une meilleure inactivation des pathogènes, à une nécessité réduite de chauffage des matières et à un apport moindre en eau. En revanche, les réactions en mode humide sont plus répandues et plus adéquates si le traitement d'une grande quantité de boues est envisagé. En complément, les réactions mésophiles sont plus stables, moins énergivores et procurent la production d'un biogaz plus riche en méthane... ..Il est important de mentionner que plusieurs procédés peuvent se révéler également intéressants pour une même nécessité. » (Lima Amarante, 2010 p. 71 et 69)

3.5 Limites et contraintes de la digestion anaérobie

La biométhanisation de la matière organique est certes une filière de traitement de ces matières qui offre plusieurs avantages. Cependant, certaines limites peuvent contraindre l'utilisation de cette technologie.

Le coût d'implantation est probablement la limite la plus importante pour les organismes qui désirent implanter la gestion des matières organiques résiduelles par biométhanisation. Ces coûts peuvent représenter plusieurs dizaines à plusieurs centaines de millions de dollars. Les études économiques ont démontré qu'afin de rentabiliser une unité de biodigestion des matières organiques résiduelles municipales, le seuil minimal de la capacité de traitement doit être d'environ 50 000 tonnes par années. D'ailleurs, la plupart des projets réalisés dans le monde pour ce type de matières organiques ont une capacité moyenne de 100 000 tonnes par années. Il a également été démontré que la biométhanisation mixte, c'est-à-dire à la fois des matières organiques résiduelles municipales ainsi que des fumiers et lisiers permet de meilleurs rendements et une meilleure rentabilité (Zaher et al., 2007). Le prochain chapitre est entièrement consacré à l'aspect économique de la biométhanisation.

Bien entendu, la digestion anaérobie est sensible à la présence d'oxygène, mais elle peut également être perturbée par les savons, les antibiotiques, les ions minéraux et les métaux lourds. Certains métaux lourds tels que le cuivre, le nickel, le chrome, le zinc et le plomb sont essentiels aux microorganismes en faibles teneurs, mais peuvent inhiber la réaction en trop grandes concentrations (Zaher et al., 2007). Il est donc important de bien contrôler la qualité et la provenance des matières organiques et de s'assurer qu'elles ne représentent pas un danger pour le bon fonctionnement du procédé de biométhanisation.

La digestion anaérobie permet d'atteindre des taux d'abaissement de la charge organique pouvant aller jusqu'à 98 %. Cependant, afin d'assurer la rentabilité des installations, les constructeurs abaissent le temps de résidence moyen de la matière organique et par conséquent le volume des équipements. Dans la plupart des scénarios, le digestat doit donc être traité avant d'être rejeté dans les milieux naturels ou les réseaux d'égouts (Cresson, 2006). La partie solide du digestat est normalement transformée en compost ou utilisée comme matière résiduelle fertilisante (MRF). La partie liquide est en partie

recyclée dans le bioréacteur alors que le reste peut être utilisé comme MRF ou être traité dans des unités de traitement des eaux conventionnelles (Actu-Environnement, 2004).

L'emplacement de l'usine de biométhanisation est également un facteur très important à prendre en considération. L'unité de traitement doit se trouver à proximité des lieux de génération des résidus organiques, pour réduire le transport, ainsi que des utilisateurs du biogaz. Pour la biométhanisation de matières organiques mixtes, cela peut causer une certaine problématique, puisque les résidus organiques proviennent à la fois des collectes municipales et du monde agricole. De plus, la problématique des odeurs pour ce genre de procédé n'est pas à prendre à la légère et doit inévitablement être prise en considération dans l'emplacement de l'usine. Plusieurs projets ont soulevé la colère des résidents adjacents aux unités de biométhanisation suite aux émissions d'odeurs nauséabondes causées par des problèmes d'opération.

4 ANALYSE ÉCONOMIQUE ET COMPARATIVE DE LA DIGESTION ANAÉROBIE

Le choix de l'emplacement et de la capacité d'une usine de traitement de la matière organique par digestion anaérobie repose sur divers paramètres, tels que la proximité de la génération des matières organiques résiduelles, ainsi que de l'utilisation finale du biogaz. L'analyse économique effectuée dans cette section ainsi que les calculs du potentiel de production de biogaz dans le chapitre cinq sont basés sur des usines de grandes capacités même si ce scénario ne s'applique pas entièrement au traitement de l'ensemble de la matière organique résiduelle générée sur le territoire québécois. Il est également assumé que la biométhanisation est effectuée à l'aide de matières organiques mixtes en provenance des municipalités, des ICI, des boues de traitement des eaux municipales et industrielles, ainsi que des lisiers et fumiers du monde agricole.

Les organismes désirant mettre en place des unités de digestion anaérobie doivent prendre en compte les spécificités québécoises pour être en mesure de faire des choix éclairés. Certains projets et études réalisés en Europe et aux États-Unis seront utilisés comme références pour les coûts d'implantation et d'exploitation. Cependant, l'analyse de la rentabilité doit se faire dans un contexte où les coûts d'énergie et les subventions à l'implantation ne sont pas les mêmes.

Les coûts de la biométhanisation sont souvent comparés aux coûts d'enfouissement de la matière organique. Pourtant, le *Projet de politique québécoise de gestion des matières résiduelles* obligera les différents générateurs de matières organiques résiduelles à les mettre en valeur à concurrence de 60 % d'ici 2015 et à 100 % d'ici 2020. La digestion anaérobie doit donc être comparée aux autres solutions de mise en valeur des matières organiques, telles que le compostage ou la production de biodiesel.

4.1 Coûts d'implantation et d'exploitation de la digestion anaérobie

Depuis les années 80, la capacité des usines de biométhanisation des matières résiduelles municipales et mixtes n'a cessé de croître. Les entreprises œuvrant dans ce secteur ont d'abord dû réaliser des projets pilotes et prouver la performance de leur technologie avant de construire des unités d'envergure. Aujourd'hui, la capacité annuelle moyenne des usines de biodigestion des matières organiques résiduelles municipales et mixtes est d'environ 100 kt (Zaher et al., 2007) et il n'est pas rare de voir dans les

nouveaux projets et ceux en études des capacités de traitement de 200 à 300 kt/an. Il va de soit, que l'augmentation des capacités de traitement permet de réduire les coûts de production du biogaz. Seuls les coûts de transport peuvent être une contrainte dans l'établissement d'une usine à haute capacité de traitement.

Il est difficile de déterminer quels sont les coûts d'implantation et d'exploitation d'une usine de digestion anaérobie. Chaque projet étant unique, peu de données sont disponibles. De plus, la plupart des usines d'envergure se trouvant en Europe, il est difficile de déterminer si ces coûts sont représentatifs et applicables au contexte nord-américain. Afin d'identifier les coûts d'immobilisation et de traitement des matières organiques, quatre projets seront analysés. Le premier projet, situé à Montpellier, est la plus grosse usine de biométhanisation en France et a été mise en service récemment. Deux autres projets analysés dans cette section sont des études réalisées dans les dernières années sur des potentiels d'implantation d'usines de digestion anaérobie aux États-Unis. L'un pour l'État de Washington et l'autre pour la ville de New York. Finalement, le quatrième projet est également une étude, mais cette fois-ci réalisée dans le contexte québécois. Il s'agit d'une étude comparative des technologies et scénarios de gestion des matières résiduelles pour la ville de Montréal. Malgré le fait que la ville de Montréal ait annoncé deux projets de biométhanisation, les données disponibles ne sont pas suffisantes pour les détailler dans cette section. Seules les données de l'étude réalisée en 2007 seront utilisées.

4.1.1 Montpellier

Le premier juillet 2008, l'agglomération de Montpellier inaugurerait la plus grande unité de méthanisation de France, avec une capacité annuelle de traitement de 203 000 tonnes de matière organique municipale. Le projet Amétyst, utilisant la technologie Kompogas permet de desservir une population de près de 500 000 habitants. Le coût de construction s'élève à 73,3 millions d'euros (98,3 M\$), soit un coût d'immobilisation de 484 \$ par tonne de capacité. À plein régime, l'usine produira annuellement 14,4 Mm³ de biogaz. Le biogaz permet de générer 30 000 MWh d'électricité et 20 000 MWh de chaleur par an. La chaleur est utilisée pour chauffer les biodigesteurs alors que l'électricité est vendue à Énergie de France (EDF) pour des revenus de 3,4 millions d'euros par année (4,56 M\$). Le procédé produit également 28 kt de compost ayant une valeur de 200 000 €/an (268 100 \$/an) (Braun, 2008). Ce projet permettra à la municipalité de traiter les résidus organiques pour un coût de 80 €/tonne (107 \$/tonne) (Actu-Environnement, 2004).

4.1.2 État de Washington

Un groupe de chercheurs américains de l'Université de l'État de Washington et du « Washington State Department of Ecology » ont réalisé une étude, en 2007, sur la production d'énergie à partir de la digestion anaérobie des matières organiques résiduelles municipales. L'étude a démontré que le meilleur scénario consisterait en une usine utilisant la technologie à 2 étapes de BTA ou Linde avec quelques modifications. Le procédé choisi est un procédé sec (24 % de siccité) incorporant des matières organiques mixtes (municipales, ICI et agricoles) dont le temps de résidence est de 16 jours. Cette usine aurait une capacité annuelle de 24,1 kt et produirait de 90 à 135 m³ de biogaz par tonne d'intrants. Le biogaz dont la concentration en méthane est estimée entre 60 et 65 % permettrait d'alimenter une chaudière de 335 kW de puissance. Le coût d'installation de l'usine est estimé à 460 \$US par tonne de capacité (468 \$), soit un total de près de 11 millions de dollars américains (11,3 M\$) (Zaher et al., 2007).

4.1.3 New York

Une autre étude, cette fois-ci réalisée à l'Université Columbia en 2004, montre le potentiel de la biométhanisation à grande échelle des résidus organiques de marchés d'alimentation et de restaurants pour la ville de New York. La technologie en mode sec envisagée est celle de DRANCO ou Valorga. D'une capacité annuelle de 100 000 tonnes, l'usine permettrait de générer environ 115 mètres cubes de biogaz par tonne d'intrants. L'étude estime le coût de traitement de la matière organique à 55 \$US/tonne (56 \$/tonne), avec des revenus potentiels de 2 et 6 \$US/tonne (2,03 à 6,10 \$/tonne) pour la vente du compost et de l'électricité. Ce qui représente un coût de revient de 47 \$US/tonne (48 \$/tonne). L'étude ne dévoile pas le coût d'immobilisation, mais mentionne que l'investissement nécessaire pour ce type de technologie est de 245 à 635 \$US par tonne de capacité (249 et 646 \$), en fonction de la capacité de l'usine (Ostrem, 2004).

4.1.4 Montréal

Le premier février 2010, les villes de Montréal, Longueuil et Laval annonçaient en grande pompe la construction de plusieurs centres de traitement de la matière organique totalisant 559 M\$. À elle seule, Montréal planifie la construction de deux centres de biométhanisation, deux centres de compostage et d'une usine de prétraitement. Longueuil et Laval projettent la construction d'une usine de biométhanisation dans chacune des

villes (MDDEP, 2010f). L'usine de Laval pourra traiter annuellement 115 000 tonnes de matière organique, dont des boues municipales. Cette usine devrait produire jusqu'à 7 Mm³ de biogaz par année (Bergeron, 2010). Les données pour ces projets sont actuellement insuffisantes pour déterminer les coûts d'immobilisation et les coûts de revient spécifiques au traitement de la matière organique par digestion anaérobie.

Malgré le peu d'information sur les projets de Montréal, Laval et Longueuil, une étude réalisée pour le compte de la Communauté métropolitaine de Montréal (CMM) permet de faire une brève analyse économique de ces projets. Suite à l'entrée en vigueur du *Plan métropolitain de gestion des matières résiduelles* (PMGMR) en 2006, la ville de Montréal a mandaté les firmes SCN-Lavalin et Solinov afin de faire la comparaison des technologies et des scénarios de gestion des matières résiduelles. La digestion anaérobie fut l'une des technologies de gestion des matières organiques mise à l'étude. Le scénario de référence prend en charge les matières organiques d'une population de 400 000 habitants, soit près de 40 000 tonnes/an de résidus organiques (110 tonnes/jours). Le procédé de référence est un procédé sec (30 % de siccité) fabriqué par Valorga ou DRANCO. Le temps de résidence dans ce procédé serait de 15 à 20 jours, pour une production de 120 mètres cubes de biogaz par tonne de matière organique introduite, soit une production annuelle de 4,8 Mm³ de biogaz. Le traitement de 40 000 tonnes de matière organique générerait près de 12 000 tonnes de compost. Pour une telle usine de méthanisation, les coûts d'immobilisation sont estimés à 30 M\$. Les coûts d'implantation pour ces technologies sont estimés entre 500 et 700 \$ par tonne de capacité installée. Le coût de revient est, quant à lui, évalué à 107 \$ par tonne de matière organique traitée (CMM, 2007). Les projets annoncés le 1^{er} février 2010, par les villes de Montréal, Longueuil et Laval, étant de plus grande capacité que ce que l'étude de SCN-Lavalin et Solinov présente, il est possible que les coûts réels soient moindres.

Le tableau 4.1 résume les investissements et les coûts de traitement de la matière organique pour les cas présentés. Les données pour trois de ces cas sont tirées d'études, alors que la ville de Montpellier est un cas réel. Il sera donc accordé plus d'importance à ce dernier cas ainsi qu'à celui de Montréal qui est plus représentatif du contexte québécois. Il est intéressant de constater que les coûts de traitement pour l'usine de Montpellier et de l'étude pour Montréal sont les mêmes avec une valeur de 107 \$/tonne de

matière organique traitée. Pour ce qui est des investissements initiaux, les valeurs semblent se situer entre 250 et 700 \$ par tonne de capacité.

Tableau 4.1 : Coûts d'investissement et de traitement des résidus organiques

| Cas analysés | Capacité | Production | Investissement | Traitement |
|--------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| | (Tonnes) | (m ³ /tonne) | (\$/tonne de capacité) | (\$/tonne) |
| Montpellier | 203 000 ⁽¹⁾ | 71 ⁽¹⁾ | 484 \$ ⁽¹⁾ | 107 \$ ⁽²⁾ |
| État de Washington | 24 100 ⁽³⁾ | 90 à 135 ⁽³⁾ | 468 \$ ⁽³⁾ | n.d. |
| New York | 100 000 ⁽⁴⁾ | 115 ⁽⁴⁾ | 249 à 646\$ ⁽⁴⁾ | 48 \$ ⁽⁴⁾ |
| Montréal | 40 000 ⁽⁵⁾ | 120 ⁽⁵⁾ | 500 à 700 \$ ⁽⁵⁾ | 107 \$ ⁽⁵⁾ |

(1) Braun (2008)

(2) Actu-Environnement (2004)

(3) Zaher et al. (2007, p. 51)

(4) Ostrem (2004, p. 40 à 42)

(5) CMM (2008, p. 61, 65 et 164)

4.2 Comparaison des modes de gestion de la matière organique résiduelle

Alors qu'autrefois les matières organiques résiduelles en provenance des municipalités et des ICI n'étaient que des nuisances dont il fallait disposer, aujourd'hui ces mêmes matières sont de plus en plus convoitées. L'augmentation des coûts d'enfouissement, les nouvelles politiques de mise en valeur des matières organiques résiduelles ainsi que le développement de nouvelles technologies de mise en valeur en sont les causes principales. Chacune des filières de traitement et de valorisation des matières organiques a des avantages et des inconvénients qui lui sont propres et il est difficile de déterminer quelle est la meilleure. En fait, un amalgame de ces différents modes de gestion des matières organiques est probablement le meilleur scénario.

Tel que présenté au chapitre deux, il est vrai qu'une quantité importante de résidus organiques est actuellement éliminée et potentiellement disponible pour être mise en valeur. Cependant, la biométhanisation entre directement en compétition avec les technologies qui mettent en valeur certaines catégories de matières organiques résiduelles. Le but de cette section sera donc des les analyser et de les comparer. La production d'éthanol cellulosique ne sera pas analysée, puisqu'elle n'entre pas directement en compétition avec la digestion anaérobie. En effet, l'éthanol cellulosique est produit à partir de matières ligneuses, telles que les résidus forestiers et les déchets

agricoles ligneux (Ressources naturelles Canada, 2010). D'ailleurs dans la réalisation du bilan massique des matières organiques résiduelles potentiellement disponibles pour la biométhanisation, les matières ligneuses n'ont pas été prises en considération.

4.2.1 Enfouissement

Depuis des décennies, les sociétés nord-américaines ont fait le choix de privilégier l'enfouissement des matières résiduelles car les coûts sont inférieurs à ceux des autres modes de gestion. Cependant, au Québec, les nouvelles contraintes techniques, législatives et environnementales, ainsi que les redevances à l'enfouissement ont fait augmenter les coûts, rendant les autres filières de traitement de plus en plus intéressantes.

Il est estimé que les coûts d'enfouissement sont de l'ordre de 50 à 70 \$/tonne près des centres urbains et de 80 à 110 \$/tonne dans les régions où les lieux d'enfouissement techniques ont de plus petites capacités. Pour ce qui est des ICI, les coûts d'enfouissement peuvent varier entre 50 et 150 \$/tonne (Forcier, et al., 2009). L'analyse conjointe des firmes SNC-Lavalin et Solinov qui a réalisé une étude intitulée, *Comparaison des technologies et des scénarios de gestion des matières résiduelles*, pour le compte de la Communauté métropolitaine de Montréal, estime le coût d'enfouissement pour la métropole à 66 \$/tonne (CMM, 2006). Au Québec, la redevance à l'enfouissement, en date du 1^{er} janvier 2010 était de 10,73 \$/tonne. Le MDDEP a toutefois proposé de majorer ce montant de 9,50 \$/tonne enfouie, afin de porter la redevance à 20,23 \$/tonne (MDDEP, 2010e). Les données présentées dans ce paragraphe ne tiennent pas compte de la proposition de majorer la redevance à l'enfouissement de 9,50 \$/tonne, puisqu'elle n'a pas encore été adoptée.

4.2.2 Compostage

Le compostage est la transformation aérobie de la matière organique. Durant le traitement, la matière biodégradable évacue à l'atmosphère une partie de sa masse sous forme de dioxyde de carbone et de vapeur d'eau. La matière qui est peu ou pas biodégradable forme le compost résiduel. Malgré les quelques problèmes financiers et techniques qu'a connus le secteur du compostage au Québec dans les dernières années, cette technique est toujours une solution très intéressante pour le traitement des matières

organiques résiduelles. Le compostage a le principal avantage de nécessiter peu d'investissement pour les infrastructures de départ, comparativement à la digestion anaérobie. De plus, cette technique peut recevoir des matières avec une plus grande contamination en plastiques, verres et métaux que le procédé de biométhanisation. En effet, ces matières peuvent s'accumuler au fond des biodigesteurs et occasionner des bris d'équipements (Forcier et al., 2009).

Le compostage entre directement en compétition avec la digestion anaérobie pour les résidus alimentaires solides récupérés lors des collectes sélectives, certaines matières organiques commerciales ainsi que pour les biosolides ayant une siccité supérieure à 25 %. Le compostage nécessite également des matières structurantes telles que les résidus verts (feuilles, branches, etc.) et des matières ligneuses en provenance du secteur forestier et de la transformation du bois. Ces dernières matières ne sont cependant pas en compétition avec la digestion anaérobie, puisque leur dégradabilité est trop lente pour ce procédé (Forcier et al., 2009).

Il est estimé que le compostage à aire ouverte possède des coûts de revient variant entre 40 et 80 \$/tonne alors que les coûts pour le compostage pour les sites fermés sont de plus de 80 \$/tonne. Ces coûts n'incluent pas les frais de transport (Forcier et al., 2009). Lors de la comparaison des technologies et des scénarios de gestion des matières résiduelles réalisée dans le cadre PMGMR, de la ville de Montréal, les firmes SCN-Lavalin et Solinov ont estimé les coûts de compostage pour la ville de Montréal à 85 \$/tonne (CMM, 2007).

4.2.3 Épandage direct au sol

Certaines matières organiques résiduelles peuvent être utilisées comme matières résiduelles fertilisantes (MRF) et être épandues directement dans les champs du Québec. Les MRF sont généralement constituées de biosolides municipaux ou industriels en provenance des stations de traitement des eaux. L'épandage au sol des MRF nécessite des coûts variant entre 5 et 35 \$/tonne selon les intrants et le contexte de valorisation. Ces frais n'incluent pas leur transport (Forcier et al., 2009).

Les déjections animales ne sont pas considérées comme des matières organiques résiduelles, mais possèdent des caractéristiques intéressantes pour la biométhanisation. Au Québec, plus de 30 millions de tonnes de fumiers et lisiers sont annuellement

épanchées sur les terres agricoles. Ces matières sont une ressource précieuse pour les cultures. L'épandage, s'il suit les règles imposées, est une solution simple pour les cultivateurs qui utilisent les déjections animales pour fertiliser les mêmes champs qui ont servi à la culture permettant d'alimenter leurs bétails. Il s'agit d'une boucle fermée qui limite également les transports, puisque la génération des lisiers et fumiers se fait à proximité des champs. Les cultivateurs peuvent donc voir d'un mauvais œil l'intérêt de la biodigestion des matières organiques mixtes, sauf dans les régions en surplus de matière fertilisante. Une étude réalisée en 2003, par le MDDEP, a démontré que sur les neuf bassins versants, où 56 % des unités animales du Québec sont concentrées, huit généraient plus de matière fertilisante (azote et phosphore) que les besoins des cultures. Ces bassins versants sont situés dans les régions de la Montérégie, du Centre-du-Québec et de Chaudière-Appalaches (MDDEP, 2003).

Les fumiers et lisiers sont riches en azote, phosphore et potassium, trois éléments nécessaires à la croissance des plantes. Ces éléments peuvent être présents sous différentes formes plus ou moins assimilables par les végétaux. La biométhanisation des fumiers et des lisiers permet de décomposer les matières organiques et de rendre les éléments nutritifs plus facilement assimilables par les plantes. Il est intéressant de constater que la biométhanisation ne réduit pas les quantités d'azote, de phosphore et de potassium, contenues dans les intrants, il ne fait qu'en modifier les formes chimiques. Le digestat généré par la biométhanisation est donc un fertilisant rapide très efficace qui peut être retourné aux agriculteurs. Il doit cependant être utilisé pour les plantes à croissance rapide, afin d'éviter le lessivage excessif de ces éléments nutritifs (Robert et Couture, 2000; Ricard et al., 2009).

4.2.4 Production de biodiesel

La production de biodiesel se fait généralement à partir d'huiles végétales, d'huiles de friture ou de gras animal. Ces huiles et graisses sont transformées à l'aide d'un alcool léger pour former un ester méthylique selon un procédé appelé transestérification. Les matières organiques utilisées dans la production de biodiesel possèdent également des potentiels méthanogènes très intéressants, variant de 230 à 600 m³ de biogaz par tonne. Cependant, l'efficacité énergétique de conversion des huiles et graisses est plus grande pour la production de biodiesel que pour celle du méthane dans les procédés de digestion anaérobie. La production du biodiesel devient alors un compétiteur important à la

biométhanisation. Cependant, le procédé de production de biodiesel nécessite des matières de très bonne qualité alors que la biométhanisation est moins contraignante et peut recevoir des matières mélangées ou avec des concentrations en eau plus élevées (Forcier et al., 2009).

À l'heure actuelle, le Québec ne possède qu'une seule usine de production de biodiesel. Rothsay Biodiesel, située à Ville Sainte-Catherine, est une filiale de Maple Leaf. Ouverte en 2005, cette usine a une capacité de production annuelle de 35 millions de litres. L'usine produit deux types de carburants, l'un en provenance des graisses animales et l'autre à partir d'huiles de friture usées. Au Québec, environ 125 stations-service, sous les bannières Sonic et Olco, commercialisent le biodiesel de cette usine. Elles intègrent 5 % du biodiesel dans le diesel régulier. Le biodiesel est également utilisé par plusieurs sociétés de transport tel qu'à Victoriaville, Montréal, Laval, Québec, Trois-Rivières, Lévis, Saguenay, Sherbrooke et Gatineau (Conseil québécois du biodiesel, 2008).

Selon le Conseil québécois du biodiesel, les graisses animales, ainsi que les huiles de friture sont achetées à des coûts d'environ 450 \$/tonne. Ce qui permet de produire un carburant dont le surcoût est d'environ 0,20 \$/litre par rapport au diesel conventionnel. Les incitatifs fiscaux à l'achat de ce biocarburant permettent de le rendre compétitif. Le coût avant taxes du biodiesel est de 0,70 \$/litre (Conseil québécois du biodiesel, 2005). Avec une densité de 0,88 kg par litre, le coût est donc de 795 \$/tonne (mpbiodiesel, s. d.). Malgré le coût élevé de la production du biodiesel, le prix élevé de vente de ce carburant permet de le rentabiliser. Avec une production de 230 à 600 m³ de biogaz par tonne et un prix de vente de 0,21 \$/m³ (Gaz Métro, 2010a), il est évident que la digestion anaérobie ne peut concurrencer la production de biodiesel à partir des graisses animales et des huiles de friture.

4.2.5 Équarrissage

Certaines matières organiques résiduelles qui proviennent du secteur agroalimentaire, telles que les graisses, les viandes ou les carcasses animales possèdent des potentiels méthanogènes très intéressants. Cependant, ces matières, lorsqu'elles ne sont pas dégradées, sont convoitées par les équarrisseurs qui les acheminent entre autres chez des producteurs de nourriture pour animaux (Forcier et al., 2009). La valeur monétaire de

ces matières n'a pu être déterminée, mais il est certain qu'elles possèdent actuellement une valeur ajoutée plus élevée que ce que la digestion anaérobie peut offrir.

La synthèse des coûts de traitement de la matière organique résiduelle est présentée au tableau 4.2. Ces données sont présentées à titre informatif, car les coûts nets de traitement des résidus organiques dépendent d'une multitude de facteurs qui doivent être évalués au cas par cas. En effet, les données de ce tableau ne tiennent pas compte des valeurs ajoutées, telles que le prix de revente du biodiesel ou les coûts évités d'achat d'engrais pour l'épandage au sol.

Tableau 4.2 : Synthèse des coûts de traitement de la matière organique résiduelle

| Modes de traitement | Coûts de traitement |
|----------------------------|----------------------|
| | (\$/tonne) |
| Biométhanisation | 107 \$/tonne(1) |
| Enfouissement | 50 à 150 \$/tonne(2) |
| Compostage sur site ouvert | 40 à 80 \$/tonne(2) |
| Compostage sur site fermé | + 80 \$/tonne(2) |
| Épandage direct au sol | 5 à 35 \$/tonne(2) |
| Production de biodiesel | 795 \$/tonne(3) |
| Équarrissage | n.d. |

(1) CMM (2007, p. 65)

(2) Forcier et al. (2009, p.17-18 et 23-24)

(3) Conseil québécois du biodiesel (2005, p.8)

Les données du tableau 4.2 ne tiennent pas compte des derniers dénouements de la gestion des matières organiques résiduelles au Québec. L'adoption imminente de la majoration de la redevance à l'enfouissement fera augmenter les coûts à l'enfouissement de 9,50\$ pour atteindre des coûts variant entre 60 et 160 \$/tonne. Selon l'étude de SCN-Lavalin et Solinov, réalisée en 2007, le coût d'enfouissement sera donc d'environ 76 \$/tonne pour la région métropolitaine. Bien entendu, le nouveau *Projet de politique québécoise de gestion des matières résiduelles* interdisant l'enfouissement des résidus organiques d'ici 2020, seules les techniques de mise en valeur doivent être comparées.

Le projet de politique inclut également le *Programme de traitement de matières organiques par biométhanisation et compostage* qui viendra inévitablement réduire les coûts d'immobilisation des unités de compostage et de biométhanisation pour les

municipalités. À ce chapitre, le volet biométhanisation est légèrement avantageé avec des coûts admissibles pour les municipalités de 67 %, alors que ceux du compostage sont de 50 %. (MDDEP, 2010b).

En 2007, avant même le projet de politique et la mise en place des incitatifs financiers pour l'implantation d'infrastructures de traitement de la matière organique résiduelle, la ville de Montréal avait mandaté le Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services (CIRAIG), pour évaluer les options proposées par les firmes SNC-Lavalin et Solinov. L'analyse du CIRAIG a démontré que l'option du compostage et de la digestion anaérobie s'équivalent et qu'une simple augmentation des coûts d'énergie avantagerait la biométhanisation. L'analyse du cycle de vie a également démontré que les gains environnementaux sont supérieurs lors de la digestion anaérobie grâce à la production et à l'utilisation du biogaz comme énergie de substitution aux énergies fossiles. Pour ce qui est des rejets solides et liquides, les deux modes de traitement sont comparables (CMM, 2007).

L'ensemble de ces facteurs, ainsi que l'augmentation prévisible des coûts énergétiques font en sorte que le traitement des matières organiques résiduelles par digestion anaérobie peut être considéré tout à fait compétitif avec le compostage. Bien entendu certaines catégories de matières organiques résiduelles ont des valeurs ajoutées beaucoup plus intéressantes dans d'autres types de traitement, tels que la production de biodiesel ou la fabrication de nourriture animale. Cependant, ces catégories de matières organiques ne représentent qu'une infime partie de l'ensemble des matières organiques générées au Québec et ne devraient pas affecter de façon significative le potentiel de traitement par biométhanisation.

4.3 Aides financières et prix de l'énergie produite par la biométhanisation

En Europe, les gouvernements ont pris la décision de financer les projets de biométhanisation en plus de voter des lois permettant de faciliter la production de biogaz. Deux outils majeurs sont utilisés pour encourager la production d'énergies renouvelables. Premièrement, le tarif de rachat garanti aux producteurs et deuxièmement l'imposition de quotas pour que les fournisseurs d'énergie intègrent des énergies renouvelables. La Commission européenne a également mis à la disposition de ses États membres, un fonds de 347 milliards d'euros (465 milliards de dollars), afin de promouvoir les

installations de biogaz. Ce fonds est disponible depuis 2007 et le sera jusqu'en 2013. Le tableau 4.3 montre les prix de vente minimaux et maximaux de l'électricité générée à partir des biogaz dans certains pays européens (Ricard, 2010).

Tableau 4.3 : Prix de vente de l'électricité générée à partir de biogaz en Europe

| Pays | Prix de vente minimum | | Prix de vente maximum | |
|-----------|-----------------------|----------|-----------------------|----------|
| | (€/kWh) | (\$/kWh) | (€/kWh) | (\$/kWh) |
| Allemagne | 0,084 | 0,113 | 0,310 | 0,415 |
| Autriche | 0,1129 | 0,151 | 0,1694 | 0,227 |
| Danemark | 0,098 | 0,131 | 0,098 | 0,131 |
| France | 0,110 | 0,147 | 0,140 | 0,187 |

Ricard (2010, p. 18 et 22 à 24)

Alors que l'Europe a pris un virage vers les énergies renouvelables dès le choc pétrolier de 1979, le Canada et les États-Unis ont continué à appuyer la production d'énergie conventionnelle. Ce n'est que depuis quelques années, avec l'augmentation des coûts des hydrocarbures et la pression internationale afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre, que les investissements en Amérique du Nord ont recommencés pour le développement des énergies vertes. La présente section a pour but d'identifier les différentes sources d'aide financière et les prix de vente des énergies produites par les usines de digestion anaérobie, au Québec.

4.3.1 Programme de traitement des matières organiques par biométhanisation et compostage

Au Québec, l'incitatif le plus important est sans aucun doute les 650 M\$ investis dans le *Programme de traitement de matières organiques par biométhanisation et compostage* (MDDEP, 2010b). Ce programme entré en vigueur le 16 novembre 2009 et se terminera le 30 septembre 2013. Il permet aux municipalités de financer les infrastructures de biométhanisation jusqu'à concurrence de 67 % et celles de compostage jusqu'à 50 %. Déjà une bonne partie de cette enveloppe a été attribuée à différents projets dévoilés dans les derniers mois. Pour le volet de biométhanisation, les matières organiques visées par le programme sont les matières organiques d'origine domestique et du secteur des ICI, les résidus verts traitables dans un digesteur anaérobie, les boues d'origine municipale et industrielle, les boues de fosses septiques et les déjections animales du secteur agricole. Cependant, ces dernières matières ne doivent pas dépasser 10 % du volume total des

matières organiques traitées (MDDEP, 2010b). Ce programme s'insère également dans le *Plan d'action sur les changements climatiques* et la *Stratégie énergétique du Québec*.

4.3.2 Fonds pour l'infrastructure verte

Dans le cadre du *Plan d'action économique du Canada*, le gouvernement canadien a mis en place le *Fonds pour l'infrastructure verte* (FIV). Ce fonds, d'une valeur de 1 milliard de dollars permettra de financer des projets de production et de transport d'énergies durables, le traitement des eaux usées ainsi que la gestion des déchets solides municipaux. Les projets présentés à ce programme doivent également viser l'assainissement de l'air, de l'eau et la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Le FIV s'intègre donc parfaitement aux projets de digestion anaérobie. D'ailleurs à ce jour, le FIV a autorisé le financement de plusieurs projets de biométhanisation au Québec (Infrastructure Canada, 2010).

4.3.3 Fonds municipal vert

Le gouvernement du Canada a mis à la disposition de la Fédération canadienne des municipalités (FCM) un montant de 550 M\$ afin de créer le Fonds municipal vert (FMV). Ce fonds a pour objectif de soutenir les municipalités dans la réalisation de projets bénéfiques pour l'environnement, l'économie locale et la qualité de la vie. Spécifiquement pour les matières résiduelles, les projets doivent viser la réutilisation, le recyclage, le traitement thermique ou l'utilisation de procédés biologiques. Le FMV permet de subventionner des projets jusqu'à concurrence de 400 000 \$ et/ou de les financer sous forme de prêts jusqu'à 4 M\$ (maximum de 80 % des coûts de projet) (FCM, s. d.).

4.3.4 Programme Prime-Vert

Le programme Prime-Vert, administré par le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) ne s'applique pas pour les municipalités. Il pourrait cependant s'appliquer à un agriculteur, un regroupement d'agriculteurs ou une entreprise œuvrant dans l'agroalimentaire désirant implanter la biométhanisation pour la gestion des lisiers, fumiers et matières résiduelles agricoles. Le programme dispose d'une enveloppe budgétaire de 156,6 M\$ pour la période 2009-2013. En fonction des projets, le financement peut s'élever jusqu'à 70 % des coûts ou jusqu'à 1 M\$ (MAPAQ, 2009a; MAPAQ, 2009c; Ricard, 2010).

4.3.5 Fonds écoÉNERGIE pour l'électricité renouvelable

Le fonds écoÉNERGIE pour l'électricité renouvelable, d'un montant de 1,48 milliard de dollars, a été créé par le gouvernement canadien en 2007. Il vise à encourager la production d'électricité en provenance de sources renouvelables, telles que l'énergie éolienne, la biomasse, la géothermie, l'énergie photovoltaïque, l'énergie des océans et les centrales hydroélectriques à faible impact. Ce programme permet de majorer les revenus des producteurs d'énergies renouvelables en offrant 0,01 \$/kWh pendant une période de 10 ans. Il est à noter que le programme prend fin le 31 mars 2011 et que pour l'instant aucune prolongation n'est prévue (gouvernement du Canada, 2010; Forcier et al., 2009).

4.3.6 Hydro-Québec

Contrairement à certains pays d'Europe, le prix d'achat de l'électricité produite à partir de la biométhanisation n'est pas fixe. Depuis quelques années, Hydro-Québec procède à des appels d'offres pour l'achat d'énergie produite par les énergies renouvelables. C'est d'ailleurs ce mécanisme qui a permis le développement de l'énergie éolienne au Québec.

Le 14 avril 2009, Hydro-Québec lançait son premier appel d'offres pour les projets de cogénération à la biomasse. Le 18 décembre 2009, huit projets furent sélectionnés, dont deux pour la biométhanisation des déchets organiques. La liste des projets est disponible à l'annexe 1. Les deux projets de biométhanisation, présentés par l'entreprise RCI Technologies, sont situés à Longueuil et Anjou. Ils possèdent tous les deux une capacité de traitement de la matière organique de 100 kt/an et une puissance électrique nominale de 3,9 MW. L'appel d'offres a permis de combler 60,7 MW des 125 offerts. Les contrats doivent cependant être approuvés par la Régie de l'énergie. Hydro-Québec est toujours en attente de projets viables pour combler le reste de l'appel d'offres. Le prix moyen de l'énergie des soumissions retenues est de 0,112 \$/kWh (Hydro-Québec, 2009; CNW, 2009).

Dans le cadre des appels d'offres, Hydro-Québec tente de trouver les projets viables dont les coûts de l'énergie sont les plus intéressants. Chaque projet est donc unique et il est impossible, dans le cadre de ce mécanisme, de fixer une valeur du prix d'achat de l'électricité produite à l'aide de la biométhanisation. Les deux projets retenus permettent néanmoins de tracer la ligne pour les autres projets à venir et d'évaluer le potentiel de

vente de l'énergie à 0,112 \$/kWh. À titre comparatif, en Ontario, l'électricité produite suite à la biométhanisation est vendue entre 0,11 et 0,1454 \$/kWh (Ricard, 2010).

4.3.7 Gaz Métro

La société en commandite Gaz Métro est le principal distributeur de gaz naturel au Québec. L'entreprise achète le gaz naturel sur les différents marchés puis s'occupe de sa compression, de son transport, de l'équilibrage et de la distribution. Les projets de biométhanisation qui voudront vendre leur gaz naturel à Gaz Métro devront donc être compétitifs et suivre les prix du marché du gaz naturel. Au 1^{er} janvier 2010, le gaz naturel se transigeait sur les marchés à 0,20764 \$/m³ (Gaz Métro, 2010a).

4.3.8 Synthèse des aides financières

Les différentes aides financières disponibles pour financer les projets de digestion anaérobie sont synthétisées au tableau 4.4. L'ensemble des programmes et des fonds qui sont mis à la disposition des municipalités et des entreprises représente une somme de plus de 3,8 milliards de dollars. Ces aides financières ne sont cependant pas dédiées uniquement aux projets de biométhanisation. Certains programmes et fonds sont également disponibles pour le financement de projets de compostage, de production d'énergie renouvelable, de traitement des eaux, ainsi que de divers autres projets.

Tableau 4.4 : Synthèse des aides financières

| Programmes | Montant | Digestion anaérobie | Compos-tage | ÉR* | Autre |
|--|--------------|---------------------|-------------|-----|-------|
| | (M\$) | | | | |
| Programme de traitement des matières organiques par biométhanisation et compostage | 650 | X | X | | |
| Fonds pour l'infrastructure verte (FIV) | 1 000 | X | | X | X |
| Fonds municipal vert (FMV) | 550 | X | X | X | X |
| Programme Prime-Vert | 157 | X | X | | X |
| Fonds écoÉNERGIE pour l'électricité renouvelable | 1480 | X | | X | |
| Hydro-Québec : Appel d'offres, projets de cogénération à la biomasse | NA | X | | | X |
| Total | 3 837 | | | | |

* ER : Énergie renouvelable

Les références sont indiquées dans les sections correspondantes.

5 POTENTIEL QUÉBÉCOIS DE PRODUCTION DE BIOGAZ

Avec le nouveau *Projet de politique québécoise de gestion des matières résiduelles* interdisant l'enfouissement des résidus organiques d'ici 2020, ainsi que les 650 M\$ consacrés au *Programme de traitement de matières organiques par biométhanisation et compostage*, le Québec vient d'entrer dans une nouvelle ère concernant la gestion de ses matières organiques résiduelles. Maintenant que les décisions politiques ont été prises et que les moyens financiers ont été accordés, l'effervescence entourant la biométhanisation est bien visible. Ce chapitre permettra de faire l'inventaire des principaux projets implantés, en réalisation ou qui ont été annoncés au Québec. Par la suite, l'identification des principales entreprises œuvrant dans ce secteur au Québec sera effectuée.

Finalement, l'évaluation du potentiel québécois de la production de biogaz et d'énergie par les procédés de biométhanisation, sera réalisée. Cette section découle directement du bilan massique de la matière organique résiduelle présenté au chapitre deux, ainsi que du rendement moyen des technologies de biométhanisation analysées au chapitre trois. Une série d'hypothèses sera d'abord énoncée et divers scénarios seront élaborés afin de déterminer le volume de biogaz pouvant être produit par la digestion anaérobie des matières organiques résiduelles disponibles au Québec.

5.1 La biométhanisation au Québec

Avec son objectif de mettre en valeur la totalité des matières organiques sur son territoire d'ici 10 ans, dont une partie par digestion anaérobie, le Québec ne fait pas fausse route. Cette volonté politique permettra de rattraper, en partie, le retard que le Québec possède sur d'autres pays. Il a été évalué que dans le monde agricole, plus de 5 500 unités de digestion anaérobie étaient installées en 2008. De ce nombre, 4 000 étaient en opération en Allemagne, ce qui fait de ce pays le chef de file dans ce secteur. Il est également intéressant de mentionner qu'un grand nombre de biodigesteurs sur les fermes allemandes prennent également en charge une partie des matières organiques municipales et agroalimentaires, en plus d'introduire des cultures énergétiques spécifiques à ce procédé. Les États-Unis comptabilisent quant à eux près d'une centaine de biodigesteurs agricoles (CRAAQ, 2008).

Pour ce qui est des unités de biométhanisation des matières organiques résiduelles municipales, les Européens ont encore une bonne longueur d'avance. En 2006, plus de 90 usines de biométhanisation de ces résidus municipaux étaient en opération. Au Pays-Bas, le biodigester de Friesland peut à lui seul traiter près de 230 kt par année. Il est estimé que la capacité de l'Europe à traiter des matières organiques résiduelles municipales est de plus de 4 millions de tonnes par année (Rapport, 2008; Ostrem, 2004; Montpellier Agglomération, 2006).

En 2007, l'Union européenne avait une production annuelle en biogaz équivalente à 5 900 ktep, soit plus de 68 térawattheures (TWh). À titre comparatif, Hydro-Québec a produit près de 203 TWh en 2009 (Hydro-Québec, 2010a). La production énergétique équivalente européenne en biogaz représente donc environ 33 % de la production d'Hydro-Québec. L'Allemagne et le Royaume-Uni sont les leaders avec des productions respectives de 2 383 et 1 624 ktep (27,7 et 18,9 TWh). L'Italie, l'Espagne et la France ont quant à eux produit respectivement 406, 329 et 310 ktep (4,7; 3,8 et 3,6 TWh) (Actu-Environnement, 2010).

5.1.1 Projets de biométhanisation implantés au Québec

Avant même la mise en place de politiques et de fonds pour encourager la biométhanisation, quelques entreprises et municipalités avaient déjà pris le virage de la digestion anaérobie. Ces décisions ont tout d'abord été prises d'un point de vue économique afin de résoudre la gestion des matières organiques résiduelles.

Au Québec, déjà six villes traitent leurs boues municipales par des procédés de digestion anaérobie. Les villes concernées sont : Châteauguay, Gatineau, Repentigny, Rosemère-Lorraine, Saint-Hyacinthe et Vaudreuil-Dorion (Recyc-Québec 2008; Rodgers, 2010; Châteauguay, s. d.). Le dernier projet en lice est celui de l'usine de biométhanisation de Saint-Hyacinthe qui peut traiter 13 600 tonnes de boues et devrait être rentabilisé en 6 ans (Rodgers, 2010).

Dans le secteur industriel, peu d'information est disponible sur les biométhaniseurs en place. À ce jour, neuf projets sont connus et implantés. Sur ces neuf projets, deux appartiennent à l'entreprise Bonduelle Canada (anciennement Aliments Carrière) qui œuvre dans la transformation de légumes. L'usine de Saint-Denis-sur-Richelieu possède,

depuis 2006, un bioréacteur d'un volume de 2 000 m³ (Centre d'expertise sur les produits agroforestiers (CEPAF), 2007). L'autre usine est située à Saint-Césaire et traite, depuis 1996, ses effluents par biométhanisation, ainsi que les effluents de deux autres usines de la région. Les deux autres usines qui acheminent leurs effluents au biométhaniseur de Bonduelle Canada, sont implantées à Rougemont, soit A. Lassonde, producteur de jus et Vincor, fabricant de vin (St-Amand, 2008).

Quatre autres projets industriels de biométhanisation sont localisés dans des fromageries, dont trois ont été implantés par la firme Valbio Canada. La Fromagerie Blackburn à Jonquière opère un bioréacteur depuis juin 2007. Le procédé traite près de 1 800 tonnes d'eaux blanches et de lactosérum. Le bioréacteur de la Fromagerie Port-Joli, à St-Jean-Port-Joli est en fonction depuis janvier 2010 et traite environ 1 000 tonnes d'eaux blanches et de lactosérum (Valbio, 2010). La Fromagerie La Vache à Maillotte, située à La Sarre en Abitibi, a démarré en juin 2010 son biométhaniseur. Le projet de 1 M\$ devrait permettre à l'entreprise d'épargner 56 000 \$ de diesel par année (Audet, 2010). Finalement, la Fromagerie Agropur située à Notre-Dame-du-Bon-Conseil possède un biométhaniseur depuis 1983 (CEPAF, 2007).

Trois autres projets sont également implantés dans le secteur industriel. ADM Agri-Industrie à Candiac possède un bioréacteur de 12 500 m³ depuis 1989 (CEPAF, 2007). La deuxième entreprise, Interquisa Canada, fabrique de l'acide téréphtalique. Cette entreprise possède un biodigester de 1 800 m³ depuis 2003. Le dernier projet industriel est celui de Tembec au Témiscaming, qui possède un digesteur anaérobie depuis 2006. Ce biodigester serait le plus grand système de traitement anaérobie dans le secteur des pâtes et papiers en Amérique du Nord. La production de biogaz est assurée par deux unités qui produisent près de 67 000 m³ par jour, ce qui permet à l'entreprise de réduire de 80 % la consommation de gaz naturel pour le séchage rapide de la pâte (Biglow, s. d.).

Finalement, dans le secteur agricole, trois biométhaniseurs sont en service au Québec. Deux projets ont été réalisés par Bio-terre Systems dans des fermes porcines. Le premier projet, situé en Estrie, a été réalisé en 2001 sur la ferme R. Péloquin, qui élève 4 000 porcs. Le biométhaniseur peut traiter 4 000 tonnes de lisier par année. Le deuxième projet, implanté dans la région de Chaudière-Appalaches en 2004, se trouve sur la Ferme St-Hilaire. La ferme possède 10 000 porcs et l'unité de digestion anaérobie peut traiter

8 000 tonnes de lisiers par année et produire jusqu'à 200 000 m³ de biogaz (CRAAQ, 2008; Beaugard, 2008; Bio-Terre Systems, s. d.). Le dernier projet agricole est situé en Abitibi dans un élevage aviaire. Les deux biométhaniseurs de 750 m³, provenant du fabricant Allemand Lipp, transforment le lisier de volaille (CEPAF, 2007).

Tableau 5.1 : Synthèse des projets de biométhanisation implantés au Québec

| Projets | Secteur | Statut | Matières traitées | Capacité traitement | Production biogaz | Coût |
|----------------------------------|------------|-----------------|---------------------|---------------------|----------------------|-------|
| | | | | (tonnes/an) | (m ³ /an) | (M\$) |
| Châteauguay | Municipal | Implanté (1991) | Boues* | n.d. | n.d. | n.d. |
| Gatineau | Municipal | Implanté | Boues | n.d. | n.d. | n.d. |
| Repentigny | Municipal | Implanté | Boues | n.d. | n.d. | n.d. |
| Rosemère-Lorraine | Municipal | Implanté | Boues | n.d. | n.d. | n.d. |
| Vaudreuil-Dorion | Municipal | Implanté | Boues | n.d. | n.d. | n.d. |
| Saint-Hyacinthe | Municipal | Implanté (2010) | Boues | 13 600 | n.d. | n.d. |
| Fromagerie Agropur | Industriel | Implanté (1983) | Effluent industriel | n.d. | n.d. | n.d. |
| ADM Agri-Industrie | Industriel | Implanté (1989) | Effluent industriel | n.d. | n.d. | n.d. |
| Bonduelle St-Césaire | Industriel | Implanté (1996) | Effluent industriel | n.d. | n.d. | n.d. |
| Bonduelle St-Denis-sur-Richelieu | Industriel | Implanté (2006) | Effluent industriel | n.d. | n.d. | n.d. |
| Interquisa Canada sec | Industriel | Implanté (2003) | Effluent industriel | n.d. | n.d. | n.d. |
| Fromagerie Blackburn | Industriel | Implanté (2007) | Effluent industriel | 1 800 | 28 000 | n.d. |
| Tembec Témiscaming | Industriel | Implanté (2006) | Effluent industriel | n.d. | 24 000 000 | n.d. |
| Fromagerie Port-Jolie | Industriel | Implanté (2010) | Effluent industriel | 1 000 | 14 000 | n.d. |
| Fromagerie la Vache à Maillotte | Industriel | Implanté (2010) | Effluent industriel | n.d. | n.d. | 1 M\$ |
| Ferme R. Péloquin | Agricole | Implanté (2001) | Lisier de porcs | 4 000 | n.d. | n.d. |
| Ferme St-Hilaire | Agricole | Implanté (2004) | Lisier de porcs | 8 000 | 200 000 | n.d. |
| Ferme aviaire | Agricole | Implanté (2004) | Lisier de volaille | n.d. | n.d. | n.d. |

* Boues : signifie implicitement « boues municipales »

Les références sont indiquées dans le texte qui précède le tableau.

5.1.2 Projets de biométhanisation en réalisation ou potentiels au Québec

Suite au dévoilement du nouveau *Programme de traitement de matières organiques par biométhanisation et compostage*, plusieurs projets d'envergure ont été annoncés dans les derniers mois. Quelques-uns de ces projets semblent être très sérieux et possèdent des études et des données à l'appui. Par contre, d'autres projets ont été annoncés dans le but de « réserver » une part des subventions disponibles. Ces projets devront faire l'objet d'études plus approfondies par les promoteurs.

Le projet de traitement de la matière organique par biométhanisation le plus avancé à ce jour est probablement celui de Rivière-du-Loup dans le Bas-St-Laurent. Le projet avait déjà été annoncé dès 2008. La société d'économie mixte d'énergie renouvelable sera responsable du projet. Cette société est formée du groupe Envirogaz, de la ville de Rivière-du-Loup et de la municipalité régionale de comté (MRC) de Rivière-du-Loup. Le projet devrait permettre de détourner de l'enfouissement près de 18 000 tonnes de matière organique et générer 1,4 Mm³/an de biogaz. Le projet est évalué à 15 M\$, dont 4,4 M\$ viendront du *Fonds municipal vert (FMV)*, 4,1 M\$ du *Fonds pour l'infrastructure verte (FIV)* et 4,7 M\$ du *Programme de traitement des matières organiques par biométhanisation et compostage*. La municipalité de Rivière-du-Loup désire utiliser le biogaz pour substituer près de 1,4 million de litres de diesel, actuellement consommés par une trentaine de camions (Milot, 2010; Dubé, 2010).

Le 28 janvier dernier, la ville de Québec annonçait à son tour son entrée dans le monde de la biométhanisation. La ville désire implanter la biométhanisation et le compostage pour le traitement de 85 000 tonnes de matière organique. Ces matières seront détournées de l'incinération et permettront une réduction de 3,8 % des émissions de GES de la ville. La production de biogaz devrait être de 4,4 Mm³/an. Le projet est estimé à 57 M\$, dont 16,5 M\$ devraient être financés par le gouvernement fédéral et 17,7 M\$ par le gouvernement provincial. Les frais annuels d'exploitation de cette unité sont estimés à 4,5 M\$. L'emplacement des installations n'a pas encore été déterminé. La ville a estimé que ce projet devrait lui permettre de traiter les matières organiques à un coût de 52 \$ par tonne (Normandin, 2010).

Le 1^{er} février 2010, les villes de Montréal, Longueuil et Laval annonçaient en grande pompe la construction de plusieurs centres de traitement de la matière organique.

L'ensemble de ces projets représente des investissements de 559 M\$. Montréal, à elle seule, planifie la construction de deux centres de biométhanisation, deux centres de compostage et d'une usine de prétraitement. Ces cinq usines devraient être en mesure de détourner de l'enfouissement plus de 230 000 tonnes de matière organique (Collectif Cartier, 2010). Le projet montréalais devrait représenter un investissement de près de 215,5 M\$, dont 67,1 M\$ seront accordés par le gouvernement fédéral et 68,5 M\$ par le gouvernement provincial (Plan d'action économique du Canada, 2010).

Longueuil et Laval projettent la construction d'une usine de biométhanisation dans chacune des villes (MDDEP, 2010f). L'usine de Laval, qui sera située à côté de l'usine de traitement des eaux usées, pourra traiter annuellement 115 000 tonnes de matière organique en provenance du secteur résidentiel, des institutions, des commerces et de la station de traitement des eaux usées. Cette usine devrait produire jusqu'à 7 Mm³ de biogaz par année. Le projet est évalué à 121,3 M\$, dont 64,4 M\$ en subventions (Bergeron, 2010; CNW, 2010). Quant à l'usine de Longueuil, elle devrait représenter un investissement de 87,7 M\$, dont 21,5 M\$ seront financés par le gouvernement canadien. La construction de deux autres usines de biométhanisation dans la Couronne Sud de Montréal est également planifiée. Les villes qui accueilleront ces usines n'ont pas encore été identifiées (Fortin, 2010). Le projet est cependant estimé à une valeur de 93 M\$ (Plan d'action économique du Canada, 2010).

Quant à la ville de Sherbrooke, elle entrait dans la course, le 1^{er} juin 2010. La ville a annoncé un projet de 72 M\$ pour le traitement de 65 000 tonnes de matière organique, dont environ les deux tiers seraient payés par les gouvernements canadien et québécois. La ville de Sherbrooke est en fait partenaire dans ce projet qui sera piloté par la Régie intermunicipale du centre de valorisation des matières résiduelles du Haut-Saint-François. Le projet permettra de traiter les matières organiques résidentielles, mais également les boues municipales de Sherbrooke et East-Angus. Pour le moment, il est prévu d'alimenter une flotte de 62 autobus, à l'aide des biogaz générés (Bombardier, 2010). Selon une discussion avec le directeur des services et infrastructures urbaines et de l'environnement de la ville de Sherbrooke, le projet devrait permettre de générer environ 5 Mm³/an de biogaz. Un deuxième projet similaire au premier, d'une valeur de 55 M\$ pourrait également prendre en charge, près de 65 000 tonnes de matières organiques résiduelles des ICI et produire un autre 5 Mm³/an (Gélinas, 2010; AQPER, 2010).

Finalement, le 2 juin 2010, la Laiterie Charlevoix de Baie-Saint-Paul annonçait la construction d'un biométhaniseur pour le traitement de ses effluents. Le projet permettra de traiter quotidiennement près de 20 000 litres d'effluents, soit 6,5 millions de litres par année. Le projet devrait permettre de substituer la consommation de 65 000 litres de mazout annuellement et de générer 67 600 m³ de biogaz par année. Ce projet, réalisé par Valbio Canada, est estimé à une valeur de 2,3 M\$. Une partie du financement proviendra de l'Agence de l'efficacité énergétique. La fromagerie Charlevoix dispose déjà d'un musée sur la production du fromage et désire intégrer le système de traitement de ses effluents par biométhanisation dans la visite des installations (Cotret, 2010; Valbio, 2010).

La synthèse des projets de biométhanisation qui ont été annoncés dernièrement sur le territoire québécois est présentée au tableau 5.2.

Tableau 5.2 : Synthèse des projets de biométhanisation potentiels au Québec

| Projets | Secteur | Statut | Matières traitées | Capacité traitement | Production biogaz | Coût |
|----------------------|------------|-----------|---------------------|---------------------|----------------------|---------|
| | | | | (tonnes/an) | (m ³ /an) | (M\$) |
| Rivière-du-Loup | Municipal | Potentiel | MORM* + ? | 18 000 | 1 400 000 | 15 M\$ |
| Québec | Municipal | Potentiel | MORM + ? | 85 000 | 4 400 000 | 57 M\$ |
| Montréal | Municipal | Potentiel | MORM + ? | 115 000 | n.d. | 108 M\$ |
| Montréal | Municipal | Potentiel | MORM + ? | 115 000 | n.d. | 108 M\$ |
| Laval | Municipal | Potentiel | MORM + boues + ? | 115 000 | 7 000 000 | 121 M\$ |
| Longueuil | Municipal | Potentiel | MORM + ? | n.d. | n.d. | 88 M\$ |
| Rive-Sud de Montréal | Municipal | Potentiel | MORM + ? | n.d. | n.d. | 47 M\$ |
| Rive-Sud de Montréal | Municipal | Potentiel | MORM | n.d. | n.d. | 47 M\$ |
| Sherbrooke | Municipal | Potentiel | MORM + boues** | 130 000 | 10 000 000 | 127 M\$ |
| Laiterie Charlevoix | Industriel | Potentiel | Effluent industriel | 6 500 | 67 600 | 2,3 M\$ |

* MORM : Matières organiques résiduelles municipales

** Boues : signifie implicitement « boues municipales »

Les références sont indiquées dans le texte qui précède le tableau.

5.2 Entreprises œuvrant dans le secteur de la biométhanisation au Québec

L'inventaire des entreprises œuvrant dans le domaine de la biométhanisation et qui ont pignon sur rue au Québec peut s'avérer complexe. Bien entendu, les entreprises qui ont déjà réalisé des projets sont bien en vue, alors que beaucoup d'autres n'ont pas encore de projet concret, mais tentent de prendre position sur le marché. De plus, les fournisseurs de technologies, tels que Kompogas, DRANCO ou Valorga ont probablement déjà des distributeurs en Amérique du Nord, qui ne s'affichent pas nécessairement pour le moment.

En 2008 fut créé Biogaz Québec, une association regroupant des entreprises œuvrant dans le développement et la promotion de l'énergie du biogaz. Pour l'instant, Biogaz Québec regroupe une dizaine d'entreprises. Ces entreprises peuvent aussi bien travailler dans la digestion anaérobie que sur la captation et la valorisation des biogaz dans les sites d'enfouissement (Biogaz Québec, 2010). De plus, certaines entreprises œuvrent dans le secteur du biogaz sans être membre de cette nouvelle association. Les membres de Biogaz Québec sont présentés au tableau 5.2.

Tableau 5.3 : Entreprises membres de Biogaz Québec et leurs secteurs d'activités

| Entreprises | Secteurs d'activités |
|--------------------------------|--|
| Bio-terre Systems | Digestion anaérobie des lisiers |
| Biothermica | Captation et valorisation des biogaz des LES et LET |
| DDACE | Distributeur de système à combustion |
| Dominion & Grimm Environnement | Digestion anaérobie des matières organiques des ICI, municipales et agricoles (agent manufacturier Lipp) |
| Électrigaz | Digestion anaérobie des matières organiques des ICI, municipales et agricoles |
| Envirogaz | Digestion anaérobie des matières organiques des ICI, municipales et agricoles |
| Golder & associés | Captation et valorisation des biogaz des LES et LET |
| Pluritec | Captation et valorisation des biogaz des LES et LET |
| Valbio Canada | Digestion anaérobie des effluents industriels |
| Xébec | Traitement et purification des biogaz |

(Bio-terre Systems, 2010; Biothermica, 2009; Detroit Diesel-Allison Canada Est (DDACE), 2009; Dominion & Grimm Environnement, s. d.; Électrigaz, 2010a; Envirogaz, s. d.; Golder & associés, 2008; Pluritec, s. d.; Valbio, 2010; Xébec, s. d.)

D'autres entreprises, même si elles ne sont pas membres de Biogaz Québec, travaillent dans le domaine des biogaz et pourraient devenir des joueurs importants sur la scène

québécoise. Enviro-Technologies Mittner semble être le représentant des technologies Kompogas et distributeur de Lipp (Réseau des entreprises canadiennes (REC), 2010), alors qu'Énergie Highland et EBI Énergie sont deux entreprises qui conçoivent des systèmes de captation et valorisent le biogaz des sites d'enfouissement (Lachance, 2010).

Il ne faut cependant pas oublier les grandes firmes de génie-conseil, telles que Beaulieu, Poulin et Robitaille (BPR), SNC-Lavalin, Tecsalt, Teknika-HBA, Génivar, Dessau, Roche ou encore le Groupe SM International, qui ne voudront certainement pas laisser passer sous leur nez, les centaines de millions de dollars qui viennent d'être annoncées. En effet, la plupart des grands projets de biométhanisation qui ont été annoncés, dans les derniers mois, n'ont pas encore de promoteur. Les villes doivent aller en appel d'offres pour déterminer qui concevra, implantera et exploitera ces centres. Il est indéniable que ces projets devront être pris en charge par des firmes ayant une capacité financière importante et pouvant offrir des garanties. Ces grandes firmes risquent donc de jouer un rôle important dans le développement de la biométhanisation au Québec.

Finalement, il n'est pas exclu que les entreprises œuvrant dans la gestion des matières résiduelles soient également tentées par l'aventure de la biométhanisation. RCI Environnement, BFI Canada, Gaudreau Environnement et Waste Management Canada sont actuellement les entreprises qui occupent la plus grande part du marché de la collecte et de la gestion des matières résiduelles au Québec. D'ailleurs RCI Technologies, filiale de RCI Environnement, est l'entreprise qui a été retenue pour deux projets de biométhanisation lors de l'appel d'offres d'Hydro-Québec concernant les projets de cogénération à la biomasse (RCI Technologies, 2010; Hydro-Québec, 2009).

5.3 Évaluation du potentiel de production de biogaz par la biométhanisation des matières organiques résiduelles au Québec

L'évaluation du potentiel de production de biogaz par la biométhanisation des résidus organiques est relativement simple. Il s'agit en effet de calculer, en fonction du bilan massique des matières organiques résiduelles et du rendement moyen des technologies de biométhanisation, la production potentielle de biogaz pour l'ensemble du Québec. Cependant, un effort considérable doit être mis, afin de poser les hypothèses de base pour la réalisation des calculs. Ces hypothèses reposent entre autres sur la disponibilité et la proportion de matière organique qui sera traitée par biométhanisation.

À l'heure actuelle, il est difficile de déterminer quel mode de gestion des matières organiques résiduelles sera privilégié par les municipalités. Cependant, depuis la mise en place, le 16 novembre 2009, du *Programme de traitement de matières organiques par biométhanisation et compostage*, les annonces faites par les municipalités semblent démontrer une forte tendance vers les procédés de biométhanisation. Les volumes de matière organique qui seront traités dans les usines de biométhanisation de Longueuil et de la Couronne Sud de Montréal n'ont pas encore été dévoilés. Cependant, considérant que les usines de Montréal et Laval auront des capacités annuelles de traitement d'environ 115 000 tonnes, l'extrapolation permet d'affirmer que les neuf projets annoncés depuis novembre dernier permettront le traitement de plus de 900 000 tonnes de matière organique résiduelle.

En fait, depuis le dévoilement du *Programme de traitement de matières organiques par biométhanisation et compostage*, huit municipalités ont choisi la voie de la biométhanisation (Rivière-du-Loup, Québec, Montréal (2X), Laval, Longueuil, Couronne Sud de Montréal (2X) et Sherbrooke). Dans la même période, une seule ville a annoncé un projet de compostage, soit Lévis. Finalement, la ville de Salaberry-de-Valleyfield a annoncé un projet pilote de gazéification de 12 500 tonnes par année de matière résiduelle, qui pourrait éventuellement mener à la construction d'une usine d'une capacité de 30 000 à 50 000 tonnes par année (Bergeron, 2009). Il est donc évident que la biométhanisation est en pleine croissance et constitue un choix prisé par les municipalités du Québec.

5.3.1 Éléments de calculs et hypothèses

Les calculs qui seront effectués dans cette section reposent sur les données présentées au tableau 5.4. Alors que le deuxième chapitre permet de déterminer la quantité de matière organique potentiellement disponible pour la biométhanisation, le troisième chapitre fait ressortir les critères importants à observer pour le bon fonctionnement des biométhaniseurs, tels que la siccité et le ratio de carbone sur l'azote (C/N). Ces deux paramètres seront analysés afin de déterminer si les matières organiques résiduelles possèdent des caractéristiques intéressantes pour la digestion anaérobie dans des centres de traitement accueillant des matières mixtes. Les potentiels de production de biogaz seront utilisés pour déterminer les volumes de biogaz générés en fonction des intrants traités pour chacun des scénarios qui seront présentés.

Tableau 5.4 : Données de base pour les calculs de production de biogaz

| Matières organiques | Masses disponibles ⁽¹⁾ | Ratio C/N ⁽²⁾ | Siccité ⁽²⁾ | Potentiel biogaz ⁽³⁾ |
|----------------------------|-----------------------------------|--------------------------|------------------------|---------------------------------|
| | (tonnes/an) | | (%) | (m ³ /tonne) |
| MOR* municipales | 1 375 000 | 30 | 28 % | 120 |
| MOR des ICI | 300 000 | 30 | 28 % | 120 |
| Boues municipales | 773 000 | 10 | 28 % | 103 |
| Boues mixtes de papetières | 1 083 000 | 25 | 40 % | 87 |
| Lisier de porcs | 9 000 000 | 14 | 4 % | 15 |
| Fumier de bovins | 21 000 000 | 23 | 24 % | 67 |

* MOR : Matières organiques résiduelles

(1) Références disponibles au tableau 2.5

(2) Références disponibles au tableau 3.1

(3) Références disponibles au tableau 3.2

Le bilan massique réalisé au chapitre deux, n'a pas permis d'évaluer les caractéristiques des matières résiduelles organiques en provenance des ICI. Les valeurs pour le ratio C/N, la siccité et le potentiel de production de biogaz ont donc été comparées à celles provenant du secteur municipal. Cette estimation devrait s'avérer relativement juste, puisqu'une grande partie des résidus organiques de ce secteur provient des commerces d'alimentation et de restauration, donc est constituée de matières putrescibles similaires à celles du milieu municipal. De plus, l'étude réalisée sur le potentiel de production de biogaz à partir des déchets de commerces d'alimentation et de restaurants pour la ville de New York a évalué le potentiel de production de biogaz à 115 m³/tonne de matière traitée (Ostrem, 2004). Finalement les recherches démontrent que les effluents de l'industrie agroalimentaire ont des potentiels très intéressants pour la digestion anaérobie et la production de méthane. En plus de posséder de fortes charges organiques, les composés organiques sont généralement rapidement biodégradables (Cresson, 2006).

Les potentiels de production de biogaz pour les différents types de matière organique permettent de déterminer la production de biogaz par quantité incorporée dans le bioréacteur. Ces données sont donc très importantes et très sensibles pour les calculs. Le tableau 3.2 donne un potentiel de 126 m³ de biogaz par tonne de matière organique résiduelle municipale. Cependant, tel que discuté dans la section sur le rendement des diverses technologies, une valeur plus conservatrice de 120 m³/t sera utilisée. Finalement, une donnée très importante était manquante et a dû être calculée. Il s'agit du potentiel de production de biogaz des boues secondaires et mixtes des papetières. Cette donnée est

cruciale, puisque ces boues représentent 28 % de la masse totale des quatre premiers scénarios mis à l'étude dans la prochaine section.

La matière solide contenue dans les boues de papetières est principalement constituée de cellulose et d'hémicellulose qui sont facilement biométhanisables. Elle contient également de la lignine qui est difficilement biométhanisable sur une courte période (Bipfubusa et al., 2004). Afin de déterminer la valeur du potentiel de production de biogaz par les boues de papetières, l'institut FPInnovations fut contacté. Cet institut, avec plus de 600 employés à travers le Canada, réunit des opérateurs forestiers, des producteurs de bois, de pâtes et papiers et le Centre canadien sur la fibre de bois de Ressources naturelles Canada (FPInnovations, 2010). Des tests réalisés par FPInnovations ont démontré que le potentiel méthanogène des boues de papetières est d'environ 100 m³ de méthane par tonne de demande chimique en oxygène (DCO) introduite dans le bioréacteur. La partie solide des boues possède une DCO de 1,3 tonne par tonne de boues sèches (Mahmood, 2010). Considérant que les boues de papetières ont une siccité moyenne de 40 %, et que la concentration en méthane du biogaz est de 60 %, la valeur de 87 m³ de biogaz par tonne de boues biométhanisées est obtenue.

5.3.2 Potentiel de production de biogaz au Québec selon cinq scénarios

Dans le but de déterminer le potentiel de production de biogaz, cinq scénarios seront analysés. Les quatre premiers scénarios (A, B, C et D) correspondent à la mise en valeur de 25, 50, 75 et 100 % des matières organiques résiduelles disponibles en provenance des municipalités, des ICI ainsi que les boues municipales et de papetières. Le *Programme de traitement de matières organiques par biométhanisation et compostage* n'autorise que l'incorporation de 10 % de matières organiques d'origine agricole, telles que les lisiers et fumiers. Puisqu'il s'agit du principal programme de financement des projets de digestion anaérobie, les quatre premiers scénarios respecteront ce critère en n'incorporant que 10 % de biosolides agricoles. Il sera considéré que 50 % des matières agricoles sera des lisiers de porcs et que l'autre moitié sera des fumiers de bovins. Aux fins de comparaison et de discussion, le potentiel de biométhanisation de l'ensemble des matières organiques résiduelles, incluant tous les lisiers et fumiers, sera également évalué dans le scénario E. Les fractions des matières organiques qui seront traitées par biométhanisation pour chacun des scénarios sont présentées au tableau 5.5.

Tableau 5.5 : Fractions des matières organiques biométhanisées selon les scénarios

| Matières organiques | Scénarios | | | | |
|------------------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|
| | A | B | C | D | E |
| MOR** municipales | 25 % | 50 % | 75 % | 100 % | 100 % |
| MOR des ICI | 25 % | 50 % | 75 % | 100 % | 100 % |
| Boues municipales | 25 % | 50 % | 75 % | 100 % | 100 % |
| Boues mixtes de papetières | 25 % | 50 % | 75 % | 100 % | 100 % |
| Lisier de porcs | 0,54 % | 1,09 % | 1,63 % | 2,18 % | 100 % |
| Fumier de bovins | 0,23 % | 0,47 % | 0,70 % | 0,93 % | 100 % |
| Matières organiques totales | 2,9 % | 5,9 % | 8,8 % | 11,7 % | 100 % |

* MOR : Matières organiques résiduelles

La siccité et le ratio de carbone sur l'azote (C/N) font partie des paramètres importants à analyser pour le bon fonctionnement de la biométhanisation. La plupart des procédés secs nécessitent une siccité de 25 à 30 %, alors que l'optimum pour le ratio C/N est de 25. Selon le scénario E, où 100 % des matières organiques résiduelles sont considérées, une valeur moyenne de siccité de 18 % est obtenue ainsi qu'un ratio C/N de 21. Les faibles taux de la siccité et du ratio C/N sont dus à la grande quantité de lisier de porcs qui vient abaisser considérablement la moyenne de ces valeurs. Pas contre, dans le cas des quatre premiers scénarios (A, B, C et D), où il y a incorporation de seulement 10 % de matières agricoles, par rapport à la masse des autres intrants, le taux de siccité moyen est de 30 % et le ratio C/N est de 24. Ces données correspondent donc aux critères typiques pour le bon fonctionnement de la biométhanisation.

Tel que décrit précédemment, le scénario A prend en considération la méthanisation de 25 % des matières organiques résiduelles du secteur municipal et des ICI, ainsi que des boues municipales et de papetières. À cette quantité est additionné 10 % de matières agricoles. Avec une masse totale de 981 000 tonnes de matières organiques biométhanisées, ce scénario est celui qui s'approche le plus de l'ensemble des projets annoncés sur le territoire québécois depuis novembre 2009. En effet, selon les annonces faites, une masse d'environ 900 000 tonnes de matières organiques sera biométhanisée au Québec d'ici quelques années. Les calculs de ce scénario permettent de déterminer que près de 98 Mm³/an de biogaz pourraient être générés, dont plus de 42 % en provenance des matières organiques résiduelles municipales. Les données du scénario A sont présentées au tableau 5.6.

Tableau 5.6 : Production de biogaz selon le scénario A

| Matières organiques | Masses disponibles | Fractions traitées* | Masses traitées* | Biogaz produit |
|----------------------------|--------------------|---------------------|------------------|-----------------------|
| | (t/an) | (%) | (t/an) | (Mm ³ /an) |
| MOR** municipales | 1 375 000 | 25 % | 343 750 | 41,25 |
| MOR ICI | 300 000 | 25 % | 75 000 | 9,00 |
| Boues municipales | 773 000 | 25 % | 193 250 | 19,90 |
| Boues mixtes de papetières | 1 083 000 | 25 % | 270 750 | 23,56 |
| Lisier de porcs | 9 000 000 | 0,54 % | 49 042 | 0,74 |
| Fumier de bovins | 21 000 000 | 0,23 % | 49 042 | 3,29 |
| Total | 33 531 000 | 2,9 % | 980 834 | 97,73 |

* Traitées en digestion anaérobie

** MOR : Matières organiques résiduelles

Les cinq scénarios ne seront pas exposés en détail dans cette section pour alléger le texte. Les scénarios B, C et D sont néanmoins présentés à l'annexe 2 et résumés au tableau 5.8. Quant au scénario E, dans lequel 100 % des matières organiques résiduelles de tous les secteurs serait traité par biométhanisation, il est présenté au tableau 5.7. Le scénario E représente la quantité maximale théorique de biogaz qui pourrait être générée avec l'ensemble des résidus organiques identifiés dans le bilan du deuxième chapitre. Cette production maximale est évaluée à 1 917 Mm³/an de biogaz. De cette quantité, près de 1 542 Mm³ sont générés par les fumiers et lisiers et 165 Mm³ par les résidus municipaux. Malgré leur grande quantité, les boues de papetières ne représentent qu'un potentiel de 94 Mm³, dû à leur potentiel de production de biogaz plus faible que les résidus municipaux et les boues municipales.

Tableau 5.7 : Production de biogaz selon le scénario E

| Matières organiques | Masses disponibles | Fractions traitées* | Masses traitées* | Biogaz produit |
|----------------------------|--------------------|---------------------|-------------------|-----------------------|
| | (t/an) | (%) | (t/an) | (Mm ³ /an) |
| MOR** municipales | 1 375 000 | 100 % | 1 375 000 | 165 |
| MOR des ICI | 300 000 | 100 % | 300 000 | 36 |
| Boues municipales | 773 000 | 100 % | 773 000 | 80 |
| Boues mixtes de papetières | 1 083 000 | 100 % | 1 083 000 | 94 |
| Lisier de porcs | 9 000 000 | 100 % | 9 000 000 | 135 |
| Fumier de bovins | 21 000 000 | 100 % | 21 000 000 | 1 407 |
| Total | 33 531 000 | 100 % | 33 531 000 | 1 917 |

* Traitées en digestion anaérobie

** MOR : Matières organiques résiduelles

Tableau 5.8 : Volumes de biogaz produits selon les cinq scénarios

| Scénarios | Masses traitées* | Biogaz produit | Équivalent gaz naturel |
|-------------------------------------|------------------|-----------------------|------------------------|
| | (t/an) | (Mm ³ /an) | (Mm ³ /an) |
| Scénario A (25 % + 10 % agricole) | 981 000 | 98 | 59 |
| Scénario B (50 % + 10 % agricole) | 1 962 000 | 195 | 117 |
| Scénario C (75 % + 10 % agricole) | 2 943 000 | 293 | 176 |
| Scénario D (100 % + 10 % agricole) | 3 923 000 | 391 | 235 |
| Scénario E (100 % + 100 % agricole) | 33 531 000 | 1 917 | 1 150 |

* Traitées en digestion anaérobie

Il est difficile de déterminer d'ici 2020, année où il sera interdit d'enfouir de la matière organique, quelle fraction de la matière organique résiduelle sera traitée par biométhanisation. Les projets en développement vont certainement permettre de statuer sur l'efficacité des technologies et encourager d'autres municipalités et entreprises à emboîter le pas dans la production de biogaz. Tel que mentionné précédemment, les neuf projets qui ont été annoncés depuis l'automne 2009 se rapprochent du scénario A, avec une production potentielle de 98 Mm³/an, soit l'équivalent de 59 Mm³ de gaz naturel.

Il est donc réaliste de croire que le scénario B et même le scénario C peuvent être atteints d'ici 2020. Le scénario C permettrait de traiter par digestion anaérobie près de 3 Mt de matière organique et de produire environ 293 Mm³/an de biogaz (176 Mm³/an de gaz naturel équivalent). À titre comparatif, en 2007 les Québécois ont consommé près de 6 100 Mm³ de gaz naturel (MRNF, 2009). Même le scénario E, où tous les résidus organiques disponibles sont biométhanisés, génère à peine 1 917 M³/an de biogaz, soit l'équivalent de 1 150 Mm³ de gaz naturel. Cette quantité représente 19 % de la consommation totale de gaz naturel au Québec.

Finalement, une étude réalisée en 2008 par le *California Integrated Waste Management Board*, révèle que le potentiel de production d'énergie par biométhanisation des matières organiques résiduelles municipales actuellement enfouies en Californie est de 360 Mm³/an de gaz naturel équivalent (2 300 GWh/an) (Rapport et al., 2008). Ce comparatif permet d'affirmer que l'évaluation faite sur le potentiel québécois de production de biogaz est dans le bon ordre de grandeur. En effet le potentiel québécois pour ces mêmes matières est de 165 Mm³/an de biogaz (99 Mm³ de gaz naturel équivalent) et le Québec compte environ 4,5 fois moins d'habitants que la Californie, ce qui semble concorder.

5.4 Financement de la biométhanisation au Québec

L'implantation d'une usine de biométhanisation des matières organiques résiduelles exige des investissements considérables. Malgré la compétitivité à long terme de ce mode de traitement et des revenus qui peuvent être générés, les coûts d'immobilisation sont une contrainte majeure pour les municipalités. Les gouvernements canadien et québécois ont donc mis en place de nombreux programmes et fonds permettant de financer ces projets. La présente section a pour objectif d'évaluer si les efforts gouvernementaux sont suffisants et jusqu'à quel point ils peuvent permettre d'encourager la biométhanisation.

Tel que présenté à la section 4.3, les divers programmes et fonds, permettant de financer des projets de biométhanisation, représentent plus de 3,8 milliards de dollars. De cette somme plus de 800 millions de dollars sont disponibles uniquement au Québec et plus de 3 milliards de dollars pour l'ensemble du Canada. Considérant que la population québécoise représente environ 25 % de la population canadienne, un calcul simple permet d'affirmer qu'environ 750 millions de dollars du gouvernement canadien sont disponibles au Québec, pour un total d'environ 1,55 milliard de dollars.

Il est important de considérer que les divers programmes et fonds mis en place ne couvrent pas seulement la biométhanisation, mais entre autres le compostage, le traitement des eaux et la production d'énergie renouvelable. Cependant, tel que présenté précédemment, la biométhanisation semble être un mode de traitement des résidus organiques privilégié par les municipalités dans les derniers mois. En considérant que 50 % de la somme identifiée soit dédié à des projets de biométhanisation, environ 775 M\$ sont disponibles pour inciter la digestion anaérobie sur le territoire québécois.

Le tableau 5.9 présente les projets municipaux de biométhanisation annoncés ainsi que les subventions accordées. Dans la compilation des données du tableau 5.9, les fonds provinciaux proviennent uniquement du *Programme de traitement de matières organiques par biométhanisation et compostage* (650 M\$), alors que les fonds fédéraux sont principalement liés au *Fonds pour l'infrastructure verte* (1 milliard de dollars). Le *fonds municipal vert* (550 M\$) semble être également adapté aux différents projets de biométhanisation annoncés, cependant seule la ville de Rivière-du-Loup a confirmé l'octroi d'une subvention de 4,4 M\$ de ce fonds fédéral. La plupart des projets ayant été annoncés dans les derniers mois, il est possible que les demandes de subvention n'aient

pas encore été acheminées ou traitées. Il faut aussi considérer que la plupart des programmes exigent que les municipalités défrayent une partie des coûts et dans certaines circonstances, il peut s'avérer inutile de solliciter plus de deux fonds

Tableau 5.9 : Subventions accordées pour les projets municipaux de biométhanisation

| Villes | Masses traitées | Valeur projet | Fonds québécois | Fonds canadiens |
|--------------------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------|
| | (tonnes/an) | (M\$) | (M\$) | (M\$) |
| Rivière-du-Loup | 18 000 | 4,7 | 8,5 | 15,0 |
| Québec | 85 000 | 17,7 | 16,5 | 57,0 |
| Montréal | 230 000 | 68,5 | 67,1 | 215,5 |
| Couronne Sud de Montréal | n.d. | 38,2 | 31,0 | 93,1 |
| Laval | 115 000 | 35,0 | 30,6 | 121,3 |
| Longueuil | n.d. | 23,2 | 21,5 | 87,7 |
| Sherbrooke | 130 000 | 42,0 | 42,0 | 127,0 |
| Total | | 229,3 | 217,2 | 716,6 |

Les références sont indiquées dans la section 4.3.

Selon le tableau 5.9, près de 446 M\$ de dollars ont été attribués aux neuf projets municipaux de biométhanisation. À la section précédente, il a été déterminé que ces neuf projets se rapprochaient du scénario A, soit la biométhanisation de 25 % de l'ensemble des matières organiques avec une limite de 10 % de biosolides agricoles. Si environ 775 M\$ sont disponibles au Québec pour financer des projets de digestion anaérobie, cela signifie que le scénario B pourrait pratiquement être atteint avec les fonds actuels. Ce scénario permettrait de biométhaniser 50 % de toutes les matières organiques résiduelles avec l'incorporation de 10 % de biosolides agricoles.

Les différents programmes et fonds ne sont assurément pas suffisants pour permettre le traitement de toutes les matières organiques résiduelles du Québec par biométhanisation. Cependant, en considérant que jusqu'à récemment la biométhanisation était relativement méconnue au Québec, la possibilité d'atteindre le scénario B avec les sommes annoncées constitue une avancée importante. Le principal programme provincial se termine en septembre 2013, alors que le *Fonds pour l'infrastructure verte* se termine en mai 2014. Ils constituent une première phase de financement. Les efforts devront néanmoins continuer dans cette direction et des sommes équivalentes devront être réinvesties pour atteindre l'objectif de mettre en valeur 100 % des matières organiques résiduelles d'ici 2020.

6 UTILISATION DU BIOGAZ

Maintenant que le potentiel de production de biogaz à partir des matières organiques résiduelles a été évalué, cette section permettra de déterminer les usages potentiels pour ce biogaz. L'intérêt d'opter pour la biométhanisation des matières organiques résiduelles plutôt que la voie du compostage, par exemple, réside dans la valeur ajoutée de ce procédé. En effet, l'utilisation du biogaz peut devenir une source de revenus considérable. Ce chapitre permettra d'identifier les usages tels que la production d'électricité, l'utilisation thermique, l'injection dans le réseau de gaz naturel ou encore la liquéfaction pour l'utilisation dans des véhicules adaptés.

La transformation des matières organiques résiduelles en biogaz permet avant tout de répondre à la problématique de gestion de ces matières. Le biogaz produit lors de la digestion anaérobie doit cependant être utilisé adéquatement pour en tirer le plein potentiel. La commercialisation de ce biogaz est l'élément principal qui attirera les investisseurs dans ces technologies, qui sont beaucoup plus complexes et coûteuses que les modes de gestion conventionnels comme le compostage ou l'enfouissement. Plusieurs possibilités de mises en valeur sont envisageables pour le biogaz. Le choix de son usage est souvent déterminé par le contexte régional et la volonté politique. Par exemple, plusieurs pays de l'Union européenne ont choisi de subventionner la production d'électricité produite à l'aide de biogaz en provenance de la digestion anaérobie. Ces incitatifs encouragent les entreprises et municipalités à se tourner vers cette solution. Les contraintes environnementales ainsi que les engagements des États font également en sorte que d'autres solutions peuvent être mises de l'avant malgré le fait qu'elles soient peu rentables ou moins efficaces.

Les différents usages du biogaz qui seront présentés dans cette section sont ceux qui s'appliquent aux usines de biométhanisation de grandes capacités. Les solutions qui s'appliquent aux unités résidentielles et à celles sur les fermes ne seront pas prises en compte. Il n'est cependant pas exclu qu'une ferme puisse produire des quantités de biogaz suffisamment grandes pour appliquer les solutions présentées. D'ailleurs, plusieurs projets en Allemagne, situés sur des fermes et intégrant des matières organiques en provenance des municipalités et industries, produisent des volumes importants de biogaz.

Le gaz naturel distribué dans les réseaux nationaux contient environ 95 % de méthane, 4 % d'éthane et propane et 1 % de dioxyde de carbone (Gaz Métro, 2009). Le gaz naturel possède un pouvoir calorifique de $38,26 \text{ MJ/m}^3$ ($10,63 \text{ kWh/m}^3$) (Ressources naturelles Canada, 2009a). Malgré le fait que le gaz naturel ne contienne pas que du méthane, le seul pouvoir calorifique de ce dernier sera utilisé pour déterminer le pouvoir calorifique du biogaz. Il est donc estimé que le biogaz contenant 60 % de méthane possède un pouvoir calorifique d'environ 23 MJ/m^3 ($6,4 \text{ kWh/m}^3$). Le pouvoir calorifique du biogaz correspond à l'énergie maximale pouvant être extraite du biogaz. En fonction de l'utilisation et des procédés employés, le rendement énergétique du biogaz sera réduit dû aux pertes et à l'inefficacité des systèmes. Dans le tableau 5.8, du précédent chapitre, les volumes équivalents en gaz naturel ont été indiqués, afin de calculer les potentiels énergétiques dans le présent chapitre. Le scénario E, présentait une production maximale théorique de $1\,917 \text{ Mm}^3/\text{an}$ de biogaz, soit l'équivalent de $1\,150 \text{ Mm}^3/\text{an}$ de gaz naturel. Cette quantité de biogaz correspond également à un potentiel énergétique de 44,1 millions de GJ ou encore 12,3 TWh. Ce qui représente 6,1 % de la production annuelle d'Hydro-Québec.

La plupart des procédés de biométhanisation des résidus organiques municipaux opèrent en mode mésophile ou thermophile, ce qui signifie que les bioréacteurs ont besoin d'être maintenus à des températures d'environ 37 et 55 °C. Il est estimé, que selon la technologie employée, une environ 10 à 30 % de la production de biogaz est utilisée pour le chauffage des bioréacteurs et que le reste est disponible pour diverses utilisations (CRAAQ, 2008; Association pour l'environnement et la sécurité aquitaine (APESA), 2007).

6.1 Utilisation thermique

Lorsque le biogaz produit par les procédés de digestion anaérobie est utilisé thermiquement, peu de traitements sont requis, puisque le biogaz est principalement constitué de méthane et de dioxyde de carbone. Le biogaz doit cependant être désulfuré pour éviter la corrosion des équipements et la formation d'éléments non désirables lors de la combustion. La désulfuration du biogaz peut être réalisée soit à l'aide de charbon actif, par lavage oxydatif du biogaz, de façon biologique ou encore grâce à des filtres moléculaires. La façon la plus répandue et la moins chère est le procédé biologique. Le procédé de désulfuration choisi doit cependant prendre en compte la teneur initiale en soufre, l'utilisation finale du biogaz, ainsi que les exigences demandées par les utilisateurs (Ricard, 2010).

L'assèchement du biogaz est également recommandé avant son utilisation. Cette étape permet d'augmenter le pouvoir calorifique du biogaz et d'éviter la condensation de l'eau dans les conduites et équipements. De plus, dans les climats nordiques comme celui du Québec, l'assèchement du biogaz évite la formation de glace pouvant restreindre l'écoulement du biogaz si une partie des conduites ou équipements est à l'extérieur. Finalement, lors de l'utilisation thermique, le biogaz doit normalement être comprimé, afin de lui permettre de circuler adéquatement dans les conduites et d'obtenir les vitesses d'écoulement recommandées par les fabricants d'équipements, tels que les brûleurs (Ricard, 2010).

Le biogaz utilisé thermiquement peut servir dans différents procédés industriels pour produire de l'eau chaude, de la vapeur ou encore chauffer directement de l'air. Les municipalités peuvent également avoir recours au biogaz pour chauffer des bâtiments. Lorsqu'il est utilisé sous forme thermique, le biogaz a une efficacité d'environ 80 à 90 % (Ricard, 2010; Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME), s.d.).

Au Québec, un projet très intéressant d'utilisation thermique de biogaz a été réalisé en 2008. L'usine de Cascades, située à Saint-Jérôme, utilise le biogaz produit par le site d'enfouissement de Sainte-Sophie. Malgré le fait que ce biogaz provienne d'un site d'enfouissement, ce projet démontre bien la faisabilité de l'utilisation du biogaz par une industrie. D'ailleurs, les procédés de digestion anaérobie ont un avantage sur la production de biogaz par les sites d'enfouissement, puisque ces derniers ne peuvent fournir pendant de longues périodes une quantité de biogaz élevée et constante. L'usine de Cascades possède une entente de dix ans avec l'entreprise qui exploite le site d'enfouissement. Cette entente prévoit la livraison de 36 Mm³/an de biogaz, ce qui permet à Cascades de réduire de 85 % son achat énergétique (Desjardins, 2008; Centre d'expertise sur les matières résiduelles (CEMR), s. d.).

6.2 Production d'électricité par combustion du biogaz

Afin d'envisager la production d'électricité à l'aide de biogaz, il faut s'assurer que les volumes sont suffisants et stables. Pour de petits centres de production, tels que les biodigesteurs agricoles, l'énergie produite peut être utilisée directement sur place. Pour des installations de plus grande envergure, l'énergie peut en partie servir au fonctionnement des équipements et en partie être vendue à un distributeur local.

Cependant, l'énergie produite par les procédés de biométhanisation étant normalement subventionnée, les producteurs vont préférer vendre à fort prix l'énergie produite et acheter à de plus faibles taux l'électricité sur le réseau pour le fonctionnement de l'usine. Par exemple, l'appel d'offres d'Hydro-Québec, pour l'achat d'électricité générée par la valorisation de la biomasse, a fixé un coût d'achat moyen de 0,112 \$/kWh. Les entreprises quant à elles payent l'énergie électrique, incluant la puissance, à un prix moyen de 0,07 \$/kWh. Il est donc possible de générer, malgré tout, une marge de profit de 0,042 \$/kWh sur les kWh consommés par l'usine (Hydro-Québec, 2009).

Le biogaz produit par la digestion anaérobie peut être utilisé pour produire de l'électricité, soit dans une turbine à gaz ou encore dans une chaudière qui activera une turbine à vapeur. La turbine à gaz nécessite moins d'infrastructures, mais exige un apport constant en biogaz et un taux de méthane relativement stable. Le procédé utilisant la turbine à vapeur tolère davantage les fluctuations dans l'alimentation du biogaz, autant en volume qu'en concentration. Ces procédés ont un rendement de conversion de l'énergie contenue dans le biogaz d'environ 30 à 35 % (ADEME, s. d.). Finalement, le traitement du biogaz pour la production d'électricité ne diffère pas de celui qui doit être réalisé pour l'utilisation thermique.

Le projet le plus en vue au Québec, est probablement celui de Gazmont à Montréal. Cette usine récupère le biogaz dans l'ancien site d'enfouissement de la carrière Miron pour produire de l'électricité. Le biogaz est brûlé dans une chaudière qui produit près de 100 tonnes de vapeur à l'heure. Cette vapeur active ensuite une turbine à condensation couplée à un alternateur d'une puissance nominale de 25 MW. La production électrique est d'environ 150 GWh par année (Ressources naturelles Canada, 2009a). Cependant, depuis la fermeture du site d'enfouissement en 2000, la production de biogaz ne satisfait plus les attentes et ce projet fait actuellement face à une possibilité de fermeture.

6.3 Cogénération

L'utilisation du biogaz dans un procédé de cogénération est probablement la solution la plus efficace lorsqu'il est question de produire de l'électricité, puisque la chaleur résiduelle du procédé est récupérée pour d'autres utilités. Ce type d'utilisation est en fait une combinaison des deux premiers usages présentés ci-haut.

Les conditions gagnantes doivent cependant être réunies pour qu'un procédé de cogénération soit mis en place. En effet, le volume de biogaz doit être suffisant, l'électricité doit trouver preneur, un réseau électrique pouvant accueillir la production doit être présent et un besoin thermique doit être présent tout au long de l'année pour rentabiliser la vente d'énergie thermique. La cogénération possède un rendement électrique d'environ 35 % et un rendement thermique d'environ 50 %, pour un rendement global variant entre 70 et 90 % (Ricard, 2010; Biogaz Énergie Renouvelable, 2009b; ADEME, s. d.).

L'avantage de cette technique réside dans le fait que 100 % du biogaz peut être utilisé pour la production d'électricité. En effet, lorsque seule la génération d'électricité est réalisée à l'aide du biogaz, une fraction de celui (environ 20 %) doit être conservée pour chauffer le biodigester. Quant au procédé de cogénération, la totalité du biogaz est acheminée à la turbine électrique. Une petite partie de la chaleur résiduelle est alors utilisée pour chauffer le biodigester, alors que le reste de l'énergie thermique sera utilisé par divers procédés (Ricard, 2010). Tel que décrit plus haut, la principale contrainte pour cet usage du biogaz est l'emplacement de l'usine de biométhanisation et de cogénération qui doit se trouver à la fois près des générateurs de matières organiques, d'un réseau électrique et des utilisateurs de la chaleur résiduelle.

6.4 Injection dans le réseau de gaz naturel

Contrairement à l'utilisation thermique ou électrique, le biogaz qui sera injecté dans un réseau de gaz naturel doit subir de nombreuses étapes de purification. En plus de la désulfuration, le dioxyde de carbone et l'eau doivent être retirés. Le gaz naturel ayant une concentration supérieure à 98 % en méthane, éthane et propane, le biogaz doit au moins respecter cette valeur en méthane pour ne pas atténuer les propriétés calorifiques du gaz dans le réseau de distribution. Les concentrations des éléments traces dans le biogaz sont généralement fixées par les distributeurs de gaz ou selon les exigences des entreprises qui utiliseront ce biogaz dans leurs opérations (CRAAQ, 2008; CMM, 2007). La conversion du biogaz en gaz naturel a une efficacité d'environ 85 % (ADEME, s. d.).

En Allemagne, il est prévu que d'ici la fin de 2010 près de 70 installations de biométhanisation injecteront leur biogaz dans le réseau de gaz naturel du pays. Les Pays-Bas, la Suède, l'Autriche ainsi que la Suisse possèdent également des installations de biométhanisation qui injectent leur production dans les réseaux de distribution nationaux

(Actu-Environnement, 2010). Ici, au Québec, le biogaz capté du site d'enfouissement de Saint-Thomas est traité puis injecté dans le gazoduc reliant Montréal et Québec. Plus de 7 Mm³ de gaz naturel sont ainsi substitués annuellement dans le réseau de Gaz Métro, grâce à ce projet réalisé par EBI Énergie (Gaz Métro, 2004; EBI Énergie, 2010).

6.5 Carburant pour les véhicules

Cette application est la plus exigeante pour le traitement du biogaz. Elle nécessite, en plus des étapes de désulfuration et de déshydratation, une étape de décarbonatation qui consiste à enlever le dioxyde de carbone. De plus, selon la composition du biogaz, des étapes d'élimination des organo-halogénés, des métaux lourds, des huiles et des poussières fines peuvent être nécessaires. Les différentes étapes de traitement peuvent faire perdre près de 8 % du méthane présent dans le biogaz. (Biogaz Énergie Renouvelable, 2009c; APESA, 2007). La transformation du biogaz en carburant pour les véhicules possède une efficacité d'environ 80 % (ADEME, s. d.).

Après avoir été traité, le biogaz a pratiquement les mêmes propriétés que le gaz naturel. Les véhicules qui utilisent le biogaz sont donc les mêmes qui utilisent le gaz naturel. La seule différence réside dans la provenance du gaz et de son impact environnemental, tel qu'il le sera décrit dans le prochain chapitre. Le gaz naturel ou le biogaz utilisé dans les véhicules peut être comprimé ou encore liquéfié. Ces technologies existent déjà depuis de nombreuses années et ont fait leurs preuves. En 2005, plus de 10 millions de véhicules dans le monde fonctionnaient au gaz naturel. Cette application est particulièrement présente en Californie, Australie, Argentine, Brésil, Italie, Pakistan, Inde, Chine et Iran. Aux États-Unis près de 110 000 véhicules fonctionnaient au gaz naturel en 2005, alors que ce nombre était évalué à plus de 12 000 pour le Canada (Gaz Métro, 2005).

Pour le moment, l'utilisation du gaz naturel ou du biogaz dans les véhicules est avantageuse seulement pour les véhicules à usage intensif, tels que les camions de marchandise, les autobus et les taxis. Concernant les postes de ravitaillement pour les véhicules, les provinces de l'Ouest canadien sont largement en avance sur le Québec. La Colombie-Britannique est la meneuse avec 22 stations libre-service où il est possible de se procurer du gaz naturel, puis suivent l'Alberta (12), la Saskatchewan (7), l'Ontario (6) et finalement le Québec n'en possède qu'une seule située à Boucherville (Canadian natural gas vehicle alliance (CNGVA), 2005).

Gaz Métro envisage cependant la construction de deux terminaux de ravitaillement en gaz naturel liquéfié sur l'axe Toronto-Montréal, afin d'encourager le développement de la flotte de véhicules au Canada. Le ministère des Finances du Québec (MFQ) a même déjà prévu dans son budget 2010-2011 des avantages fiscaux aux entreprises qui opteront pour cette technologie (Gaz Métro, 2005; MFQ, 2010).

Des neuf projets de biométhanisation des matières organiques résiduelles annoncés depuis l'automne 2009, au moins deux envisagent l'utilisation de biogaz pour le fonctionnement de véhicules. Il s'agit de Rivière-du-Loup qui désire alimenter une trentaine de véhicules lourds et de Sherbrooke qui planifie faire l'acquisition de 62 autobus fonctionnant au biogaz (Milot, 2010; Bombardier, 2010).

6.6 Production d'électricité par réaction chimique (pile à combustible)

Finalement, la dernière application présentée est la transformation du biogaz en électricité par les piles à combustible. Cette méthode est encore au stade de développement et demeure très coûteuse. Cependant, elle pourrait connaître une forte croissance lorsqu'elle sera mature, puisque son efficacité est estimée être entre 40 et 60 %, contrairement à 30 à 35 % pour les méthodes thermiques présentées à la section 6.2 (Électrigaz, 2010b). Deux possibilités existent pour produire de l'électricité à partir du biogaz et de la pile à combustible. La première option, consiste à produire de l'hydrogène par le reformage du méthane contenu dans le biogaz pour en alimenter une pile à combustible conventionnelle. L'hydrogène réagira avec l'oxygène pour produire de l'eau, de la chaleur et de l'électricité. La deuxième option consiste à utiliser une pile à combustible haute température de type SOFC (solid oxide fuel cell) qui peut être alimentée directement avec du méthane ou du biogaz. Ce type de pile à combustible ne nécessite pas de conversion du biogaz au préalable puisque le méthane du biogaz est transformé *in situ* en hydrogène par reformage interne direct (Pagnier, 2010).

6.7 Résumé des usages du biogaz et les potentiels énergétiques

Les moyennes pour le rendement des différents usages du biogaz sont présentées au tableau 6.1. Ces données permettent de constater que la transformation du biogaz en électricité est probablement l'usage le moins efficace, avec un rendement moyen de 33 %, si elle n'est pas couplée à la récupération de chaleur dans un procédé de cogénération. Le

rendement de la production d'électricité à l'aide des piles à combustible est relativement élevé (50 %), cependant les coûts de cette technologie ne sont pas encore compétitifs. Quant aux quatre autres usages, ils semblent être dans les mêmes ordres de grandeur avec des rendements variant entre 70 et 90 % selon les technologies utilisées et les volumes transformés.

Tableau 6.1 : Rendements énergétiques moyens des différents usages du biogaz

| Usages du biogaz | Thermique | Électrique | Perte | Rendement |
|---------------------------------|-----------|------------|-------|-----------|
| | (%) | (%) | (%) | (%) |
| Combustion | 85 % | - | 15 % | 85 % |
| Turbine à gaz ou à vapeur | - | 33 % | 65 % | 33 % |
| Cogénération | 50 % | 35 % | 15 % | 80 % |
| Injection réseau de gaz naturel | NA* | NA | 15 % | 85 % |
| Carburant | NA | NA | 15 % | 80 % |
| Pile à combustible | - | 50 % | 50 % | 50 % |

* NA : Non applicable

Les références sont disponibles dans le texte ci-haut

Le tableau 6.2 présente les potentiels de production d'énergie en fonction des usages du biogaz et des scénarios présentés au chapitre précédent. Ces résultats prennent en considération que le procédé de digestion anaérobie nécessite une moyenne de 20 % de la production de biogaz pour le chauffage des bioréacteurs.

Tableau 6.2 : Potentiels de production d'énergie selon les usages et scénarios

| Usages du biogaz | Scénarios | | | | |
|---------------------------------|-----------|-----|-------|-------|-------|
| | A | B | C | D | E |
| | (GWh/an) | | | | |
| Combustion | 425 | 851 | 1 276 | 1 701 | 8 342 |
| Turbine à gaz ou à vapeur | 165 | 330 | 495 | 661 | 3 239 |
| Cogénération | 400 | 801 | 1 201 | 1 601 | 7 851 |
| Injection réseau de gaz naturel | 425 | 851 | 1 276 | 1 701 | 8 342 |
| Carburant | 400 | 801 | 1 201 | 1 601 | 7 851 |
| Pile à combustible | 250 | 500 | 751 | 1 001 | 4 907 |

Le tableau 6.2 démontre que le maximum d'énergie pouvant être produit par la digestion anaérobie est de 8 342 GWh/an, si l'ensemble des matières organiques résiduelles disponibles au Québec était biométhanisé. Cependant, un scénario plus réaliste, tel que le scénario B, où 50 % des matières serait biométhanisé (avec seulement 10 % de matières

agricoles), permettrait l'utilisation d'un maximum de 1 276 GWh/an si le biogaz était utilisé sous forme thermique ou en cogénération. Il est bien entendu que l'ensemble du biogaz produit sur le territoire québécois ne sera pas utilisé de la même façon. Encore une fois, les volontés politiques et les contraintes physiques feront en sorte que le biogaz sera employé selon un amalgame des différents usages présentés dans ce chapitre.

6.8 Revenus potentiels de la vente d'énergie

Avec les informations recueillies jusqu'à présent, il est possible de déterminer les revenus potentiels générés par l'utilisation du biogaz et la vente de l'énergie. Tel que présenté dans le chapitre quatre, le coût de vente de l'électricité produite à partir de biomasse peut être établi à 0,112 \$/kWh (Hydro-Québec, 2009). Le coût de vente du biogaz sera considéré comme un coût évité d'achat de gaz naturel pour la plupart des scénarios. Ce coût d'achat se situait à 0,438 \$/m³ de gaz naturel (0,263 \$/m³ de biogaz) au 1^{er} janvier 2010 pour un tarif modulaire D_M (Gaz Métro, 2010b). Pour ce qui est de l'injection de biogaz dans le réseau de gaz naturel, le revenu considéré sera le prix d'achat de Gaz Métro, fixé à 0,208 \$/m³ de gaz naturel, soit environ 0,125 \$/m³ de biogaz (Gaz Métro, 2010a). Les revenus potentiels selon les usages du biogaz et les scénarios sont présentés au tableau 6.3. Le tableau présente également les revenus unitaires par mètre cube de biogaz utilisé afin de comparer les divers usages entre eux.

Tableau 6.3 : Revenus potentiels selon les usages du biogaz et les scénarios

| Usages du biogaz | Revenus biogaz | Scénarios | | | | |
|---------------------------------|----------------------|-----------|----|----|-----|-----|
| | | A | B | C | D | E |
| | (\$/m ³) | (M\$/an) | | | | |
| Combustion | 0,22 | 17 | 35 | 52 | 70 | 342 |
| Turbine à gaz ou à vapeur | 0,24 | 18 | 37 | 55 | 74 | 363 |
| Cogénération | 0,41 | 32 | 64 | 97 | 129 | 632 |
| Injection réseau de gaz naturel | 0,11 | 8 | 17 | 25 | 33 | 162 |
| Carburant | 0,21 | 16 | 33 | 49 | 66 | 322 |
| Pile à combustible | 0,36 | 28 | 56 | 84 | 112 | 550 |

Il est important de préciser que les données du tableau 6.3 ne prennent pas en considération les investissements nécessaires pour les équipements et infrastructures. Si seuls les revenus sont considérés, l'injection dans le réseau de gaz naturel est l'option qui est la moins intéressante avec des revenus de 0,11 \$/m³, alors que la cogénération est la

plus rentable avec 0,41 \$/m³. Malgré les revenus potentiellement intéressants de la production d'électricité à l'aide de piles à combustible (0,36 \$/m³), cette technologie n'est pas encore assez mature pour être implantée à grande échelle.

La production de carburant pour les véhicules, l'utilisation thermique (combustion) et la production d'électricité, à l'aide de turbines à gaz ou à vapeur, possèdent toutes des revenus similaires variant entre 0,21 et 0,24 \$/m³. De ces trois usages, l'utilisation thermique est probablement celle qui est la plus intéressante puisqu'elle nécessite moins d'investissements. Cependant le biogaz doit être utilisé près de l'unité de digestion anaérobie dans un équipement adapté.

Le tableau 6.3 démontre également que la production d'énergie à l'aide du biogaz peut générer des revenus annuels pouvant aller jusqu'à 632 M\$ par année si tous les résidus organiques étaient biométhanisés et utilisés dans des procédés optimaux. La réalité se situe cependant entre les scénarios A et C avec des revenus potentiels variant entre 8 et 97 M\$ par année, selon les usages employés.

L'analyse des revenus potentiels ne permet pas de déterminer quelle solution est la meilleure économiquement, puisque les coûts d'équipements et d'infrastructures ne sont pas connus. Il serait néanmoins intéressant d'approfondir l'analyse économique et technique afin de déterminer les coûts d'implantation et la complexité des différents usages du biogaz présentés dans ce chapitre.

7 GAINS ENVIRONNEMENTAUX

La biométhanisation des matières organiques résiduelles et l'utilisation du biogaz engendrent des gains environnementaux considérables. Ces gains peuvent être générés de deux façons distinctes : par la valorisation elle-même des matières organiques résiduelles en biogaz ainsi que par l'utilisation de ce biogaz. Le premier volet de ce chapitre consistera donc à identifier les gains environnementaux de la biométhanisation par rapport à des techniques conventionnelles de gestion des résidus organiques. Deuxièmement, les différents usages du biogaz permettent de substituer d'autres sources d'énergie dont la plupart sont non renouvelables et génèrent des impacts négatifs sur l'environnement. La seconde section permettra donc d'estimer les gains environnementaux attendus par l'utilisation du biogaz comme source d'énergie de substitution dans le contexte québécois. Finalement, les gains en émissions de gaz à effet de serre et en polluants atmosphériques en fonction des usages du biogaz et selon les différents scénarios seront exposés.

7.1 Impacts environnementaux des différents modes de gestion de la matière organique résiduelle

Cette section permettra de comparer les impacts environnementaux des différents modes de gestion des résidus organiques. Pour chacune des alternatives, une attention particulière sera accordée aux émissions de gaz à effet de serre (GES). La plupart des informations concernant les GES ont été extraites d'un rapport produit par la firme ICF Consulting, en 2005, pour le compte d'Environnement Canada et de Ressources naturelles Canada. D'ailleurs, le gouvernement canadien a développé, à partir de ce document, un outil de calcul automatisé pour l'évaluation des émissions de GES liées à la gestion des matières résiduelles.

La problématique des changements climatiques est une préoccupation constante depuis quelques années. Cependant, les impacts environnementaux de la gestion des matières organiques résiduelles ne sont pas seulement liés aux émissions de GES, mais également à la contamination des eaux, de l'air et des sols. Malgré le fait qu'il est plus difficile de trouver des données comparatives concernant ces divers impacts, ils seront néanmoins exposés pour démontrer les diverses conséquences qu'ont ces modes de gestion.

7.1.1 Enfouissement

Les lieux d'enfouissement peuvent être considérés comme des bioréacteurs où la matière organique est décomposée en mode anaérobie. Les gaz de décomposition sont généralement captés et brûlés ou encore utilisés pour leurs valeurs énergétiques. Au Québec, l'enfouissement des déchets est d'ailleurs responsable de la production d'environ 5 Mt_{eqCO2}/an, soit près de 6 % du bilan total d'émissions de GES (MDDEP, 2008c). Lorsque les biogaz d'un site d'enfouissement sont brûlés à l'aide de torchères, les émissions de CO₂ ne sont pas comptabilisées puisque le carbone de la matière organique est biosynthétique, c'est-à-dire qu'il provient de la masse végétale et entre dans le cycle naturel du carbone. Malheureusement, les systèmes de captation dans les sites d'enfouissement ne sont pas infaillibles. Il est estimé que ces systèmes ont une efficacité moyenne d'environ 75 % (Environnement Canada, 2009a). Le méthane qui s'échappe des sites d'enfouissement possédant un pouvoir de réchauffement climatique 21 fois supérieur au CO₂, doit donc être comptabilisé dans le bilan d'émissions de GES. Les résidus alimentaires (putrescibles) et ceux de jardins (verts) n'ont pas les mêmes facteurs d'émissions, puisque les résidus verts contiennent une plus forte concentration de carbone non biodégradable. En théorie, ce carbone qui demeure dans les sites d'enfouissement pourrait être considéré comme un puits de carbone, mais les ententes internationales, tel que les lignes directrices du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) ne le comptabilisent pas ainsi. En considérant que les matières organiques sont composées à parts égales de résidus putrescibles et verts, le facteur d'émission de GES pour l'enfouissement de celles-ci est de 0,66 t_{eqCO2}/tonne. Ce facteur inclut le transport (ICF Consulting, 2005).

En plus de la production de GES, la matière organique dans les sites d'enfouissement est à l'origine d'émissions de composés azotés et soufrés qui contribuent à la génération de pluies acides. La matière organique libère également des composés organiques volatils (COV), de l'ammoniac et des organochlorés (Recyc-Québec, 2010; CMM, 2007). Les COV qui réagissent avec l'ozone troposphérique sont à l'origine de la formation du smog urbain.

L'enfouissement des matières organiques est également responsable de la production d'une partie du lixiviat dans les sites d'enfouissement. En effet, avec leurs hautes teneurs en eau et la production d'acide, les matières organiques contribuent à lixivier des

contaminants, tels que les métaux lourds, les chlorures ainsi que les sulfates et à les entraîner dans les eaux souterraines et de surfaces (Recyc-Québec, 2010; CMM, 2007).

7.1.2 Compostage

Lors du compostage, les matières organiques sont, entre autres, dégradées en acides fulviques et humiques, en humine, en différents minéraux et en CO₂ (Olivier, 2007). Si les étapes de compostage sont bien réalisées, il ne devrait pas y avoir de production de méthane et les émissions de GES devraient être considérées nulles puisque le carbone du CO₂ est biosynthétique. Dans ce cas, seules les émissions liées aux transports et au procédé doivent être comptabilisées dans le bilan des GES. Il est estimé que la fabrication de compost génère 0,02 t_{eqCO2}/tonne de matière organique traitée (ICF Consulting, 2005).

La production de compost génère également des lixiviats qui sont captés par des drains ou dans des fossés. Ce lixiviat est riche en matière organique et doit généralement être traité avant d'être envoyé dans les réseaux d'égouts ou dans les milieux récepteurs (Olivier, 2007).

7.1.3 Épandage direct au sol

Le secteur de l'agriculture est responsable d'environ 7,5 % (6,4 Mt_{eqCO2}/an) des émissions totales de GES du Québec. De ce nombre, près d'un million de tonnes équivalent CO₂ proviennent de la gestion des fumiers et lisiers. Considérant la génération de 30 Mt de fumiers et lisiers au Québec, un facteur d'émission de GES de 0,03 t_{eqCO2}/tonne est déterminé. Les GES émis des fumiers et lisiers sont principalement du méthane et du N₂O (MDDEP, 2008c). Ce facteur d'émission ne tient pas compte des transports liés à la manutention des fumiers et lisiers. De plus, l'épandage des biosolides agricoles a été identifié comme l'une des causes qui contribuent à l'eutrophisation des lacs et des rivières.

7.1.4 Production de biodiesel

La production de biodiesel peut être intéressante si elle permet de valoriser des matières organiques résiduelles, puisque son impact environnemental dépend de l'origine des matières utilisées pour sa fabrication. Rothsay Biodiesel, la seule entreprise implantée au Québec qui produit du biodiesel, mentionne que selon l'analyse de cycle de vie, leur produit permet de réduire les émissions de GES de 78 % par rapport au diesel

conventionnel (Rothsay, 2009). Puisque le biodiesel est d'origine végétale, sa combustion, si elle est complète, ne devrait pas produire de GES au sens de la définition. Les GES proviennent donc de sa fabrication. Considérant que le diesel émet 2,79 t_{eqCO2}/tonne (Environnement Canada, 2010), la production de biodiesel émet donc 0,61 t_{eqCO2}/tonne.

7.1.5 Incinération

La combustion des matières organiques produit du CO₂ qui ne doit pas être comptabilisé, mais produit également du N₂O. Malgré que la production de N₂O soit relativement faible, ce gaz possède un pouvoir de réchauffement climatique 310 fois supérieur à celui du CO₂ (MAPAQ, 2009b). En considérant le transport, l'incinération des matières organiques émet 0,05 t_{eqCO2}/tonne (ICF Consulting, 2005).

Si le bilan des GES de l'incinération est relativement faible, cette technologie émet de grandes quantités de polluants atmosphériques qui doivent être traités dans les gaz de cheminée. L'incinération de toutes les matières résiduelles confondues est responsable de l'émission d'oxydes de soufre (SO₂ et SO₃), d'oxydes d'azote (NO_x), d'acides (HCl et HF), de monoxyde de carbone (CO), d'hydrocarbures insaturés, de métaux, de dioxines et de furanes (CMM, 2007). Les matières organiques génèrent plus particulièrement des NO_x, du CO, des dioxines et des furanes (Olivier, 2007).

L'une des plus grandes problématiques environnementales de l'incinération réside dans la production de cendres. Ce procédé peut générer plus de 250 kg/t de ces cendres (siccité de 82 %) dans un procédé où l'ensemble des matières résiduelles y est introduit. Les cendres volantes peuvent contenir des métaux toxiques comme le plomb, le cadmium, le cuivre, le zinc et de faibles quantités de dioxines et furanes. Les cendres volantes doivent donc être stabilisées avant d'être enfouies dans des centres spécialisés. Elles peuvent également être décontaminées par lavage pour en retirer les matières dangereuses (CMM, 2007).

7.1.6 Digestion anaérobie

Tout comme le compostage, les émissions de GES provenant de la digestion anaérobie devraient être considérées nulles puisque le carbone est biosynthétique. Il faut cependant être certain que le biogaz produit sera entièrement capté et utilisé correctement, puisque

le méthane possède un pouvoir de réchauffement climatique 21 fois supérieur à celui du CO₂. Le facteur d'émission de GES pour les procédés de biométhanisation est estimé à 0,01 t_{eqCO2}/tonne, dû aux transports des résidus organiques et à l'énergie consommée par le procédé (ICF Consulting, 2005).

En plus du méthane et du CO₂, le biogaz contient également certains composés organiques volatils (COV), des acides sulfureux (H₂S) et de l'azote ammoniacal. Normalement, le biogaz est désulfuré et les autres composés présents dans le biogaz sont détruits ou transformés lors de la combustion de ce dernier (CMM, 2007).

La digestion anaérobie est très intéressante pour la production de méthane, mais génère également le digestat qui doit être traité. La partie boueuse du digestat est transformée en compost à l'aide d'agents structurants. Il est estimé que la production de compost est équivalente à 30 % de la masse des intrants. La partie liquide du digestat, estimée à 0,27 m³/t traitée, est en partie recirculée dans le bioréacteur, alors que l'autre partie doit être traitée pour abaisser à un seuil acceptable la concentration en charge organique (CMM, 2007).

L'ensemble des impacts environnementaux pour chacun des modes de gestion de la matière organique résiduelle est présenté au tableau 7.1.

Tableau 7.1 : Impacts environnementaux des différents modes de gestion de la matière organique résiduelle

| Modes de gestion | GES | Autres impacts environnementaux |
|-------------------------|--------------------------|---|
| | (kg _{eqCO2} /t) | |
| Enfouissement | 0,66 | Production de lixiviat. Contribution aux pluies acides et au smog urbain. |
| Compostage | 0,02 | Production de lixiviat. |
| Épandage au sol | 0,03 | Contribution à l'eutrophisation des lacs et des rivières. |
| Production de biodiesel | 0,61 | n.d. |
| Incinération | 0,05 | Émission de polluants atmosphériques, dont les NO _x , le CO, les dioxines et les furanes. Production de cendres volantes et de boues. |
| Digestion anaérobie | 0,01 | Production de digestat. |

Les références sont disponibles dans le texte ci-haut

7.2 Gains environnementaux liés à la substitution d'énergie par le biogaz

En plus de permettre de disposer de la matière organique de façon efficace, la digestion anaérobie permet de produire des quantités considérables de biogaz. Tel que décrit dans le chapitre précédent, le biogaz peut être utilisé de diverses façons, ce qui entraîne des gains environnementaux par la substitution d'autres sources d'énergie plus polluantes. Selon les usages, le biogaz peut substituer du gaz naturel, du mazout léger, du propane, de l'électricité et du diesel. Il n'est cependant pas exclu que le biogaz puisse substituer d'autres sources d'énergie plus marginales, telles que le mazout lourd et le bois. Le mazout lourd est encore utilisé dans les industries et dans la centrale thermique de Tracy, alors que le bois est souvent utilisé dans des chaudières à la biomasse. Le charbon est encore utilisé dans certains procédés industriels, mais ne sera pas analysé puisque son utilisation est généralement spécifique, comme dans les fours de cimenteries. Tous ces types d'énergie sont présentés dans le tableau 7.2, en ordre croissant d'émissions équivalent CO₂. Puisque les sources d'énergie n'ont pas toutes les mêmes unités, elles sont comparées selon leur intensité énergétique en gigajoule (GJ).

Tableau 7.2 : Facteurs d'émission de GES de différentes sources d'énergie

| Sources d'énergie | Facteurs d'émission | | Intensité énergétique | | Facteurs d'émission |
|-------------------|------------------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|-------------------------|
| | kg _{eqCO2} /(unité) | | GJ/(unité) | | kg _{eqCO2} /GJ |
| Électricité | 0,00115 ⁽²⁾ | kg/kWh | 0,0036 ⁽³⁾ | GJ/kWh | 0,32 |
| Bois | 0,0073 ⁽¹⁾ | kg/kg | 0,018 ⁽³⁾ | GJ/kg | 0,40 |
| Gaz naturel | 1,89 ⁽¹⁾ | kg/m ³ | 0,038 ⁽³⁾ | GJ/m ³ | 49,4 |
| Propane | 1,54 ⁽¹⁾ | kg/l | 0,026 ⁽³⁾ | GJ/l | 60,5 |
| Essence | 2,35 ⁽¹⁾ | kg/l | 0,035 ⁽⁴⁾ | GJ/l | 67,9 |
| Diesel | 2,69 ⁽¹⁾ | kg/l | 0,039 ⁽⁴⁾ | GJ/l | 69,6 |
| Mazout léger | 2,73 ⁽¹⁾ | kg/l | 0,039 ⁽³⁾ | GJ/l | 70,7 |
| Mazout lourd | 3,15 ⁽¹⁾ | kg/l | 0,042 ⁽⁴⁾ | GJ/l | 75,4 |

(1) Environnement Canada (2010)

(2) ICF Consulting (2005)

(3) Ressources naturelles Canada (2009b)

(4) Office national de l'énergie (2010)

C'est sans surprise que l'électricité est la source d'énergie qui produit le moins de GES. Il faut cependant se rappeler que ce facteur d'émission est spécifique au Québec qui génère près de 97 % de son électricité par des ressources renouvelables. Le tableau 7.2 montre également qu'après l'électricité, la source d'énergie qui émet le moins de GES est le bois.

Le faible facteur d'émission de GES du bois s'explique par le fait que le carbone contenu dans le bois est biosynthétique, donc que ses émissions de CO₂ ne doivent pas être comptabilisées. La combustion du bois émet cependant du CH₄ et du N₂O qui doivent être comptabilisés puisqu'ils possèdent des pouvoirs de réchauffement climatique respectifs de 21 et 310 par rapport à celui du CO₂. Cette logique peut également être appliquée pour évaluer les émissions de GES de la combustion du biogaz. Il a été calculé qu'en ne prenant compte que des émissions de CH₄ et de N₂O, le gaz naturel émettrait 0,30 kg_{eqCO2}/GJ (Environnement Canada, 2010). Cette valeur peut donc être utilisée pour extrapoler les émissions de GES de la combustion du biogaz. Il est intéressant de constater que cette valeur est inférieure aux émissions de GES de l'électricité.

Il faut cependant faire attention aux généralisations en ne regardant que les émissions de gaz à effet de serre. La combustion des diverses énergies est à l'origine de nombreuses autres émissions atmosphériques, telles que les NO_x, SO_x, CO, COV et PM₁₀. Il en est de même pour les impacts écologiques de l'exploitation de ces énergies qui peut contaminer les eaux et les sols en plus de détruire des habitats naturels. Une analyse du cycle de vie complète des différentes sources d'énergie et de leurs utilisations serait nécessaire afin de déterminer lesquelles sont les plus avantageuses au plan environnemental.

Le tableau 7.3 présente les facteurs d'émissions de cinq polluants atmosphériques pour les différentes sources d'énergie qui peuvent être potentiellement substituées par le biogaz. Les facteurs d'émissions du tableau 7.3 ont été sélectionnés selon les équipements les plus susceptibles d'être rencontrés dans les projets d'utilisation de biogaz. Ainsi, pour le bois, le gaz naturel, le mazout léger et le mazout lourd, il a été considéré que la substitution se ferait dans un contexte de production de chaleur industrielle. Pour ce qui est du diesel, il devrait être remplacé pour l'alimentation de véhicules routiers, tels qu'il l'est envisagé dans les projets de biométhanisation de Rivière-du-Loup et de Sherbrooke. Il a également été considéré que l'essence serait substituée pour l'alimentation d'équipements lourds, tels que des pelles mécaniques et des chariots élévateurs. Finalement, la consommation d'électricité n'émettant pas de contaminants atmosphériques lors de son utilisation, les émissions liées à la production de cette énergie ont été retenues.

Tableau 7.3 : Facteurs d'émissions de différents contaminants atmosphériques selon les sources d'énergie et les équipements

| Sources d'énergie | Équipements | Facteurs d'émission | | | | |
|-------------------|------------------------|---------------------|-----------------|------|------------------|------|
| | | NO _x | SO _x | CO | PM ₁₀ | COV |
| | | (g/GJ) | | | | |
| Électricité | Production | 7,4 | 3,1 | 1,6 | 0,24 | 0,16 |
| Bois | Chaudière industrielle | 55 | 6,3 | 150 | 125 | 4,3 |
| Gaz naturel | Chaudière industrielle | 80 | 0,3 | 35,2 | 3,2 | 2,3 |
| Propane | Chaudière industrielle | 89 | 4,8 | 15 | 2,8 | 0,92 |
| Essence | Équipement lourd | 701 | 36 | n.d. | 43 | 776 |
| Diesel | Véhicule routier | 936 | 113 | 756 | 32 | 71 |
| Mazout léger | Chaudière industrielle | 74 | 86 | 15 | 3,1 | 0,59 |
| Mazout lourd | Chaudière industrielle | 135 | 531 | 14 | 28 | 2,1 |

Inspiré de Enviro-Accès (2005)

Le tableau 7.3 permet de constater que malgré le fait que certaines sources d'énergie aient un bilan carbone intéressant, leur utilisation peut engendrer des impacts considérables sur l'environnement et la santé humaine. Par exemple, la combustion du bois, qui émet pratiquement la même quantité de gaz à effet de serre que la production d'électricité, est la source d'énergie qui produit le plus de PM₁₀. Les particules en suspension plus petites que 10 microns (PM₁₀) sont néfastes pour la santé humaine et sont à l'origine de nombreuses maladies pulmonaires (Environnement Canada, 2003).

Selon le tableau 7.3, la substitution des carburants pour les véhicules à essence et au diesel permettrait de générer les meilleurs gains environnementaux pour ce qui est des émissions de polluants atmosphériques. Cette situation s'explique probablement par le fait que les autres sources d'énergie ont été évaluées pour des procédés industriels ayant des combustions et des systèmes de nettoyage des gaz de combustion plus efficaces que les véhicules routiers et les équipements lourds. Vient ensuite l'utilisation du mazout lourd qui produit des quantités considérables de polluants atmosphériques par rapport aux autres sources d'énergie utilisées par les industries. D'ailleurs, le gouvernement québécois, par l'entremise de l'Agence de l'efficacité énergétique (AEE) et du *Plan d'action sur les changements climatiques 2006-2012*, a mis en place le *Programme de réduction de consommation de mazout lourd* afin d'encourager les industries à convertir leurs équipements vers des sources d'énergie moins polluantes (AEE, 2010).

Encore une fois, la source d'énergie qui est la plus saine est la production d'énergie électrique, qui libère à peine quelques fractions des polluants atmosphériques attribués à l'utilisation des autres sources d'énergie.

7.3 Gains d'émissions de GES selon les différents usages du biogaz

Cette section vise à déterminer les gains d'émissions de GES selon les différents usages du biogaz et les cinq scénarios élaborés dans les chapitres cinq et six. Les calculs s'appuient sur les rendements des usages du biogaz résumés dans le tableau 6.1 du précédent chapitre. Il est important de rappeler que ces données prennent en considération que 20 % du biogaz est utilisé pour le chauffage des biodigesteurs. Cette fraction n'est donc pas comptabilisée dans les gains d'émissions de GES de cette section.

Tel que présenté à la section précédente, la combustion des hydrocarbures génère entre 49 et 75 $\text{kg}_{\text{eqCO}_2}/\text{GJ}$, selon la nature du combustible. Afin de demeurer prudent, la valeur la plus faible d'émissions de GES sera utilisée, soit celle de la combustion du gaz naturel, pour la production d'énergie thermique. Cette hypothèse n'est peut-être pas tout à fait juste, mais devrait représenter la grande majorité des projets de substitutions, puisque le gaz naturel est l'une des sources d'énergie les moins chères et les plus utilisées dans les industries québécoises. Pour ce qui est de la production de carburant, la valeur d'émission de GES du diesel sera utilisée. Les résultats de ces calculs sont exposés au tableau 7.4.

Tableau 7.4 : Gains d'émission de GES selon les usages du biogaz et les scénarios

| Usages du biogaz | Émissions GES | Scénarios | | | | |
|---------------------------------|--|---------------------------|------|------|------|-------|
| | | A | B | C | D | E |
| | ($\text{kg}_{\text{eqCO}_2}/\text{m}^3$) | (kt _{eqCO2} /an) | | | | |
| Combustion | 0,97 | 76 | 151 | 227 | 302 | 1 481 |
| Turbine à gaz ou à vapeur | 0,0024 | 0,19 | 0,38 | 0,57 | 0,76 | 3,7 |
| Cogénération | 0,57 | 45 | 89 | 134 | 178 | 875 |
| Injection réseau de gaz naturel | 0,97 | 76 | 151 | 227 | 302 | 1 481 |
| Carburant | 1,28 | 100 | 200 | 300 | 401 | 1 964 |
| Pile à combustible | 0,0037 | 0,29 | 0,58 | 0,86 | 1,2 | 5,6 |

Les résultats du tableau 7.4 démontrent clairement que la production d'électricité, sans récupération de la chaleur, est l'utilisation du biogaz qui génère le moins de gains d'émissions de GES. Bien entendu cette donnée a été calculée dans un contexte

québécois. Considérant que le Québec pourrait exporter cette énergie électrique vers des provinces ou des états où la production d'énergie est majoritairement faite à partir du charbon, la donnée pourrait être toute autre. Il serait également intéressant d'étudier la possibilité d'utiliser le biogaz produit par digestion anaérobie dans l'une des chaudières de la centrale thermique de Tracy qui consomme du mazout lourd (Hydro-Québec, 2010b). Cette centrale thermique est la principale source d'émission de GES d'Hydro-Québec. De plus, cette alternative permettrait de faire fonctionner une ou plusieurs turbines tout au long de l'année et de rentabiliser les installations en place. De plus, elle permettrait d'éviter des investissements d'implantation d'une centrale spécifique à la production d'électricité à l'aide du biogaz ainsi que d'un nouveau réseau de transport d'électricité.

L'analyse du tableau 7.4 permet également de constater que l'usage du biogaz qui génère le plus des gains d'émissions de GES est la transformation du biogaz en carburant de remplacement pour le diesel. Selon le scénario E où 100 % des matières organiques résiduelles du Québec seraient biométhanisées, la production de carburant de substitution au diesel permettrait des gains d'émissions de GES de 1,964 millions de tonnes équivalent CO₂ par année. Cette valeur représenterait une réduction de 2,3 % des émissions totales de GES au Québec. Cependant, les scénarios les plus réalistes, où 25 à 75 % des matières organiques résiduelles municipales, des ICI et des boues ainsi que 10 % des biosolides agricoles seraient traités par digestion anaérobie, permettraient des réductions de 100 à 300 kt_{eqCO2}/an. Tel que présenté au tableau 7.3, la combustion du diesel dans les véhicules routiers produit également des quantités considérables de polluants atmosphériques. Dans ces circonstances, il est possible d'affirmer que les villes de Rivière-du-Loup et de Sherbrooke ont fait les choix les plus écologiques, pour ce qui est des émissions de GES et de polluants atmosphériques, afin de valoriser leur biogaz. Il sera intéressant de voir si d'autres municipalités, qui ont annoncé des projets de digestion anaérobie, emboîteront le pas dans cette direction.

L'utilisation du biogaz sous forme thermique ou encore son injection dans le réseau de gaz naturel sont néanmoins des usages qui permettent de générer des gains d'émissions de GES importants. Les scénarios A et C présentent des gains d'émissions de GES variant de 76 à 227 kt_{eqCO2}/an. De plus, ces deux usages sont technologiquement simples et demandent des investissements moindres.

CONCLUSION

L'engouement créé par le dévoilement du nouveau *Projet de politique québécoise de gestion des matières résiduelles* et du *Programme de traitement des matières organiques par biométhanisation et compostage* a incité, dans les derniers mois, huit municipalités à faire l'annonce de l'implantation de centres de traitement de la matière organique résiduelle par digestion anaérobie. À eux seuls, ces projets pourraient permettre le traitement annuel de 900 000 tonnes de matières organiques résiduelles. La volonté politique étant bien présente, l'objectif principal de cet essai consistait à faire l'évaluation du potentiel énergétique et des gains environnementaux qui peuvent être générés par la biométhanisation des matières organiques résiduelles au Québec.

Après avoir exposé l'origine et les lignes directrices du nouveau projet de politique, le bilan massique des matières organiques résiduelles a permis de déterminer les quantités potentiellement disponibles pour les projets de biométhanisation. Ce bilan est à la base de tous les calculs effectués dans ce document. Des sources fiables et diverses ont donc été utilisées pour sa réalisation.

Le traitement de la matière organique par digestion anaérobie fait compétition à d'autres modes de mise en valeur, comme l'enfouissement, le compostage, l'épandage sur les sols et la production de biodiesel. L'analyse des coûts de traitement a cependant démontré la compétitivité de la biométhanisation avec des coûts de 107 \$/t, par rapport à des coûts de compostage d'environ 85 \$/t, pour la ville de Montréal, et d'enfouissement de 50 à 150 \$/t, sans compter la majoration proposée de la redevance à l'enfouissement de 9,50 \$/t. De plus, l'analyse a permis d'exposer de nombreuses sources de financement qui permettent d'implanter et de réduire les coûts d'immobilisation des centres de biométhanisation.

Afin d'évaluer le potentiel énergétique de la biométhanisation des matières organiques résiduelles au Québec, cinq scénarios ont été élaborés. Cette stratégie permet de donner un aperçu plus réaliste de ce potentiel québécois. En plus d'être utilisés pour évaluer les potentiels de production de biogaz, ces scénarios ont permis d'évaluer les potentiels de production d'énergie selon les usages, ainsi que les gains environnementaux potentiels. Puisque le *Programme de traitement de matières organiques par biométhanisation et compostage* n'autorise l'incorporation que de 10 % de matières organiques d'origine agricole dans les projets, quatre des scénarios respectent ce critère en incorporant soit 25,

50, 75 ou 100 % des autres matières organiques résiduelles potentiellement disponibles. Le dernier scénario inclut tous les résidus organiques, peu importe leurs origines et permet de fixer la limite supérieure.

L'évaluation du potentiel québécois de production de biogaz par la biométhanisation contrôlée a permis d'estimer qu'entre 98 et 1 917 millions de mètres cubes de biogaz pourraient être générés. La valeur minimum peut être représentative des neuf projets municipaux annoncés depuis l'automne 2009.

Pour ce qui est des usages du biogaz, l'étude a démontré que l'utilisation thermique par combustion, l'injection dans le réseau de Gaz Métro, la cogénération et la production de carburant étaient beaucoup plus efficaces que la production d'électricité à l'aide de turbines à gaz ou à vapeur et à partir de piles à combustible. Les différents scénarios démontrent des potentiels de production énergétique variant de 400 à 8 342 GWh/an pour les quatre usages du biogaz les plus efficaces. La production d'électricité par les deux usages analysés a un potentiel variant de 165 à 4 907 GWh/an selon les scénarios.

L'analyse économique de la vente de ces énergies a démontré que la cogénération génère les plus grands revenus (0,41 \$/m³). Viennent ensuite la production d'électricité à l'aide de piles à combustible (0,36 \$/m³), la production d'énergie électrique à l'aide de turbines à gaz ou à vapeur (0,24 \$/m³), la valorisation thermique (0,22 \$/m³), la production de carburant (0,21 \$/m³) et l'injection dans le réseau de gaz naturel (0,11 \$/m³). Les revenus potentiels selon les scénarios et les usages varient entre 8 et 632 M\$/an.

L'analyse des impacts environnementaux a démontré que la biométhanisation est le mode de traitement qui génère le moins de GES, suivi de près par le compostage, l'incinération et l'épandage des biosolides. Selon les scénarios, les gains d'émission de GES peuvent être de 45 000 à 1 964 000 t_{eqCO2}/an, si la production d'énergie électrique sans récupération de chaleur est exclue. Pour ce qui est des polluants atmosphériques, l'analyse a démontré que la production de carburant de substitution au diesel et à l'essence représentait généralement les meilleurs gains d'émissions de polluants atmosphériques et que la substitution de l'électricité était la moins intéressante.

L'ensemble des modes de traitement de la matière organique, des potentiels de production de biogaz, d'énergie et des gains environnementaux constitue une matrice complexe qui doit également être jumelée aux contextes économique et social. Les projets qui seront implantés sur le territoire québécois seront constitués d'un amalgame des options présentées dans ce document. Les municipalités possédant des contraintes et des particularités propres à elles-mêmes, chaque projet de digestion anaérobie devra être analysé dans son contexte spécifique. Cet essai trace néanmoins le portrait des potentiels énormes qu'offre la biométhanisation des matières organiques résiduelles au Québec.

Il est encourageant de constater l'effervescence qui entoure le nouveau *Projet de politique québécoise de gestion des matières résiduelles* et le *Programme de traitement des matières organiques par biométhanisation et compostage*. Par l'entremise de ceux-ci, le gouvernement québécois a clairement indiqué sa volonté politique tout en joignant les fonds nécessaires pour arriver ses fins. Les fonds actuellement disponibles pourraient permettre le traitement par digestion anaérobie d'environ 50 % de toutes les matières organiques résiduelles au Québec avec l'incorporation de 10 % de biosolides agricoles. Les principaux programmes de financement de la digestion anaérobie se terminent d'ici 2014 et constituent une première phase de financement qui devra être reconduite pour atteindre l'objectif de mettre en valeur 100 % des résidus organiques d'ici 2020. Pour le moment, les efforts semblent donc être à la hauteur des objectifs. Il est certain que ce virage permettra d'encourager la mise en valeur des matières organiques résiduelles dans le respect des 3RV, ainsi que de contribuer à l'atteinte des objectifs du *Plan d'action sur les changements climatiques* et à ceux de la *Stratégie énergétique du Québec*. D'ailleurs, la biométhanisation semble être tout à fait adaptée à l'atteinte conjointe de ses trois grandes stratégies gouvernementales.

RÉFÉRENCES

- Actu-Environnement (2004). La méthanisation pour éliminer ses déchets ménagers à Montpellier. Énergies. Publié le 05/08/2007. [En ligne]. <http://www.actu-environnement.com/ae/news/693.php4> (page consultée le 4 août 2010).
- Actu-Environnement (2006). Biogaz : quelles perspectives en France? Énergies. Publié le 04/05/2010. [En ligne]. http://www.actu-environnement.com/ae/news/biogaz-france-allemande-achat-injection-reseau-grenelle2_10161.php4 (page consultée le 3 août 2010).
- Agence de l'efficacité énergétique (AEE) (2010). Programme de réduction de consommation de mazout lourd. Programmes et aides financières destinés aux industries. [En ligne]. <http://www.aee.gouv.qc.ca/clientele-affaires/industries/programmes-et-aide-financiere-destines-aux-industries/programme-de-reduction-de-consommation-de-mazout-lourd/> (page consultée le 14 août 2010).
- Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) (s. d.). Le biogaz. [En ligne]. http://www.ademe.fr/midi-pyrenees/a_2_19.html (page consultée le 11 août 2010).
- Agence internationale de l'énergie (AIE) (2006). Renewable energy : RD&D priorities. Insights from IEA technology programmes. [En ligne]. <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2006/renewenergy.pdf> (page consultée le 2 août 2010).
- Association des organismes municipaux de gestion des matières résiduelles (AOMGMR) (2001). Guide d'élaboration d'un plan de gestion des matières résiduelles. [En ligne]. <http://www.aomgmr.com/guide/Guide%20de%20l%27AOMGMR.pdf> (page consultée le 07 mai 2010).
- Association pour l'environnement et la sécurité aquitaine (APESA) (2007). Méthanisation et production de biogaz – État de l'art. [En ligne]. http://www.apesa.fr/iso_album/etat_de_l_art_methanisation-biogaz.pdf (page consultée le 11 août 2010).
- Association québécoise de la production d'énergie renouvelable (AQPER) (2010). Biométhanisation des déchets : les élus acceptent le projet. [En ligne]. http://www.apesa.fr/iso_album/etat_de_l_art_methanisation-biogaz.pdf (page consultée le 1^{er} septembre).
- Audet, Y. (2010). La Vache à Maillotte vire au vert. Canoe.ca. Publié le 12 juillet 2010. [En ligne]. <http://lechoabitibien.canoe.ca/webapp/sitepages/content.asp?contentid=149693&id=296> (page consultée le 6 août 2010).
- Beauregard, S. (2008). La méthanisation du lisier de porcs dans une optique de développement durable. COGENOR Lanaudière. [En ligne]. <http://www.mapaq.gouv.qc.ca/NR/rdoonlyres/E3B5CBEE-829D-4352-BEC4-96C8E122497C/14401/Lamthanisationdulisierdansuneoptiquededveloppement.pdf> (page consultée le 6 août 2010).

- Bergeron, U. (2009). Salaberry-de-Valleyfield transforme ses déchets en biodiesel. Vision durable. [En ligne]. <http://www.visiondurable.com/actualites/entreprises/6759-salaberry-de-valleyfield-transforme-ses-dechets-en-biodiesel> (page consultée le 10 août 2010).
- Bergeron, U. (2010). La biométhanisation débarque à Montréal. Vision durable. [En ligne]. <http://www.visiondurable.com/actualites/entreprises/6810-la-biomethanisation-debarque-a-montreal> (page consultée le 4 août 2010).
- Biglow, L. (s. d.). Expérience opérationnelle de bio-raffinage chez Tembec Témiscaming. Tembec. [En ligne]. http://www.fpinnovations.ca/pdfs/13h15-Biglow-Ethanol_Cellulosique-FR.pdf (page consultée le 8 août 2010).
- Biogaz Énergie Renouvelable (2009a). Potentiel Méthanogène. [En ligne]. http://www.biogaz-energie-renouvelable.info/dechets_potentiel_methane.html (page consultée le 8 août 2010).
- Biogaz Énergie Renouvelable (2009b). Cogénération du biogaz. [En ligne]. http://www.biogaz-energie-renouvelable.info/biogaz_cogeneration.html (page consultée le 9 août 2010).
- Biogaz Énergie Renouvelable (2009c). Épuration du biogaz. [En ligne]. http://www.biogaz-energie-renouvelable.info/biogaz_epuration.html (page consultée le 9 août 2010).
- Biogaz Québec (2010). Association Québécoise du biogaz. [En ligne]. <http://www.biogazquebec.ca/> (page consultée le 7 août 2010).
- Bio-Terre Systems Inc. (2010). Digestion Anaérobique; : Qu'est-ce que la digestion anaérobique?. [En ligne]. <http://www.bioterre.com/digestion.php> (page consultée le 26 juillet 2010).
- Bio-Terre Systems (s. d.). Traitement anaérobique à basse température du lisier de porc et valorisation énergétique du biogaz. Bio-Terre Systems. [En ligne]. http://www.bioterre.com/upload/Energie_ferme_St-Hilaire.pdf (page consultée le 6 août 2010).
- Biothermica, (2009). Valorisation du biogaz : Exemple de projets. [En ligne]. http://www.biothermica.com/fr/3_3_1_sample.html (page consultée le 30 mars 2010).
- Bipfubusa, M., N'Dayegamiye, A. et Antoun, H. (2004). Effets de boues mixtes de papetières fraîches et compostées sur l'agrégation du sol, l'inclusion et la minéralisation du C dans les macro-agrégats stables à l'eau. Faculté des Sciences de l'Agriculture et de l'Alimentation. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement. [En ligne]. www.bashanfoundation.org/hani/hanifreshpaper.pdf (page consultée le 27 juillet 2010).
- Bombardier, D. (2010). Projet de 127 M\$ pour la biométhanisation des déchets. LaTribune. Publié le 1er juin 2010. [En ligne]. <http://www.cyberpresse.ca/la-tribune/estrie/201006/01/01-4285601-projet-de-127-m-pour-la-biomethanisation-des-dechets.php> (page consultée le 6 août 2010).

- Braun, J. (2008). Déchet : Montpellier championne de la méthanisation. Le journal développement durable. 3 juillet 2008. [En ligne]. <http://www.developpementdurablejournal.fr/spip.php?article2914> (page consultée le 3 août 2010).
- Buffière, P., Bayard, R., Germain, P. (2009). Freins et développements de la filière biogaz : Les besoins en recherche et développement. Réseau coopératif de recherche sur les déchets (RECORD). [En ligne]. www.record-net.org/record/etudesdownload/record07-0418_1A.pdf (page consultée le 18 août 2010).
- Bureau d'audience publique sur l'environnement (BAPE) (1997). Rapport de la Commission d'enquête et d'audience publique sur la gestion des matières résiduelles au Québec : Déchet d'hier, Ressource de demain, [En ligne]. <http://www.bape.gouv.qc.ca/sections/rapports/publications/bape115.pdf> (page consultée le 06 mai 2010).
- Canadian natural gas vehicle alliance (CNGVA) (2005). Where to refuel. [En ligne]. <http://www.cngva.org/wheretorefuel.htm> (page consultée le 11 août 2010)
- Center for environmental farming systems (CEFS) (2005). Production de compost et usage dans les systèmes agricoles durables. NC State university A&T State university cooperative extension. [En ligne]. www.organiccentre.ca/Docs/Cefs/Field_Compost_f.pdf (page consultée le 27 juillet 2010).
- Centre de recherche industrielle du Québec (CRIQ) (2009). Traitement Mécano-Biologique des ordures ménagères : Projet pilote laboratoire. Dossier CRIQ No 640-PE38910(R1)-Rapport final. Réalisé pour le compte de la Ville de Montréal. [En ligne]. http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/PAGE/ENVIRONNEMENT_FR/MEDIA/DOCUMENTS/Traitement%20mecano-biologique%20des%20ordures%20menageres%20projet%20pilote%20laboratoire.pdf (page consultée le 27 juillet 2010).
- Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ) (2006). De référence en fertilisation, 1re édition : Deuxième mise à jour. [En ligne]. <http://www.craaq.qc.ca/Publications?p=32&l=fr&ldDoc=1737> (page consultée le 27 juillet 2010).
- Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ) (2008). La biométhanisation à la ferme [En ligne]. <http://www.craaq.qc.ca/data/DOCUMENTS/EVC033.pdf> (page consultée le 26 juillet 2010).
- Centre d'expertise sur les matières résiduelles (CEMR) (s. d.). Vitrine technologique – Intersan inc. [En ligne]. http://www.cemr.ca/f_business_08.html (page consultée le 11 août 2010).

- Centre d'expertise sur les produits agroforestiers (CEPAF). La production de biocarburants dans les milieux ruraux du Québec. Présenté au Ministère des Affaires municipales et des Régions (MAMR) - Gouvernement du Québec. [En ligne]. www.bioperre.com/medias/public/ldv_4a40c776e923a_biocarbur.pdf (Page consultée le 8 août 2010).
- Châteauguay (s. d.). Y vivre : Unique et privilégiée; Écologie et environnement; Gestion de l'Eau potable. [En ligne]. <http://www.ville.chateauguay.qc.ca/public/vivre/eau.asp?lang=fr&ssMenu=6> (page consultée le 7 août 2010).
- CNW (2009). Hydro-Québec choisit deux projets de RCI Technologies pour les premières usines de biométhanisation au Québec – Des investissements de plus de 60 M\$. [En ligne]. <http://www.newswire.ca/en/releases/archive/December2009/18/c4587.html> (page consultée le 5 août 2010).
- CNW (2010). L'usine de biométhanisation de Laval, en fonction dans trois ans. CNW. [En ligne]. <http://www.newswire.ca/fr/releases/archive/February2010/01/c5575.html> (page consultée le 6 août 2010).
- Collectif Cartier (2010). Usines de biométhanisation à Montréal : des poubelles transformées en énergie. Collectif Cartier. [En ligne]. <http://www.collectifquartier.org/2010/02/04/usines-de-biomechanisation-a-montreal/> (page consultée le 6 août 2010).
- Communauté métropolitaine de Montréal (CMM) (2007). Comparaison des technologies et des scénarios de gestion des matières résiduelles. Réalisé dans le cadre du PGMR. [En ligne]. http://www.cmm.qc.ca/fileadmin/user_upload/documents/Etude_Technologies_PMG_MR.pdf (page consultée le 28 juillet).
- Conseil québécois du biodiesel (2005). Le biodiesel. Le secteur énergétique au Québec : contexte, enjeux, questionnement. Commission de l'économie et du travail. [En ligne]. <http://www.biodieselquebec.org/Pages/documentation.html> (page consultée le 3 août 2010).
- Conseil québécois du biodiesel (2008). Le biodiesel. [En ligne]. <http://www.biodieselquebec.org/Pages/biodiesel.html#producteurs> (page consultée le 3 août 2010).
- Cotret, F. R. (2010). Première mondiale : une fromagerie québécoise emploie des plantes pour filtrer ses eaux usées. GaïaPresse. Publié le 2 juin 2010. [En ligne]. <http://www.gaiapresse.ca/fr/articles/article.php?id=17491> (page consultée le 6 août 2010).
- Cresson, Romain (2006). Étude du démarrage de procédés intensifs de méthanisation. Impact des conditions hydrodynamiques et de la stratégie de montée en charge sur la formation et l'activité du biofilm. Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'Université Montpellier II. [En ligne]. http://www.inra.fr/ea/fichier_these/These-R-Cresson.pdf (page consultée le 26 juillet 2010).

- Danielo, O. (2009). Allemagne – Du biogaz-électricité...à partir de déchets cellulosiques! Objectif Terre des Hommes. [En ligne]. <http://www.electron-economy.org/article-27525863.html> (page consultée le 11 août 2010).
- Detroit Diesel-Allison Canada Est (DACE) (2009). Produits. [En ligne]. http://www.ddace.com/Main/main_index.htm (page consultée le 7 août 2010).
- Desjardins, J.-P. (2008). Cascades prouve qu'il peut être rentable d'être « vert ». Journal Le Nord. Publié le 3 juin 2008. [En ligne]. <http://www.journallenord.com/article-219050-Cascades-prouve-quil-peut-etre-rentable-detre-vert.html> (page consultée le 10 août 2010).
- Dominium & Grimm Environnement (s. d.). Domaines d'applications. [En ligne]. <http://www.dominiongrimm.ca/biogaz/application.htm> (page consultée le 7 août 2010).
- Dubé, S. (2010). Société d'économie mixte d'énergie renouvelable de la région de Rivière-du-Loup - Première usine de biométhanisation au Québec. Municipalité régionale de comté de Rivière-du-Loup. [En ligne]. <http://www.riviereduloup.ca/revue/?id=10687> (page consultée le 6 août 2010).
- EBI Énergie (2010). EBI Énergie – Station de valorisation des biogaz. [En ligne]. http://www.groupe-ebi.com/services_ebi_energie.php (page consultée le 11 août 2010).
- Électrigaz (2010a). Électrigaz – Le génie du biogaz. [En ligne]. http://www.electrigaz.com/accueil_fr.htm (page consultée le 7 août 2010).
- Électrigaz (2010b). Foire aux questions. [En ligne]. http://www.electrigaz.com/faq_fr.htm (page consultée le 11 août 2010).
- Enviro-Accès (2005). Définition de facteurs d'émission de contaminants atmosphériques (NOx , SOx , CO, PM10 , COT, COTNM et COV) et calcul des réductions obtenues grâce à la réalisation des projets Enviroclub 2001 à 2004. Enviro-Accès. 41 pages.
- Envirogaz (s. d.). Produits et services. Envirogaz. [En ligne]. <http://www.enviroval.ca/envirogaz/index.php?p=3> (page consultée le 7 août 2010).
- Environnement Canada (2003). Les polluants principaux. La qualité de l'air. [En ligne]. http://www.atl.ec.gc.ca/airquality/pollutants_f.html#pm (page consultée le 14 août 2010).
- Environnement Canada (2009a). Calculatrice des gaz à effet de serre pour la gestion des matières résiduelles. Fichier Excel. Disponible sur demande. [En ligne]. <http://www.ec.gc.ca/qdd-mw/default.asp?lang=fr&n=D6A8B05A-1> (page consultée le 13 août 2010).
- Environnement Canada (2009b). Annexe A : Facteurs de conversion et d'émission utilisés. Secteur industriel. [En ligne]. <http://oee.nrcan-rncan.gc.ca/industriel/info-technique/analyse-comparative/itcu/annexe-a.cfm?attr=24> (page consultée le 13 août 2010).

- Environnement Canada (2010). Combustion des combustibles. Changements climatiques. [En ligne]. <http://www.ec.gc.ca/ges-ghg/default.asp?lang=Fr&n=AC2B7641-1> (page consultée le 13 août 2010).
- Etchart, M. (2009). Gestion et valorisation des digestats de méthanisation collective dans le bassin de la coopérative Arterris. Coopérative Arterris. [En ligne]. http://138.102.82.2/appli/pmb/opac_css/index.php?lvl=more_results&mode=keyword&user_query=M%E9thanisation (page consultée le 18 août 2010).
- Europétrole (s. d.). Tonne équivalent pétrole (TEP). Europétrole. [En ligne]. http://www.euro-petrole.com/re_05_details_mot.php?idMot=65&PHPSESSID=dc86dca8b06746f91f24122cb8ae1602 (page consultée le 6 août 2010).
- Fédération canadienne des municipalités (FCM) (s. d.). Le fonds municipal vert de la FCM. [En ligne]. <http://www.sustainablecommunities.ca/fr/GMF/> (page consultée le 4 août 2010).
- Forcier, F., Pellerin, F. et Labrecque, Y. (2009). Analyse du potentiel de codigestion à la ferme de matières organiques provenant des secteurs municipal, industriel, commercial et institutionnel (ICI). Rapport réalisé par Solinov pour le Centre de développement du porc du Québec. [En ligne]. www.cdpqinc.qc.ca/document/Projet/Rapport%20Solinov.pdf (page consultée le 2 août 2010).
- Fortin, J.-L. (2010). 559 millions \$ pour la biométhanisation. Actualités. 24H. [En ligne]. <http://www.24hmontreal.canoe.ca/24hmontreal/actualites/archives/2010/02/20100201-095530.html> (page consultée le 6 août 2010).
- Gautam, S.P., Bundela, P.S., Pandey, A.K., Awashi, M.K. and Saraiya, S. (2010). Composting of municipal solid waste of Jabalpur city. University of Jabalpur (M.P.). [en ligne]. <http://www.idosi.org/gjer/gjer4%281%2910/8.pdf> (page consultée le 28 juillet 2010).
- Gaz Métro (2004). Informa-tech – La valorisation du biogaz des lieux d’enfouissement sanitaire. [En ligne]. http://www.gazmetro.com/Data/Media/vol18_no1_fr.pdf (page consultée le 11 août 2010).
- Gaz Métro (2005). L’ABC du gaz naturel. [En ligne]. <http://www.corporatif.gazmetro.com/Le-Gaz-Naturel/Default.aspx?culture=fr-CA> (page consultée le 11 août 2010).
- Gaz Métro (2009). Tout sur le gaz naturel - Le gaz naturel – L’ABC. [En ligne]. <http://www.toutsurlegaznaturel.com/abc.html> (page consultée le 9 août 2010).
- Gaz Métro (2010a). Tarifs au 1er janvier 2010. [En ligne]. http://www.gazmetro.com/data/media/Texte_tarifs_fr.pdf (page consultée le 5 août 2010).

- Gaz Métro (2010b). Éléments de la facture – Taux au 1^{er} janvier 2010 – Zone Sud. [En ligne]. <http://www.gazmetro.com/data/media/Affaires%20-%20Janv2010%20-%20fran%C3%A7ais.pdf> (page consultée le 12 août 2010).
- Gélinas, D. (2010). Directeur du Service des infrastructures urbaines et de l'environnement, Ville de Sherbrooke. Appel téléphonique pour obtenir de l'information sur le projet de biométhanisation des matières organiques résiduelles. 29 juillet 2010.
- Golder & associés (2008). Services / Géosciences. Golder & associés. [En ligne]. http://www.golderassociés.com/002_geosciences_01.html (page consultée le 7 août 2010).
- Gouvernement du Canada (2010). ÉcoÉNERGIE pour l'électricité renouvelable. [En ligne]. <http://www.ecoaction.gc.ca/ecoenergy-ecoenergie/power-electricite/index-fra.cfm> (page consultée le 4 août 2010).
- Guiot, R., Frigon, J.-C. (2008). Importance d'une bonne compréhension des fondements microbiologiques de la digestion anaérobie. Conseil national de recherches Canada. [En ligne]. <http://www.apcas.qc.ca/2008AvrilGuiot.pdf> (page consultée le 7 août 2010).
- Hydro-Québec (2009). Communiqué : Appel d'offres pour l'achat d'énergie produite par cogénération à la biomasse : Hydro-Québec retient huit (8) soumissions. [En ligne]. http://www.hydroquebec.com/4d_includes/surveiller/PcFR2009-191.htm (page consultée le 5 août 2010).
- Hydro-Québec (2010a). Rapport annuel 2009 : Façonner l'avenir. [En ligne]. http://www.hydroquebec.com/publications/fr/rapport_annuel/pdf/rapport-annuel-2009.pdf (page consultée le 6 août 2010).
- Hydro-Québec (2010b). Combustibles fossiles. Énergie éolienne et autres sources d'énergie. [En ligne]. <http://www.hydroquebec.com/comprendre/autres-sources/fossile.html> (page consultée le 15 août 2010).
- ICF Consulting (2005). Analyse des effets des activités de gestion des matières résiduelles sur les émissions de gaz à effet de serre. [En ligne]. <http://www.nrcan.gc.ca/mms-smm/busi-indu/rad-rad/pdf/icf-finr-fra.pdf> (page consultée le 13 août 2010).
- Infrastructure Canada (2010). Fonds pour l'infrastructure verte. [En ligne]. <http://www.buildingcanada-chantierscanada.gc.ca/creating-creation/gif-fiv-fra.html> (page consultée le 4 août 2010).
- Institut de la statistique du Québec (ISQ) (2006). La situation démographique au Québec – Bilan 2006. Institut de la statistique du Québec [En ligne]. <http://www.stat.gouv.qc.ca/publications/demograp/pdf2006/Bilan2006.pdf> (page consultée le 15 août 2010).

- Institut de recherche et de développement agroenvironnement (IRDA), 2003. Mémoire de l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. Commission sur le développement durable de la production porcine au Québec. [En ligne]. http://www.irda.qc.ca/documents/publications/5/29_fr.pdf (page consultée le 25 juillet 2010).
- International Energy Agency (IEA) (2009). Key world energy statistics 2009. [En ligne]. www.iea.org/textbase/nppdf/free/2009/key_stats_2009.pdf (page consultée le 2 août 2010).
- Lachance, M. (2010). Les bioproduits industriels issus de biomasses agricoles : quel avenir ? Centre Québécois de Valorisation des biotechnologies (CQVB). [En ligne]. http://www.craaq.qc.ca/UserFiles/file/Evenements/COLLPER10/Lachance_PPT.pdf (page consultée le 6 août 2010).
- Laloe, J. (2003). Méthanisation des boues de station d'épuration – Potentiel Réunionnais. Département Génie de l'Environnement. Université de Savoie. [En ligne]. http://www.arer.org/pj/articles/52_methanisation-boues-station-epuration.pdf (page consultée le 8 août 2010).
- Lima Amarante, J. A. (2010). Biométhanisation des déchets putrescibles municipaux – Technologies disponibles et enjeux pour le Québec. Essai présenté au Centre Universitaire de Formation en Environnement en vue de l'obtention du grade de maître en environnement. Université de Sherbrooke. [En ligne]. http://www.usherbrooke.ca/environnement/fileadmin/sites/environnement/documents/Essais2010/Amarante_J_10-07-2010_.pdf (page consultée le 26 juillet 2010).
- Mahmood, T. (2010). Potentiel méthanogène des boues de papetières. Courrier électronique à Dr Talat Mahmood, adresse destinataire : Talat.Mahmood@fpinnovations.ca.
- Milot, M. (2010). 4,4 millions de dollars pour le projet de biométhanisation sur le territoire de la MRC de Rivière-du-Loup. Municipalité régionale de comté de Rivière-du-Loup. [En ligne]. <http://www.bas-saint-laurent.org/texte.asp?id=11408> (page consultée le 6 août 2010).
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) (2009a). Prime-vert. [En ligne]. <http://www.mapaq.gouv.qc.ca/NR/exeres/CD4822D9-ADC6-4D11-B94B-3EE57CD3CEC8.htm> (page consultée le 4 août 2010).
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) (2009b). Changements climatiques. [En ligne]. <http://www.mapaq.gouv.qc.ca/Fr/Productions/Agroenvironnement/bonnespratiques/changementclimatiques/> (page consultée le 12 août 2010).
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) (2009c). Renouvellement du programme Prime-vert. [En ligne]. http://www.mapaq.gouv.qc.ca/cgi-bin/MsmGo.exe?grab_id=197&page_id=5314560&query=primevert&hiword=primevert+ (page consultée le 1 septembre 2010).

- Ministère des Finances du Québec (2010). Budget 2010-2011 – Des choix pour l'avenir – Plan d'action économique et budgétaire. [En ligne]. <http://www.budget.finances.gouv.qc.ca/Budget/2010-2011/fr/documents/PlanBudgetaire.pdf> (page consultée le 11 août 2010).
- Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) (2009). Consommation totale d'énergie. [En ligne]. <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/energie/statistiques/statistiques-consommation-energie.jsp> (page consultée le 10 août 2010).
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) (2002). Politique québécoise de gestion des matières résiduelles 1998-2008. Gouvernement du Québec. Matières résiduelles. [En ligne]. <http://www.mddep.gouv.qc.ca/matieres/politique1998-2008/index.htm> (Page consultée le 30 mars 2010).
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) (2003). Synthèse des informations environnementales disponibles en matière agricole au Québec. Ministère de l'Environnement. Gouvernement du Québec. [En ligne]. http://www.mddep.gouv.qc.ca/milieu_agri/agricole/synthese-info/synthese-info-enviro-agricole.pdf (Page consultée le 21 août 2010).
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) (2007). Bilan annuel de conformité environnementale / Secteur des pâtes et papiers, 2007 (suite). Gouvernement du Québec. Milieu industriel. [En ligne]. http://www.mddep.gouv.qc.ca/milieu_ind/bilans/pates07/bilan07.pdf (Page consultée le 25 juillet 2010).
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) (2007b). Les boues : le mouton noir du recyclage. [En ligne]. <http://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/upload/publications/boues-mouton-noir-recyclage.pdf> (Page consultée le 23 juillet 2010).
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) (2008). Plan d'action 2006-2010 sur les changements climatiques. Gouvernement du Québec. Air. [En ligne]. http://www.mddep.gouv.qc.ca/changements/plan_action/index-mesures.htm (Page consultée le 13 mai 2010).
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) (2008b). Bilan 2007 de la valorisation des matières résiduelles fertilisantes. Gouvernement du Québec. Air. [En ligne]. http://www.mddep.gouv.qc.ca/matieres/mat_res/fertilisantes/Bilan2007.pdf (Page consultée le 22 juillet 2010).
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) (2008c). Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2006 et leur évolution depuis 1990. Gouvernement du Québec. [En ligne]. <http://www.mddep.gouv.qc.ca/changements/ges/2006/inventaire2006.pdf> (Page consultée le 13 août 2010).

- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) (2010a).
Projet de politique québécoise sur la gestion des matières résiduelles.
Gouvernement du Québec. Matières résiduelles. [En ligne].
<http://www.mddep.gouv.qc.ca/matieres/pgmr/index.htm> (Page consultée le 30 mars 2010).
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) (2010b).
Programme de traitement des matières organiques par biométhanisation et compostage. Gouvernement du Québec. Matières résiduelles. [En ligne].
<http://www.mddep.gouv.qc.ca/programmes/biomethanisation/index.htm> (Page consultée le 30 mars 2010).
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) (2010c).
Communiqué de presse : Traitement des déchets organiques : Plus de 100 emplois directs et indirects créés. Québec annonce sa participation à un projet de biométhanisation à Rivière-du-Loup. Gouvernement du Québec. Fil de presse. [En ligne]. <http://www.mddep.gouv.qc.ca/Infuseur/communiqu.asp?no=1612> (Page consultée le 30 mars 2010).
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) (2010d).
Règlement sur l'enfouissement et l'incinération de matières résiduelles (REIMR).
Gouvernement du Québec. Matières résiduelles. [En ligne].
<http://www.mddep.gouv.qc.ca/matieres/reimr.htm> (Page consultée le 08 mai 2010).
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) (2010e).
Un investissement Canada-Québec pour quatre projets d'infrastructure verte dans la région de Montréal. Communiqué de presse. 1^{er} février 2010. [En ligne].
<http://www.mddep.gouv.qc.ca/infuseur/communiqu.asp?no=1617> (page consultée le 4 août 2010).
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) (2010f).
Les redevances à l'élimination de matières résiduelles. Matières résiduelles. [En ligne]. <http://www.mddep.gouv.qc.ca/matieres/redevances/index.htm> (page consultée le 3 août 2010).
- Montpellier Agglomération (2006). La carte de la méthanisation en Europe. Tout savoir sur la méthanisation. [En ligne]. <http://www.montpellier-agglo.com/vivre/environnement/tout-savoir-sur-la-methanisation/la-carte-de-la-methanisation-en-europe-26670.khtml?RH=1140897988159> (page consultée le 3 août 2010).
- mpbiodiesel (s. d.). Masse volumique à 15 °C. mpbiodiesel. [En ligne].
<http://www.mpbiodiesel.ch/fr/sp-cifications/masse-volumique-15-c.html> (page consultée le 5 août 2010).
- N'Dayegamiye, Adrien (2006). Pour une gestion efficace des engrais organiques. Article paru dans Le producteur de lait québécois, novembre 2006. [En ligne].
http://www.irda.qc.ca/_documents/_Results/47.pdf (page consultée le 24 juillet 2010).

- Normandin, P.-A. (2010). Fini le « gaspillage » des restes de tables en 2013. leSoleil. Publié le 28 janvier 2010. [En ligne]. <http://www.cyberpresse.ca/le-soleil/actualites/environnement/201001/28/01-944005-fini-le-gaspillage-des-restes-de-table-en-2013.php> (page consultée le 6 août 2010).
- Office national de l'énergie (2010). Table de conversion d'unités d'énergie. [En ligne]. <http://www.neb.gc.ca/clf-nsi/rnrgynfmtn/sttstc/nrgycnvrstbl/nrgycnvrstbl-fra.html> (page consultée le 13 août 2010).
- Olivier, M. (2007). Matières résiduelles et 3RV-E. 2^e édition. Les productions Jacques Bernier. 252 pages.
- Ostrem, K.(2004). Greening Waste : Anaerobic digestion for treating the organic fraction of municipal solid wastes. Submitted in partial fulfillment or requirement for Master of Sciences thesis in Earth Resources Engineering. Columbia University. [En ligne]. http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/Ostrem_Thesis_final.pdf (page consultée le 27 juillet 2010).
- Pagnier, T. (2010). Biogaz carburant de pile à combustible haute température (SOFC) : mécanisme d'action des polluants étudié par spectroscopie Raman in situ – Projet de thèse. [En ligne]. http://edimep2.grenoble-inp.fr/servlet/com.univ.collaboratif.util.LectureFichiergw?CODE_FICHER=1272893126976&ID_FICHE=203610 (page consultée le 25 août 2010).
- Perron, V. et Hébert, M. (2007). Caractérisation des boues d'épuration municipales. Partie I : Paramètres agronomiques. Article technique paru dans Vecteur environnement. Septembre 2007. [En ligne]. www.mddep.gouv.qc.ca/matieres/articles/caract_boues1.pdf (page consultée le 27 juillet 2010).
- Plan d'action économique du Canada (2010). Fonds pour l'infrastructure verte. [En ligne]. <http://plandaction.gc.ca/initiatives/fra/index.asp?mode=2&initiativeld=115> (page consultée le 6 août 2010).
- Pluritec (s. d.). Valorisation du biogaz : Études, expertise et conception. [En ligne]. <http://www.pluritec.gc.ca/html/biogaz-index.htm> (page consultée le 7 août 2010).
- Rapport, J., Zhang, R., Jenkins, B.M., Williams, R.B. (2008). Current anaerobic digestion technologies used for treatment of municipal organic solid waste. Rapport réalisé par le Department of biological and agricultural engineering (University of California) pour le compte du California Integrated Waste Management Board (CIWMB). [en ligne]. <http://www.calrecycle.ca.gov/publications/default.asp?pubid=1275> (page consultée le 27 juillet 2010).
- RCI Technologies (2010). Transformation des matières résiduelles en énergie renouvelable. RCI Technologies. [En ligne]. <http://www.rcienvironnement.com/dechetsUltimes-rci-technologies.php> (page consultée le 22 août 2010).

- Recyc-Québec (2008). La digestion anaérobie. Les matières organiques en fiches techniques. [En ligne]. <http://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/upload/publications/mici/mat-org-fiches-2008/fiche6-digestion.pdf> (page consultée le 26 juillet 2010).
- Recyc-Québec (2009). Bilan 2008 de la gestion des matières résiduelles au Québec. [En ligne]. <http://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/client/fr/industrie/bilan.asp> (page consultée le 30 mars 2010).
- Recyc-Québec (2010). Les matières organiques – Fiches informatives. [En ligne]. <http://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/Upload/Publications/Fiche-compost.pdf> (page consultée le 22 juillet 2010).
- Recyc-Québec et al. (2009). Caractérisation des matières résiduelles du secteur résidentiel et des lieux publics au Québec 2006-2009. [En ligne]. <http://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/Upload/Publications/MICI/Rendez-vous2009/Caract-sect-res-lp.pdf> (page consultée le 21 juillet 2010).
- Réseau des entreprises canadiennes (REC) (2010). Enviro-Technologies Mittner inc – Profil complet. [En ligne]. <http://www.ic.gc.ca/app/ccc/srch/nvgt.do?lang=fra&prtl=1&sbPrtl=&estblmntNo=234567111432&profile=cmpltPrfl&profileId=61&app=sold> (page consultée le 7 août 2010).
- Ressources naturelles Canada et Agriculture et Agroalimentaire Canada (RNCan et AAC) (2002). À la découverte de la production et des utilisations du biogaz. Série sur les bioénergies. [En ligne] <http://dsp-psd.pwgsc.gc.ca/Collection/M92-253-2002F.pdf> (page consultée le 26 juillet 2010).
- Ressources naturelles Canada (2009a). Bâtiment et industrie – Production de 25 MW d'électricité à partir de gaz d'enfouissement. [En ligne]. <http://oeo.nrcan.gc.ca/publications/infosource/pub/ici/caddet/francais/r393.cfm?attr=20> (page consultée le 11 août 2010).
- Ressources naturelles Canada (2009b). Calculateur de gigajoules et d'intensité énergétique. Secteur industriel. [En ligne]. <http://www.oeo.nrcan.gc.ca/commerciaux/info-technique/outils/calculateur-gigajoule.cfm?attr=24> (page consultée le 13 août 2010).
- Ressources naturelles Canada (2010). Les carburants de remplacement au Canada : Faire aujourd'hui des choix qui assureront un avenir meilleur. Office de l'efficacité énergétique. [En ligne]. <http://oeo.nrcan-rncan.gc.ca/publications/infosource/pub/transport/carburants-au-canada.cfm?attr=8> (page consultée le 4 août 2010).
- Ricard, M.-A., Drolet, V., Coulibaly, A., Laflamme, C. B., Charest, C., Forcier, F., Lahance, M.-P., Pelletier, F., Levasseur, P., Pouliot, F., S. et Lemay, S. (2010). Développer un cadre d'analyse et identifier l'intérêt technico-économique de produire du biogaz à la ferme dans un contexte québécois. Centre de développement du porc du Québec inc. [en ligne]. www.agrireseau.qc.ca/porc/documents/MethanisationFINAL.pdf (page consultée le 1er août 2010).

- Robert, L. et Couture, J.-N. (2000). L'analyse des fumiers et lisiers : un outil essentiel. Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec (CDAQ). [En ligne]. www.cdaq.qc.ca/content.../Doc_Analyse_Fumiers.pdf (page consultée le 3 août 2010).
- Rodgers, C. (2010). Saint-Hyacinthe ouvre son usine de méthanisation. La Presse. Publié le 9 février 2010. [En ligne]. <http://lapresseaffaires.cyberpresse.ca/portfolio/portrait-2010/monteregie-est/201002/09/01-947892-saint-hyacinthe-ouvre-son-usine-de-methanisation.php> (page consultée le 6 août 2010).
- Rothsay (2009). Produits biodiesel. [En ligne]. <http://www.rothsay.ca/francais/produits/biodiesel/> (page consultée le 13 août 2010).
- Rouez, M. (2008). Dégradation anaérobie de déchets solides : caractérisation, facteurs d'influence et modélisation. Thèse pour obtenir le grade de docteur. Institut national des sciences appliquées de Lyon. 259 pages. [En ligne]. <http://compostagecefrepade.files.wordpress.com/2009/02/these-maxime-rouez-29-09-08.pdf> (page consultée le 10 août 2010).
- St-Amand, M. (2008). Rencontre pour la réalisation d'une étude en efficacité énergétique. Communication orale. 17 juillet 2008. Usine de Bonduelle Canada à St-Césaire.
- Valbio (2010). Fromageries. Solution pour les industries. [En ligne]. http://www.valbio.com/fr/solutions/solutions-pour-les-industries/fromageries/id_321 (page consultée le 6 août 2010).
- Xebec (s. d.). Applications liées aux biogaz. Xebec. [En ligne]. http://www.xebecinc.com/fr/e_applications_biogas.php (page consultée le 7 août 2010).
- Zaher, U., Cheong, D.-Y., Wu, B. et Chen S. (2007). Producing energy and fertilizer from organic municipal solid waste. Department of biological systems engineering. Washington State University. [En ligne]. http://www.ecy.wa.gov/climatechange/2008CATdocs/IWG/bw/071108_pefmsw.pdf (page consultée le 27 juillet 2010).

BIBLIOGRAPHIE

- Actu-Environnement (2006). Les énergies renouvelables gagnent du terrain : bilan chiffré! Énergies. Publié le 03/07/2006. [En ligne]. <http://www.actu-environnement.com/ae/newsSP/7.php4> (page consultée le 3 août 2010).
- Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) (2001). Industrie papetière française : gestion et traitement des déchets. [En ligne]. <http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?m=3&sort=-1&cid=96&catid=12441&p1=4000> (page consultée le 18 août 2010).
- AQME, Association québécoise pour la Maîtrise de l'Énergie (2007). Mission et objectifs. [En ligne]. http://aqme.org/mission_objectifs.aspx (page consultée le 30 mars 2010).
- Arpin, M. (2005). La valorisation énergétique des matières résiduelles biodégradables : potentiel d'application dans le contexte québécois. Essai présenté au Centre Universitaire de Formation en Environnement en vue de l'obtention du grade de maître en environnement. Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, 69 pages.
- Beck, R. W. (2004). Anaerobic digestion feasibility study for the Bluestem solid waste agency and Iowa department of natural resources. [En ligne]. www.iowadnr.gov/waste/policy/files/bluestem.pdf (page consultée le 4 août 2010).
- Centre de recherche industrielle du Québec (CRIQ) (2001). Recherche sur les avantages à utiliser le compost. Dossier CRIQ 640-PE27158(R1). [en ligne]. http://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/upload/publications/mici/compost_avantage_criq.pdf (page consultée le 23 juillet 2010).
- Couturier, C. (2004). Potentiel et facteurs d'émergence de la récupération du biogaz et des gaz fatals. Réseau coopératif de recherche sur les déchets (RECORD). [En ligne]. http://www.record-net.org/record/etudesdownload/record02-0415_1A.pdf (page consulté le 12 août 2010).
- Couturier, C., Berger, S., Meiffren, I. (2006). La méthanisation des effluents industriels – Retours d'expériences sur le bassin Adour-Garonne. Agence de l'Eau Adour-Garonne. [En ligne]. http://www.info-eau-adourgaronne.fr/PDF/methanisation_effluents_ind.pdf Page consultée le 18 août 2010).
- CQVB, Centre québécois de valorisation des biotechnologies (2010). À propos du CQVB. [En ligne]. <http://www.cqvb.qc.ca/fra/a-propos-du-cqvb/default.asp> (page consultée le 30 mars 2010).
- David, S. (2008). L'identification des différentes matières résiduelles au Québec en tant que potentiel énergétique. Essai présenté au Centre Universitaire de Formation en Environnement en vue de l'obtention du grade de maître en environnement. Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, 76 pages.

- Delgenes, J.-P. (2007). Production décentralisée d'énergie par méthanisation de produits résiduels organiques et de biomasses. Institut National de la Recherche Agronomique (INRA). 2^e Conférence International DERBI. 31 mai 2007. [En ligne]. www.pole-derbi.com/fichiers/Biomasse_LBE_INRA_DERBI_2007.pdf (page consultée le 10 août 2010).
- Front commun québécois pour une gestion écologique des déchets (FCQGED) (2004). La bioréaction appliquée à la gestion des déchets au Québec : aspects techniques et environnementaux. [En ligne]. http://www.fcqged.org/pdf/doc_01.pdf (page consultée le 5 août 2010).
- GIEC, Groupe d'expert intergouvernemental sur l'évolution du climat (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Pdf. [En ligne]. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html> (page consultée le 30 mars 2010).
- Gouzenes, E. (2006). La méthanisation pour traiter les effluents industriels. Agence de l'Eau Adour-Garonne. [En ligne]. http://www.info-eau-adourgaronne.fr/PDF/pages_methanisation_revue94.pdf (page consultée le 8 août 2010).
- International Energy Agency (IEA) (2009). Energy Sector Methane Recovery and Use. [En ligne]. <http://search.atomz.com/search/?sp-q=biogas+2009&sp-a=sp10029401&sp-p=all&sp-f=ISO-8859-1> (page consultée le 2 août 2010).
- International Energy Agency (IEA) (2009). World Energy Outlook. [En ligne]. <http://www.worldenergyoutlook.org/> (page consultée le 2 août 2010).
- Lacour, C., Jeanjean, D. et Datigalongue, M. (2004). Le biogaz. École nationale des Ponts et Chaussées. Étude réalisée en 2003/2004 lors de l'Atelier Changements climatiques à l'ENPC sous la direction de P. Quirion. 68p. [En ligne]. http://www.enpc.fr/fr/formations/ecole_virt/trav-eleves/cc/cc0304/biogaz/biogaz.htm (page consultée le 23 juillet 2010).
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ) (2009). Mon lisier, ma source d'énergie. [En ligne]. http://www.mapaq.gouv.qc.ca/cgi-bin/MsmGo.exe?grab_id=90&page_id=4857600&query=biogaz&hiword=BIOGAS+biogaz+ (page consultée le 30 mars 2010).
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) (2008). Guide sur la valorisation des matières résiduelles fertilisantes. Critère de référence et normes réglementaires. [En ligne]. http://www.mddep.gouv.qc.ca/matieres/mat_res/fertilisantes/critere/index.htm (Page consultée le 3 août 2010).
- Moreira, J. (2010). Ouvrage de surverse et stations d'épuration : Évaluation de performance des ouvrages municipaux d'assainissement des eaux pour l'année 2009. Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire (MAMROT). [En ligne]. http://www.mamrot.gouv.qc.ca/publications/infrastructures/eval_perform_rapport_2009.pdf (page consultée le 7 août 2010).

- Observatoire Régional des Déchets d'Ile de France (ORDIF) et Agence Régional de l'Environnement et des Nouvelles Énergies Ile de France (ARENE) (2003). Quelle place pour la méthanisation des déchets organiques en Ile-de-France? [En ligne]. www.ordif.com/public/document.srv?id=6990 (page consultée le 8 août 2010).
- Picard M.-C. (2008). Système de gestion des matières résiduelles : recommandations pour favoriser l'implication du participant. Essai présenté au Centre Universitaire de Formation en Environnement en vue de l'obtention du grade de maître en environnement. Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, 95 pages.
- Recyc-Québec (2009). Gérer les matières résiduelles dans les municipalités. [En ligne]. <http://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/client/fr/gerer/municipalites/gestion-efficace.asp> (page consultée le 30 mars 2010).
- Société en commandite Gaz Métro (2002). Étude des variantes : Valorisation de biogaz, Ste-Sophie. Site de la Régie de l'énergie. [En ligne]. http://www.regie-energie.qc.ca/audiences/3532-04/RepSCGMDemRens/SCGM-1Doc-1-16-Annex_3532_RepDemRensREGIE_8juin04.pdf (page consultée le 30 mars 2010).
- Solinov (2009). Analyse du potentiel de codigestion à la ferme de matières organiques provenant des secteurs municipal, industriel, commercial et institutionnel (ICI). [En ligne]. <http://www.cdpqinc.qc.ca/document/Projet/Rapport%20Solinov.pdf> (page consultée le 25 juillet 2010).
- Vaillancourt, P., Bassignot, L., Robitaille, M., Chevalier, A (2006). Évaluation des choix technologiques de traitement des matières résiduelles pour l'agglomération de Montréal. Rapport final. Dessau Soprin Ingénierie et construction. [En ligne]. http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/Environnement_Fr/media/documents/14.evaluation_choix_technologiques_traitement.pdf (page consultée le 4 août 2010).

ANNEXE 1

**LISTE DES SOUMISSIONS RETENUES SUITE À L'APPEL D'OFFRES D'HYDRO-
QUÉBEC POUR LES PROJETS DE COGÉNÉRATION À LA BIOMASSE**

Tableau A.1.1 : Liste des soumissions retenues par Hydro-Québec

| A/O 2009-01 - Cogénération à la biomasse - 125 MW | | | |
|--|---|--|--------------------------------------|
| Liste des soumissions retenues - 18 décembre 2009 | | | |
| Nom du soumissionnaire | Type de combustibles | Localisation de la centrale : - Municipalité - MRC - Région administrative | Quantités contractuelles (MW) |
| EBI Énergie inc | Site d'enfouissement (biogaz) | St-Thomas MRC de Joliette Lanaudière | 9,4 |
| FPS Canada Inc. | Biomasse forestière (papetière) | Thurso et Lochaber ouest MRC de Papineau Outaouais | 18,8 |
| Innoventé Inc. | Biomasse forestière, fumiers et boues d'épuration | Saint-Patrice-de-Beaurivage MRC de Lotbinière Chaudière-Appalaches | 4,6 |
| RCI Technologies Inc. | Biométhanisation de déchets | Montréal, arrondissement Anjou CMM Montréal | 3,9 |
| RCI Technologies Inc. | Biométhanisation de déchets | Longueuil Agglomération de Longueuil Montréal | 3,9 |
| SFK Pâtes S.E.N.C. | Biomasse forestière (papetière) | Saint-Félicien Domaine du Roy Saguenay-Lac-Saint-Jean | 9,5 |
| Terreau Biogaz Inc. | Site d'enfouissement (biogaz) | Sainte-Cécile de Milton MRC de Haute-Yamaska Montréal | 3,0 |
| WM Québec Inc. | Site d'enfouissement (biogaz) | Drummondville MRC de Drummond Centre-du-Québec | 7,6 |

(Hydro-Québec, 2009)

ANNEXE 2
TABLEAUX DES POTENTIELS DE PRODUCTION DE BIOGAZ SELON LES
SCÉNARIOS B, C ET D

Tableau A.2.1 : Production de biogaz selon le scénario B

| Matières organiques | Masses disponibles | Fractions traitées* | Masses traitées* | Biogaz produit |
|----------------------------|--------------------|---------------------|------------------|-----------------------|
| | (t/an) | (%) | (t/an) | (Mm ³ /an) |
| MOR** municipales | 1 375 000 | 50 % | 687 500 | 82,50 |
| MOR des ICI | 300 000 | 50 % | 150 000 | 18,00 |
| Boues municipales | 773 000 | 50 % | 386 500 | 39,81 |
| Boues mixtes de papetières | 1 083 000 | 50 % | 541 500 | 47,11 |
| Lisier de porcs | 9 000 000 | 1,09 % | 98 083 | 1,47 |
| Fumier de bovins | 21 000 000 | 0,47 % | 98 083 | 6,57 |
| Total | 33 531 000 | 100 % | 1 961 667 | 195,46 |

* Traitées en digestion anaérobie

** MOR : Matières organiques résiduelles

Tableau A.2.2 : Production de biogaz selon le scénario C

| Matières organiques | Masses disponibles | Fractions traitées* | Masses traitées* | Biogaz produit |
|----------------------------|--------------------|---------------------|-------------------|-----------------------|
| | (t/an) | (%) | (t/an) | (Mm ³ /an) |
| MOR** municipales | 1 375 000 | 75 % | 1 031 250 | 123,75 |
| MOR des ICI | 300 000 | 75 % | 225 000 | 27,00 |
| Boues municipales | 773 000 | 75 % | 579 750 | 59,71 |
| Boues mixtes de papetières | 1 083 000 | 75 % | 812 250 | 70,67 |
| Lisier de porcs | 9 000 000 | 1,63 % | 147 125 | 2,21 |
| Fumier de bovins | 21 000 000 | 0,70 % | 147 125 | 9,86 |
| Total | 33 531 000 | 100 % | 33 531 000 | 293,19 |

* Traitées en digestion anaérobie

** MOR : Matières organiques résiduelles

Tableau A.2.3 : Production de biogaz selon le scénario D

| Matières organiques | Masses disponibles | Fractions traitées* | Masses traitées* | Biogaz produit |
|----------------------------|--------------------|---------------------|-------------------|-----------------------|
| | (t/an) | (%) | (t/an) | (Mm ³ /an) |
| MOR** municipales | 1 375 000 | 100 % | 1 375 000 | 165,00 |
| MOR des ICI | 300 000 | 100 % | 300 000 | 36,00 |
| Boues municipales | 773 000 | 100 % | 773 000 | 79,62 |
| Boues mixtes de papetières | 1 083 000 | 100 % | 1 083 000 | 94,22 |
| Lisier de porcs | 9 000 000 | 2,18 % | 196 167 | 2,94 |
| Fumier de bovins | 21 000 000 | 0,93 % | 196 167 | 13,14 |
| Total | 33 531 000 | 100 % | 33 531 000 | 390,93 |

* Traitées en digestion anaérobie

** MOR : Matières organiques résiduelles