HEC Montréal

Analyse du secteur de la production d'énergie à partir de la biomasse au Canada selon l'approche TIMES

Par

Yosra Neji

Sciences de la gestion

(Méthodes Analytiques de Gestion)

Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de maîtrise ès sciences

(M. Sc.)

Juillet 2012

© Yosra Neji, 2012

Sommaire

Nous nous intéressons dans ce mémoire à analyser le secteur de la production d'énergie au Canada à partir de la biomasse dans un contexte prospectif au moyen du modèle TIMES-Canada. La phase la plus délicate de cette étude est de fournir au modèle une base de données fiable sur les estimations du potentiel de production d'énergie sur une échelle géographique dans les provinces et territoires canadiens.

L'objectif de l'étude est d'illustrer le rôle de la biomasse dans la réduction de gaz à effet de serre (GES) sur l'horizon 2050. En effet, le Canada s'est engagé en 2010, aux termes de l'Accord de Copenhague, à réduire ses émissions d'ici 2020 de 17% par rapport à l'an 2005 (Bureau du vérificateur général du Canada, 2012). D'autres cibles de réductions sont établies à l'échelle provinciale (Ressources naturelles Canada, 2011a). Nous avons construit des scénarios sur la base de ces objectifs de réductions pour représenter quelques situations futures des principaux déterminants énergétiques comme l'évolution démographique, le progrès économique et l'utilisation de l'énergie. L'intérêt des scénarios est d'analyser la configuration du système énergétique canadien sur l'horizon 2050.

Les résultats du modèle TIMES-Canada englobent trois situations. Dans un premier scénario de référence BAU où aucune contrainte climatique n'est imposée, le secteur de la biomasse s'avère peu sollicité malgré la large disponibilité des ressources. En 2050, la consommation de la biomasse est de seulement 8% contre 32% pour le pétrole et 27% pour le gaz naturel. Dans une deuxième situation GES1 où l'on exige atteindre les objectifs de réductions de gaz à effet de serre annoncés aux termes de l'Accord de Copenhague, la consommation de la biomasse augmente de 1% par rapport au BAU, tandis que l'utilisation du pétrole recule considérablement pour atteindre 26% contre une baisse légère de 2% de la consommation du gaz naturel. Si nous imposons une contrainte de réduction extrême de 75% sur les émissions de gaz à effet de serre, l'importance de la biomasse s'affaiblit par rapport aux scénarios BAU et GES1 en faveur de l'électricité basée essentiellement sur le nucléaire qui pourrait répondre à 36% de la consommation d'énergie en 2050.

Mots-clés : TIMES, biomasse, scénarios, gaz à effet de serre

Table des matières

Sommaire ii
Liste des acronymes vi
Liste de conversion des unités vii
Liste des tableaux vii
Liste des figures ix
Remerciements x
Introduction 1
1. Contexte énergétique de la biomasse au Canada 3
1.1. Sources de biomasse 4
1.1.1. Biomasse agricole 5
1.1.1.1. Grandes cultures 5
1.1.1.2. Résidus de cultures 6
1.1.1.3. Cultures dédiées 7
1.1.2. Déchets organiques 7
1.1.2.1. Résidus de transformation industrielle 8
1.1.2.2. Résidus organiques municipaux 9
1.1.2.3. Fumier 10
1.1.2.4. Matières enfouies 10
1.1.3. Biomasse forestière 11
1.1.3.1. Étendue des forêts canadiennes 11
1.1.3.2. Caractéristiques des forêts canadiennes 12
1.1.3.3. Biomasse forestière et environnement 13
1.1.3.4. Responsabilité de gestion des forêts 14
1.1.3.5. Piste de potentiel d'énergie de la biomasse forestière 14
1.1.4. Liqueur noire 15
1.1.5. Biomasse aquatique 16
1.1.5.1. Algues 16
1.1.5.2. Huile de poisson 17
1.2. Modes de conversion de la biomasse en énergie 17

1.2.1. Voies thermochimiques 17
1.2.2. Voies biologiques et biochimiques 19
1.3. Production de biocarburants 22
1.3.1. Perspectives de production du bioéthanol 22
1.3.2. Perspectives de production du biodiesel 24
1.3.3. Perspectives de production du biogaz 25
1.3.4. Biocarburants de 3ème génération 25
2. Modélisation prospective avec le modèle TIMES-Canada 26
2.1. Modélisation prospective 27
2.1.1. Modèles Top-down 29
2.1.2. Modèles Bottom-Up 30
2.2. Modèle MARKAL 30
2.3. Modèle TIMES 31
2.3.1. Présentation du modèle TIMES-Canada 31
2.3.2. Notion du système énergétique de référence 34
2.3.3. Structure mathématique du modèle TIMES 35
2.3.4. Formulation de l'équilibre 36
3. Inventaire du potentiel de la biomasse au Canada 40
3.1. Les données : piliers de construction du module de la biomasse 41
3.2. Potentiel d'énergie de la biomasse agricole 42
3.2.1. Potentiel de production du bioéthanol 43
3.2.2. Potentiel de production du biodiesel 46
3.2.3. Potentiel de production du biogaz 47
3.2.4. Potentiel d'énergie des cultures dédiées 49
3.3. Potentiel d'énergie de la biomasse forestière 50
3.3.1. Potentiel d'énergie des résidus forestiers 51
3.3.2. Potentiel d'énergie des résidus du bois 52
3.3.3. Potentiel d'énergie de la liqueur noire 53
3.4. Potentiel d'énergie des résidus solides municipaux 54
3.5. Potentiel d'énergie des résidus industriels 56
3.6. Potentiel d'énergie de biosolides 57
3.7. Potentiel d'énergie du fumier 59
3.8. Potentiel d'énergie des matières enfouies 62

3.9. Potentiel d'énergie de la biomasse aquatique 63
3.9.1. Potentiel d'énergie des algues 63
3.9.2. Potentiel d'énergie de l'huile de poisson 64
4. Analyse des résultats 65
4.1. Estimation du potentiel d'énergie de la biomasse en 2050 66
4.2. Formulation des scénarios 69
4.2.1. Scénario de référence (BAU) 69
4.2.2. Scénarios de politiques climatiques GES1 et GES2 71
4.3. Analyse des résultats 73
4.3.1. Profil de la consommation d'énergie finale dans le scénario BAU 73
4.3.2. Évolution de la consommation d'énergie finale dans les trois scénarios 76
4.3.3. Analyse des émissions de gaz à effet de serre 79
Discussion conclusive 80
A. ANNEXE A 82
B. ANNEXE B 100
Bibliographie 105

Liste des acronymes

Acronyme	Description
°C	Degré Celsius
btu	Unité thermale anglo-saxonne
btu/lb	Unité thermale anglo-saxonne par livre
CH_4	Méthane
CO_2	Dioxyde de carbone
CO_{2eq}	Dioxyde de carbone équivalent
EJ	Exajoule
GES	Gaz à effet de serre
GJ	Gigajoule
ha	Hectare
kcals	Kilocalories
km^2	Kilomètre carré
Kt	Kilotonne
kg	Kilogramme
L	Litre
lb	Livre
m^3	Mètre cube
Max	Maximum
Mha	Millions d'hectares
Min	Minimum
MJ	Mégajoule
Mt	Millions de tonnes
Mt sèches	Millions de tonnes sèches
Mt C/an	Millions de tonnes de carbone par année
NA	Non disponible
PJ	Pétajoule
t	Tonne
tonne C	Tonne de carbone

Liste de conversion des unités

1 t = 2204.62 lb

1 btu = 1,055. 10^{-12} PJ

1 EJ = 10^{3} PJ

1 PJ = 10^{6} GJ

1 Kt = 10^{3} t

Liste des tableaux

Tableau 1.1: Rendement en matières sèches du fumier par type d'animal 10
Tableau 2.1: Codification des provinces et territoires canadiens 32
Tableau 3.1: Répartition des terres forestières par province 50
Tableau 3.2: Surplus des résidus du bois et potentiel énergétique par province 52
Tableau 3.3: Potentiel de production du biogaz des résidus solides municipaux par province 55
Tableau 3.4: Potentiel de production d'énergie des résidus industriels par province 57
Tableau 3.5: Disponibilité de biosolides par province 58
Tableau 3.6: Intensité de production du fumier par type d'animal 59
Tableau 3.7: Potentiel d'énergie des matières enfouies par province 63
Tableau 4.1: Projection du potentiel d'énergie à partir de la biomasse agricole et forestière en 2050 67
Tableau 4.2: Projection du potentiel d'énergie des grandes cultures en 2050 67
Tableau 4.3: Projection du potentiel des résidus agricoles en 2050 68
Tableau 4.4: Potentiel d'énergie des résidus agricoles entre 2007 et 2050 68
Tableau 4.5: Réductions cibles des émissions de GES par province 72
Tableau A.1: Hypothèses sur les rendements agricoles 82
Tableau A.2: Potentiel de production du bioéthanol des grandes cultures dans les régions de l'Ouest 83
Tableau A.3: Potentiel de production du bioéthanol des grandes cultures dans les régions du Centre 84
Tableau A.4: Potentiel de production du bioéthanol des grandes cultures dans les régions de l'Est 85
Tableau A.5: Potentiel de production du bioéthanol des grandes cultures dans les régions du Nord 86
Tableau A.6: Potentiel de production du bioéthanol des résidus agricoles dans les régions de l'Ouest 86
Tableau A.7: Potentiel de production du bioéthanol des résidus agricoles dans les régions du Centre 87
Tableau A.8: Potentiel de production du bioéthanol des résidus agricoles dans les régions de l'Est 87
Tableau A.9: Potentiel de production du bioéthanol des résidus agricoles dans les régions du Nord 88
Tableau A.10: Potentiel de production du biodiesel des grandes cultures dans les régions de l'Ouest 88
Tableau A.11: Potentiel de production du biodiesel des grandes cultures dans les régions du Centre 89

Tableau A.12: Potentiel de production du biodiesel des grandes cultures dans les régions de l'Est 90
Tableau A.13: Potentiel de production du biodiesel des grandes cultures dans les régions du Nord 90
Tableau A.14: Potentiel de production du bioéthanol des cultures dédiées 91
Tableau A.15: Potentiel de production du biogaz des résidus forestiers dans les régions de l'Ouest 91
Tableau A.16: Potentiel de production du biogaz des résidus forestiers dans les régions du Centre 92
Tableau A.17: Potentiel de production du biogaz des résidus forestiers dans les régions de l'Est 93
Tableau A.18: Potentiel de production du biogaz des résidus forestiers dans les régions du Nord 94
Tableau A.19: Potentiel d'énergie de la liqueur noire 94
Tableau A.20: Potentiel de production du biogaz des déchets municipaux solides 95
Tableau A.21: Potentiel d'énergie de biosolides 95
Tableau A.22: Rendements du fumier 96
Tableau A.23: Potentiel de production d'énergie du fumier dans les régions de l'Ouest 96
Tableau A.24: Potentiel de production d'énergie du fumier dans les régions du Centre 97
Tableau A.25: Potentiel de production d'énergie du fumier dans les régions de l'Est 97
Tableau A.26: Potentiel de production d'énergie du fumier dans les régions du Nord 98
Tableau A.27: Potentiel d'énergie des matières enfouies 98
Tableau A.28: Potentiel d'énergie des algues et de l'huile de poisson 99
Tableau B.1: Estimation du potentiel d'énergie de la biomasse en 2050 dans les régions de l'Ouest 100
Tableau B.2: Estimation du potentiel d'énergie de la biomasse en 2050 dans les régions du Centre 100
Tableau B.3: Estimation du potentiel d'énergie de la biomasse en 2050 dans les régions de l'Est 101
Tableau B.4: Estimation du potentiel d'énergie de la biomasse en 2050 dans les régions du Nord 102
Tableau B.5: Évolution de la consommation d'énergie dans le BAU par secteur 102
Tableau B.6: Évolution de la consommation d'énergie finale dans le BAU par province 103
Tableau B.7: Évolution de la consommation d'énergie finale dans le BAU par région 103
Tableau B.8: Évolution de la consommation d'énergie finale dans le BAU selon la source 103
Tableau B.9: Consommation d'énergie dans les trois scénarios BAU, GES1 et GES2 104
Tableau B.10: Consommation de la biomasse dans les trois scénarios BAU, GES1 et GES2 104
Tableau B.11: Émissions de GES dans les trois scénarios BAU, GES1 et GES2 104
Tableau B.12:Composantes de l'électricité dans les trois scénarios BAU, GES1 et GES2 104

Liste des figures

Figure 1.1: Répartition des sites de rejets industriels au Canada 9
Figure 1.2: Répartition des forêts au Canada 13
Figure 1.3: Conversion thermochimique de la biomasse 18
Figure 1.4: Processus de digestion anaérobie 21
Figure 1.5: Nombre d'usines opérationnelles de production de bioéthanol par province 23
Figure 1.6: Nombre d'usines opérationnelles de production de biodiesel par province 24
Figure 2.1: Provinces et territoires canadiens 32
Figure 2.2: Vue partielle du système énergétique de référence 34
Figure 2.3: Détermination de l'équilibre partiel dans le modèle MARKAL-TIMES 35
Figure 3.1: Potentiel minimal de production du bioéthanol des grandes cultures par province 45
Figure 3.2: Potentiel maximal de production du bioéthanol des grandes cultures par province 45
Figure 3.3: Potentiel minimal de production du biodiesel des résidus agricoles par province 47
Figure 3.4: Potentiel maximal de production du biodiesel des résidus agricoles par province 47
Figure 3.5: Potentiel minimal de production du biogaz des résidus agricoles par province 48
Figure 3.6: Potentiel maximal de production du biogaz des résidus agricoles par province 49
Figure 3.7: Inventaire de la disponibilité des résidus forestiers par province 51
Figure 3.8: Partage de production papetière au Canada 53
Figure 3.9: Potentiel de production d'énergie de la liqueur noire par province 54
Figure 3.10: Potentiel maximal de production d'énergie de biosolides par province 59
Figure 3.11: Potentiel minimal de production d'énergie du fumier par province 61
Figure 3.12: Potentiel maximal de production d'énergie du fumier par province 61
Figure 4.1: Projection de la population par province en 2050 : scénario de référence de TIMES-Canada 70
Figure 4.2: Projection du PIB par province en 2050 : scénario de référence de TIMES-Canada 71
Figure 4.3: Projection de la consommation d'énergie finale dans le BAU 74
Figure 4.4: Projection de la consommation d'énergie finale par secteur dans le BAU 75
Figure 4.5: Projection de la consommation d'énergie finale par province dans le BAU 76
Figure 4.6: Consommation d'énergie finale dans les trois scénarios 77
Figure 4.7: Consommation de la biomasse dans les trois scénarios 78
Figure 4.8: Sources de production de l'électricité dans les trois scénarios 78
Figure 4.9: Émissions de GES dans les trois scénarios 79

Remerciements

J’adresse mes plus sincères remerciements tout d’abord à mon directeur de recherche Olivier BAHN et à mon codirecteur Jean-Philippe WAAUB pour leur disponibilité et leur patience pour mener à bien ce travail.

Je tiens à remercier également Kathleen VAILLANCOURT, coordinatrice du projet TIMES-Canada, pour ses conseils et la confiance qu’elle m’a témoignée.

J’adresse aussi ma gratitude à tous les membres du GERAD, en particulier à l’équipe E2G, pour les moments de joie, de discussions et de travail que nous avons partagés ensemble durant ce mémoire.

Merci à ma famille et mes amis qui étaient toujours à mes côtés.

Je remercie enfin toute personne qui a contribué, de près ou de loin, à la réussite de ce travail.

« Soyons reconnaissants aux personnes qui nous donnent du bonheur ; elles sont les charmants jardiniers par qui nos âmes sont fleuries ».

Marcel Proust

Introduction

Dans un contexte où les ressources en pétrole se raréfient, le Canada s'intéresse de plus en plus de sa sécurité énergétique à l'égard des grands producteurs du pétrole, particulièrement les producteurs du Moyen-Orient et de la Russie. Actuellement, on estime que les réserves du pétrole pourront servir uniquement pour 40 ans sur le rythme de consommation actuel. Au Canada, en dépit des réserves en pétrole albertain, le pays a importé en 2010 48,7% de ses besoins énergétiques en pétrole en grande partie de l'Algérie.

D'autre part, les concentrations du dioxyde de carbone provenant essentiellement du secteur du transport sont en forte croissance. En un siècle, les températures moyennes de différents pays du monde ont indiqué une augmentation de plus de 0,6 °C, ce qui pourrait augmenter la fréquence des catastrophes naturelles, le recul des glaciers et l'élévation du niveau marin.

Face à ces inquiétudes, le recours aux énergies renouvelables est devenu une priorité indispensable dans la lutte contre le réchauffement climatique.

On se demande alors quelles sont les mesures possibles pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, quelles ressources devrions-nous utiliser et en quelles quantités.

Pour pouvoir répondre à ces questions, le choix d'un modèle prospectif qui intègre un ensemble large de stratégies est nécessaire. Cette approche permettra de construire plusieurs scénarios sous des contraintes multiformes afin d'évaluer le contexte énergétique dans le futur. À cet égard, différentes familles de modèles ont été conçues dont la famille MARKAL (MARket-ALlocation) qui est utilisée actuellement par une large communauté internationale qui compte 37 pays (Eia, 2007). Le modèle TIMES (The Integrated Markal Efom System) représente la dernière incarnation de la famille MARKAL. Il a été développé par des membres du GERAD (Groupe des Études et de Recherches en Analyse de Décisions) au sein de l'ETSAP (Energy Technolgical System Analysis Program) de l'AIE (Agence Internationale de l'Énergie). L'intérêt du modèle TIMES est de minimiser le coût technique, économique ou environnemental du système énergétique en question sous différentes contraintes.

Le modèle TIMES-Canada décrit de façon suffisamment détaillée le système énergétique canadien en mettant en œuvre toutes les technologies de conversion de toutes les énergies primaires (énergies renouvelables, biomasse et énergies fossiles). La modélisation comprend aussi tous les secteurs de la demande des services d'énergie à savoir le secteur industriel, commercial, résidentiel, agricole et du transport.

Dans la présente étude, nous montrons comment le modèle TIMES-Canada permet de clarifier les répercussions environnementales des options politiques. Dans ce qui suit, nous fournissons des estimés sur le potentiel d'énergie à partir de la biomasse disponible au Canada et nous examinons son éventuelle utilisation en 2050 afin de réduire les émissions de GES. Pour chaque catégorie de la biomasse, nous avons estimé son potentiel géographique à l'échelle provinciale, soit l'ampleur de la quantité accessible de la biomasse en tenant compte des contraintes technologiques, légales, topographiques et écologiques. Des rapports fédéraux et provinciaux, des rapports de thèse, des sites web d'organisations non gouvernementales et des statistiques ont été à l'appui pour construire de la façon la plus soignée et fiable la base de données du module de la biomasse dans le modèle TIMES-Canada. Les données sont présentées sous forme d'un fichier de calcul Excel qui peut être consulté de façon interactive. Elles montrent à l'utilisateur la quantité de biomasse disponible, la superficie récoltée, la production annuelle et les rendements. Une partie de l'étude est consacrée à la construction de scénarios afin de mesurer l'efficacité de l'introduction de la biomasse dans la réduction des émissions de GES d'ici 2050.

Le rapport s'articule autour de quatre chapitres. Le premier chapitre trace le contexte énergétique canadien global et définit toutes les sources considérées de la biomasse ainsi que les modes de production de biocarburants. Le chapitre suivant introduit la modélisation prospective et décrit le modèle TIMES-Canada et son utilité. Le troisième chapitre s'intéresse à présenter la méthodologie d'estimation du potentiel d'énergie de la biomasse dans chaque province et territoire du Canada. Les sources et les hypothèses sont exposées aussi de façon détaillée. Dans le dernier chapitre, nous présenterons les trois scénarios construits ainsi que les résultats du modèle. Nous conclurons le rapport avec les apports de la modélisation et les pistes d'amélioration.

1. Contexte énergétique de la biomasse au Canada

Le bois était la première source de biomasse utilisée pour le chauffage et la cuisson. Avec l'arrivée de l'industrie, le bois est devenu une source insuffisante et incapable de répondre à tous nos besoins en énergie. Il a fallu donc remplacer le bois par du charbon et du pétrole. Actuellement, la baisse de la disponibilité des ressources fossiles et l'importance d'assurer un minimum de sécurité environnementale et énergétique amène un renouveau d'intérêt pour la biomasse.

Au Canada, la biomasse d'origine forestière constitue la deuxième plus importante source d'énergie renouvelable après l'énergie hydraulique (CanmetÉNERGIE, 2007). Son avantage le plus reconnu par rapport aux autres sources renouvelables est le fait qu'en plus de produire de l'énergie, elle permet de réduire en particulier le volume des déchets des activités humaines ainsi que leurs impacts sur l'environnement.

L'intérêt de ce chapitre est d'introduire les différentes sources de biomasse au Canada et de décrire les processus de gestion des biocarburants.

1.1. Sources de biomasse

Le terme biomasse renvoie sur tout type de matière organique vivante ou éteinte, végétale, animale ou fongique qui peut provenir de deux sources : une source cultivée ou une source résiduelle. L'activité cultivée comprend une partie de la matière destinée à l'industrie pour la production de bioproduits comme le biodiesel et le bioéthanol. Les résidus de biomasse comprennent le reste de la récolte agricole, les matériaux abîmés, les résidus de transformation du bois, les déchets animaux et les déchets industriels, résidentiels et municipaux.

Les sources de la biomasse sont très nombreuses. Nous nous sommes limités ici à la liste suivante :

- Les grandes cultures : maïs, blé, culture d'amidon (avoine et orge), culture du sucre, soja, colza, huile végétale (huile de tournesol essentiellement)
- Les résidus agricoles : paille, canne de maïs, foin et résidus de colza
- Les résidus graisseux : suif et graisses jaunes
- Les cultures énergétiques dédiées : panic érigé

- Les résidus de transformation industrielle
- Les résidus organiques municipaux
- Les déchets des sites d'enfouissement
- Le fumier : produits laitiers, bœufs, porcs, volailles, turques et moutons
- Les biosolides
- Les résidus forestiers : sciure de bois, résidus de bois franc, résidus résineux et résidus d'usines de bois
- La liqueur noire
- La biomasse aquatique : algues et huile de poisson

1.1.1. Biomasse agricole

L'inventaire de la biomasse agricole comprend :

- les grandes cultures : maïs, blé, culture d'amidon, orge, avoine, cultures sucrières, soja, colza, huile végétale (huile de tournesol), suif et graisse jaune
- les résidus agricoles : paille, canne de maïs, foin et résidus de colza

La production d'énergie de la biomasse agricole peut être extraite de la plante intégrale (cultures dédiées), de la récolte (grains) ou des résidus de culture.

1.1.1.1. Grandes cultures

La récolte des grandes cultures dépend de la précipitation et de la variabilité de la température. Une variabilité importante du facteur temps peut mettre en cause les rendements agricoles et par la suite la disponibilité de biomasse pour la production d'énergie. Au Canada, il y a trois types de terres :

- Les terres arables : elles désignent toute terre pouvant être labourée comprenant ainsi les superficies en jachère, en culture et en foin ainsi que les pâturages ensemencés ou cultivés. Les terres en jachère sont des terres fertiles abandonnées temporairement sans culture pour qu'elles produisent plus tard amplement. Le désherbage de ces terres se fait en travaillant le sol et en utilisant les produits chimiques.

- Les terres non cultivables : elles ne font pas partie des terres exploitables. Leur compte ne fait pas augmenter le potentiel énergétique à partir de la biomasse. Elles comprennent les terres très humides, très sèches, très pentues ou très froides, les pâturages naturels et les terres boisées. En particulier, les terres humides sont les terres recouvertes d'eau en permanence ou de façon temporaire. Elles sont protégées par une convention internationale vu leur importance à absorber les inondations, éliminer les substances toxiques et procurer un abri pour plusieurs espèces. Les terres humides comprennent les marais d'eau salée et d'eau douce, les marécages boisés, les forêts inondées et les tourbières.
- Les pâturages naturels : ce sont des prairies très sèches, très pierreuses et non fertiles délaissées plusieurs années. Elles englobent les prairies de graminées, les grandes prairies destinées au fourrage, les prairies montagneuses, les pâturages grossiers et la Toundra. Les pâturages naturels assurent la protection du sol contre l'érosion et la repousse d'herbes pour produire du bétail. On peut augmenter les surfaces cultivables par la déforestation ou en exploitant les prairies. Cependant, la productivité de ces terres serait inférieure à la productivité moyenne ordinaire.

Au Canada, plus de 85% de la superficie des terres cultivables, soit près de 32 Mha, se trouvent dans les Prairies (l'Alberta, la Saskatchewan et le Manitoba) où emportent les cultures céréalières (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2008).

1.1.1.2. Résidus de cultures

La production de la bioénergie à partir des produits de récolte devient coûteuse surtout avec la hausse des prix des matières premières et de par la concurrence avec l'utilisation pour l'alimentation. L'accès aux résidus de l'agriculture comme la paille, la canne de maïs, le foin et les résidus de colza prend de plus en plus d'ampleur en raison de leur abondance. Néanmoins, l'utilisation des résidus pour la production d'énergie pose plusieurs problèmes au niveau de la combustion à cause de leur teneur élevée en potassium. À titre d'exemple, la paille de blé renferme entre 6,5% et 10 % de cendres, 1 % de potassium et 0,4 % de chlore (Samson et ass., 2000, cité par IREF, 2008). Bien que la paille constitue une bonne source de matière première, sa teneur en potassium décourage les producteurs de l'utiliser pour la production de bioénergie.

1.1.1.3. Cultures dédiées

Les cultures dédiées sont des plantations herbacées comme le panic érigé et le miscanthus, cultivées périodiquement sur un an, trois ans ou dix ans de rotation et qui sont conçues spécialement pour la production d'énergie. Elles sont formées de lipides, de protéines, d'huiles et de carbohydrates. Elles sont aussi riches en fibres d'où leur appellation de plantations lignocellulosiques. Les cultures dédiées sont bien adaptées pour la conversion thermochimique et sont préférables aux grandes cultures et aux résidus agricoles.

1.1.2. Déchets organiques

Les déchets désignent le reste de toute matière dangereuse ou non, qui sera recyclé ou éliminé. Les déchets dangereux regroupent les matières nocives pour la vie humaine et l'environnement. Ils peuvent provenir des industries, des usines de transformation, du secteur médical ou des matières abîmées comme les pesticides et les lubrifiants usés. Ces déchets peuvent être toxiques, inflammables ou corrosifs mettant ainsi la santé humaine en risque perpétuel. Pour cela, le Canada a défini des conditions de traitement de ces matières par recyclage ou élimination dans des équipements autorisés. Quant aux déchets non dangereux qui sont souvent nommés au Canada des déchets solides municipaux, ils contiennent les matières recyclables, fermentables et tous les déchets non résidentiels (industries, commerces, institutions, construction et démolition).

Les résidus sont classés selon leur provenance en :

- résidus industriels : boues des industries agroalimentaires, déchets de transformation des industries végétales et animales, fraction fermentable des déchets industriels banals
- résidus municipaux : journaux, emballages, coton, textiles, déchets verts et sous-produits de l'assainissement urbain
- résidus agricoles : déjections d'animaux, substrats végétaux solides et bois déchiquetés

Au Québec, les émissions de GES des matières résiduelles ont représenté 5,9 % des émissions totales de GES au Québec soit une quantité de 4,8 Mt de CO_{2eq} (Paradis, 2011).

1.1.2.1. Résidus de transformation industrielle

Les déchets industriels sont les parties inutilisées lors de l'extraction des matières premières ou les déchets mis à part lors du raffinage des matériaux bruts. Ils proviennent des manufactures, des services, de l'agriculture et du secteur de la construction. Ils peuvent être solides, liquides ou gazeux.

Les déchets industriels peuvent être des déchets inertes, des déchets industriels banals (DIB) ou des déchets industriels spéciaux (DIS). Les déchets inertes sont des résidus minéraux, stables et inoffensifs. Ils sont généralement constitués de briques, du béton, de tuiles, de cailloux et de minéraux. Les déchets industriels banals sont formés de ferraille, de papier, de textile, de plastique et de déchets organiques. Ils sont dangereux dans la mesure où ils prolifèrent rapidement ou que leur consommation de ressources est énorme. Les déchets industriels spéciaux renferment des substances toxiques dangereuses (solvants, matériaux souillés...). Pour cela, ils doivent subir un traitement spécial et adapté. Au Canada, les sites de rejet industriels se trouvent principalement dans le sud de l'Ontario et du Québec et en périphérie des grandes villes en Colombie-Britannique et dans les Prairies. (Voir figure 1.1)

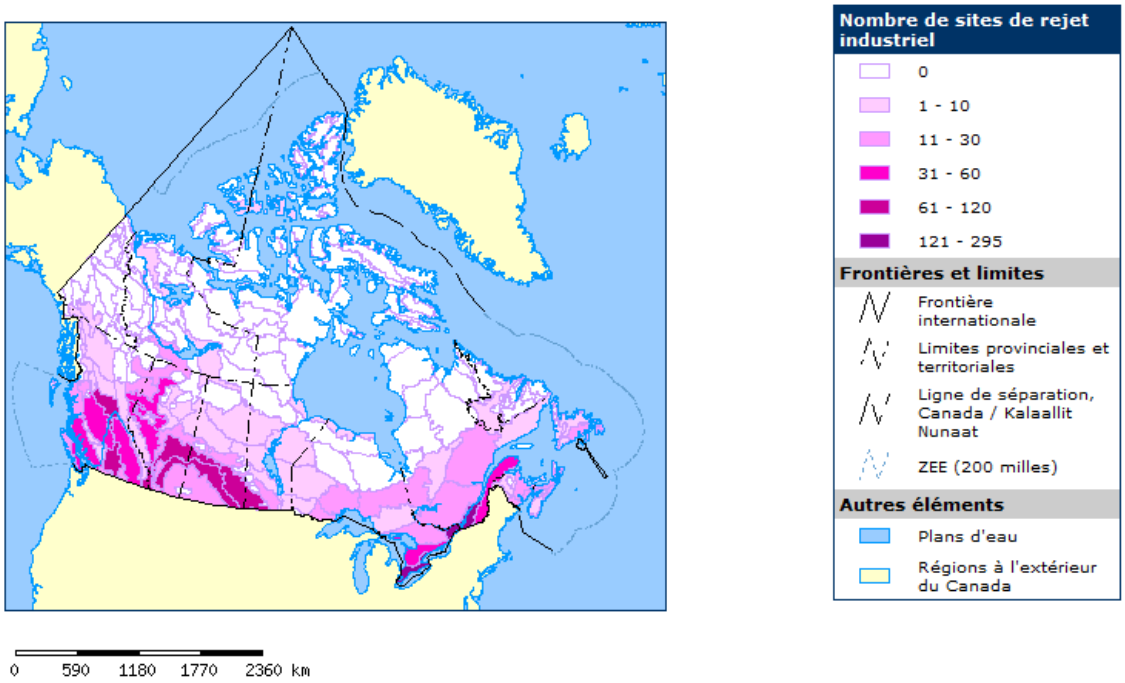

Figure 1.1: Répartition des sites de rejets industriels au Canada

(Ressources naturelles Canada, 2003b)

1.1.2.2. Résidus organiques municipaux

Les résidus organiques municipaux désignent toute matière putrescible qui demande l'intervention des communes pour s'en débarrasser comme les ordures organiques ménagères, les boues de station d'épuration, les déchets verts des collectivités et les déchets de nettoiement. Les déchets solides municipaux englobent les matières recyclables des résidences et des lieux de construction.

Au Canada, la gestion des déchets solides municipaux est une tâche commune et partagée entre le gouvernement fédéral, les gouvernements provinciaux/territoriaux et les gouvernements municipaux. Il existe 250 organismes municipaux au Québec qui représentent plus de 70 % des ménages et qui s'engagent pendant la saison estivale dans la collecte des résidus verts (Taillefer, 2010). Au Canada, une personne génère en moyenne 750 kg/année de déchets solides municipaux (Kajat, 2006). En 2006, le Canada a traité au total 773 000 t de déchets solides municipaux (Environnement Canada, 2010b). Les quatre principales installations de traitement

thermique ont généré ensemble 5 229 000 GJ d'énergie dont plus de 2 644 000 GJ ont été revendues sous forme de vapeur, d'électricité et d'eau chaude (Environnement Canada, 2010b).

1.1.2.3. Fumier

Le fumier est une matière organique qui provient des déjections d'animaux solides. Après compostage, il sert de fertilisant pour les terres agricoles grâce aux nutriments qu'il renferme. Il contient aussi de l'azote, du potassium, du phosphore et des oligo-éléments. Les fumiers sont très hétérogènes et diffèrent selon la nature de l'élevage, l'âge et la nature d'exploitation. Ils peuvent être très aérés, déjà décomposés ou peu perméables.

L'utilité principale du fumier est d'améliorer la qualité des terres. Néanmoins, il peut constituer une source de production d'énergie par processus de méthanisation. La méthanisation du fumier permet de produire du biogaz en vue de l'utiliser pour produire de la chaleur (dans un brûleur) ou de l'électricité (dans un cogénérateur). La méthanisation solide s'applique lorsque la matière sèche a un taux au-dessus de 15% à 20% des déchets à digérer.

Le tableau 1.1 donne les quantités en matière sèche obtenues pour chaque type de fumier.

Tableau 1.1: Rendement en matières sèches du fumier par type d'animal

(Jeanmaire, 1999)

Type d'animal	**Rendement en matières sèches (kg/t)**
Bovins	190-220
Chevaux	220
Moutons et chèvres	220
Porcs	250
Volailles	400-750

1.1.2.4. Matières enfouies

L'enfouissement est la façon la plus traditionnelle et la plus utilisée dans la majorité des pays pour se débarrasser des déchets. Les lieux d'enfouissement contribuent de 20% aux émissions

du méthane au Canada (Environnement Canada, 2010c). Ils génèrent près de 27 Mt de CO_{2eq} par année dont 20 Mt de CO_{2eq} sont émises dans l'air (Environnement Canada, 2010c). Seulement 7 Mt de CO_{2eq} sont retenues et brûlée soit l'équivalent des émissions de près de 5,5 millions de voitures (Environnement Canada, 2010c).

Les industries émettent leurs rejets dans les plans d'eau ou dans l'air où ils les acheminent vers des sites d'enfouissement. L'enfouissement des matières organiques est une solution pratique, rapide et peu coûteuse. Cependant, la biodégradation en absence d'oxygène produit le lixiviat riche en polluants qui s'écoule avec les ruissellements d'eau et qui transporte ainsi les produits chimiques dangereux des sites d'enfouissement vers les plans d'eaux.

La récupération du biogaz libéré permet à la fois de réduire les émissions de GES et de mettre en valeur l'énergie sous forme d'électricité, de chaleur ou de biocarburant.

1.1.3. Biomasse forestière

1.1.3.1. Étendue des forêts canadiennes

La grande diversité des matières cellulosiques au Canada (bois, troncs, branches, feuilles, racines d'arbres…) fait de la biomasse forestière une source avantageuse. En effet, le bois fournit 5 à 10 fois plus d'énergie que les résidus agricoles utilisés généralement pour le fourrage et le conditionnement du sol. Par ailleurs, la faible population du Canada (34 millions d'habitants) en opposition à l'immense superficie de ses forêts aménagées (plus de 2 millions de km^2) et son grand approvisionnement annuel en bois (250 millions de m^3) fournissent au Canada un potentiel important de production d'énergie de la biomasse forestière. Les terres boisées constituent la plus grande réserve de biomasse et représentent 10% des terres boisées dans le monde (Ressources naturelles Canada, 2011b). Ces terres boisées procurent à elles seules 74 milliards de dollars à l'industrie forestière (Wood et Layzell, 2003, cité par Smith *et al*., 2009).

Au Canada, il existe 347,7 Mha de forêts, 41,8 Mha d'autres types de terres boisées et 7,8 Mha d'autres terres arborées (Ressources naturelles Canada, 2011b). 25% des inventaires des forêts sont des forêts productives (Smith *et al*., 2009). 71% des forêts appartiennent aux provinces, 22% appartiennent au gouvernement fédéral (y compris les forêts territoriales) et 7% des terres boisées sont des propriétés privées (Smith *et al*., 2009).

1.1.3.2. Caractéristiques des forêts canadiennes

L'étude des types de forêts au Canada permet de définir son écosystème et de fournir des renseignements pour orienter les politiques et les décisions de gestion des ressources forestières pour une future exploitation.

Les forêts du Canada couvrent en totalité neuf écozones : la Taïga des plaines, les Plaines boréales, le Bouclier boréal, la Cordillère boréale, la Maritime du Pacifique, la Cordillère montagnarde, les Prairies, la Maritime de l'Atlantique et les Plaines à forêts mixtes. La nature des forêts varie selon la zone et le climat. En effet, il existe trois principaux types de forêts dans le monde : la forêt des régions équatoriales, la forêt des zones modérées et la forêt des régions froides.

La forêt boréale ou la Taïga constitue la majeure partie des forêts canadiennes avec une occupation de 72% (Ressources naturelles Canada, 2011c). Elle s'étend du territoire de Yukon jusqu'aux Terre-Neuve-et-Labrador. Elle comprend pareillement l'Alaska, la Sibérie, la Finlande, la Suède et la Norvège (Stanton) avec environ 30% au Canada (Ressources naturelles Canada, 2011c).

La forêt de la zone modérée s'étale le long de la côte du Pacifique et dans le Sud-ouest de l'Ontario. La grande partie des conifères se trouve dans les provinces de l'ouest en particulier en Colombie-Britannique. Les forêts des feuillus se trouvent dans le sud du Canada où le climat chaud et humide favorise la croissance de ce biome. (Voir figure 1.2)

Dans la forêt mixte coexistent les conifères et les feuillus, notamment entre la forêt boréale et la forêt des feuillus. Les forêts mixtes présentent des sols riches et cultivables où les activités agricoles sont avantageuses, contrairement au nord du Canada où l'exploitation forestière est plus adaptée.

Il existe aussi au Canada des forêts urbaines qui forment le paysage du pays. Le but de ces paysages n'est guère la production du bois, mais la préservation des environnements forestiers indigènes du Canada.

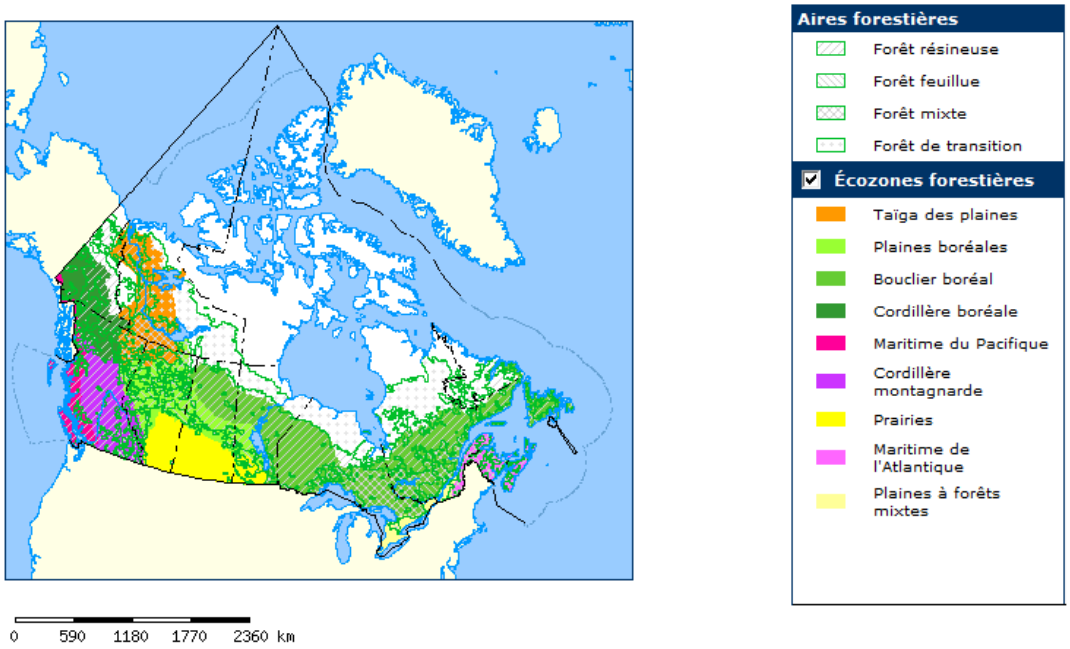

Figure 1.2: Répartition des forêts au Canada

(Ressources naturelles Canada, 2003a)

1.1.3.3. Biomasse forestière et environnement

La biomasse forestière possède plusieurs avantages environnementaux. Les racines des arbres stabilisent la terre contre l'érosion. Elles protègent aussi les sols contre les vents et les inondations et réduisent la sédimentation. Une forêt en croissance permet également d'absorber du gaz carbonique de l'atmosphère et réduire ainsi l'effet de serre de la planète (Thierry, 2012). De plus, pendant l'hiver, les forêts freinent les vents froids et offrent de l'ombre durant l'été, réduisant ainsi les coûts de climatisation jusqu'à 50% (Thierry, 2012). Par ailleurs, certaines forêts constituent des habitats pour des espèces indigènes permettant ainsi la préservation de l'équilibre de l'écosystème.

Les forêts ont également plusieurs avantages industriels, économiques et sociaux. En effet, en 2008, le Canada a exporté un total net de 30,2 milliards de dollars de produits forestiers dont 70,8% sont destinés aux États-Unis, fournissant ainsi 273 700 emplois directs et appuyant 300 collectivités forestières (ArbresCanada, 2010). Encore plus, les zones forestières constituent un lieu de pratique d'activités récréatives indispensable pour le bien-être des individus. Pour cela, il est impossible de profiter de la totalité des richesses forestières pour produire de la bioénergie.

1.1.3.4. Responsabilité de gestion des forêts

En 2007, les insectes ont détruit 18,6 Mha de forêts canadiennes sur une superficie totale de 417,6 Mha. En 2008, 1,7 Mha ont été brûlés par des incendies (ArbresCanada, 2010). Annuellement, 5 Mha à 6 Mha de la forêt boréale au Canada sont défoliées par les mêmes causes, ce qui représente une superficie égale à cinq fois celle exploitée chaque année par la récolte commerciale (Ressources naturelles Canada, 2011c). Ce n'est pas tout, la surexploitation des terres forestières, le retrait excessif des résidus ligneux (feuilles, branches,…) ainsi que la déforestation pour des raisons d'extension d'agriculture mettent en danger les forêts canadiennes en provoquant l'appauvrissement du sol et la dégradation des ressources forestières.

De ce fait, la protection des forêts canadiennes est devenue une priorité pour le gouvernement fédéral. Le Canada a mis en place un ensemble de démarches pour diriger la gestion des forêts canadiennes. Toutes les parties de la société sont responsables de la préservation de la biodiversité et du maintien de l'équilibre de l'écosystème forestier. Les provinces s'intéressent davantage à la protection des richesses forestières. Elles ont entrepris des nouvelles mesures de gestion forestière et ont investi dans des pratiques de reboisement des forêts. Par exemple, en 2008, près de 447 195 ha ont été reboisés et 34 602 ha ont été semés (Ressources naturelles Canada, 2011c). Par ailleurs, les gouvernements fédéraux ont déclaré la nécessité de protéger les réserves fauniques, les réserves naturelles et les parcs. Actuellement, 15% de la forêt boréale n'a pas encore aucun accès terrestre et 8% de cette forêt est interdite de toute exploitation (Ressources naturelles Canada, 2011c). De la totalité des forêts canadiennes, 7,6% sont protégées dont 95 % sont dotées d'une protection totale (ArbresCanada, 2010). Pour le reste, un niveau d'exploitation humaine est permis pour des raisons d'activités agricole, minière ou forestière.

1.1.3.5. Piste de potentiel d'énergie de la biomasse forestière

Chaque année, le Canada récolte moins de 1 % de ses forêts (0,7 Mha ont été exploités en 2008) (Ressources naturelles Canada, 2011b). La grande partie de la biomasse récoltée est formée de résidus du bois rond appelés aussi résidus ligneux, qui constituent la source de bioénergie la plus disponible au Canada. Ces résidus comportent toutes les parties des arbres qui sont défaites après le retrait de la quantité de bois destinée au commerce.

La biomasse forestière utilisable pour la production de la bioénergie provient de différentes sources. Elle englobe les arbres âgés et inadaptés pour produire du bois d'œuvre, les arbres morts par des catastrophes naturelles (ravage d'insectes, incendie ou maladies), les résidus des procédés de construction et de démolition et le reste des coupes précommerciales des peuplements forestiers. On compte aussi les déchets forestiers industriels comme la sciure de bois, les écorces et les copeaux (Ressources naturelles Canada, 2012).

Les résidus du bois varient selon l'espèce, l'âge, le lieu géographique et la saison de récolte. Le taux d'élimination des résidus dépend des caractéristiques du sol (niveau d'humidité, pente du terrain, fertilité…), de la hauteur de coupe, des pratiques de rotation agricoles et des facteurs climatiques. Comme pour le cas des résidus agricoles, une proportion de résidus forestiers doit être laissée pour des raisons de maintien de la fertilité du sol. Tout cela peut affecter la disponibilité de la biomasse et par la suite donc le potentiel de production d'énergie.

Comparativement au potentiel d'énergie de la biomasse agricole, le potentiel d'énergie des forêts est de loin plus grand. Ceci revient au fait que la majorité des résidus agricoles est utilisée comme fourrage, pour conditionner le sol ou pour des fins énergétiques.

1.1.4. Liqueur noire

Les entreprises de l'industrie des pâtes et papiers utilisent les fibres cellulosiques pour les transformer en pâtes, en papiers et en cartons. Au Canada, 95% des fibres de cellulose dérivent du bois des forêts (Minnes, 2012). Le reste comprend du coton et de chiffons ou du vieux papier (Minnes, 2012). En ce sens, la liqueur noire peut être définie comme un sous-produit liquide de l'industrie papetière. C'est une solution aqueuse constituée de lignine et d'hémicellulose, récupérée et utilisée pour produire du combustible qui fournit de l'électricité et de la chaleur aux industries des pâtes et papiers à travers le procédé de cogénération. On utilise par ailleurs la gazéification pour obtenir un meilleur potentiel d'énergie. Au Canada, la production du méthanol en 2003 à partir de la liqueur noire a atteint 24 Mt (Tampier *et al*., 2004). On estime que le potentiel d'énergie correspondant est de 282 PJ/année (Tampier *et al*, 2004).

1.1.5. Biomasse aquatique

Les milieux aqueux se caractérisent par une température stable qui aide à maintenir les plantes marines riches en éléments nutritifs. A priori, l'objectif essentiel de ces milieux aqueux n'est pas la production alimentaire. Par conséquent, ils peuvent représenter une source importante pour produire de la biomasse marine.

Le Canada possède le plus long littoral au monde et la plus grande partie des ressources en eau douce et marine. Le secteur de l'aquaculture au Canada a un poids industriel considérable et peut générer plus de 308 000 t de production aquacole en 2020 (Pêches et Océans Canada, 2009). L'aquaculture désigne toute activité de culture et de récolte végétale ou animale que l'on exerce en bord de mer, des rivières et des étangs. Nous nous intéressons dans cette étude principalement à la pisciculture et l'algoculture.

1.1.5.1. Algues

Les algues sont des organismes photosynthétiques qui ne possèdent ni de feuilles ni de racines ni de tiges. Elles poussent entre 10 fois et 100 fois plus rapidement que les cultures terrestres et leur rendement peut atteindre 38 000 litres par demi-hectare (Cadoret et Bernard, 2008, cité par Palluet et Pineau, 2012).

Les algues marines peuvent être cultivables ou sauvages. Elles sont utilisées pour la production alimentaire, la production du textile et dans les secteurs pharmaceutique et biotechnologique. Elles se classifient en microalgues et macroalgues. Les microalgues sont riches en huile sous forme de triglycéride, mais leur culture est contraignante. Les macroalgues sont pauvres en lipides et leur rendement espéré n'est pas satisfaisant. De ce fait, les microalgues constituent une meilleure source pour produire les biocarburants. Palluet et Pineau (2012) citent que les scientifiques du Laboratoire National sur les Énergies Renouvelables affirment que les microalgues sont capables de « synthétiser 20 fois plus d'huile à l'hectare que les plantes terrestres oléagineuses utilisées pour la fabrication de biocarburants».

1.1.5.2. Huile de poisson

L'huile de poisson est extraite des tissus biologiques y compris les déchets de l'intestin des poissons gras. Les déchets de l'huile de saumon représente une bonne source pour la production du biodiesel. Le Canada est le quatrième plus important producteur de saumons d'élevage dans le monde après la Norvège, le Chili et le Royaume-Uni (Pêches et Océans Canada, 2011). La production des saumons représente 73% du volume de la production totale d'aquaculture (Pêches et Océans Canada, 2011). Au Canada, la Colombie-Britannique se place en premier lieu dans la production de poisson et de mollusques. Viennent ensuite le Nouveau-Brunswick, l'Île-du-Prince-Édouard, la Terre-Neuve-et-Labrador et enfin la Nouvelle-Écosse (Pêches et Océans Canada, 2011).

1.2. Modes de conversion de la biomasse en énergie

La gestion des déchets appelée rudologie est un processus de collecte, de transport et de traitement des restants de produits pour les réutiliser ou les éliminer. Les restants de produits peuvent être utilisés entièrement, mais cela ne permet pas de freiner l'ampleur de la production des déchets industriels. Au lieu de les abandonner, les déchets peuvent constituer une ressource de matières biodégradables qui permet de récupérer du biogaz pour produire de l'électricité, de la chaleur ou comme substitut aux carburants.

La combustion des matériaux organiques était le moyen principal pour produire de l'énergie dans les résidences. L'avancement technologique au fil du temps a permis l'évolution des modes de conversion de la biomasse pour produire de l'énergie. Il existe six techniques de transformation de la biomasse en énergie. Il y a des techniques de transformation par voies thermochimiques et d'autres transformations par voies biologiques et biochimiques (CanmetÉNERGIE, 2007).

1.2.1. Voies thermochimiques

Les techniques de transformation thermochimiques consistent en la dégradation des matériaux pour obtenir un biogaz de synthèse appelé *syngas*. Le biogaz obtenu est transformé par la suite en hydrocarbure que l'on ajoute aux carburants.

On distingue quatre techniques thermochimiques :

- L'incinération : c'est un mode de conversion des résidus agricoles, des résidus forestiers et des pâtes de papiers pour produire de l'électricité et de la chaleur.
- La gazéification : c'est un processus d'oxydation partielle des résidus agricoles, des résidus forestiers et des déchets urbains en présence de la vapeur pour produire le *syngas*. La figure 1.1 illustre le processus de conversion thermochimique des résidus agricoles et forestiers par gazéification.
- La pyrolyse : elle consiste à convertir les résidus agricoles et forestiers en absence d'oxygène.
- Le traitement thermique et catalytique ou transestérification : ce processus désigne la conversion des huiles végétales nouvelles et usées ainsi que les cultures et les résidus agricoles pour produire du biodiesel.

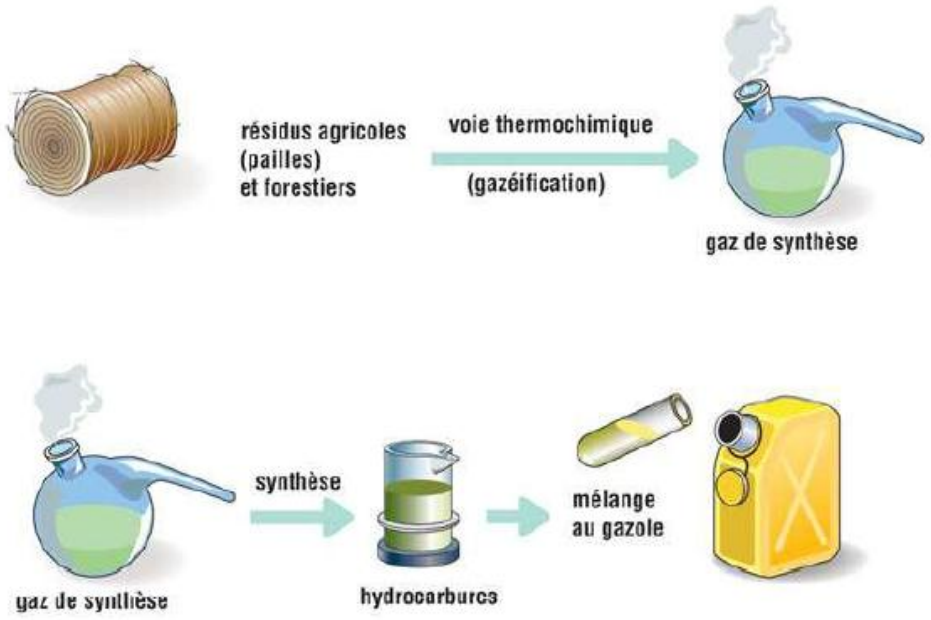

Figure 1.3: Conversion thermochimique de la biomasse[1]

(planet-energie.com, cité par Palluet et Pineau, 2012)

[1] Le biocarburant peut être utilisé directement plutôt qu'être mélangé au gazole

L'incinération a été développée dans les années 1960 en raison d'un manque de sites d'enfouissement. C'est une technique de transformation des déchets en cendre, en fumées ou en mâchefers. Les mâchefers est la fraction solide des matériaux qui n'ont pas été brûlés et qui peuvent être utilisés comme matériaux de construction. L'incinération réduit de 70% la quantité des déchets et de 90% leur volume (Vedura, 2010).

Quant à la combustion, elle se produit dans des conditions de 850°C. Elle agit efficacement et détruit les microbes des déchets. Cependant, elle fait l'objet d'une grande partie des émissions de dioxines et de furannes qui doivent être quasi éliminés. En effet, en 2006, ces émissions ont contribué de 22,5 % aux émissions totales de GES au Canada.

1.2.2. Voies biologiques et biochimiques

Les techniques biologiques et biochimiques font intégrer des micro-organismes comme les levures, les bactéries et les enzymes qui se mettent à dégrader la biomasse et la faire dissoudre.

On distingue deux sortes de traitements :

- La fermentation qui consiste en la transformation de l'amidon et de la cellulose en bioéthanol.
- La digestion anaérobie appelée aussi méthanisation ou biométhanisation, par laquelle le biogaz est produit à partir du fumier, des résidus agricoles, des résidus industriels et des déchets municipaux.

Nous expliquons dans ce qui suit le processus de digestion anaérobie. En effet, c'est un procédé biologique naturel de transformation de matières organiques en biogaz. Les matières premières de la méthanisation peuvent inclure du fumier, des lisiers d'animaux domestiques, des boues de station d'épuration, des résidus agricoles, des déchets industriels, des résidus forestiers et des déchets de cuisine. La quantité du biogaz extraite varie selon la nature du résidu et le niveau d'avancement de la fermentation. La dégradation se produit en milieu microbien en absence d'oxygène. Elle produit du biogaz et du digestat. Le digestat est le reste des déchets formés de matières organiques non dégradées et de bactéries excédentaires. Il peut être utilisé après traitement pour fertiliser les terres agricoles ou être enfoui. Le biogaz est utilisé pour produire de l'électricité, de la chaleur ou comme un biocarburant.

Le processus de digestion anaérobie se déroule en quatre étapes :

- L'hydrolyse : elle consiste en la décomposition de la matière organique en molécules simples par des enzymes hydrolytiques.
- L'acidogénèse : c'est la phase durant laquelle des micro-organismes dit acidogènes transforment les molécules simples en composés neutres et en acides organiques.
- L'acétogénèse : à l'aide des bactéries acétogènes, les substrats se transforment en acétate, en hydrogène et en CO_2.
- La méthanogénèse : selon le type de bactéries méthanogènes (acétoclastiques ou hydrogénophiles), cette phase peut se produire soit par décarboxylation ou par réduction du CO_2.

Le schéma 1.4 explique en détails les phases du processus de la digestion anaérobie.

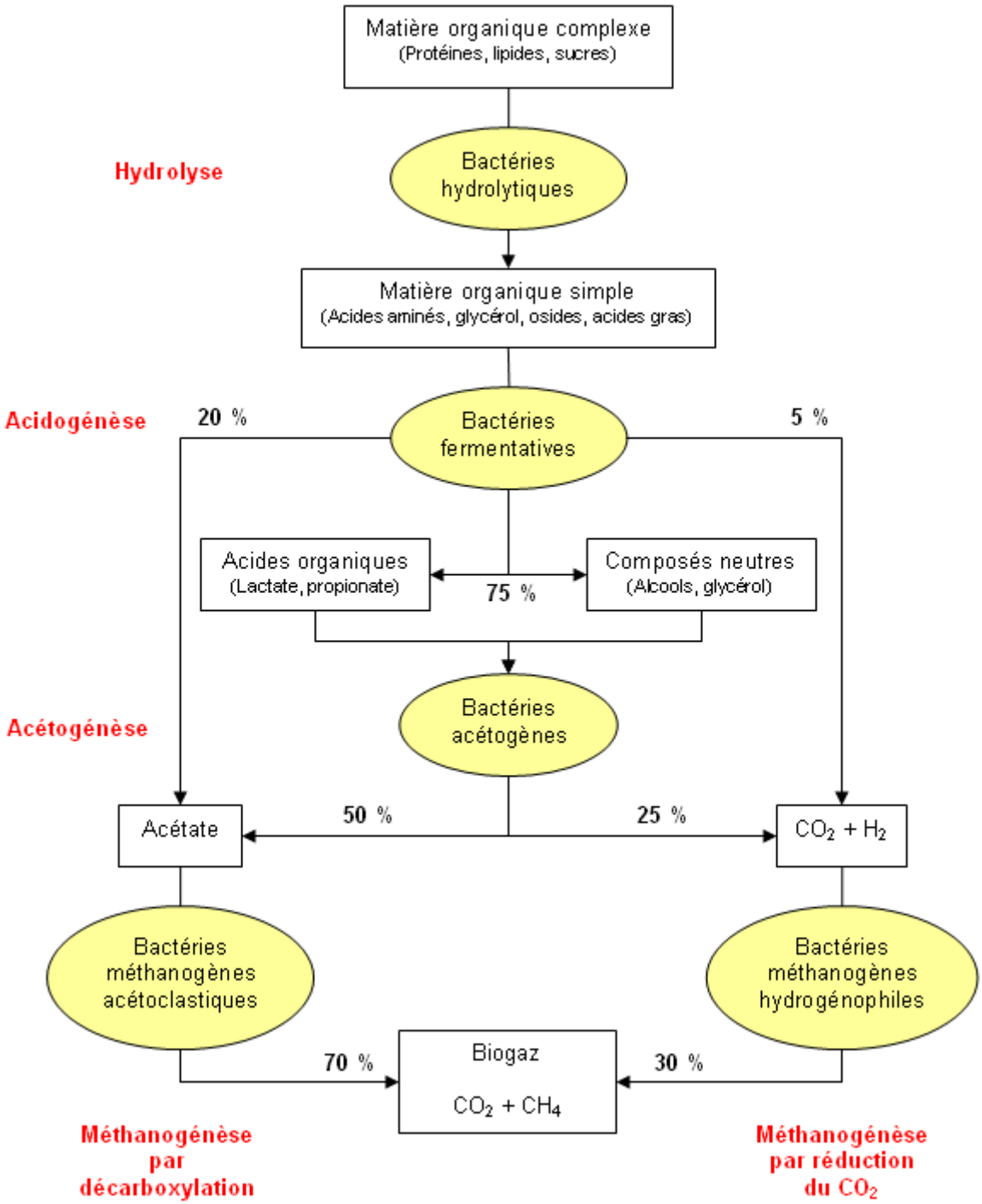

Figure 1.4: Processus de digestion anaérobie

(Frederic, 2012)

Le Canada adopte plusieurs procédés pour se débarrasser des déchets organiques. En 2006, un peu plus de 27 Mt de déchets ont été destinées à l'élimination par enfouissement ou incinération, soit 8 % de plus par rapport à 2004 et 7,7 Mt ont été destinées au recyclage, soit une hausse de 9% par rapport à 2004 (Statistique Canada, 2008). 34% de ces déchets proviennent du secteur résidentiel tandis que le reste est constitué de déchets non résidentiels (Statistique Canada, 2008).

La valorisation de déchets c'est d'éviter de recourir aux lieux de décharges et aux incinérateurs et de s'orienter plutôt vers le recyclage, le compostage ou la méthanisation pour réduire les émissions de GES et profiter de l'utilité des matières organiques. En produisant du biogaz, la méthanisation contribue à réduire la dépendance énergétique en carburants fossiles.

1.3. Production de biocarburants

Le mot biocarburant vient du grec *bios*, qui signifie vie ou vivant, et du latin *carbo*, qui signifie carbone et charbon. Il renvoie sur tout produit obtenu depuis un être vivant. Le mot agro-carburant est utilisé pour décrire les carburants d'origine végétale. En effet, les bioproduits désignent « le résultat de sources courantes de la biomasse qui, grâce à certains bioprocédés, se transforment en combustibles, en produits chimiques ou en biomatières. » (CanmetÉNERGIE, 2007: 1).

Il existe trois familles de biocarburants : les biocarburants de première génération issus des produits alimentaires, les biocarburants de deuxième génération issus des sources lignocellulosiques comme les copeaux de bois, la sciure, les feuilles et la paille, et les biocarburants de troisième génération produits à partir des algues et des poissons grâce à des technologies avancées.

Nous nous intéressons dans cette étude à la production du bioéthanol, du biodiesel et du biogaz.

1.3.1. Perspectives de production du bioéthanol

Le bioéthanol est un alcool produit par transformation du saccharose contenu dans des plantes sucrières comme les cannes à sucre ou à partir de l'amidon suite à un processus de fermentation ou d'hydrolyse enzymatique. Le bioéthanol issu des plantes sucrières et de l'amidon s'appelle du bioéthanol de première génération, car il est produit par des procédés industriels simples. Dans le

cas du bioéthanol de deuxième génération dit aussi éthanol cellulosique, le procédé d'hydrolyse enzymatique est plus sophistiqué (Brodeur *et al*., 2008) étant donnée la structure rigide de la cellulose qui demande plus de délicatesse et des techniques avancées pour la détruire et libérer la cellulose, ce qui justifie leur appellation de deuxième génération.

En 2010, le Canada a produit 1,83 milliards de litres d'éthanol en utilisant 15% de la production globale de maïs soit 5,7% de la production globale de grains (Daynard et Daynard, 2011).

En 2010, le Canada dispose de treize usines de production du bioéthanol. De plus, deux autres sont en phase de construction et six usines sont proposées. Parmi les treize usines opérationnelles, une est en Alberta avec une capacité de 36 millions litres/année, une au Manitoba avec une capacité de 130 millions litres/année, cinq se trouvent en Saskatchewan et six en Ontario. (Voir figure 1.5)

La figure 1.5 montre la répartition des usines opérationnelles de production du bioéthanol au Canada.

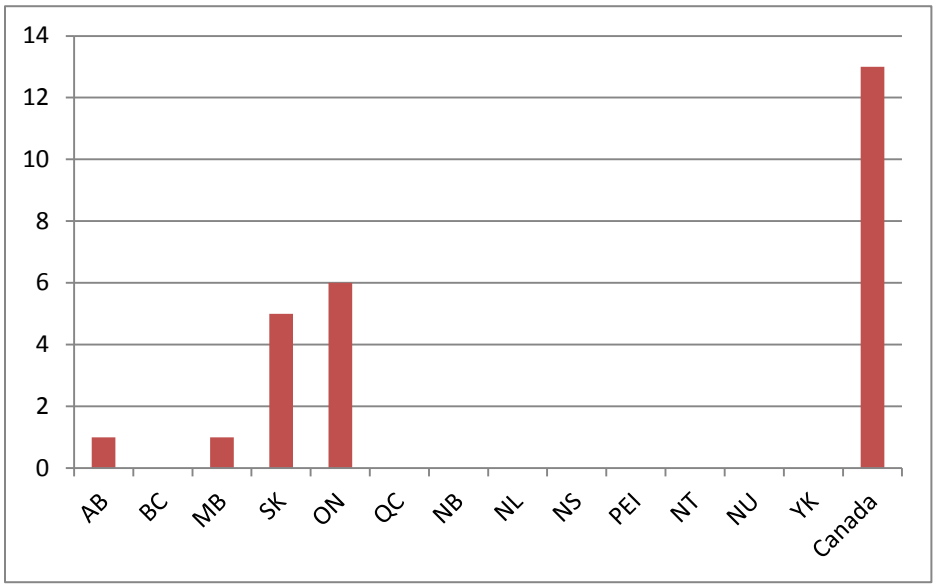

Figure 1.5: Nombre d'usines opérationnelles de production de bioéthanol par province

Adaptée de Daynard et Daynard (2011)

1.3.2. Perspectives de production du biodiesel

Le biodiesel est un ester alcoolique obtenu par conversion des triglycérides qui se trouvent dans les huiles végétales et les graisses animales. Il peut être utilisé à l'état pur soit 100% (nommé B100) pour remplacer le diesel ou mélangé avec du pétrodiesel dans des proportions qui dépendent de la disponibilité et du niveau d'émissions recherché. On trouve alors des proportions de 2 % (B2), de 5 % (B5) et de 10 % (B10).

Le Canada dispose en 2010 de treize usines de biodiesel. Neuf autres correspondent à des projets futurs ou sont en phase de construction. En Alberta, il existe une usine opérationnelle d'une capacité de 19 millions de litres/année. Une usine se trouve en Colombie-Britannique avec une capacité totale de 20,9 millions de litres/année, trois sont au Manitoba, trois en Ontario et trois autres au Québec. Une dernière usine opérationnelle d'une capacité d'un million de litre/année se trouve en Saskatchewan (Daynard et Daynard, 2011).

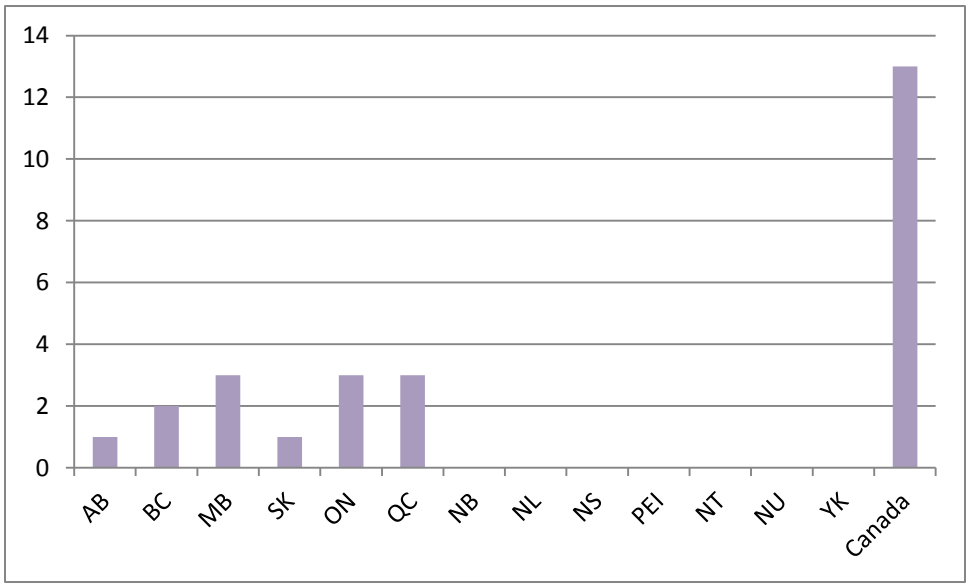

Figure 1.6: Nombre d'usines opérationnelles de production de biodiesel par province

Adaptée de Daynard et Daynard (2011)

En 2010, le Canada a produit 110 millions de litres de biodiesel en utilisant 10% de l'huile végétale totale (Daynard et Daynard, 2011).

1.3.3. Perspectives de production du biogaz

Le biogaz est un gaz obtenu par processus de digestion anaérobie. Il est composé de 50% à 80% de méthane (CH_4) utilisable comme source d'énergie ou comme produit chimique de base (Frederic, 2012). D'autres gaz s'ajoutent en faible pourcentage dans la composition du biogaz notamment le CO_2 qui constitue de 20% à 50% du volume (Frederic, 2012). Le sulfure d'hydrogène (H_2S) peut exister dans une proportion qui varie entre 0% et 0,5% (Frederic, 2012).

1.3.4. Biocarburants de 3ème génération

Les recherches avancées ont permis d'exploiter d'autres sources de production de biocarburants notamment le biodiesel à partir des algues et de poissons. Le biodiesel à partir des micro-algues semble être le seul biocarburant capable de substituer totalement le diesel sans mettre en cause ni la production alimentaire ni la dégradation des terres arables (Cantin, 2010).

Pour produire du biodiesel à partir de poissons, les déchets doivent subir d'abord un pressage mécanique suivi d'un processus de séparation de l'eau et de l'huile qui se produit dans des conditions de 90°C. Par la suite, l'huile extraite est mélangée avec environ 9% du méthanol et de la soude caustique pour pouvoir séparer la glycérine du biodiesel. On ajoute ensuite le manganèse pour purifier le carburant obtenu. Les sous-produits de ce processus peuvent être utilisés pour produire du savon, tandis que les résidus sont utilisés pour produire de la farine de poisson.

2. Modélisation prospective avec le modèle TIMES-Canada

Dans le but d'optimiser la configuration des systèmes énergétiques, une famille de modèles technico-économiques de l'acronyme MARKAL (MARKet-Allocation) a été conçue et développée dans les années 80 par des membres du GERAD pour l'ETSAP (Energy Technology System Program) de l'AIE (l'Agence Internationale de l'Énergie). Le modèle TIMES représente la dernière génération de la lignée de cette famille. À partir d'un ensemble de données et d'hypothèses sur les tendances du marché énergétique, le modèle TIMES permet d'avoir des informations quantitatives sur l'impact des politiques énergétiques et climatiques sur le système énergétique.

Nous présentons dans ce chapitre un aperçu général sur les modèles de la littérature, puis nous détaillons la structure du modèle TIMES-Canada et ses différents paramètres.

2.1. Modélisation prospective

L'analyse prospective est basée sur la formulation mathématique de modèles pour permettre aux décideurs d'entreprendre les démarches stratégiques appropriées en matière d'économie, d'énergie et d'environnement. Elle apporte de nombreux outils pour comprendre les phénomènes économiques. Néanmoins, faire un choix adéquat du modèle pour analyser les perspectives d'utilisation d'énergie est d'une majeure importance. Dans ce contexte, Boulanger et Bréchet (2003) catégorisent les modèles mathématiques suivant six classes :

- Modèles macro-économétriques
- Modèles multi-agents
- Modèles d'équilibre général calculable
- Réseaux bayésiens
- Modèles d'optimisation centralisée
- Modèles de dynamique des systèmes

Les modèles macro-économétriques ont été introduits par Tinbergen en 1936 (Boulanger et Bréchet, 2003). Ce sont des modèles macro-économiques qui décrivent l'économie nationale par des équations mathématiques de comptabilité. Ils permettent d'évaluer les décisions de stabilisation et leurs répercussions sur le système économique. L'avantage de ces modèles réside dans les techniques économétriques de validation de différents secteurs. Par contre, ces modèles s'avèrent incapables de caractériser certaines conséquences, ceci en plus de la critique de Lucas

mentionnée dans les travaux de Boulanger et Bréchet (2003) qui conclut que le défaut majeur de ces modèles est l'influence des politiques économiques sur la stabilité des estimations.

Les modèles multi-agents sont des modèles qui représentent les agents de façon informatique dans un univers artificiel d'interaction avec les ressources spatiales. L'objectif est d'étudier les chances de réussite des agents de cette population à survivre ou à se reproduire. Le meilleur exemple est la modélisation darwinienne : les agents les plus adaptés à leur entourage sont ceux qui survivent et se reproduisent (Boulanger et Bréchet, 2003). Les points forts de cette famille de modèles résident dans la diversité de la population, la représentation des interactions entre les agents et la modélisation de leur environnement. Cependant, la validation de ces modèles demeure contraignante en raison de la multiplicité des états de ses individus.

Quant aux modèles d'équilibre général calculable (MEGC), ils représentent les relations intersectorielles des agents économiques par une représentation walrasienne où le but est d'expliquer l'équilibre entre la production et la consommation d'une part et la fixation des prix d'autre part. L'atout de ces modèles est la puissance de la théorie micro-économique en question. Le point faible de ces modèles est leur sens abstrait et leur grand nombre de paramètres qui rendent la procédure du calibrage difficile (Boulanger et Bréchet, 2003).

Le type de réseaux bayésiens représente l'ensemble des graphes acycliques orientés. Les nœuds incarnent les évènements ou les états reliés entre eux par des arcs qui représentent les relations de causalité. Ces relations désignent l'indépendance conditionnelle entre les variables. Elles transmettent les informations connues à priori pour obtenir des distributions de probabilités à posteriori. Ainsi, ces modèles peuvent servir à trouver la cause la plus probable parmi plusieurs et ils sont utiles en particulier dans le domaine de détection des causes des maladies (Boulanger et Bréchet, 2003). La possibilité d'ajouter de nouvelles causes au modèle est un atout majeur. Par contre, leur point faible est attribué au grand nombre de parents possibles pour une même variable.

Un modèle d'optimisation centralisée est une représentation d'une seule fonction objectif avec n variables non négatives et m contraintes. Ces modèles sont utilisés généralement dans les applications technologiques où l'on cherche à optimiser un coût ou un profit. L'avantage de ces modèles vient du fait d'expliciter tous les choix technologiques admissibles. Cependant,

Boulanger et Bréchet (2003) critiquent trois aspects qui font défauts dans ces modèles à savoir le choix des technologies qui se fait de manière subjective selon l'expert, le grand risque qui s'en suit de ce choix, et l'hypothèse peu réaliste de parfaites informations sur l'ensemble du système énergétique.

La dernière catégorie de modèles englobe les modèles de dynamique de systèmes, qui schématisent les systèmes en termes de niveaux (avec des variables de stock) et de taux (avec des variables de flux). Boulanger et Bréchet (2003) citent plusieurs applications de ces modèles dans les domaines de gestion des stocks et la planification des systèmes hospitaliers. Leur atout revient à leur grande flexibilité de simulation. Cependant, le nombre élevé des paramètres de ces modèles constitue leur point faible (Boulanger et Bréchet, 2003).

Une autre classification des modèles fait ressortir deux grandes familles :

- Les modèles « Top-Down »
- Les modèles « Bottom-Up »

Nous nous intéressons à cette classification qui, en pratique, permet le mieux de modéliser les interactions entre l'économie, l'environnement et l'énergie (Bahn *et al*., 2005).

2.1.1. Modèles Top-down

Les modèles Top-Down renvoient sur l'aspect descendant de cette approche du niveau le plus agrégé au niveau le plus désagrégé. Les modèles macro-économétriques comme NEMSIS[2] et MDM-E3[3]et les modèles d'équilibre général calculable comme GEM-E3[4] représentent le plus cette famille de modèles (Seck, 2012). Les modèles Top-Down s'appuient essentiellement sur la description du système économique globale et considèrent plusieurs secteurs économiques qui échangent des biens entre eux.

La force des modèles Top-Down est leur capacité de décrire la situation énergétique de façon globale, bouclée et qui tient compte des interactions entre les décisions prises. Cependant, ces modèles ont une base statistique faible et ne sont pas suffisants pour décrire toutes les

[2]NEMSIS: New Econometric Model for Environmental and Sustainable Development and Implementation Strategies
[3]MDM-E3: Multisectoral Dynamic Model for Energy, Environment, Economy
[4]GEM-E3: General Equilibrium Model for Energy-Environment-Economy

technologies de production. De plus, leur calibrage exige le recours à plusieurs modèles économétriques de projection.

2.1.2. Modèles Bottom-Up

Les modèles Bottom-Up s'intéressent le plus souvent à une description détaillée des technologies qui émanent du système économique globale. Cette famille de modèle regroupe les modèles de simulation et les modèles technico-économiques d'optimisation (EFOM, MARKAL, TIMES...) qui permettent de tracer l'image d'un secteur en identifiant en détail les technologies, les combustibles et les matières premières utilisées.

L'avantage principal des modèles Bottom-Up est la description détaillée des technologies du secteur énergétique considéré, ce qui permet d'effectuer tout éventuel changement structurel lors de l'introduction d'une nouvelle technologie. Par contre, la limite de cette approche réside dans les hypothèses de parfaite réactivité entre les agents économiques et la parfaite information sur les paramètres des technologies.

En particulier, le modèle TIMES qui réunit les propriétés du modèle MARKAL et du modèle EFOM représente est un générateur de modèles du type Bottom-Up. Il propose de résoudre un programme linéaire dont l'objectif est de maximiser le surplus total des consommateurs et des producteurs sur le marché énergétique. Les marchés du secteur d'énergie sont supposés compétitifs avec une parfaite prédiction des décisions d'investissement avec une connaissance complète des événements prochains.

2.2. Modèle MARKAL

Le modèle MARKAL (MARKet Allocation) permet d'optimiser sur le moyen-long terme le coût technique, économique ou environnemental d'un système énergétique régional, national ou mondial (IEA-ETSAP, 2011). Comme la structure Bottom-up l'impose, la chaîne de transformation énergétique du modèle MARKAL est décrite de l'amont à l'aval, soit à partir des unités d'offre d'énergie jusqu'aux secteurs de l'énergie finale. Les secteurs peuvent être pris ensemble ou individuellement. Ils englobent le secteur agricole, commercial, industriel, résidentiel et de transport.

2.3. Modèle TIMES

Le modèle TIMES (**T**he **I**ntegrated **M**ARKAL-**E**FOM **S**ystem) descend de la famille MARKAL et EFOM. C'est un moyen prospectif qui permet, à partir de l'analyse de différents scénarios, d'évaluer des mesures décisionnelles de gestion d'énergie. L'objectif du modèle TIMES est d'optimiser le coût du système énergétique sous des contraintes du marché énergétique.

Les intrants du modèle TIMES inclut des données sur le potentiel d'énergie primaire disponible ainsi que les caractéristiques des technologies en jeu. D'une part, il possède en commun avec le modèle MARKAL le concept du système énergétique de référence (RES), la description des technologies et les caractéristiques de l'équilibre du marché d'énergie (Loulou *et al*., 2005). D'autre part, il partage avec le modèle EFOM la représentation des flux énergétiques. Cependant, il présente maintes nouveautés au niveau de l'échelle temporelle. En effet, nous remarquons que les périodes dans le modèle TIMES peuvent être de durées différentes, les flux nets sont représentés de façon détaillée dans la fonction objectif et les intrants et les extrants des technologies sont flexibles. Par ailleurs, le modèle TIMES prend en compte l'aspect d'aversion au risque associé à la programmation stochastique et la possibilité de commerce entre les régions.

2.3.1. Présentation du modèle TIMES-Canada

La modélisation de TIMES-Canada couvre les systèmes énergétiques de référence des treize provinces et territoires canadiens qui sont reliés entre eux par les flux d'énergie, les matériaux et les quantités d'émissions de GES. (Voir figure 2.1)

Pour être conforme à la structure du modèle, nous distinguons les régions de l'Ouest, les régions du Centre, les régions de l'Est et les régions du Nord. Chaque province ou territoire est désigné par un code comme le montre le tableau 2.1.

Tableau 2.1: Codification des provinces et territoires canadiens

Province/Territoire	**Code**[5]	**Région**
Alberta	AB	Ouest
Colombie-Britannique	BC	Ouest
Île du Prince-Édouard	PE	Est
Manitoba	MB	Ouest
Nouveau-Brunswick	NB	Est
Nouvelle-Écosse	NS	Est
Nunavut	NU	Nord
Ontario	ON	Centre
Québec	QC	Centre
Saskatchewan	SK	Ouest
Territoires du Nord-Ouest	NT	Nord
Terres-Neuves-et-Labrador	NL	Est
Yukon	YT	Nord

Figure 2.1: Provinces et territoires canadiens

(Wikipédia, 2012)

[5] Correspond à l'ISO (Organisation internationale de normalisation)

Dans chaque scénario du modèle TIMES-Canada, il y a quatre composantes : la demande d'énergie utile, le potentiel disponible d'énergie primaire, les politiques de gestion et les caractéristiques des technologies.

La demande en énergie utile est estimée de façon exogène à partir des déterminants socio-économiques comme la population et le produit intérieur brut (PIB). Dans TIMES-Canada, les données sur ces spécifications s'obtiennent en utilisant d'autres modèles comme le modèle GEMINI-E3 (Loulou *et al*., 2005) ou à partir de rapports scientifiques gouvernementaux comme le GICC[6] et le GIEC[7] (Loulou *et al*., 2005). Notons que seul le scénario de référence reçoit depuis l'utilisateur les données sur la demande d'énergie utile, car pour les autres scénarios, TIMES permet d'ajuster la demande à partir d'élasticités-prix de façon automatique (Loulou *et al.*, 2005).

La composante d'offre met en exergue les données sur la disponibilité de différentes sources d'énergie. Les relations d'échange commercial peuvent être considérées à cet effet.

Quant à la composante politique, elle définit par exemple les mesures de précaution ou d'intervention sur les émissions de GES. Ces politiques peuvent être des micro-mesures comme la gestion des portefeuilles des technologies ou des mesures économiques comme l'imposition d'une taxe sur le carbone.

La dernière composante technico-économique définit les paramètres de transformation des énergies primaires en énergies finales (carburants, émissions, services d'énergie…)

La solution de l'équilibre sur le marché de l'offre et de la demande énergétique permet d'analyser l'évolution des déterminants du système énergétique dans chaque scénario. La solution primale du programme linéaire concerne :

- les investissements dans les technologies
- les niveaux d'opérations des technologies
- les importations et les exportations de chaque type d'énergie et matériau
- les niveaux d'extraction de chaque type d'énergie et matériau

[6] GICC: Gestion et Impacts du Changement Climatique
[7] GIEC: Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

- les flux de chaque commodité du système
- les émissions totales, les émissions par technologie et par secteur
- l'évolution de la concentration de GES

Par ailleurs, la solution duale inclut l'ombre coût des commodités du système énergétique de référence ainsi que les coûts réduits de chaque technologie (Loulou *et al.,* 2005).

2.3.2. Notion du système énergétique de référence

Le système énergétique de référence (RES) (Reference Energy System) est un réseau qui définit les relations entre les entités du système énergétique. On dispose de trois types d'entités dans le système énergétique de référence : les commodités, les technologies et les flux de commodités. Dans le modèle TIMES-Canada, les commodités sont représentées par des lignes verticales, les processus par des rectangles et les flux de commodités par des lignes horizontales qui lient les processus aux commodités comme le montre la figure 2.2.

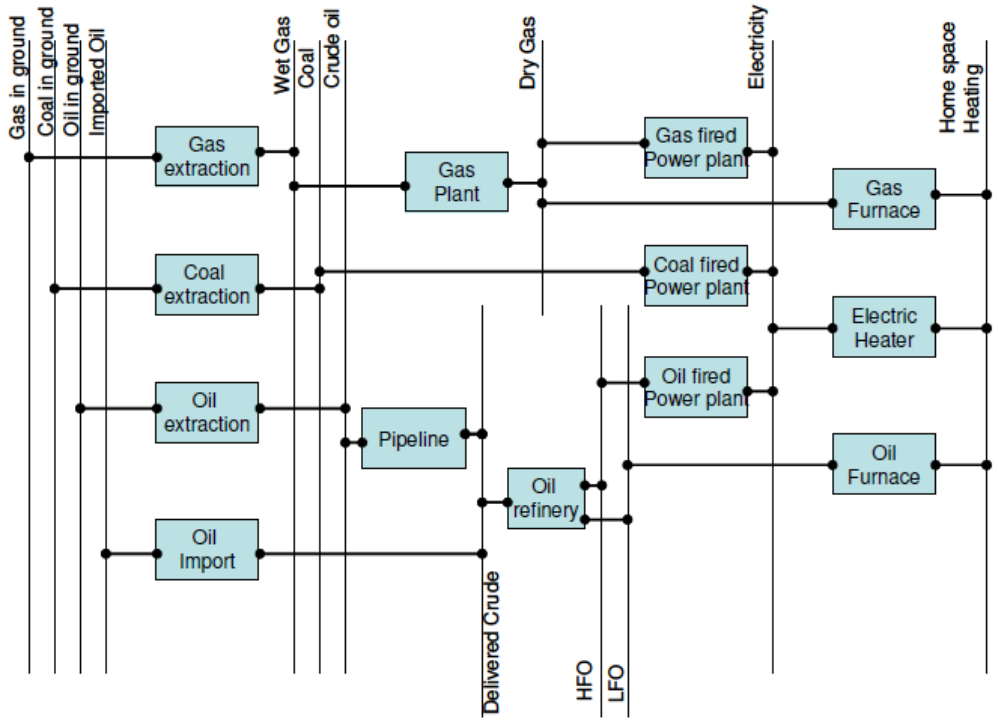

Figure 2.2: Vue partielle du système énergétique de référence

(Loulou *et al.*, 2005)

Les processus sont des technologies dont le rôle est de transformer des entrées de commodités en d'autres. Les processus peuvent être des activités d'importation et d'extraction ou des activités de transformation industrielle à l'instar des technologies de conversion énergétique en électricité. Ils incluent aussi les raffineries et les appareils d'utilisation finale d'énergie (moyens de transport, chauffage…).

Les commodités représentent toutes les matières premières comprenant les sources d'énergie, les services, les matériaux, les émissions et les flux monétaires. Les commodités sont généralement produites par un processus et/ou consommées par un autre.

Les liens qui existent entre les processus et les commodités sont des flux de commodités. Ces flux héritent la nature de la commodité, mais ils sont définis selon des processus différents. Les flux sont de plusieurs types : combustibles, matériaux, demandes ou émissions. À la différence de MARKAL, chaque flux dans le modèle TIMES-Canada est défini par une variable à part.

2.3.3. Structure mathématique du modèle TIMES

Le modèle TIMES détermine l'équilibre sur le marché de l'énergie en minimisant le coût global ou en maximisant le surplus net total des consommateurs et des producteurs. L'équilibre est atteint lorsque la courbe de la demande intercepte la courbe de l'offre. Le graphique 2.3 illustre l'équilibre dans TIMES.

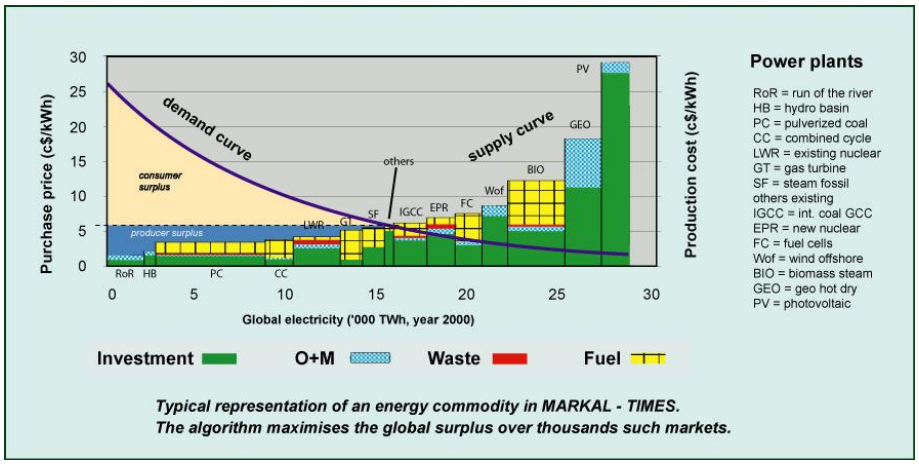

Figure 2.3: Détermination de l'équilibre partiel dans le modèle MARKAL-TIMES

(Tosato, 2007)

Les paramètres du modèle TIMES peuvent être d'ordre technique, économique ou politique. Ils concernent :

- *les produits de base* : comme l'efficacité, la partition du temps, la demande annuelle de technologies, la courbe de charge, les coûts additionnels, les taxes, les subventions…
- *les technologies* : techniquement, les paramètres peuvent concerner le facteur de disponibilité des technologies, leur consommation de produits par unité d'activité, le partage de carburant par unité d'activité, la vie technique de la technologie, le temps de construction, la durée de démontage et les quantités de produits de base consommées par unité de technologie. Les paramètres politiques et économiques incluent les coûts d'investissements, le coût de démontage, le coût de maintenance et d'opération de la technologie, les taxes et les subventions, la vie économique d'une technologie, le taux d'actualisation spécifique à une technologie, les contraintes sur l'investissement, les capacités et le niveau d'activité.
- *les flux de produits de base* : les paramètres techniques assurent le contrôle de partage maximal ou minimal des intrants/extrants des flux au sein du même groupe de produits. Les paramètres économiques sont des paramètres relatifs aux coûts de livraison, aux taxes et aux subventions d'un seul flux de technologies.

2.3.4. Formulation de l'équilibre

Le problème d'optimisation est exprimé par les variables de décision, la fonction objectif et les contraintes. Avant de définir le problème d'optimisation du modèle TIMES, nous présentons les indices utilisés dans le modèle :

r : la région
t : la période actuelle du temps
v : l'année d'investissement
p : la technologie utilisée
s : la saison
c : le produit de base (énergie, matériaux, émission ou demande)

Variables de décision

Les variables de décision représentent les quantités contrôlées par le décideur. Dans le modèle TIMES, nous énumérons les types suivants :

- *NCAP(r,v,p)* : nouvelle capacité additionnelle de la technologie *p* pendant la période *v* dans la région *r*
- *CAP(r,v,t,p)* :capacité installée d'une technologie *p* qui inclut l'investissement initial et la capacité résiduelle dans la région *r* pendant la période *v* et la période actuelle *t*
- *CAPT(r,t,p)* :capacité totale installée d'une technologie *p* tel qu'on rassemble toutes les données subdivisées dans la région *r* pendant la période actuelle *t*
- *ACT(r,t,p,s)* :niveau d'activité d'une technologie *p* dans la région *r* pendant la période actuelle *t*
- *FLOW(r,v,t,p,c,s)* : quantités consommées ou produites. Cette variable permet plus de flexibilité aux technologies et aux flux de technologies modélisés dans TIMES.
- *SIN(r,v,t,p,c,s)/SOUT(r,v,t,p,c,s)* : quantité de produits *c* stockée/déchargée par une technologie *p* dans la région *r* pendant la période *v*
- *TRADE(r,t,p,c,s,imp)/TRADE(r,t,p,c,s,exp)* : quantité de produits *c* achetée/vendue par exportation/importation par une technologie *p*.
- *D(r,t,d)* :demande de service énergétique finale *d* dans la région *r* pendant la période actuelle *t*. Dans le scénario de référence, cette variable est définie par l'utilisateur.

Il existe bien d'autres variables connexes aux variables de produits de base comme *COMPRD* qui définit la quantité totale produite d'un produit et *COMCON* qui est la quantité totale consommée d'une marchandise.

Fonction objectif

Le programme d'optimisation de TIMES ne permet pas seulement de minimiser le coût total du système énergétique, mais aussi de déterminer l'équilibre de l'offre et de la demande en maximisant le surplus total sur le marché énergétique.

Chaque année, le coût total du système inclut :

- le coût de capital investi

- les coûts de maintenance opérationnelle (fixes et variables)
- les coûts d'importation exogènes et de production domestique
- les revenues des exportations exogènes
- les coûts de livraison des produits de base
- les taxes sur les flux de produits et les activités ou les investissements
- la récupération de la valeur d'une technologie à la fin de l'horizon de temps
- la perte de bien-être de la demande finale de produits

Contraintes

Les contraintes dans le modèle TIMES portent essentiellement sur :

- la pénétration technologique
- les émissions de GES
- les prix exogènes
- le lien entre investissements et capacités
- les capacités des technologies : la capacité d'une technologie pour produire de l'énergie diffère d'une à autre
- l'équilibre de la balance des produits de base
- l'interconnexion des flux dans un processus donné
- la satisfaction de la demande du marché

Chaque catégorie *i*, la demande est définie dans TIMES par la relation suivante :

$$DMi(p) = Ki * pi^{Ei}$$

avec

DM_i : la demande de la catégorie *i* de l'énergie

p_i : le prix de l'énergie de la catégorie *i*

E_i : l'élasticité prix-demande de la catégorie *i*

K_i : constante

Pour déterminer la constante K_i, il suffit de connaître un seul point ($p_i°$, $DM_i°$) qui sera considéré comme la valeur de référence ce qui donne la relation suivante :

$$\frac{DMi}{DMi°} = (\frac{pi}{pi°})^{Ei}$$

Soit

$$pi = (pi° * \frac{DMi}{DMi°})^{1/Ei}$$

Selon la demande, TIMES permet de modéliser deux cas différents :

Premier cas : Si la demande est inélastique

$$\text{Min } cX$$

$$\text{Sous les contraintes} \quad \begin{cases} \sum_k CAPk, i(t) \geq DMi(t) \quad i=1...I \text{ et } t=1...T \\ B.X \geq b \end{cases}$$

Avec

c : le vecteur des coûts

X : le vecteur de toutes les variables

I : le nombre des catégories de la demande

T : la période de modélisation

CAP : variables des capacités des technologies finales

La relation B.X ≥ b définit les contraintes du modèle

Deuxième cas : Si la demande est élastique

Dans ce cas, le modèle TIMES sert à maximiser le surplus total lorsque l'offre et la demande varient en fonction du prix. Le programme d'optimisation de maximisation du surplus net total a des termes non linéaires dans la fonction objectif. Il faut donc recourir à des techniques de linéarisation pour approcher ces termes. On ne discute pas ces techniques dans ce mémoire. Le lecteur est invité à se référer au rapport de Loulou *et al.* (2005) pour plus de détails.

3. Inventaire du potentiel de la biomasse au Canada

La construction de la base de données sur le potentiel de production d'énergie à partir de la biomasse dans les provinces et territoires du Canada était la phase la plus délicate dans ce projet. Certaines données sont confidentielles et d'autres diffèrent d'une étude à une autre en fonction des hypothèses retenues. Nous nous sommes heurtés, dans certains cas, à l'absence de paramètres d'estimation lors du calcul du potentiel ou de la disponibilité de la biomasse. Pour ce faire, nous avons adopté plusieurs approches de collecte et d'estimation des données. Dans une perspective de normalisation, nous avons unifié les calculs et nous avons estimé les données manquantes comme la production, la disponibilité et le taux de production en vue d'obtenir des tableaux uniformes et de faciliter leurs intégrations dans le modèle.

Les inventaires sont les plus récents possible et sont rapportés à l'année de référence 2007. Des cartographies sont à l'appui de certains résultats. Les hypothèses de recherche sont expliquées et détaillées dans la suite du chapitre. Elles incluent entre autres :

- le potentiel de production d'énergie de chaque matière première de biomasse
- la disponibilité régionale de chaque ressource de biomasse
- les rendements des cultures
- les surfaces récoltées
- les quantités de production humide et sèche
- les pouvoirs calorifiques
- etc.

3.1. Les données : piliers de construction du module de la biomasse

L'objectif de cette partie est de développer un ensemble de données fiables sur le potentiel de production d'énergie à partir de la biomasse au Canada. De nombreuses sources ont été considérées. Pour chaque ressource, nous avons examiné son potentiel géographique, en d'autres termes, l'estimation de l'ampleur de la biomasse accessible compte tenu des contraintes technologiques, des contraintes légales, des contraintes topographiques et écologiques.
Pour ce faire, nous avons eu recours à des rapports fédéraux et provinciaux, des organisations non gouvernementales, des données du site de Statistique Canada, des études de thèse et des publications dans des revues scientifiques.

Nous distinguons cinq catégories de potentiel d'énergie adaptées du rapport du GIEC (Faaij *et al*., 2005) :

- Le *potentiel théorique* : il définit la totalité de matières premières de biomasse utilisable physiquement sur une période déterminée dans une région donnée. Aucune contrainte n'intervient dans la conversion des matières en énergie. Ce type de potentiel n'a pas d'utilité pratique dans l'évaluation de l'énergie de biomasse car il ne considère aucune contrainte possible pour la production d'énergie.
- Le *potentiel géographique* : il tient compte par rapport au potentiel théorique des contraintes de gestion, des contraintes environnementales, topographiques, légales et écologiques.
- Le *potentiel technique* : il s'obtient en déduisant du potentiel géographique les pertes de production due à l'efficacité des technologies lors du processus de production d'énergie.
- Le *potentiel économique* : il inclut en plus des contraintes précédentes les prix des compétiteurs sur le marché de l'offre et de la demande.
- Le *potentiel réaliste* : c'est le potentiel le plus réduit. Il met en jeux en plus de toutes les contraintes citées en plus des impacts socio-économiques et administratifs comme les programmes de promotions des énergies renouvelables.

Ce qui nous intéresse dans cette étude, c'est le potentiel géographique de production d'énergie à partir de la biomasse. Les hypothèses et les résultats obtenus pour toutes les provinces/territoires et toutes les catégories de biomasse sont présentés dans les tableaux de l'annexe A. Nous expliquons dans ce qui suit la démarche de calcul pour quelques provinces qui présentent des potentiels marquants.

3.2. Potentiel d'énergie de la biomasse agricole

La quantité disponible de biomasse agricole dépend du type de culture, de la rotation de cultures, du type de sol, de la topographie et du climat. Nous avons rassemblé donc les plantations en catégories selon leur fin d'utilisation énergétique et leur localisation géographique. Les cultures sont classées selon leur usage : bioéthanol (maïs, blé, cultures d'amidon, orge, avoine et cultures sucrières), biodiesel (soja, colza, autre huile végétale comme l'huile de tournesol et résidus graisseux) ou biogaz (paille, canne de maïs, foin et résidus de colza).

3.2.1. Potentiel de production du bioéthanol

Le maïs constitue une source très abondante au Canada en particulier en Ontario. Les terres de maïs s'étalent en Ontario sur une superficie de plus de 700 106 ha (McDonald, 2006) et le potentiel de production d'énergie correspondant est de 101,172 PJ (McDonald, 2006). D'autre part, Smith *et al*. (2009) estiment que la disponibilité du maïs pour la production d'énergie en Ontario est de 2 100 Kt de matières sèches. Si le contenu énergétique est de 9,34 GJ/t de matières sèches (Vaillancourt, 2012), nous pouvons alors estimer un deuxième potentiel d'énergie à partir du maïs en Ontario à 19,16 PJ par l'équation suivante :

$$Potentiel\ (PJ) = disponibilité\ (Kt) * contenu\ énergetique\ \left(\frac{GJ}{t}\right) * 10^3$$

L'indice de récolte est de 52% et le contenu en eau est de 15,5% (McDonald, 2006). Par définition, l'indice de récolte est la quantité de grains rapportée à la quantité totale de matières. Le contenu en eau renseigne sur le pourcentage d'eau renfermée dans la récolte. Plus ce taux est élevé, moins est le pouvoir calorifique des cultures.

En Saskatchewan, il existe 5 000 Kt de matières sèches de cultures de blé (Smith *et al.*, 2009). L'indice de récolte est de 50% (Smith *et al*., 2009). Pour un contenu énergétique de 9,34 GJ/t de matières sèches (Vaillancourt, 2012) et par la même démarche que pour l'Ontario, nous avons estimé que ces cultures peuvent produire 46,7 PJ de bioéthanol. Nous pouvons calculer le potentiel d'une autre façon à partir de la surface cultivée et de la production annuelle. En effet, selon Statistics Canada (2007), 4 762 300 ha ont été cultivées en blé en Saskatchewan en 2005, ce qui a donné une production de 9 058,4 Kt. La quantité de production de matières sèches correspondante est telle que :

$$Production\ de\ matières\ sèches = production * (1 - contenu\ en\ eau)$$

À part le blé et le maïs en Ontario, le contenu d'eau du blé, du maïs, des cultures d'amidon, de l'orge, de l'avoine et des cultures sucrières est de 16% pour toutes les provinces. La quantité des résidus est obtenue par l'équation inspirée de Ralevic et Layzell (2006) :

$$Total\ résidus = production\ de\ matières\ sèhes * (\frac{1}{indice\ de\ récolte} - 1)$$

L'indice de récolte considéré par Ralevic et Layzell (2006) est entre 0,5 et 1. La quantité résiduelle de blé en Saskatchewan est de 7 609,056 Kt de matières sèches (Voir tableau A.2 de l'annexe A). Pour un rendement de résidus retenus pour la production d'énergie de 50%, la quantité disponible pour la bioénergie en Saskatchewan est de 3 804,528 Kt de matières sèches. Pour un contenu d'énergie de 9,34 GJ/t, le potentiel d'énergie correspondant est de 35,53 PJ.

En Ontario, le potentiel de blé est de 37,51 PJ pour une surface récoltée de 485 622,8 ha et un contenu en eau de 14,5 (McDonald, 2006) soit une production estimée de 1 442,4 PJ (Statistics Canada, 2007). D'autre part, Smith *et al*. (2009) estiment que la disponibilité du blé en Ontario est seulement de 550 Kt de matières sèches soit un potentiel de production du bioéthanol de 4,5 PJ pour un rendement de 8,25 GJ/t (Vaillancourt, 2012).

Au Manitoba, il existe une source de 1 400 Kt de matières sèches de blé (Smith *et al*., 2009) soit 13,08 PJ de potentiel de production du bioéthanol. Viennent ensuite les cultures d'amidon principalement l'orge et l'avoine avec 2 300 Kt de matières sèches de disponibilité maximale en Saskatchewan (Smith *et al.*, 2009) répartie en 1 800 Kt de matières sèches d'orge et 500 Kt de matières sèches d'avoine ce qui équivaut à des potentiels de production du bioéthanol respectivement de 14,05 PJ et de 9,41 PJ.

En Ontario, il existe 500 Kt de matières sèches d'orge et 300 Kt de matières sèches d'avoine soit un potentiel total de production du bioéthanol de 13,9 PJ.

Les résultats sur le potentiel minimal et maximal de production du bioéthanol dans les provinces du Canada sont illustrés dans les graphes 3.1 et 3.2. Les données chiffrées figurent dans les tableaux A.2, A.3, A.4 et A.5 de l'annexe A. La différence entre les valeurs du potentiel dépend de la source de données, de la différence des indices de récolte entre les provinces, du contenu d'eau ou de la quantité résiduelle de biomasse.

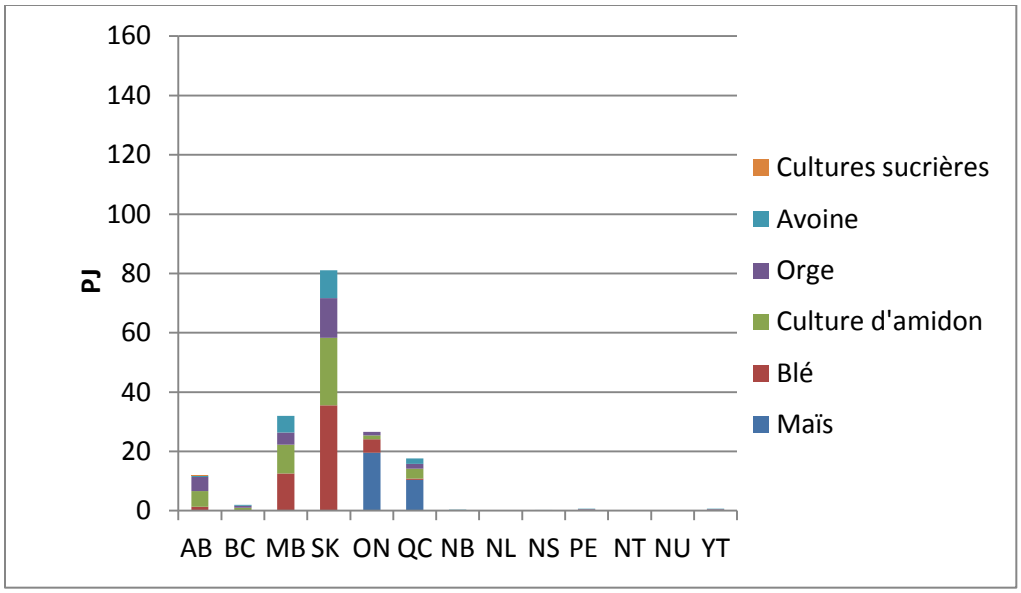

Figure 3.1: Potentiel minimal de production du bioéthanol des grandes cultures par province

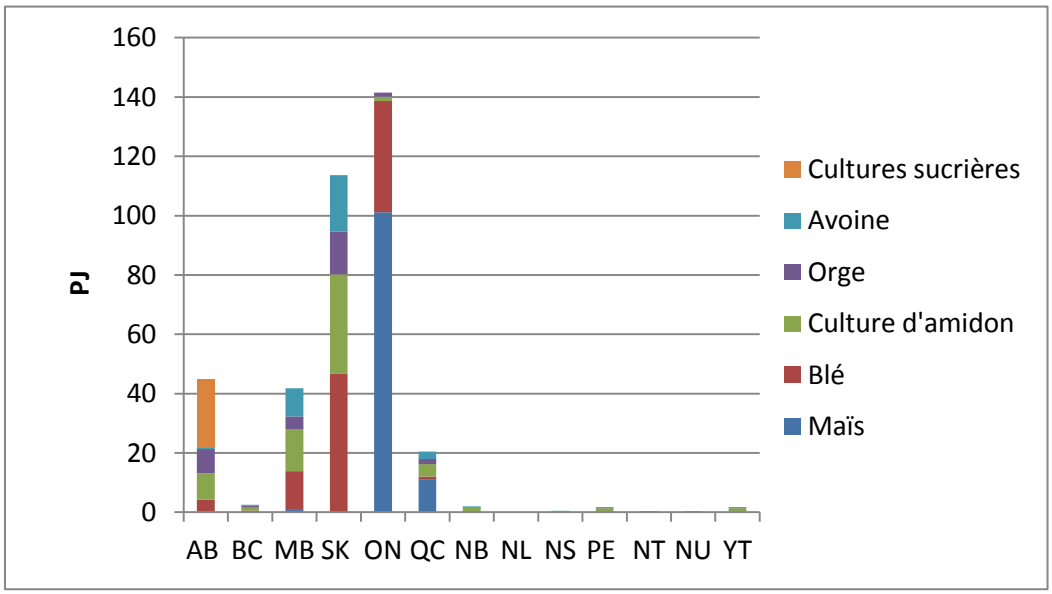

Figure 3.2: Potentiel maximal de production du bioéthanol des grandes cultures par province

Les données sur la production sèche et les surfaces récoltées pour les régions de l'Est et du Nord proviennent des estimations de Statistics Canada (2007). À partir de ces données, nous avons calculé les quantités de matières sèches, la quantité résiduelle totale et la quantité de résidus

destinés à la production de bioénergie pour obtenir enfin le potentiel d'énergie dans ces provinces. (Voir les tableaux A.4 et A.5 de l'annexe A)

3.2.2. Potentiel de production du biodiesel

Le biodiesel peut être produit du soja, du colza, de l'huile de tournesol et des résidus graisseux comme le suif et la graisse jaune. Au Canada, la plus grande disponibilité de ces matières premières est localisée en Saskatchewan (1 200 Kt de matières sèches), au Manitoba (600 Kt de matières sèches) et en Alberta (1 000 Kt de matières sèches) (Smith *et al*., 2009). L'huile de tournesol n'a pas encore eu de succès pour être utilisé pour produire les biocarburants. À part les 74 900 ha soit l'équivalent d'une production de 119,8 Kt qui est cultivée au Manitoba, il n'y a pas d'autres régions pour les plantations de tournesol (Statistics Canada, 2007).

Contrairement aux cultures utilisées pour la production du bioéthanol, les plantations huileuses présentent un contenu en eau plus faible qui varie selon le type de la plante. Pour le soja, le contenu en eau est de 14%, pour le colza, il est de 16% (Ralevic et Layzell, 2006) tandis que l'huile de tournesol ne renferme que 9% d'eau. De ce fait, ces matières premières sont considérées plus rentables. L'indice de récolte et le taux d'élimination des résidus sont de 50% (Ralevic et Layzell, 2006).

Les données sur les quantités disponibles des résidus graisseux sont tirées de Kajat (2006). Les résidus graisseux ont un pouvoir calorifique de 16 899 btu/lb (Adams, 2002). Le potentiel d'énergie s'obtient en multipliant la quantité disponible (lb) par le pouvoir calorifique (btu/lb) puis par conversion du btu en PJ.

Comme le montre la figure 3.4, l'Ontario possède le potentiel de production du biodiesel le plus élevé au Canada à partir du soja soit 37,09 PJ suivi de la Saskatchewan (15,08 PJ), de l'Alberta (12,57 PJ) et du Manitoba (7,54 PJ) à partir du colza.

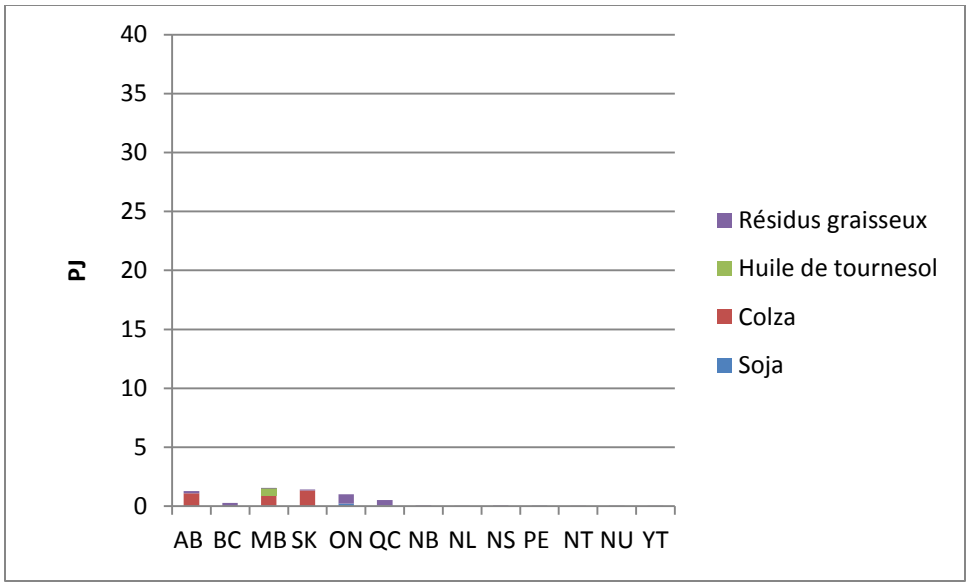

Figure 3.3: Potentiel minimal de production du biodiesel des résidus agricoles par province

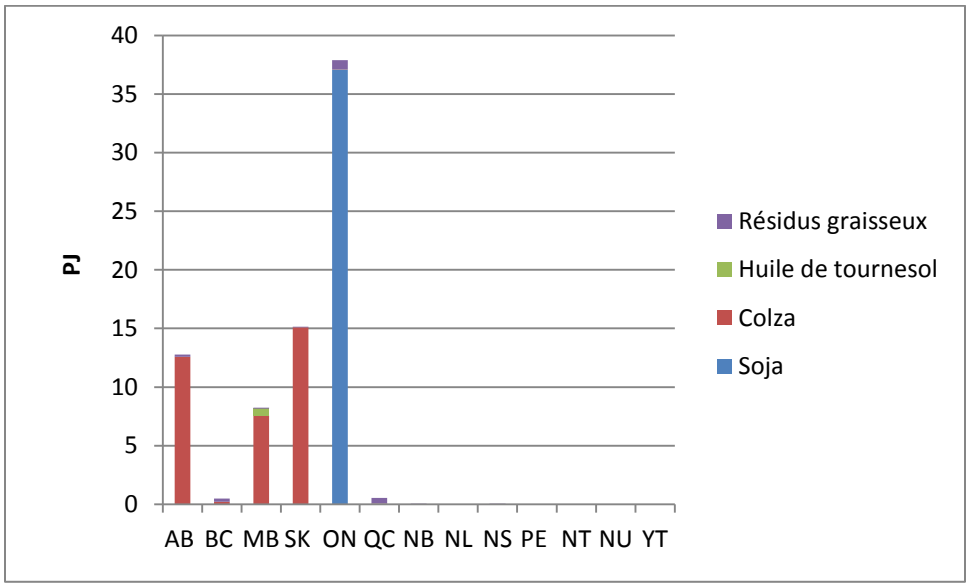

Figure 3.4: Potentiel maximal de production du biodiesel des résidus agricoles par province

3.2.3. Potentiel de production du biogaz

La paille, la canne de maïs, le foin et les résidus de colza représentent les sources les plus importantes pour produire du biogas. De point de vue technique et économique, la paille est

considérée comme la source lignocellulosique agricole la plus adaptée pour la production d'énergie.

Comme le montre le graphe 3.6, la Saskatchewan est dotée du plus grand potentiel de biogaz végétal à partir de la paille, qui peut atteindre 70,37 PJ annuellement (Tampier *et al*., 2004). Près de 9 246 Kt de matières sèches de paille sont disponibles en Saskatchewan pour la production du biogaz (Sokhansanj *et al.*, 2006b). Le Manitoba possède près de 2 940 Kt de matières sèches de paille disponibles soit un potentiel de biogaz de 22,38 PJ (Tampier *et al.*, 2004).

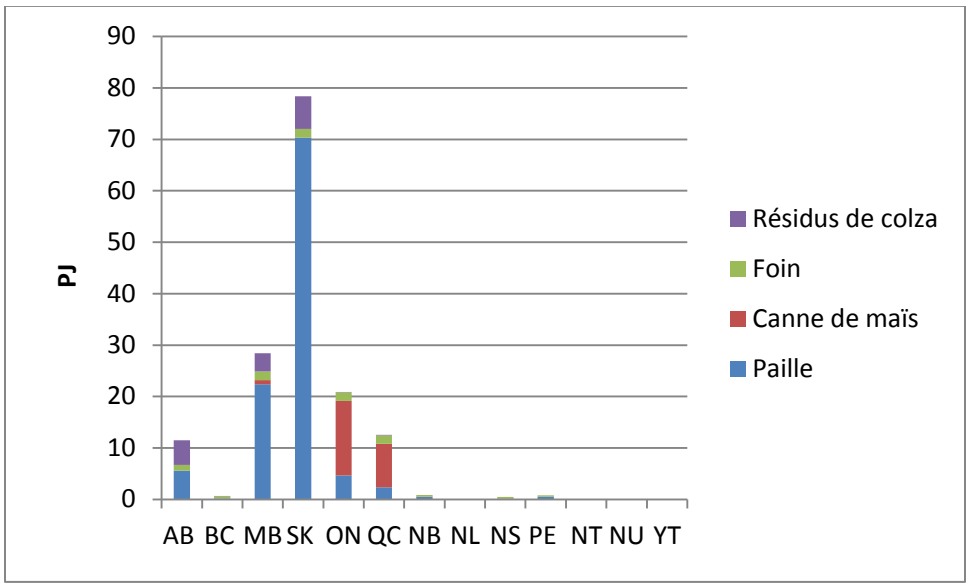

Figure 3.5: Potentiel minimal de production du biogaz des résidus agricoles par province

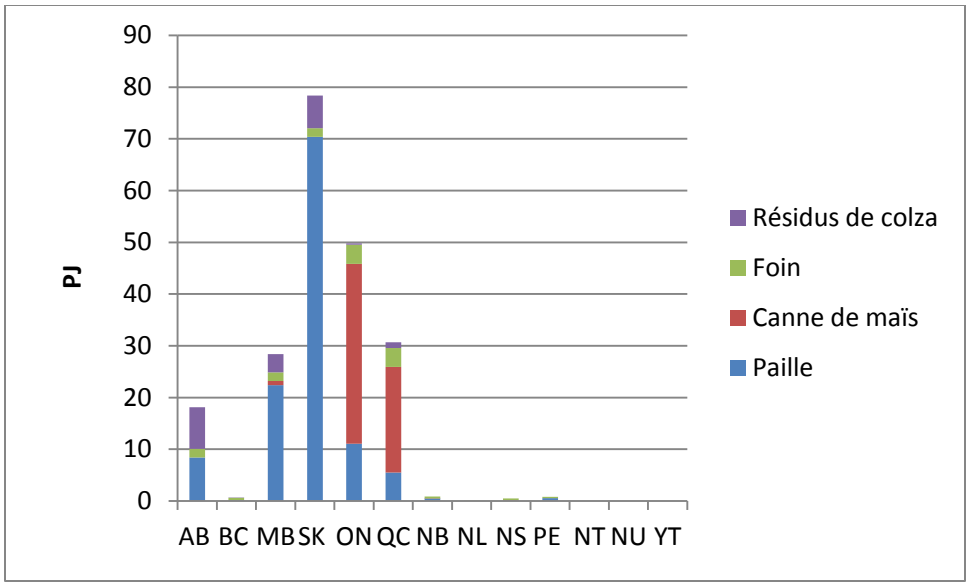

Figure 3.6: Potentiel maximal de production du biogaz des résidus agricoles par province

3.2.4. Potentiel d'énergie des cultures dédiées

Les cultures dédiées à la biomasse ressortent de plusieurs types. Elles peuvent être des plantes pérennes comme le miscanthus et le panic érigé ou des plantes annuelles comme le sorgho fibre et le triticale. Ces cultures sont utilisées pour produire les biocarburants de seconde génération. Actuellement, les cultures dédiées ne sont pas encore assez répandues sur le territoire canadien à l'exception de la Colombie-Britannique et de l'Ontario. La Colombie-Britannique a une disponibilité de 2,7 Mt de matières sèches soit 4,8% de la demande d'énergie fossile de la province (Ralevic et Layzell, 2006). Connaissant que la bioénergie en Colombie-Britannique permet de couvrir 50% de ses besoins en énergie fossile soit 920 PJ (Ralevic et Layzell, 2006), le potentiel de biomasse des cultures dédiées est alors :

$$Potentiel\ d'énergie\ = \frac{920 * 4{,}8}{50} = 88{,}32\ PJ$$

En Ontario, il existe 3 Mt de matières sèches qui sont disponibles annuellement pour la production de bioénergie. Le pouvoir calorifique étant de 16,9 GJ/t de matières sèches, le potentiel d'énergie est de 50,7 PJ (Layzell *et al.*, 2006).

3.3. Potentiel d'énergie de la biomasse forestière

Le Canada possède de vastes étendues de biomasse forestière. Cependant, uniquement 58% de ces forêts sont considérées productives, donc disponibles pour la plantation et la récolte des arbres, tandis que 42% sont des forêts réservées (Wood et Layzell, 2003).

Comme le montre le tableau 3.1, Les forêts les plus productives se situent à l'Est du Canada soit au Québec (53,99 Mha) et en Ontario (42,2 Mha), et à l'Ouest en Colombie-Britannique (51,74 Mha)

Tableau 3.1: Répartition des terres forestières par province

(Wood et Layzell, 2003)

Province	**Superficie totale des forêts (Mha)**	**Superficie de futaies productives (Mha)**	**Coupe permise (ha/an)**
AB	38,2	25,71	42 210
BC	60,6	51,74	176 312
MB	26,3	15,24	15 509
SK	28,8	12,63	21 169
ON	58	42,2	201 522
QC	83,9	53,99	384 208
NB	6,1	5,95	111 077
NL	22,5	11,27	14 415
NS	3,9	3,77	49 680
PE	0,3	0,28	5 780
NT	61,4	14,32	547
NU	54,5	0	0
YT	27,6	7,47	0

3.3.1. Potentiel d'énergie des résidus forestiers

L'inventaire des résidus forestiers est limité dans ce travail à trois types de résidus forestiers : les résidus de bois francs en bordure de route, les résidus résineux en bordure de route et les résidus d'usines (feuillus et résineux).

La quantité disponible de résidus en bordure de route et de résidus d'usine feuillus et résineux a été estimée au Canada à 49 Mt (Sidders *et al*., 2008, cité par Smith *et al*, 2009). Les tas d'écorce patrimoniale et les résidus urbains sont exclus de ces résidus. Selon une deuxième source (Wood et Layzell, 2003, cité par Smith *et al*., 2009), la disponibilité totale des résidus forestiers est entre 51 Mt/année et 97 Mt/année. Cette estimation a été faite par l'intermédiaire de l'outil d'évaluation de cartographie BIMAT[8], développé par Agriculture et Agroalimentaire Canada et adopté par le Service Canadien des forêts pour le secteur forestier (Sidders *et al.*, 2008, cité par Smith *et al.*, 2009).

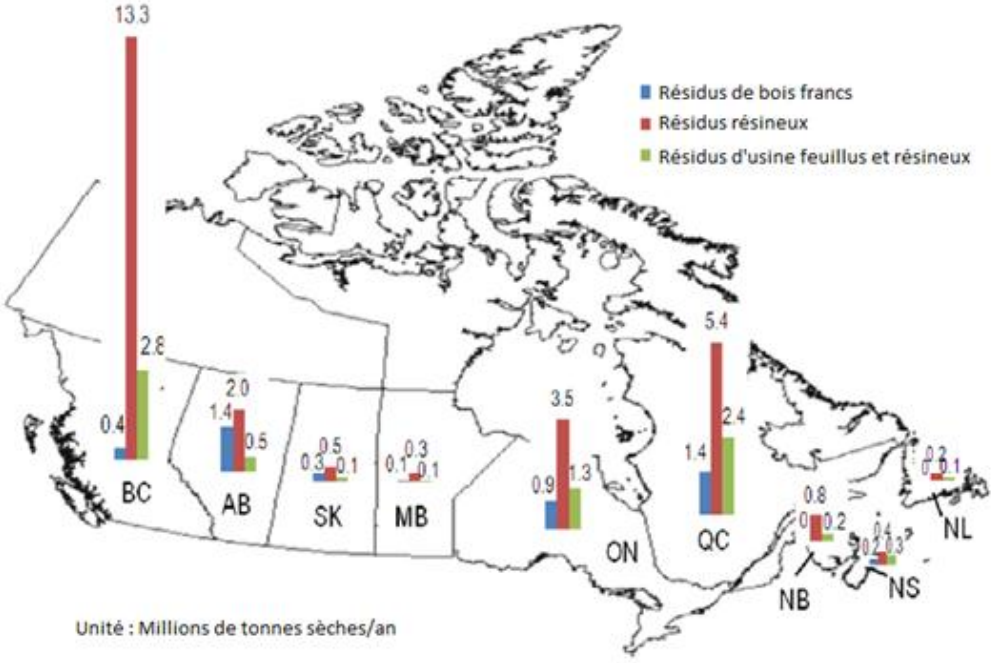

Figure 3.7: Inventaire de la disponibilité des résidus forestiers par province (Smith *et al.*, 2009)

[8] BIMAT : Biomass Inventory Mapping Assessment Tool

La Colombie-Britannique est connue pour la disponibilité de ses résidus forestiers qui s'élèvent à 16,5 Mt/année suivie du Québec qui génère 9,2 Mt/année de résidus forestiers. (Voir figure 3.7)
À partir des données sur la disponibilité des résidus forestiers, nous avons calculé le potentiel de biomasse résiduelle des forêts dans chaque province comme étant la disponibilité multipliée par la valeur énergétique du bois, qui est égale à 18,5 MJ/kg soit 1,85 10^{-5} PJ/t (OMAFRA, 1997). Les résultats de calcul figurent dans les tableaux A.15, A.16, A.17 et A.18 de l'annexe A.

3.3.2. Potentiel d'énergie des résidus du bois

Le potentiel géographique des résidus de forêts tient compte des obstacles de transport (vaste territoire canadien, type de terrains et absence de réseaux de transport), de l'efficacité des machines et des exigences de durabilité. Quand les déductions pour ces divers obstacles sont considérées, les résidus disponibles pour la production de biocarburants deviennent considérablement réduits :

Résidus du bois = récolte réelle - bois marchand

Le potentiel d'énergie s'exprime en fonction de la quantité du carbone émis. Le pouvoir calorifique des résidus de bois est de 35,76 GJ/tonne C et la quantité de carbone émise est de 0,5 tonne C/t sèche (Wood et Layzell, 2003).
Le tableau 3.2 renseigne sur les quantités disponibles de résidus du bois par province, la quantité de carbone émise et le potentiel d'énergie correspondant en 1998.

Tableau 3.2: Surplus des résidus du bois et potentiel énergétique par province
(Wood et Layzell, 2003)

Province	**Surplus de résidus (t sèche/an)**	**Carbone émis (Mt C/an)**	**Potentiel (PJ)**
AB	0,9	0,45	16
BC	2,06	1,03	37
MB	0,02	0,01	0
SK	0,05	0,02	1

ON	0,45	0,22	8
QC	1,64	0,82	29
NB	0,18	0,09	3
NL	0,02	0,01	0
NS	0,06	0,03	1
PE	0	0	0
NT, NU, YT	0	0	0

3.3.3. Potentiel d'énergie de la liqueur noire

Le Canada a un potentiel de production d'énergie à partir de la liqueur noire entre 140,4 PJ (Ekbom *et al*., 2003) et 282 PJ (Tampier *et al*., 2004).

Pour calculer le potentiel d'énergie de la liqueur noire par province, nous avons utilisé les données de la figure 3.8 qui montre que le Québec possède la part la plus importante de production papetière avec 35%, suivi de l'Ontario (25%), de la Colombie-Britannique (22%) et des provinces atlantiques et des Prairies (18%).

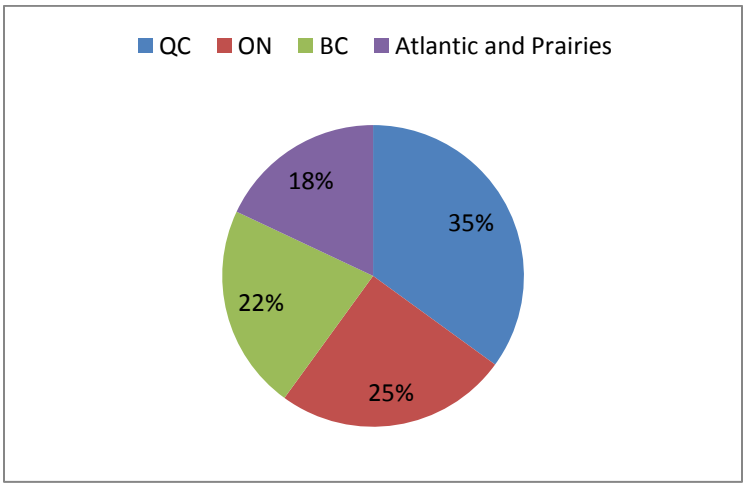

Figure 3.8: Partage de production papetière au Canada

Adaptée de Minnes (2012)

Le potentiel d'énergie par province s'obtient alors par multiplication du potentiel total au Canada et de la proportion de production de liqueur noire de chaque province. Les résultats sont dans le tableau A.19 de l'annexe A et sont illustrés sur la figure 3.9.

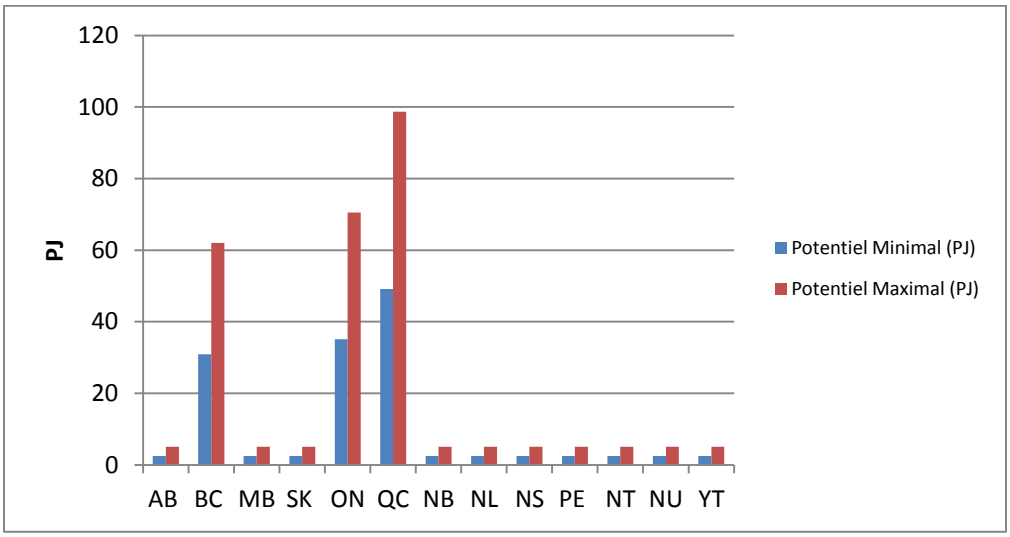

Figure 3.9: Potentiel de production d'énergie de la liqueur noire par province

Le Québec, l'Ontario et la Colombie-Britannique sont les provinces qui ont les potentiels maximaux les plus élevés de liqueur noire soient respectivement 98,7 PJ, 70,5 PJ et 62,04 PJ.

3.4. Potentiel d'énergie des résidus solides municipaux

Les résidus solides municipaux contiennent en moyenne 85% de matières organiques possiblement combustibles pour produire du biogaz par différents moyens. La combustion, la pyrolyse et la gazéification sont des technologies qui exigent l'élimination de 22,5% d'eau contenue dans les déchets municipaux pour les traiter. Les données sur le potentiel d'énergie des résidus municipaux sont tirées des travaux de Wood et Layzell (2003) où le rendement carbone est de 41% (Klass, 1998, cité par Wood et Layzell, 2003). D'un autre côté, Ralevic et Layzell (2006) estiment que les résidus solides municipaux peuvent répondre à 1,6% des besoins de la Colombie-Britannique en énergie qui sont évalués de 920 PJ/année. Nous avons déduit alors que le potentiel en Colombie-Britannique est tel que:

$$Potentiel = \frac{(920 * 1{,}6)}{50} = 29{,}44\ PJ$$

Pour les provinces du Nord (PE, NT, NU et YT), les données sur les résidus municipaux sont manquantes. Nous avons alors estimé le potentiel par rapport à la totalité du potentiel au Canada, soit 220 PJ (Wood et Layzell, 2003). Ayant les données sur la population dans chaque province en 2007 (Statistique Canada, 2011), les facteurs populations arrondis sont donnés par :

$$\frac{Population\ (PE)}{Population\ totale} = \frac{138{,}2}{32\ 929{,}7} = 0{,}004$$

$$\frac{Population\ (NT)}{Population\ totale} = \frac{43{,}5}{32\ 929{,}7} = 0{,}001$$

$$\frac{Population\ (NU)}{Population\ totale} = \frac{31{,}3}{32\ 929{,}7} = 0{,}001$$

$$\frac{Population\ (YT)}{Population\ totale} = \frac{32{,}6}{32\ 929{,}7} = 0{,}001$$

Le potentiel d'énergie est obtenu par multiplication du facteur population et du total potentiel. Les données concernées sont en gras dans le tableau 3.3. Le tableau présente entre autres la quantité de déchets éliminée par province, et les quantités de matières sèches prêtes pour la transformation en énergie.

Tableau 3.3: Potentiel de production du biogaz des résidus solides municipaux par province (Wood et Layzell, 2003)

Province	**Déchets totaux éliminés (t)**	**Fraction combustible (t)**	**Fraction combustible sèche (t)**	**Rendement carbone (t)**	**Potentiel Min (PJ)**	**Potentiel Max (PJ)**
AB	2 750 004	2 337 503	1 811 565	742 742	27	27
BC	2 592 191	2 203 362	1 707 606	700 118	25	29,44
MB	938 624	797 830	618 318	253 510	0	9
SK	828 359	704 106	545 682	223 730	8	8
ON	7 491 581	6 367 844	4 935 079	2 023 382	75	75

QC	6 912 000	5 875 200	4 553 280	1 866 845	67	67
NB	472 612	401 720	311 333	127 647	5	5
NL	409 599	348 159	269 824	110 628	4	4
NS	432 487	367 614	284 901	116 809	4	4
PE	NA	NA	NA	NA	**0,88**	**0,88**
NT	NA	NA	NA	NA	**0,22**	**0,22**
NU	NA	NA	NA	NA	**0,22**	**0,22**
YT	NA	NA	NA	NA	**0,22**	**0,22**

3.5. Potentiel d'énergie des résidus industriels

Les résidus industriels sont les résidus non résidentiels formés par les déchets des industries, les boues des industries agroalimentaires et les déchets organiques banals. Le site de Statistique Canada (2008) nous renseigne sur les quantités de déchets non résidentiels en kg/personne dans chaque province. (Voir tableau 3.4)

Pour calculer le potentiel d'énergie qui en découle, nous avons effectué alors l'inventaire de la population dans chaque province. Le contenu en eau est de 22,5% comme pour les résidus municipaux solides (Klass, 1998, cité par Wood et Layzell, 2003) et la fraction combustible est de 85% (Klass, 1998, cité par Wood et Layzell, 2003). Les quantités de déchets secs combustibles sont obtenues par :

$$Déchets\ secs\ combustibles\ = population * déchets\ non\ résidentiels * (1 - 0{,}225) * 0{,}85$$

Les calculs donnent les quantités provinciales de déchets secs combustibles (Voir tableau 3.4). Au final, le calcul du potentiel d'énergie repose sur le fait de considérer que le pouvoir calorifique est entre 14,3 MJ/kg sec et 18,3 MJ/kg sec. Le potentiel s'obtient par :

$$Potentiel = déchets\ secs\ combustibles * pouvoir\ calorifique$$

Les résultats figurent dans le tableau 3.4.

Tableau 3.4: Potentiel de production d'énergie des résidus industriels par province

Province	Population[9] (milliers d'habitants)	Déchets non résidentiels (kg/personne)[10]	Déchets secs combustibles (t)	Potentiel (PJ)	
				Min	Max
AB	3 290	844	1 829 190,65	26,15	33,47
BC	4 113	454	1 230 085,19	17,59	22,51
MB	1 148	483	365 266,33	5,22	6,68
SK	968	544	346 892,48	4,96	6,3
ON	12 160	530	4 245 512	60,71	77,69
QC	7 546	601	2 987 527,42	42,72	54,67
NB	730	312	150 036,9	2,14	2,74
NL	505	353	117 432,06	1,67	2,14
NS	913	248	149 156,81	2,13	2,72
PE	136	x[11]	x	x	x
NT	41	665	17 960,81	0,25	0,32
NU	29	x	x	x	x
YT	30	595	11 758,68	0,16	0,21

3.6. Potentiel d'énergie de biosolides

Les biosolides constituent une deuxième source de déchets municipaux. Ils renferment les déchets produits par les stations d'épurations et les eaux usées. Les quantités émises dépendent de la population provinciale desservie par le traitement des eaux. Pour le cas de NU, NT et YT, les quantités émises sont données pour l'ensemble des trois provinces. Nous avons supposé que chacune possède le tiers de la quantité disponible.

[9]Les données sont tirées de la Série « Analyses » du Recensement de 2006 - Résultats (Statistique Canada 2009)
[10]Les données sont tirées de l'Enquête sur l'industrie de la gestion des déchets : secteur des entreprises et des administrations publiques (Statistique Canada 2008).
[11]Ces données sont confidentielles

La production moyenne de biosolides est de 0,063 kg/jour/personne et le pouvoir calorifique est de 19 MJ/t de matières sèches (Klass, 1998, cité par Wood et Layzell, 2003). 78% des eaux usées subissent des traitements primaires, secondaires ou tertiaires (Wood and Layzell, 2003).

Tableau 3.5: Disponibilité de biosolides par province

(Wood and Layzell, 2003)

Province	**Résidus de biosolides disponibles**		**Population (habitants)**	**Population desservie par le traitement d'eau (habitants)**
	kg/jour	**t/an**		
AB	153 001	55 845	3 113 586	2 428 597
BC	203 502	74 278	4 141 272	3 230 192
MB	56 552	20 641	115 848	897 661
SK	49 720	18 147	1 011 808	789 210
ON	593 036	216 458	12 068 301	9 413 275
QC	366 348	133 717	7 455 208	5 815 062
NB	307 181	13 571	756 652	590 189
NL	26 122	9 534	531 595	414 644
NS	46 425	16 945	944 765	736 917
PE	6 875	2 509	139 913	109 132
NU	1 639	583	33 348	26 011
NT	1 638	583	33 347	26 011
YT	1 638	583	33 347	26 011

L'Ontario a le potentiel annuel de production d'énergie de biosolides le plus élevé soit 4,11 PJ (Wood et Layzell, 2003). Par contre, selon McDonald et Banks (2009), ce potentiel est uniquement de 0,8 PJ/an. Les données sur le potentiel pour le reste des provinces sont tirées de Wood et Layzell (2003). Pour cela, nous nous contentons de présenter uniquement le potentiel maximal d'énergie de biosolides. (Voir figure 3.10)

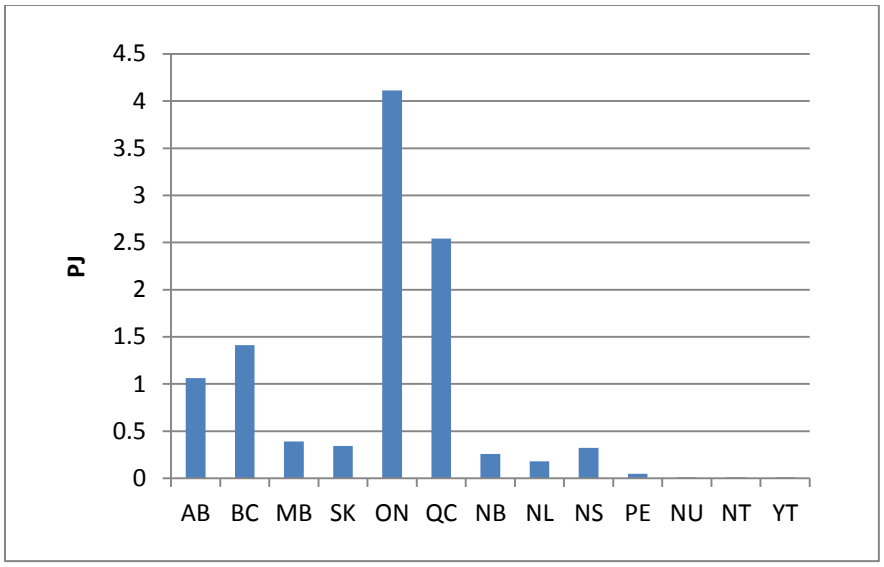

Figure 3.10: Potentiel maximal de production d'énergie de biosolides par province

3.7. Potentiel d'énergie du fumier

Au Canada, les émissions de GES à partir du fumier ont représenté en 2010 0,95% du total des émissions de GES évaluées à 692 Mt de CO_{2eq} (Environnement Canada, 2012). Le procédé de biométhanisation permet à la fois de résoudre le problème d'excédent de déchets animaux et de produire de l'énergie propre.

L'intensité de la production du fumier dépend de la nature du fumier. Le tableau 3.6 résume les quantités du fumier par jour et le taux de production par tête en fonction du type du fumier.

Tableau 3.6: Intensité de production du fumier par type d'animal

Type du fumier	**Quantité du fumier (kg/unité/jour)**	**Taux de production (t sèche/tête/an)**
Production laitière	52	2,27
Production bovine	34	1,69
Production porcine	5	NA
Production des volailles	0,06	0,01
Production des dindons	0,06	0,04
Production des moutons	52	0,28

Les données sur la quantité du fumier dans le tableau 3.6 pour la production laitière, bovine, porcine et des volailles ainsi que le taux de production bovine, des volailles, des dindons et des moutons sont tirées des travaux de Ralevic et Layzell (2006). Pour compléter les données, nous avons supposé que la quantité du fumier des dindons est égale à celle des volailles et que la quantité de production du fumier des moutons est égale à celle à partir de la production laitière.

La fraction solide du fumier laitier représente 12% de son poids (Agri-Facts, 2011). Ce pourcentage peut diminuer jusqu'à 8% pour le fumier bovin, mais il est entre 25% et 27% pour le fumier des volailles (Agri-Facts, 2011). Le solide volatil représente 80% du fumier bovin (Agri-Facts, 2011). Il peut diminuer jusqu'à 70% pour les volailles et atteindre 85% pour la production laitière (Agri-Facts, 2011). Nous supposons que ces pourcentages sont invariants sur toutes les provinces. Les formules ci-après expliquent la démarche de calcul de la production sèche et de la disponibilité du fumier :

$$Production\ sèche = production * \%\ total\ solide$$

$$Disponibilité = taux\ de\ récupération * production\ sèche$$

Le rendement du méthane représente 60% pour les volailles. Il est de 54% pour la production laitière et de 53% pour les bovins (Agri-Facts, 2011).

Le pourcentage de matière récupérable diffère selon le type du fumier et la province. Pour l'Alberta, les taux de récupération pour la production laitière, bovine et des volailles sont respectivement de 82%, 46% et de 100% (Agri-Facts, 2011). Cependant, pour le reste des provinces, ces taux des mêmes fumiers sont respectivement de 75%, 25% et de 85% (Ralevic et Layzell, 2006). Pour le fumier porcin, des dindons et des moutons, les taux de récupération sont respectivement de 85%, 85% et de 10% (Ralevic et Layzell, 2006) que nous avons généralisés pour toutes les provinces.

Les pouvoirs calorifiques de production du biogaz du fumier sont tirés des travaux de Vaillancourt (2012) et sont présentés dans le tableau A.22 de l'annexe A.

Les résultats du potentiel d'énergie à partir du fumier ainsi que les données sur le nombre de têtes d'animaux existants par province sont dans les tableaux A.23, A.24, A.25 et A.26 de l'annexe A. Les figures 3.11 et 3.12 illustrent les potentiels d'énergie obtenus par province.

Le fumier le plus disponible au Canada est le fumier porcin. Il existe 7 085 385 têtes de porcs au Manitoba soit une production de 13m^3 Mt/année de matières humides (Ralevic et Layzell, 2006).

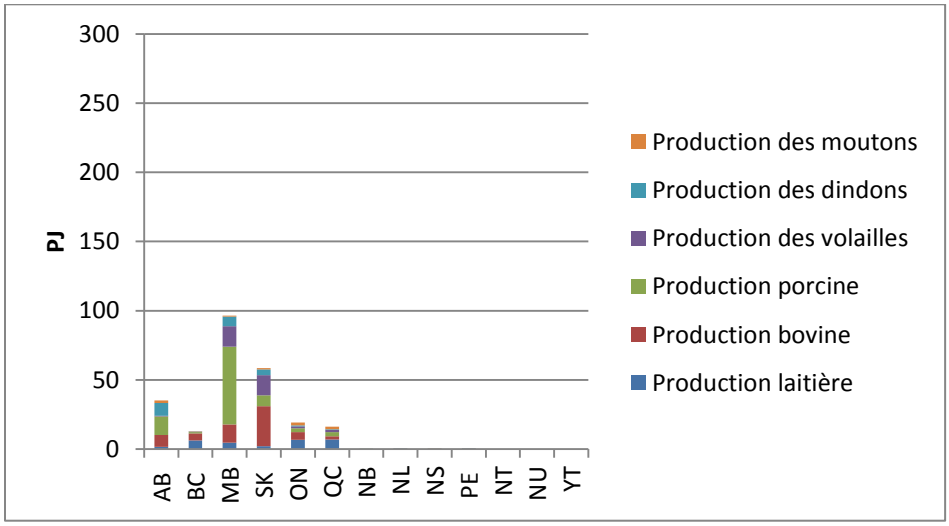

Figure 3.11: Potentiel minimal de production d'énergie du fumier par province

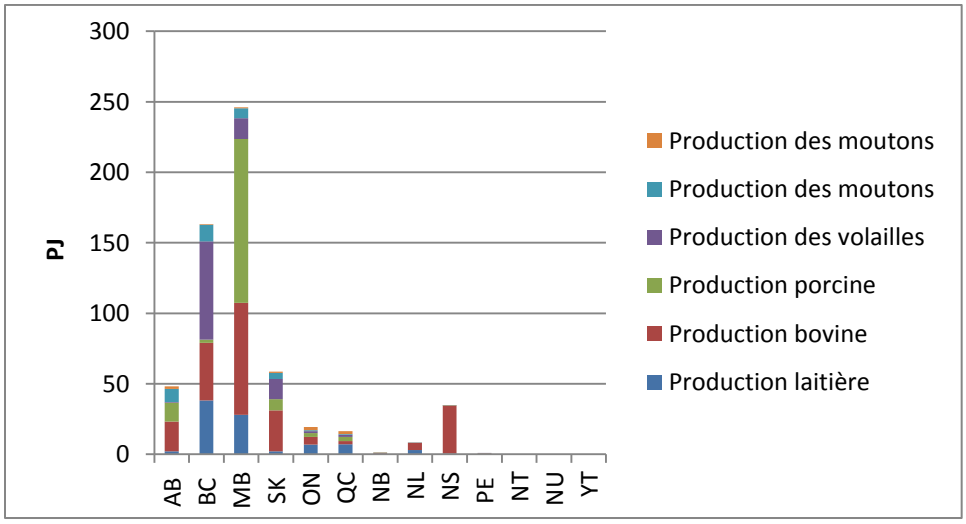

Figure 3.12: Potentiel maximal de production d'énergie du fumier par province

3.8. Potentiel d'énergie des matières enfouies

La quantité du méthane contenue dans le biogaz dépend fortement du pourcentage de la matière organique dans les déchets. Plus le pourcentage de matière organique est grand, plus il est difficile de récupérer le gaz des sites d'enfouissement (Voir tableau 3.7). La récupération de ces gaz permet à la fois d'éviter la dissipation des GES dans l'air et de procurer une source d'énergie renouvelable. Il est possible aussi de réacheminer les matières organiques par processus de digestion anaérobie ou par compostage. La digestion anaérobie produit le biogaz qui peut remplacer les carburants fossiles. Le compostage donne du compost qui est utilisé pour la fertilisation des sols.

Les hypothèses d'estimation du potentiel d'énergie concernent aussi le volume de méthane en fonction de la nature du poids des déchets organiques. Le poids humide permet de dégager 120 m^3 de CH_4/t, le poids sec permet de dégager 250 m^3 de CH_4/t tandis que le poids solide volatil dégage 400 m^3 de CH_4/t (Davidsson *et al*., 2007, cité par Pineau, 2010).

Le Canada possède plus que 20 Mt de déchets d'enfouissement soit une éventuelle source de plus de 20 Mt de CO_{2eq}. L'Ontario et le Québec ont la plus grande source de déchets d'enfouissement avec plus 6,2 Mt et émettent respectivement 7 Mt et 4,8 Mt de CO_{2eq}.

Les données sur les quantités de déchets enfouies par province au Canada sont tirées du rapport d'Environnement Canada (2009) cité par Pineau (2010). L'énergie brute du méthane est de 23 811 btu/lb (The Engineering ToolBox, 2011). Nous avons converti les quantités enfouies en lb, puis nous avons calculé le potentiel annuel d'énergie des déchets d'enfouissement comme suit :

$$Potentiel = quantité\ enfouie * énergie\ brute\ du\ CH4$$

La quantité enfouie étant en lb, l'énergie brute du méthane (CH_4) en btu/lb, le potentiel obtenu est en btu, que nous avons converti en PJ. Les résultats figurent dans le tableau 3.7.

Tableau 3.7: Potentiel d'énergie des matières enfouies par province

(Environnement Canada, cité par Pineau, 2010)

Province	Potentiel (PJ)		Quantité enfouie (t)	Quantité enfouie (lb)	Énergie (btu)	Matière organique (%)
	Min	Max				
AB	157,07	157,07	2 836 066	6 252 454 847	1,48E+14	16,7
BC	119,66	119,66	2 160 704	4763 536 602	1,13E+14	23,3
MB	47,98	47,98	866 338	1 909 948 227	4,54E+13	4,9
SK	38,69	38,69	698 631	1 540 217 605	3,66E+13	4,3
ON	346,21	346,21	6 251 181	13 781 494 134	3,28E+14	16,4
QC	345,41	345,41	6 236 765	13 749 712 297	3,27E+14	13,7
NB	19,42	19,42	350 787	773 352 904,5	1,84E+13	19,8
NL	20,97	20,97	378 733	834 963 284,2	1,98E+13	
NS	15,11	15,11	272 933	601 714 226,3	1,43E+13	29,7
PE	4,64	4,64	83 938	185 051 601,4	4,40E+12	0
NU, NT, YT	0	0	0	0	0	0

3.9. Potentiel d'énergie de la biomasse aquatique

3.9.1. Potentiel d'énergie des algues

Les biocarburants de troisième génération produits à partir des algues constituent une alternative appropriée pour remplacer les carburants fossiles. La transformation des huiles des algues peut produire du biodiesel. De plus, les carbohydrates qui y sont contenus peuvent être fermentés pour produire du bioéthanol et du biobutanol. Néanmoins, cette transformation est actuellement très peu utilisée en raison des coûts élevés d'opération et d'investissement dans les algues.

Les algues ont des cycles de vie aux alentours de 1 à 10 jours, permettant ainsi des récoltes répétées dans un délai court ce qui fait l'intérêt d'exploiter la culture des algues pour la production de biocarburants. Jusqu'à maintenant, nous ne trouvons pas d'estimations chiffrées du potentiel des algues au Canada, mais nous pourrions dire que ce potentiel est énorme et ne

dépend pas de la longueur côtière puisque les algues peuvent être cultivées même dans la neige ou au sein des laboratoires. Nous estimons un potentiel annuel de 50 PJ sur toutes les provinces.

3.9.2. Potentiel d'énergie de l'huile de poisson

La production du biodiesel à partir de l'huile marine principalement l'huile de poisson est localisée au Québec et aux Terres-Neuves-et-Labrador. Le Québec compte près de 1 532 t d'huile marine et les Terres-Neuves-et-Labrador possèdent 1 382 t (Kajat, 2006).
Pour l'huile de poisson, le pouvoir calorifique est de 36,928 MJ/L (Eia, 2007) et la litre d'huile équivaut à 0,947 kg. Nous concluons qu'un kilo d'huile de poisson pourrait produire 38,99 MJ d'énergie. Le potentiel d'énergie est alors :

Au QC : $1532*38{,}99 = 59732\ 10^6$ MJ = 59,732 PJ

Au NL : $1382*38{,}99 = 53884\ 10^6$ MJ = 53,884 PJ

Pour le reste des provinces, nous avons conclu que le potentiel d'énergie de l'huile de poisson est nul.

4. Analyse des résultats

Les émissions de GES dépendent de plusieurs variables macroéconomiques telles que l'évolution démographique, la croissance économique et l'intensité en hydrocarbures de l'économie entre autres. L'élaboration des scénarios permet de cerner l'incertitude concernant ces variables. Les scénarios ne prévoient pas le futur, mais tracent des situations possibles de l'évolution du système énergétique.

Dans ce chapitre, nous avons construit trois scénarios : BAU, GES1 et GES2. Le scénario de référence (BAU) ne fait intervenir aucune contrainte climatique ou énergétique. C'est le scénario de base. Le scénario GES1 est caractérisé par des objectifs de réduction hétérogènes à l'échelle provinciale. Ces objectifs sont obtenus par projection des objectifs de réduction du Canada lors de l'Accord de Copenhague. Le scénario GES2 est un scénario de réduction intense de 75% des émissions de GES.

L'objectif de ce chapitre est d'évaluer la réaction du système énergétique canadien suite à la sollicitation des déterminants macroéconomiques dans les trois scénarios. Ceci permettra de mesurer l'importance de la biomasse dans la réduction des émissions de GES d'ici 2050.

4.1. Estimation du potentiel d'énergie de la biomasse en 2050

Les données sur le potentiel de production d'énergie sont calibrées à l'an 2007. Le modèle TIMES-Canada est dynamique jusqu'à l'an 2050. Pour connaître le niveau de pénétration de la biomasse sur le marché énergétique en 2050, il a été nécessaire d'estimer le potentiel de production d'énergie à partir de la biomasse en 2050. Nous avons supposé entre autres, que les coûts d'extraction et de transport des matières premières de la biomasse restent inchangés par rapport à 2007.

Selon le rapport publié par Technologies du Développement Durable Canada (2006), le Canada peut atteindre un potentiel de production d'énergie de biomasse entre 2 200 PJ et 4 900 PJ d'ici une quinzaine d'années. Selon le même rapport, le Canada avait un potentiel de 1 400 PJ en 2006 à partir de l'agriculture et des résidus forestiers. Cela signifie que ce potentiel peut augmenter de 1,57 à 3,5 fois en 2020, puisque :

$$Facteur\ de\ multiplication\ minimal = \frac{2\ 200}{1\ 400} = 1{,}57$$

$$Facteur\ de\ multiplication\ maximal = \frac{4\,900}{1\,400} = 3{,}5$$

Pour pouvoir facilement estimer le potentiel d'énergie en 2050, nous supposons arbitrairement que cette augmentation est linéaire sur l'horizon 2007-2050. Le potentiel sera multiplié respectivement par 1,57 et 3,5 en 2020, puis par 3,87 et 42,87 en 2050 comme le montrent les résultats de la projection sur Excel du tableau 4.1.

Tableau 4.1: Projection du potentiel d'énergie à partir de la biomasse agricole et forestière en 2050

	2007	**2020**	**2035**	**2050**
Min (PJ)	1 400	2 200	3 457,14	5 432,65
Max (PJ)	1 400	4 900	17 150	60 025

En 2050, les potentiels d'énergie de la biomasse agricole et forestière peuvent varier entre un minimum de 5 432,65 PJ et un maximum de 60 025 PJ.

On projette aussi le potentiel d'énergie des grandes cultures en 2050 à l'aide d'Excel en multipliant par le facteur 1,57. Les résultats de projection figurent dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2: Projection du potentiel d'énergie des grandes cultures en 2050

	2007	**2020**	**2035**	**2050**
Min (PJ)	405,46	636,57	999,42	1 569,1
Max (PJ)	720,84	2 522,94	8 830,32	30 906,12

Il nous reste maintenant d'estimer le potentiel d'énergie des résidus agricoles. Pour ce faire, nous avons consulté les données du GIEC (Paré 2011)(Paré, 2011) qui prévoient que le potentiel d'énergie de la biomasse à l'échelle mondiale en 2050 serait comme suit :

- Potentiel de biomasse forestière : 110 000 PJ
- Potentiel des cultures dédiées : 110 000 PJ
- Potentiel des grandes cultures : 700 000 PJ

- Potentiel des résidus agricoles : 70 000 PJ

Nous remarquons que le potentiel d'énergie des résidus agricoles à l'échelle mondiale représente 10% de celui des grandes cultures en 2050. Nous supposons alors que le potentiel d'énergie des résidus agricoles au Canada représente lui aussi 10% du potentiel des résidus agricoles au Canada en 2050. Les résultats sont dans le tableau 4.3.

Tableau 4.3: Projection du potentiel des résidus agricoles en 2050

	2050
Min (PJ)	156,91
Max (PJ)	3 090,62

Le potentiel total d'énergie des résidus agricoles au Canada peut augmenter de 131,16 PJ en 2007 jusqu'à 3 090,61 PJ en 2050. (Voir tableau 4.4)

Tableau 4.4: Potentiel d'énergie des résidus agricoles entre 2007 et 2050

	2007	**2050**
Min (PJ)	131,16	156,91
Max (PJ)	213,54	3 090,61

Pour pouvoir estimer ce potentiel à l'échelle provinciale, nous avons calculé les facteurs d'augmentation de 2007 à 2050 :

$$Facteur\ de\ multiplication\ minimal = \frac{156{,}91}{131{,}16} = 1{,}2$$

$$Facteur\ de\ multiplication\ maximal = \frac{3\ 090{,}61}{213{,}54} = 14{,}4$$

Nous supposons que ces coefficients sont les mêmes pour toutes les provinces. Ainsi, nous pouvons déduire le potentiel d'énergie des résidus agricoles dans chaque province.

Pour les résidus industriels, les matières enfouies et le fumier, nous supposons que le potentiel de production d'énergie est susceptible d'augmenter en raison des nouvelles méthodes de

production industrielle qui permettront de limiter les déchets et de les réutiliser de façon plus efficace. Nous suggérons un multiplicateur proche de celui des résidus agricoles et forestiers soit un facteur de 1,1. Pour les algues et l'huile de poisson, nous suggérons un coefficient multiplicateur de 3 d'ici 2050.

Les résultats d'estimation du potentiel d'énergie pour chaque catégorie de la biomasse sont donnés dans les tableaux B.1, B.2, B.3 et B.4 de l'annexe B.

Nos estimations concluent que le Canada dispose d'un potentiel total de 3 876,3 PJ de biomasse disponible pour la production de bioénergie. Il peut s'élever jusqu'à 5 338,4 PJ. La grande partie de ce potentiel est assurée par les résidus forestiers et la liqueur noire (entre 956,96 PJ et 1 098,6 PJ). Ce potentiel est susceptible d'augmenter en cas d'amélioration des rendements agricoles et du développement des cultures dédiées.

4.2. Formulation des scénarios

Les scénarios de croissance de la biomasse énergétique potentielle permettent de mesurer la sensibilité du système énergétique canadien à des variations possibles des circonstances démographiques, économiques et d'utilisation d'énergie. Le choix des hypothèses sur ces forces motrices permet d'obtenir une idée sur quelques situations énergétiques possibles.

Nous supposons que l'évolution de la population, du PIB et du progrès technologique est la même dans les trois scénarios. Cependant, l'utilisation de la biomasse diffère d'un scénario à un autre selon son efficacité pour atteindre les objectifs souhaités.

4.2.1. Scénario de référence (BAU)

Le scénario de référence (BAU) est le scénario de base (*Business As Usual*) où l'économie évolue conformément aux tendances antérieures. Aucun engagement décisionnel sur les émissions de GES ou l'utilisation des énergies renouvelables n'est pris en compte.

La consommation d'énergie dans le scénario de référence est tributaire particulièrement de l'évolution démographique et de la croissance économique. Les données sur l'évolution de la population et du PIB sur l'an 2000-2020 sont obtenues de l'Office National de l'Énergie jusqu'en 2020 (National Energy Board, 2009) puis complétées par une régression linéaire

jusqu'en 2050 (Vaillancourt, 2012). En 2050, la population canadienne peut atteindre 46 673 000 habitants augmentant ainsi de 52% depuis 2000. Comme nous voyons sur la figure 4.1, l'Ontario a la croissance de la population la plus rapide, suivi du Québec, de la Colombie-Britannique et de l'Alberta. L'évolution démographique dans les autres provinces est peu marquée.

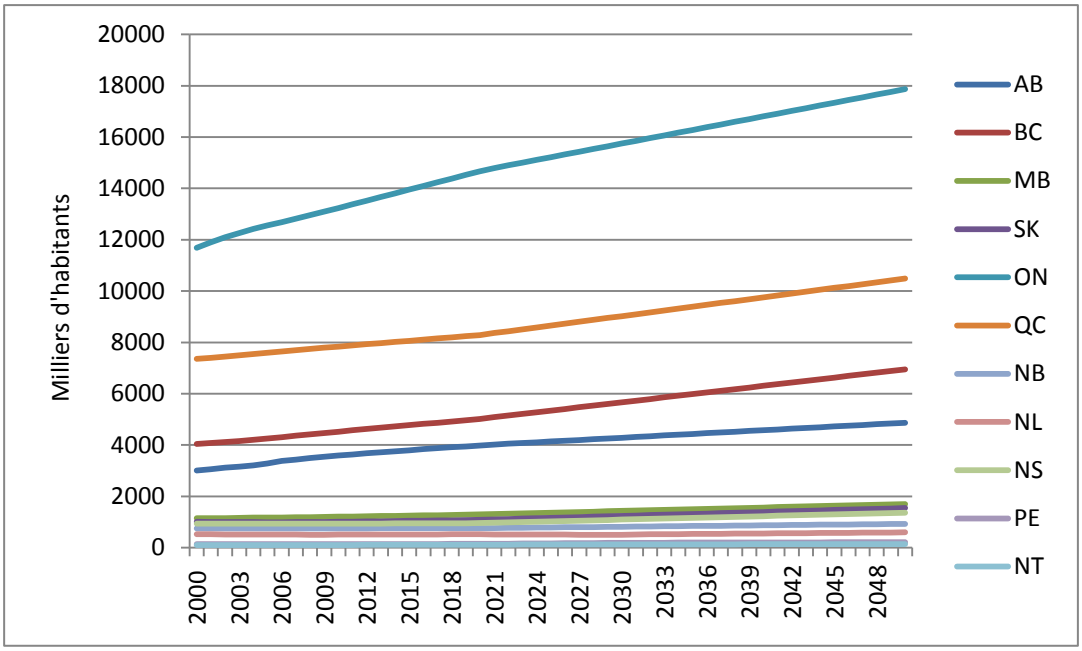

Figure 4.1: Projection de la population par province en 2050 : scénario de référence de TIMES-Canada

Les données démographiques dans le scénario de référence incluent la population active, le taux de chômage, les ménages, la surface des espaces des ménages et la surface des espaces commerciaux. Par exemple, une augmentation des surfaces des ménages ou des surfaces commerciales accentuer forcément la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel et commercial.

D'autre part, les projections futures montrent que le Canada peut connaître une forte croissance économique durant les années à venir, après le léger déclin de l'économie en 2009. Les statistiques récentes indiquent que la croissance du PIB a augmenté de 3,3% en 2010 contre un recul de 2,7 % en 2009 avec la récession économique (Industrie Canada, 2011). En effet, cette augmentation du PIB, continuellement prévue jusqu'à 2050, indique que les facteurs de

production fonctionnent à pleine capacité, signe de santé de l'économie du pays. L'Ontario, la province la plus peuplée, est celle qui a la croissance économique la plus élevée du pays suivie du Québec, de l'Alberta et de la Colombie-Britannique.

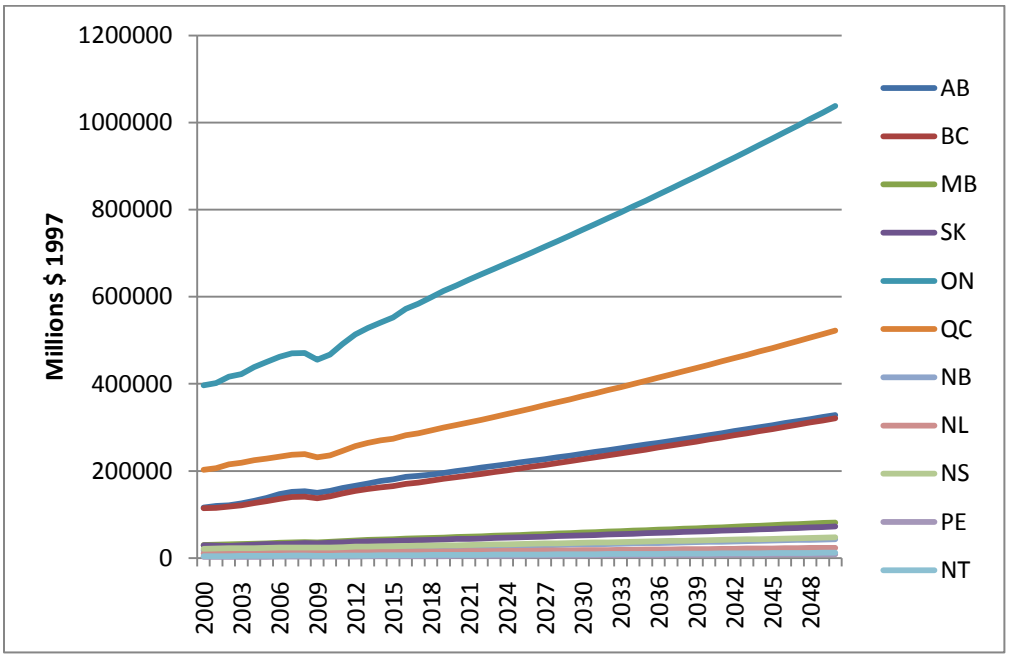

Figure 4.2: Projection du PIB par province en 2050 : scénario de référence de TIMES-Canada

4.2.2. Scénarios de politiques climatiques GES1 et GES2

Depuis le sommet de la Terre à Rio De Janeiro en 1992, le Canada a pris des engagements de lutte contre les changements climatiques et s'est ainsi fixé des objectifs de réduction de ses émissions de GES. En 2002, le Canada a ratifié de façon officielle le Protocole de Kyoto en s'engageant à réduire de 6% ses émissions sur la période 2008-2012 par rapport à 1990, mais s'en est retiré en 2011 (Bureau du vérificateur général du Canada, 2012). Par contre, lors de l'Accord de Copenhague en 2010, le Canada a annoncé un nouvel objectif de réduction de 17% en 2020 par rapport à l'an 2005 (Bureau du vérificateur général du Canada, 2012).

Par ailleurs, les provinces du Canada se sont engagées elles-mêmes et ont défini des réductions cibles d'ici 2020. La Colombie-Britannique vise à réduire de 33% ses émissions de GES en 2020

par rapport à 2007. Le Québec et la Saskatchewan espèrent diminuer leurs émissions de 20% (Ressources naturelles Canada, 2011a). Pour les Territoires du Nord, Nunavut et Yukon, nous avons pris les objectifs de l'Accord de Copenhague de 2010, soit une réduction de 17%. Le tableau 4.5 montre les objectifs de réductions rassemblées pour toutes des provinces. La projection linéaire sur Excel permet d'obtenir les réductions cibles en 2050 que nous les plafonnons à 50%.

Tableau 4.5: Réductions cibles des émissions de GES par province

Province	**Année de référence**	**Objectif pour 2020**	**Objectif pour 2050**
AB	2005	5%	14%
BC	2007	33%	50%
MB	2005	15%	45%
NB	1990	10%	20%
NL	1990	10%	20%
NS	1990	10%	20%
NT	2005	17%	50%
NU	2005	17%	50%
ON	1990	15%	30%
PE	1990	10%	20%
QC	1990	20%	40%
SK	2006	20%	40%
YT	2005	17%	50%

Le scénario GES2, contrairement au scénario GES1 qui définit des objectifs de réduction hétérogènes entre les provinces, suppose une contrainte de réduction nationale des émissions de GES de 75% en 2050.

Les résultats des scénarios permettront d'évaluer la réponse du système énergétique canadien suite à la sollicitation de ces contraintes.

4.3. Analyse des résultats

4.3.1. Profil de la consommation d'énergie finale dans le scénario BAU

À la différence de la consommation d'énergie primaire qui renferme les quantités utilisées dans le processus de production, les pertes de conversion en énergie et les pertes du transport, la consommation d'énergie finale n'inclut que les quantités demandées par le consommateur final. De façon générale, dans le scénario BAU, toutes les sources d'énergie connaissent une croissance de leur utilisation sauf le charbon et le pétrole. La consommation du charbon subit une légère baisse en 2030 passant de 309 PJ à 276 PJ tandis que la consommation du pétrole passe de 3 488 PJ à 3 252 PJ en 2040 (Voir figure 4.3). Cependant, le pétrole demeure la source d'énergie la plus consommée. Il représente en 2050 près de 32% de la consommation d'énergie finale totale. Quant à la consommation de la biomasse, elle est pratiquement doublée pendant 25 ans passant de 441 PJ en 2025 à 818 PJ en 2050. Cependant, sans aucune contrainte climatique, la pénétration de la biomasse dans le système énergétique reste partielle et lente. Elle ne représente que 8,24% de la totalité de la consommation d'énergie en 2050. D'un potentiel de plus de 3 000 PJ d'énergie de biomasse disponible en 2050, uniquement 818 PJ apparaissent sur le marché. Ceci peut s'expliquer par les coûts élevés des technologies d'extraction et de conversion d'énergie comparativement aux autres sources d'énergies. Le gaz naturel devient aussi une alternative recherchée et son utilisation s'accroît de 40% sur 2007-2050. Les autres énergies renouvelables (hydraulique, géothermique, solaire et éolienne) constituent une piste exploitable, mais très faiblement sollicitée. D'ailleurs, après une stabilisation de la consommation de ces énergies à 2 PJ entre 2007 et 2012, la consommation passe à 127 PJ en 2040 pour chuter à 90 PJ en 2050.

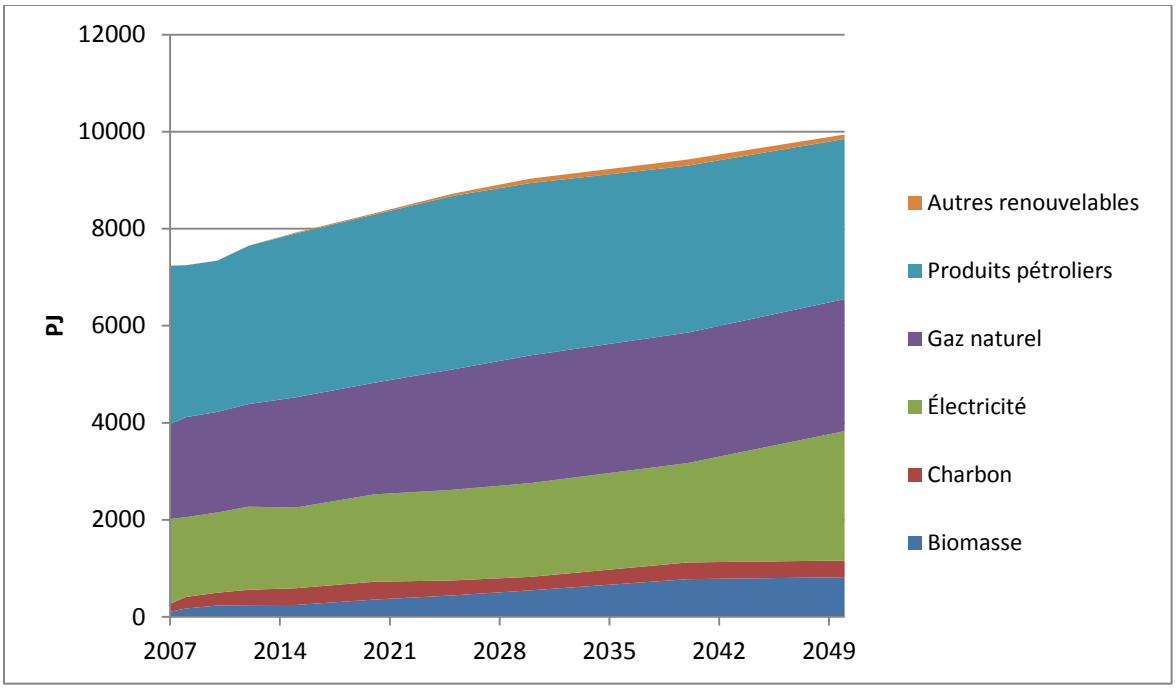

Figure 4.3: Projection de la consommation d'énergie finale dans le BAU

En nous penchant de plus près sur la consommation d'énergie finale par secteur, nous nous apercevons que le secteur du transport demeure le plus grand consommateur d'énergie jusqu'à 2040 pour céder la place ensuite aux secteurs industriel et commercial compte tenu de la pénétration des voitures électriques (dans le secteur de transport). En 2007, la consommation d'énergie finale du secteur du transport représentait 30% tandis qu'elle ne représente en 2050 que 26%. Le secteur commercial enregistre dans le scénario de base une hausse de 76% entre 2007 et 2050 avec une consommation totale de 2 803 PJ, soit 26,6% de la totalité de la consommation en 2050. Ceci peut revenir à l'augmentation des surfaces des unités commerciales prévue. D'autre part, la consommation d'énergie finale des secteurs agricole et résidentiel augmente de façon stable, mais à un rythme moins élevé que le reste des secteurs et représente respectivement 4% et 17,3% de la totalité de la consommation en 2050 (Voir figure 4.4). Cette augmentation s'explique par la rénovation qui peut survenir d'ici 2050 dans les équipements de récolte, les rendements agricoles et les moyens d'extraction et de transport.

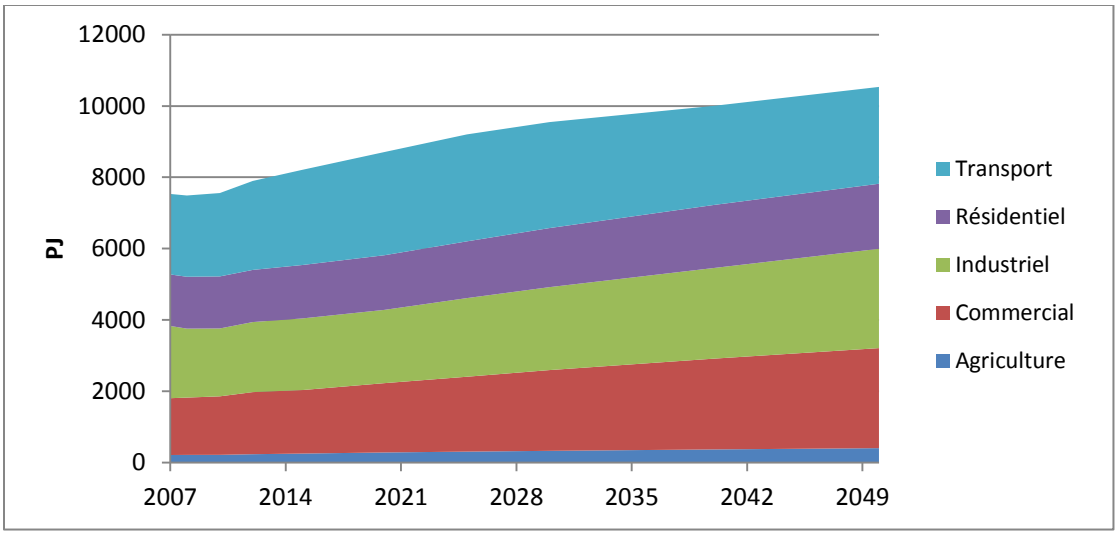

Figure 4.4: Projection de la consommation d'énergie finale par secteur dans le BAU

À l'échelle provinciale, la consommation d'énergie finale dans le scénario BAU, augmente dans toutes les provinces sans exception suite à l'évolution démographique positive. L'Ontario est la province qui consomme le plus d'énergie avec 3 929 PJ en 2050, soit à elle seule 37,3% de la totalité de la consommation d'énergie au Canada. La consommation de l'Ontario va augmenter de plus de 44% de 2007 jusqu'en 2050. Vient ensuite le Québec qui voit sa consommation d'énergie finale augmenter de 29% de 2007 à 2050, représentant ainsi près de 21% de la consommation totale d'énergie finale en 2050. La consommation de l'Alberta croît elle aussi mais de façon presque constante pour atteindre une part de 15% de la consommation d'énergie totale en 2050. (Voir figure 4.5)

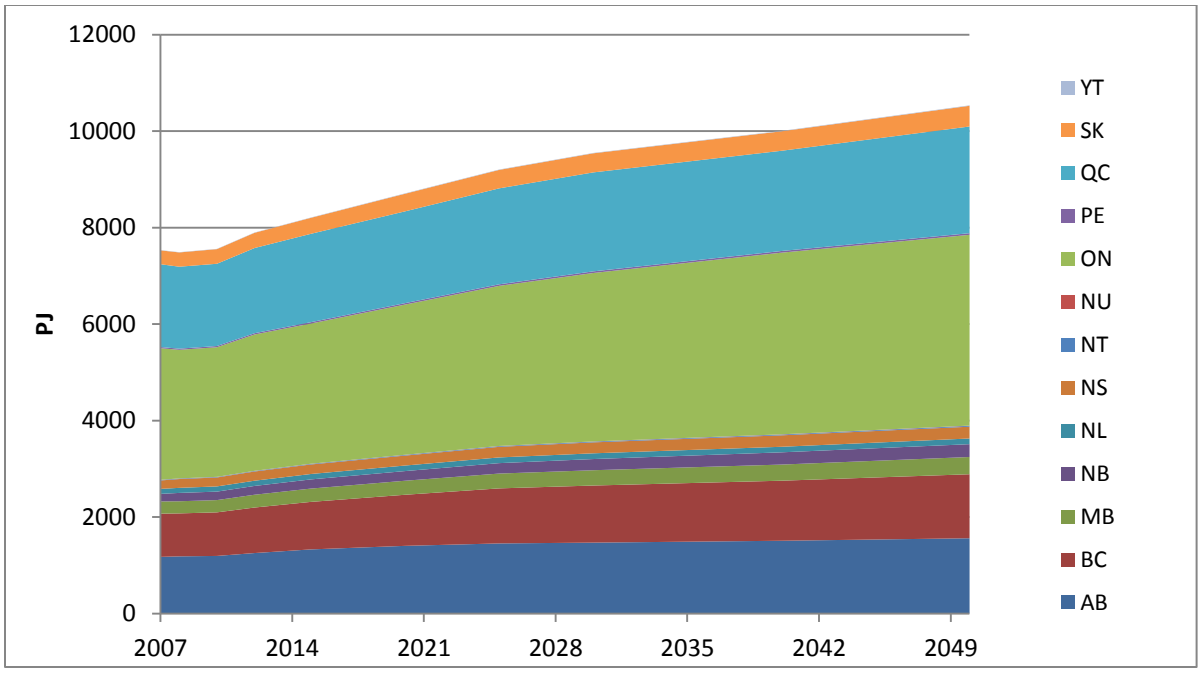

Figure 4.5: Projection de la consommation d'énergie finale par province dans le BAU

La région du centre (ON et QC) demeure celle qui consomme le plus d'énergie finale soit une part de 58,4% de la totalité en 2050.

4.3.2. Évolution de la consommation d'énergie finale dans les trois scénarios

La comparaison des trois scénarios montre que la biomasse représente une alternative énergétique prometteuse si nous souhaitons atteindre les objectifs de réduction du premier scénario GES1. La pénétration de la biomasse s'accroît de 1,37% soit une exploitation supplémentaire de 11 PJ. Par contre, avec une contrainte plus sévère de 75% de réduction de GES en 2050 (scénario GES2), la biomasse s'avère moins efficace et son rôle demeure limité. La consommation d'énergie de la biomasse dans le GES2 est réduite de 818 PJ en 2007 à 554 PJ en 2050 par rapport au scénario de référence. La figure 4.6 montre que la biomasse cède une partie dans le scénario GES1 en faveur des autres énergies renouvelables (qui augmentent considérablement de 69,89%) et de l'électricité (qui augmente de 19%). Nous remarquons aussi que la consommation des énergies fossiles (charbon, gaz naturel et pétrole) diminue visiblement dans les scénarios d'autant plus que la contrainte climatique est stricte (GES2).

Pour réduire de 75% ses émissions de GES, le Canada doit réduire sa consommation de pétrole de 57% soit 1 845 PJ de moins, et de charbon de 46% soit 144 PJ de moins. La consommation du pétrole, qui représente 32% de la consommation d'énergie finale totale dans le BAU, chute en 2050 dans le scénario GES2 à 15% de la consommation totale. De même pour la consommation du gaz naturel qui passe de 27% en 2050 (dans le BAU) à 13% (dans le GES2). L'électricité et les autres énergies renouvelables (l'éolienne, le solaire, l'hydraulique et la géothermie) seront de meilleures alternatives pour répondre aux besoins des consommateurs en 2050 comme le montre la figure 4.6.

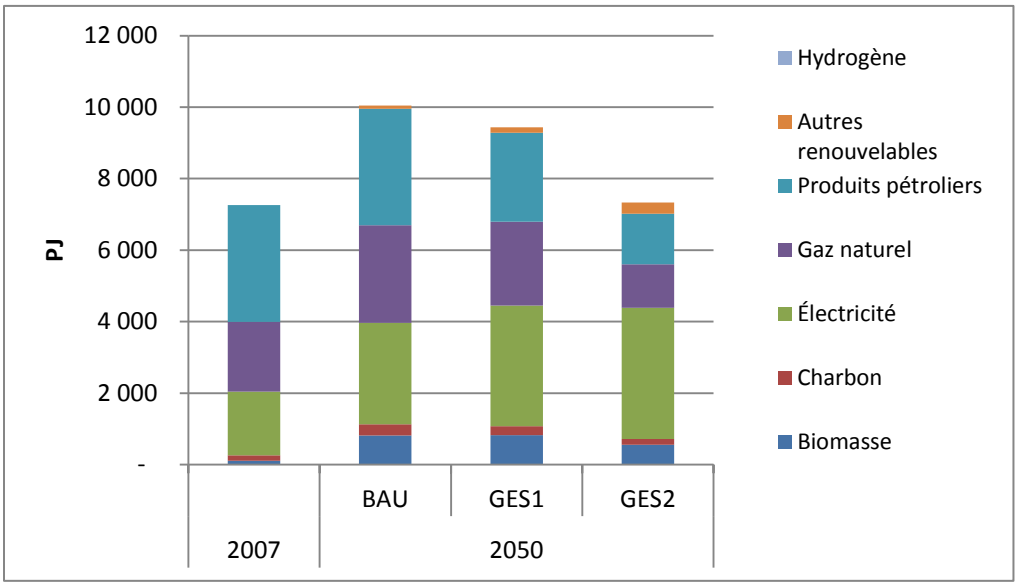

Figure 4.6: Consommation d'énergie finale dans les trois scénarios

La figure 4.7 montre que la biomasse représente une source considérable pour réduire les émissions de GES jusqu'à 2040 surtout dans le scénario GES2. Cependant, à partir de 2040, la biomasse devient moins utile dans le scénario à forte contrainte climatique (GES2). Cette contrainte implique des changements majeurs dans le système énergétique canadien et le modèle opte alors pour d'autres sources propres à échelle plus large essentiellement l'électricité basée en grande partie sur le nucléaire et les autres énergies renouvelables.

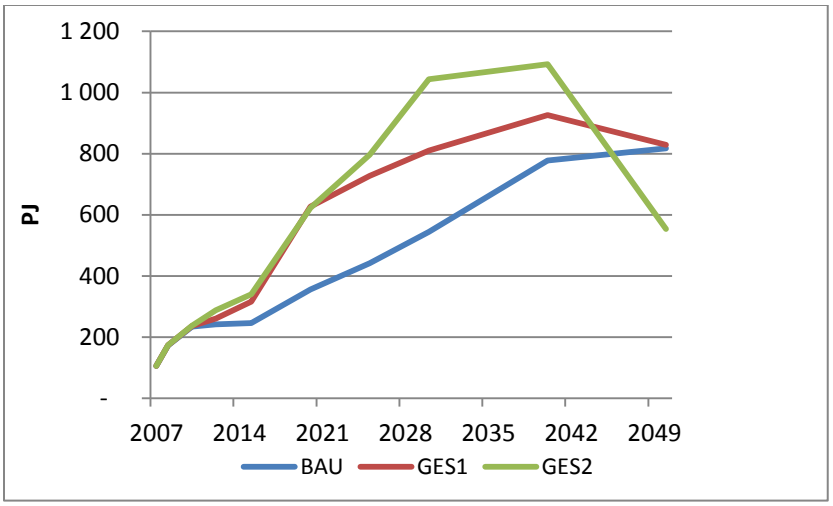

Figure 4.7: Consommation de la biomasse dans les trois scénarios

La figure 4.8 met en exergue le rôle important du nucléaire dans le deuxième scénario GES2 au détriment des énergies thermiques qui disparaissent presque totalement en 2050, et de la biomasse qui baisse de 69% par rapport au scénario GES1. L'utilisation du nucléaire augmente de 35% dans le scénario GES2 passant de 807 PJ à 1 087 PJ. L'utilisation du nucléaire au détriment de la biomasse dans le cas d'une forte contrainte climatique (GES2) peut s'expliquer par rendements relativement plus faibles dans un contexte où il faut produire suffisamment d'énergie propre d'ici 2050. De plus, les hypothèses faites sur la baisse future des couts du nucléaire facilitent la pénétration de ce dernier dans le scénario GES2.

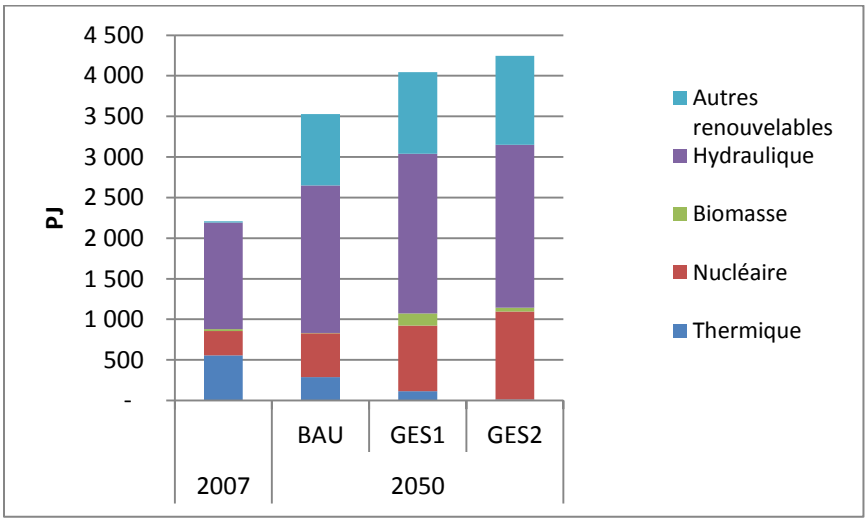

Figure 4.8: Sources de production de l'électricité dans les trois scénarios

4.3.3. Analyse des émissions de gaz à effet de serre

Dans le scénario de base (BAU) où nous n'imposons aucun engagement climatique de réduction de GES, les émissions restent élevées et atteignent un maximum de 633 Mt en 2040. Avec l'engagement du Canada lors de l'Accord de Copenhague, l'utilisation de la biomasse devient considérable et permet de réduire les émissions de GES de 32% en 2050 par rapport à 2007 (GES1). La chute la plus rapide se produit entre 2015 et 2020 où les émissions subissent une réduction de plus de 20% passant de 586 Mt à 467 Mt (Voir figure 4.9). Ceci s'explique par la forte implication du Canada pour achever les objectifs de Copenhague d'ici 2020.

Dans le scénario GES2, les émissions chutent intensivement pour passer de 583 Mt en 2007 à 139 Mt en 2050, soit l'achèvement d'une réduction de 75% des émissions de GES en 2050 grâce au recours au nucléaire.

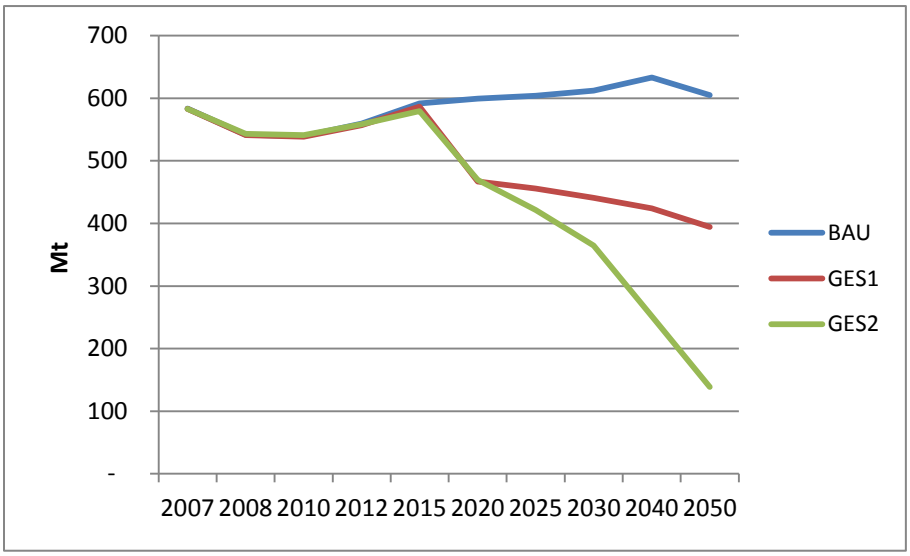

Figure 4.9: Émissions de GES dans les trois scénarios

En conclusion, nous pouvons dire que la biomasse joue un rôle important pour atteindre les réductions souhaitées du scénario GES1. Cependant, son rôle dans le scénario GES2 de forte réduction des émissions de GES reste limité et cède la place au nucléaire.

Discussion conclusive

Dans ce rapport, nous avons ébauché différentes situations énergétiques au Canada en 2050 dans un contexte de modélisation prospective avec le modèle TIMES-Canada. Nous avons construit la base de données de la disponibilité de la biomasse et de son potentiel de production d'énergie. Les données proviennent de sources fédérales, d'organisations nationales ainsi que de centres de recherche. Le secteur de la biomasse a été catégorisé de la façon la plus fine et a impliqué un effort considérable pour la normalisation des hypothèses de calcul du potentiel comme les rendements agricoles, le contenu en eau et l'indice de récolte.

Nous avons élaboré trois scénarios opposés (BAU, GES1 et GES2) dirigés par un ensemble de déterminants qui englobent l'évolution de la population et la croissance économique. Les scénarios diffèrent selon la contrainte imposée sur les émissions de GES.

Les résultats du modèle TIMES-Canada montrent que la biomasse est d'un certain intérêt pour atteindre les objectifs projetés en 2050 aux termes de l'Accord de Copenhague. Cependant, si les taux de réduction de GES sont plus contraignants (soit un objectif de 75% de moins de GES en 2050), le développement du nucléaire serait plus prometteur et la biomasse serait moins utilisée.

Notre étude pourrait être améliorée à plusieurs niveaux. Au niveau de la base de données, en l'absence de données actuelles, certaines hypothèses simplificatrices ont dû être faites (comme pour le potentiel des algues). La base de données pourra donc être complétée lorsque de nouvelles informations plus détaillées seront disponibles.

Par ailleurs, nous nous sommes limités à évaluer les résultats du modèle TIMES-Canada sur l'horizon 2050. Il serait possible d'étendre notre analyse pour obtenir plus d'informations normatives sur l'évolution du système énergétique canadien sur l'horizon 2100. Nous pourrions aussi évaluer d'autres sollicitations comme l'impact d'une rupture technologique ou l'impact des prix des énergies à court et à long terme.

Il serait aussi intéressant de discuter dans quelles mesures l'électricité peut être générée à partir du nucléaire compte tenu que cette énergie pourrait faire l'objet d'une contestation publique.

Nous espérons que cette recherche aura mis en œuvre les potentialités du modèle technico-économique TIMES-Canada dans l'analyse du secteur de production d'énergie à partir de la biomasse sous certaines contraintes environnementales. Évidemment, les pistes de recherche dans ce domaine restent ouvertes et multiples. Nous pouvons par exemple comparer les résultats obtenus avec ceux d'autres modèles comme les modèles de simulation sectorielles.

A. ANNEXE A

Les données présentées dans les tableaux ci-contre sont collectées de diverses sources et servent de base de données complète pour le modèle TIMES-Canada.

Les cases manquantes indiquent qu'il n'existe pas de renseignements sur la donnée en question, La marque x indique que la donnée est confidentielle. La désignation NA indique que la donnée est non disponible.

On confond les données du potentiel maximal et minimal si la valeur est unique.

Les données suivantes sont obtenues par une communication personnelle des travaux de Vaillancourt (2012). Nous avons calculé l'inverse du rendement pour être conforme à l'équation du potentiel d'énergie à partir de l'équation :

$$Potentiel\ (GJ) = Disponibilité\ (t) * Contenu\ en\ énergie\ \left(\frac{GJ}{ha}\right) * Inverse\ du\ Rendement(\frac{ha}{t})$$

Le potentiel est exprimé en PJ dans tous les tableaux.

Tableau A.1: Hypothèses sur les rendements agricoles

	Région	**Rendement**	**Contenu en énergie**	**Inverse du Rendement**
		t/ha	GJ/ha	ha/t
Maïs	Est	8,3	77,527	0,120
	Ouest	8,51	79,488	0,117
	Centre et Nord	8,405	78,508	0,118
Blé	Est	3,1	25,578	0,322
	Ouest	2,32	19,142	0,431
	Centre et Nord	2,71	22,360	0,369
Orge	Est	2,65	21,355	0,377
	Ouest	2,8	22,564	0,357
	Centre et Nord	2,725	21,959	0,366
Avoine	Est	2,55	48	0,392
	Ouest	2,65	49,882	0,377
	Centre et Nord	2,6	48,941	0,384
Sucre à	USA[12]	50	108,665	0,02

[12] Les données pour le sucre à canne au Canada sont manquantes. Nous considérons les données US

canne				
Soja	Est	2,7	18,083	0,370
	Ouest	2,3	15,404	0,434
	Centre et Nord	2,5	16,744	0,4
Colza	Est	1,9	32,675	0,526
	Ouest	1,5	18,861	0,666
	Centre et Nord	1,7	25,768	0,588
Huile de tournesol	Est	2,5	27,516	0,4
Résidus céréaliers	Ouest	2	15,221	0,5
	Est	3	22,832	0,333
	Centre et Nord	2,5	19,027	0,4
Canne de maïs	Ouest	2,5	18,971	0,4
	Est	9,66	73,521	0,103
	Centre et Nord	6,08	46,246	0,164
Switchgrass	Ouest	6,8	60,887	0,147
	Est	6,8	60,887	0,147
Miscanthus	Min	10	300	0,1
	Max	25	320	0,04
Plantes fourragères		5,63	95,71	0,177

❖ Ouest

Tableau A.2: Potentiel de production du bioéthanol des grandes cultures dans les régions de l'Ouest

	Surface (ha)	**Production (Kt)**	**Production sèche (Kt)**	**Total Résidu (Kt)**	**Disponibilité Min (Kt)**	**Disponibilité Max (Kt)**	**Potentiel Min (Pj)**	**Potentiel Max (Pj)**
AB								
Maïs	2 800	22,9	19,236	19,236	9,618		0,03	0,11
Blé	2 300 700	6 076,1	5 103,924	5 103,924	2 551,962	3 800	1,33	4,106
Culture d'amidon	1 978 900	5 741,7	4 823,028	4 823,028	2 411,514	2 550	5,26	8,86
Orge	1 728 000	5 114,3	4 296,012	4 296,012	2 148,006	2 250	4,75	8,18
Avoine	250 900	627,4	527,016	527,016	263,508	300	0,51	0,64
Cultures sucrières	13 800	762	640,08	640,08	320,04		0,16	23,037
BC								
Maïs	0	0	0	0	0	0	0	0
Blé	30 000	83,6	70,2	70,2	0	35,1	0	0,562
Culture d'amidon	74 400	149,9	126	126	0	62,9	0	1,008
Orge	36 400	100,7	84,6	84,6	0	42,3	0	0,677

Avoine	32 400	41,5	34,9	34,9	0	17,4	0	0,279
Seigle	2 800	4,3	3,6	3,6	0	1,8	0	0,029
Cultures céréalières	2 800	3,4	2,9	2,9	0	1,4	0	0,023
Cultures sucrières	0	0	0	0	0	0	0	0
MB								
Maïs	78 900	493,5	414,54	414,54	100	207,27	0	0,825
Blé	1 173 500	3 211,4	2 697,576	2 697,576	1 348,788	1 400	12,598	13,07
Culture d'amidon	779 000	2 399,8	2 015,832	2 015,832	850	1 007,916	9,692	13,95
Orge	380 400	1 195,3	1 004,052	1 004,052	502,026	550	4,045	4,43
Avoine	398 600	1 204,5	1 011,78	1 011,78	300	505,89	5,647	9,52
Cultures sucrières	0	0	0	0	0	0	0	0
SK								
Maïs	0	0	0	0	0	0	0	0
Blé	4 762 300	9 058,4	7 609,056	7 609,056	3 804,528	5 000	35,536	46,703
Culture d'amidon	2 644 600	6 346,4	5 330,976	5 330,976	2 300	2 665,488	22,764	33,489
Orge	1 659 200	3 945,2	3 313,968	3 313,968	1 656,984	1 800	13,352	14,505
Avoine	985 400	2 401,2	2 017,008	2 017,008	500	1 008,504	9,411	18,983
Cultures sucrières	0	0	0	0	0		0	0

- Centre

Tableau A.3: Potentiel de production du bioéthanol des grandes cultures dans les régions du Centre

	Surface (ha)	**Production (Kt)**	**Production sèche (Kt)**	**Résidus (Kt)**	**Disponibilité Min (Kt)**	**Disponibilité Max (Kt)**	**Potentiel Min (PJ)**	**Potentiel Max (PJ)**
ON								
Maïs	700 106,16	6 985,3	5 902,57	5 448,53	2 100	2 724,26	19,615	101,17
Blé	485 622,77	1 442,4	1 233,25	1 233,25	550	616,62	4,538	37,51
Culture d'amidon	137 600	305,6	415,9	415,9	150	207,95	1,208	1,41
Orge	109 300	217,7	350	350	150	175	1,208	1,41
Avoine	28 300	87,9	65,9	65,9	0	32,95	0	0
Cultures sucrières	0	0	0	0	0	0	0	0
QC								
Maïs	425 000	4 100	2 230	2 230	1 115	1 200	10,41	11,208
Blé	36 700	173,7	105,7	105,7	52,85	100	0,43	0,82
Culture d'amidon	217 000	588	625	625	312,5	330	3,372	4,21

Orge	143 000	308	437,9	437,9	200	218,95	1,61	1,76
Avoine	74 000	280	187,1	187,1	93,55	130	1,76	2,44
Cultures sucrières	0	0	0	0	0	0	0	0

- Est

Tableau A.4: Potentiel de production du bioéthanol des grandes cultures dans les régions de l'Est

	Surface (ha)	**Production (Kt)**	**Production sèche (Kt)**	**Résidus (Kt)**	**Disponibilité Min (Kt)**	**Disponibilité Max (Kt)**	**Potentiel Min (PJ)**	**Potentiel Max (PJ)**
NB								
Maïs	400	0	2,9	2,9	0	1,45	0	0,013
Blé	1 800	5,4	15,3	15,3		7,65	0,016	0,063
Culture d'amidon	21 700	69,3	100,8	100,8		50,4	0,17	1,354
Orge	13 200	45,3	64,8	64,8		32,4	0,101	0,261
Avoine	8 500	24	36	36		18	0,072	0,338
Cultures sucrières	0	0	0	0		0	0	0
NL								
Maïs	0	0	0	0	0	0	0	0
Blé	0	0	0	0	0	0	0	0
Culture d'amidon	0	0	0	0	0	0	0	0
Orge	0	0	0	0	0	0	0	0
Avoine	0	0	0	0	0	0	0	0
Cultures sucrières	0	0	0	0	0	0	0	0
NS								
Maïs	3 800	27,8	9,1	9,1		4,55	0,0425	0,074
Blé	1 500	5	7,6	7,6		3,8	0,0154	0,031
Culture d'amidon	4 600	11,4	14,4	14,4		7,2	0,028	0,193
Orge	2 600	6,9	9,2	9,2		4,6	0,0153	0,037
Avoine	2 000	4,5	5,2	5,2		2,6	0,0135	0,048
Cultures sucrières	0	0	0	0		0	0	0
PE								
Maïs	0	0	0	0		0	0	0
Blé	10 500	33	22,43	22,43		11,21	0,092	0,101
Culture d'amidon	37 500	105,6	92,88	92,88		46,44	0,260	1,248
Orge	32 800	93,5	86,4	86,4		43,2	0,208	0,348
Avoine	4 700	12,1	6,48	6,48		3,24	0,036	0,060
Cultures sucrières	0	0	0	0		0	0	0

❖ Nord

Tableau A.5: Potentiel de production du bioéthanol des grandes cultures dans les régions du Nord

	Surface (ha)	**Production (Kt)**	**Production sèche (Kt)**	**Résidus (Kt)**	**Disponibilité Min (Kt)**	**Disponibilité Max (Kt)**	**Potentiel Min (PJ)**	**Potentiel Max (PJ)**
NT								
Maïs	3 800	27,8	23,35	23,35	0	11,67	0	0,109
Blé	1 500	5	4,2	4,2		2,1	0,0154	0,017
Culture d'amidon	4 600	11,4	9,576	9,576		4,78	0,028	0,128
Orge	2 600	6,9	5,796	5,796		2,89	0,015	0,023
Avoine	2 000	4,5	3,78	3,78		1,89	0,013	0,035
Cultures sucrières	0	0	0	0		0	0	0
NU								
Maïs	3 800	27,8	23,352	4,2		2,1	0	0,109
Blé	1 500	5	4,2	9,576		4,788	0,015	0,017
Culture d'amidon	4 600	11,4	9,576	5,796		2,898	0,028	0,128
Orge	2 600	6,9	5,796	3,78		1,89	0,015	0,023
Avoine	2 000	4,5	3,78	0		0	0,013	0,035
Cultures sucrières	0	0	0				0	0
YT								
Maïs	0	0	0	0	0	0	0	0
Blé	10 500	33	27,72	27,72		13,86	0,101	0,114
Culture d'amidon	37 500	105,6	88,704	88,704		44,352	0,260	1,192
Orge	32 800	93,5	78,54	78,54		39,27	0,208	0,316
Avoine	4 700	12,1	10,164	10,164		5,082	0,036	0,095
Cultures sucrières	0	0	0	0		0	0	0

❖ Ouest

Tableau A.6: Potentiel de production du bioéthanol des résidus agricoles dans les régions de l'Ouest

	Surface (ha)	**Production (Kt)**	**Production sèche (Kt)**	**Résidus (Kt)**	**Disponibilité Min (Kt)**	**Disponibilité Max (Kt)**	**Potentiel Min (PJ)**	**Potentiel Max (PJ)**
AB								
Paille	8 150 000	16 300	1 3040	3 260	5 600	6 218	5,6	8,4
Canne de maïs	0	0	0	0	0	0	0	0
Foin	2 260 200	9 276	8 348,4	0	0	220	1,1	1,674
Résidus de colza	913 731,527	1827,463	1 535,068	627	200	627	4,772	8,067
BC								
Paille	164 285,714	328,571	262,857	65,714	23		0,175	0,175
Canne de maïs	0	0	0	0	0		0	0
Foin	445 200	1 543	1 049,24	55,2	27,6		0,442	0,442

Résidus de colza	16 030,377	32,06	26,931	11	11		0,083	0,083
MB								
Paille	2 500 000	5 000	4 000	1 000	2 940		11,416	22,376
Canne de maïs	146 666,667	366,66	110	110	110		0,834	0,834
Foin	959 100	3538	3 184,2	0	220		0	1,674
Résidus de colza	674 733,169	1 349,46	1 133,551	463	463		0,761	3,523
SK								
Paille	9 350 000	18 700	14 960	3 740	7 900	9 246	60,12	70,37
Canne de maïs	0	0	0	0	0	0	0	0
Foin	1 784 700	5511,1	4 959,99	0	0	220	1,67	1,67
Résidus de colza	1 213 936,78	2 427,87	2 039,41	833	100	833	0,76	6,33

❖ Centre

Tableau A.7: Potentiel de production du bioéthanol des résidus agricoles dans les régions du Centre

	Surface (ha)	**Production (Kt)**	**Production sèche (Kt)**	**Résidus (Kt)**	**Disponibilité Min (Kt)**	**Disponibilité Max (Kt)**	**Potentiel Min (PJ)**	**Potentiel Max (PJ)**
ON								
Paille	3 514 285,71	8 785,71	7028,57	1 757,142	615		4,680	11,05
Canne de maïs	777 000	12 668	3 800,4	3 800,4	1 900	1900	14,452	34,775
Foin	853 900	5882,35	4 000	0	220	220	1,674	3,74
Résidus de colza	14 200	34,88	29,3	29,3	14	14,2	0,106	0,256
QC								
Paille	1 771 428,57	4 428,57	3 542,857	885,714	310		2,359	5,54
Canne de maïs	425 000	3 716,66	1 115	1115	1115	115	8,481	20,4
Foin	780 000	6 241,176	4 244	0	210	210	1,598	3,61
Résidus de colza	4 500	6 904,761	5800	2 369,014	0	150	0	1,141

❖ Est

Tableau A.8: Potentiel de production du bioéthanol des résidus agricoles dans les régions de l'Est

	Surface (ha)	**Production (Kt)**	**Production sèche (Kt)**	**Résidus (Kt)**	**Disponibilité Min (Kt)**	**Disponibilité Max (Kt)**	**Potentiel Min (PJ)**	**Potentiel Max (PJ)**
NB								
Paille	142 857,143	428,57	342,857	85,714	30		0,51	0,51
Canne de maïs	345,065	3,33	1	1	1		0,02	0,02
Foin	80 900	381	342,9	0	20		0,33	0,33

Résidus de colza	0	0	0	0	0		0	0
NL								
Paille	0	0	0	0	0		0	0
Canne de maïs	0	0	0	0	0		0	0
Foin	5 100	27,2	24,48	0	1		0,02	0,02
Résidus de colza	0	0	0	0	0		0	0
NS								
Paille	71 428,57	214,28	171,42	42,857	15		0,095	0,095
Canne de maïs	1 725,32	16,66	5	5	5		0,085	0,085
Foin	69 600	375,6	338,04	0	18		0,31	0,31
Résidus de colza	0	0	0	0	0		0	0
PE								
Paille	428 571,429	1285,714	1028,571	257,142	90		0,57	0,57
Canne de maïs	0	0	0	0	0		0	0
Foin	54 000	301,2	271,08	0	13		0,215	0,215
Résidus de colza	0	0	0	0	0		0	0

- Nord

Tableau A.9: Potentiel de production du bioéthanol des résidus agricoles dans les régions du Nord

	Surface (ha)	**Production (Kt)**	**Production sèche (Kt)**	**Résidus (Kt)**	**Disponibilité Min(Kt)**	**Disponibilité Max (Kt)**	**Potentiel Min (PJ)**	**Potentiel Max (PJ)**
NT, NU, YT								
Résidus agricoles	0	0	0	0	0	0	0	0

- Ouest

Tableau A.10: Potentiel de production du biodiesel des grandes cultures dans les régions de l'Ouest

	Surface (ha)	**Production (Kt)**	**Production sèche (Kt)**	**Résidus (Kt)**	**Disponibilité Min (Kt)**	**Disponibilité Max (Kt)**	**Potentiel Min (PJ)**	**Potentiel Max (PJ)**
AB								
Soja	0	0	0	0	0	0	0	0
Colza	1 804 900	2 993,7	2 514,708	2 514,708	86,2	1 257,354	1,08	12,574
Autres huiles végétales	0	0	0	0	0	0	0	0

Résideux graisseux					5,083		0,19	0,199
BC								
Soja	0	0	0	0	0	0	0	0
Colza	24 300	34	28,6	28,6	1,56	14,3	0,0196	0,228
Autres huiles végétales	0	0	0	0	0	0	0	0
Résideux graisseux					6,761		0,265	0,265
MB								
Soja	91 100	212,3	182,578	182,578	3	91,289	0,02	0,02
Colza	1 141 200	1 714,6	1 440,264	1 440,264	69,4	720,132	0,872	7,544
Autres huiles végétales	74 900	119,8	109,018	109,018	54,50	54,50	0,599	0,599
Résideux graisseux					1,879		0,074	0,074
SK								
Soja	0	0	0	0	0	0	0	0
Colza	2 913 700	3948,5	3 316,74	3 316,74	107,04	1658,37	1,345	15,089
Autres huiles végétales	4 000	5	4,55	4,55	0	2,275	0	0
Résideux graisseux					1,652		0,064	0,064

- Centre

Tableau A.11: Potentiel de production du biodiesel des grandes cultures dans les régions du Centre

	Surface (ha)	**Production (Kt)**	**Production sèche (Kt)**	**Résidus (Kt)**	**Disponibilité Min (Kt)**	**Disponibilité Max (Kt)**	**Potentiel Min (PJ)**	**Potentiel Max (PJ)**
ON								
Soja	900 400	2 000,3	1 720,25	1 720,25	34,56	860,12	0,231	37,098
Colza	14 200	27,8	29,3	29,3	1,64	14,65	0	0,024
Autres huiles végétales	0	0	0	0	0	0	0	0
Résideux graisseux							0,774	0,774
QC								
Soja	175 500	472	285,9	285,9	7,7	142,95	0,0515	0,051
Colza	8 500	18,5	9,4	9,4	0,94	4,7	0	0,014
Autres huiles végétales	0	0	0	0	0	0	0	0
Résideux graisseux							0,478	0,478

❖ Est

Tableau A.12: Potentiel de production du biodiesel des grandes cultures dans les régions de l'Est

	Surface (ha)	Production (Kt)	Production sèche (Kt)	Résidus (Kt)	Disponibilité Min (Kt)	Disponibilité Max (Kt)	Potentiel Min (PJ)	Potentiel Max (PJ)
NB								
Soja	0	0	0	0	0	0	0	0
Colza	0	0	0	0	0	0	0	0
Autres huiles végétales	0	0	0	0	0	0	0	0
Résideux graisseux					1,235		0,048	0,048
NL								
Soja	0	0	0	0	0	0	0	0
Colza	0	0	0	0	0	0	0	0
Autres huiles végétales	0	0	0	0	0	0	0	0
Résideux graisseux					0,868		0,034	0,034
NS								
Soja	0	0	0	0	0	0	0	0
Colza	0	0	0	0	0	0	0	0
Autres huiles végétales	0	0	0	0	0	0	0	0
Résideux graisseux					1,542		0,06	0,06
PE								
Soja	4 500	11,1			0,1		0,0017	0,0017
Colza	0	0	0	0	0,1	0	0	0
Autres huiles végétales	0	0	0	0	0	0	0	0
Résideux graisseux					0,228		0,008	0,008

❖ Nord

Tableau A.13: Potentiel de production du biodiesel des grandes cultures dans les régions du Nord

Province	Surface (ha)	Production (Kt)	Production sèche (Kt)	Résidus (Kt)	Disponibilité Min (Kt)	Disponibilité Max (Kt)	Potentiel Min (PJ)	Potentiel Max (PJ)
NT								
Soja	0	0	0	0	0		0	0
Colza	0	0	0	0	0		0	0
Autres huiles végétales	0	0	0	0	0		0	0
Résideux graisseux	0	0	0	0	0,068		0,00267	0,00267
NU								
Soja	0	0	0	0	0		0	0
Colza	0	0	0	0	0		0	0

Autres huiles végétales	0	0	0	0	0		0	0
Résideux graisseux					0,049		0,00192	0,00192
YT								
Soja	0	0	0	0	0		0	0
Colza	0	0	0	0	0		0	0
Autres huiles végétales	0	0	0	0	0		0	0
Résideux graisseux					0,049		0,00192	0,00192

Tableau A.14: Potentiel de production du bioéthanol des cultures dédiées

Province	Disponibilité (Mt sèche)	Potentiel Min (PJ)	Potentiel Max (PJ)
AB		0	0
BC	2,7	88,32	88,32
MB		0	0
SK		0	0
ON	3	50,7	50,7
QC		0	0
NB		0	0
NL		0	0
NS		0	0
PE		0	0
NU		0	0
NT		0	0
YT		0	0

- Ouest

Tableau A.15: Potentiel de production du biogaz des résidus forestiers dans les régions de l'Ouest

Province	Forêts (millions ha)	Secteur de bois productif (millions ha)	Coupe permise (millions ha/an)	Disponibilité (Kt)	Potentiel Min (PJ)	Potentiel Max (PJ)
AB						
Résidus forestiers	38,2	25,71	0,0422		88,15	88,15
Résidus					62,9	62,9
résidus de bois francs en bordure de route				1,4	25,9	25,9
résidus résineux en bordure de route				2	37	37
Résidus d'usine feuillus et résineux				0,5	9,25	9,25

Résidus du bois					16	16
BC						
Résidus forestiers	60,6	51,74	0,176		342,3	342,25
Résidus					253,5	253,45
résidus de bois francs en bordure de route				0,4	7,4	7,4
résidus résineux en bordure de route				13,3	246,1	246,1
Résidus d'usine feuillus et résineux				2,8	51,8	51,8
Résidus du bois					37	37
MB						
Résidus forestiers	26,3	15,24	0,015			
Résidus						
résidus de bois francs en bordure de route				0,1	0,1	0,1
résidus résineux en bordure de route				0,3	0,3	0,3
Résidus d'usine feuillus et résineux				0,1	0,1	0,1
Résidus du bois						
SK						
Résidus forestiers	28,8	12,63	0,021		17,65	17,65
Résidus					14,8	14,8
résidus de bois francs en bordure de route				0,3	5,55	5,55
résidus résineux en bordure de route				0,5	9,25	9,25
Résidus d'usine feuillus et résineux				0,1	1,85	1,85
Résidus du bois					1	1

- Centre

Tableau A.16: Potentiel de production du biogaz des résidus forestiers dans les régions du Centre

Province	**Forêts (millions ha)**	**Secteur de bois productif (millions ha)**	**Coupe permise (millions ha/an)**	**Disponibilité (Kt)**	**Potentiel Min (PJ)**	**Potentiel Max (PJ)**
ON						
Résidus forestiers	58	42,2	0,201		113,5	113,5
Résidus					81,4	81,4
résidus de bois francs en bordure de route				0,9	16,65	16,65
résidus résineux en bordure de route				3,5	64,75	64,75
Résidus d'usine feuillus et résineux				1,3	24,05	24,05
Résidus du bois					8	8
QC						
Résidus forestiers	83,9	53,99	0,384		199,2	199,2
Résidus					125,8	125,8
résidus de bois francs en				1,4	25,9	25,9

bordure de route						
résidus résineux en bordure de route				5,4	99,9	99,9
Résidus d'usine feuillus et résineux				2,4	44,4	44,4
Résidus du bois					29	29

- Est

Tableau A.17: Potentiel de production du biogaz des résidus forestiers dans les régions de l'Est

Province	**Forêts (millions ha)**	**Secteur de bois productif (millions ha)**	**Coupe permise (millions ha/an)**	**Disponibilité (Kt)**	**Potentiel Min (PJ)**	**Potentiel Max (PJ)**
NB						
Résidus forestiers	6,1	5,95	0,111		21,5	21,5
Résidus					14,8	14,8
résidus de bois francs en bordure de route				0	0	0
résidus résineux en bordure de route				0,8	14,8	14,8
Résidus d'usine feuillus et résineux				0,2	3,7	3,7
Résidus du bois					3	3
NL						
Résidus forestiers	22,5	11,27	0,014		5,55	5,55
Résidus					3,7	3,7
résidus de bois francs en bordure de route				0	0	0
résidus résineux en bordure de route				0,2	3,7	3,7
Résidus d'usine feuillus et résineux				0,1	1,85	1,85
Résidus du bois					0	0
NS						
Résidus forestiers	3,9	3,77	0,049		17,65	17,65
Résidus					11,1	11,1
résidus de bois francs en bordure de route				0,2	3,7	3,7
résidus résineux en bordure de route				0,4	7,4	7,4
Résidus d'usine feuillus et résineux				0,3	5,55	5,55
Résidus du bois					1	1
PE						
Résidus forestiers	0,3	0,28	0,005		1,741	1,741
Résidus						
résidus de bois francs en bordure de route						
résidus résineux en bordure de route						
Résidus d'usine feuillus et résineux						
Résidus du bois					0	0

❖ Nord

Tableau A.18: Potentiel de production du biogaz des résidus forestiers dans les régions du Nord

Province	Forêts (millions ha)	Secteur de bois productif (millions ha)	Coupe permise (millions ha/an)	Disponibilité (Kt)	Potentiel Min (PJ)	Potentiel Max (PJ)
NT						
Résidus forestiers	61,4	14,32	0,00054		0,17	0,17
Résidus					0	0
résidus de bois francs en bordure de route					0	0
résidus résineux en bordure de route					0	0
Résidus d'usine feuillus et résineux					0	0
Résidus du bois					0	0
NU						
Résidus forestiers	54,5	0	0		0	0
Résidus					0	0
résidus de bois francs en bordure de route					0	0
résidus résineux en bordure de route					0	0
Résidus d'usine feuillus et résineux					0	0
Résidus du bois					0	0
YT						
Résidus forestiers	27,6	7,47	0		0	0
Résidus					0	0
résidus de bois francs en bordure de route					0	0
résidus résineux en bordure de route					0	0
Résidus d'usine feuillus et résineux					0	0
Résidus du bois					0	0

Tableau A.19: Potentiel d'énergie de la liqueur noire

Province	Potentiel Min (PJ)	Potentiel Max (PJ)
AB	2,52	5,07
BC	30,88	62,04
MB	2,52	5,07
SK	2,52	5,07
ON	35,1	70,5
QC	49,14	98,7
NB	2,52	5,07
NL	2,52	5,07
NS	2,52	5,07

PE	2,52	5,07
NU	2,52	5,07
NT	2,52	5,07
YT	2,52	5,07

Tableau A.20: Potentiel de production du biogaz des déchets municipaux solides

Province	**Total déchets émis (t)**	**Fraction combustible (t)**	**Fraction combustible sèche (t)**	**Rendement carbone (t)**	**Potentiel Min (PJ)**	**Potentiel Max (PJ)**
AB	2 750 004	2 337 503	1 811 565	742 742	27	27
BC	2 592 191	2 203 362	1 707 606	700 118	25	29,44
MB	938 624	797 830	618 318	253 510	0	9
SK	828 359	704 106	545 682	223 730	8	8
ON	7 491 581	6 367 844	4 935 079	2 023 382	75	75
QC	6 912 000	5 875 200	4 553 280	1 866 845	67	67
NB	472 612	401 720	311 333	127 647	5	5
NL	409 599	348 159	269 824	110 628	4	4
NS	432 487	367 614	284 901	116 809	4	4
PE					0,88	0,88
NU					0,22	0,22
NT					0,22	0,22
YT					0,22	0,22

Tableau A.21: Potentiel d'énergie de biosolides

Province	**Résidus de biosolides disponibles (kg/jour)**	**Résidus de biosolides disponibles (t/année)**	**Population (habitat)**	**Population desservie par le traitement d'eau (habitat)**	**Potentiel (Min) (PJ)**	**Potentiel (Max) (PJ)**
AB	153 001	55 845	3 113 586	2 428 597	1,061	1,061
BC	203 502	74 278	4 141 272	3 230 192	1,411	1,411
MB	56 552	20 641	115 848	897 661	0,392	0,392
SK	49 720	18 147	1 011 808	789 210	0,345	0,345
ON	593 036	216 458	12 068 301	9 413 275	0,8	4,112
QC	366 348	133 717	7 455 208	5 815 062	2,54	2,54
NB	37 181	13 571	756 652	590 189	0,257	0,257
NL	26 122	9 534	531 595	414 644	0,181	0,181
NS	46 425	16 945	944 765	736 917	0,321	0,321
PE	6 875	2 509	139 913	109 132	0,047	0,047

NU	1 639	583	33 348	26 011	0,0113	0,0113
NT	1 638	583	33 347	26 011	0,0113	0,0113
YT	1 638	583	33 347	26 011	0,0113	0,0113

Tableau A.22: Rendements du fumier

Fumier	**Niveau**	**Biogaz**	**Contenu en énergie**
		m^3/t	GJ/m^3
Bovins	Min	13	0,252
	Max	32	0,622
Porcins	Min	16	0,311
	Max	23	0,447
Ovins	Min	99	1,924
	Max	99	1,924
Volailles	Min	87	1,691
	Max	87	1,691

- Ouest

Tableau A.23: Potentiel de production d'énergie du fumier dans les régions de l'Ouest

Province	**Nombre de têtes (unités/an)**	**Production (t)**	**Disponibilité Min (t)**	**Disponibilité Max (t)**	**Potentiel Min (PJ)**	**Potentiel Max (PJ)**
AB						
Production laitière	169 532	3 217 714	308 900,544	2 167 000	1,6	2,1
Production bovine	1 849 720	22 955 019	1 4022 000	1 469 121,216	8,7	21,1
Production porcine				2 694 000	13,407	13,407
Production des volailles	152 345	284 342	49 759,85	288 000	0,4	0,5
Production des dindons	28 061			63 000	9,269	9,269
Production des moutons				9 000	1,714	1,714
BC						
Production laitière	71 401	1 355 191		1913000	6,284	38,081
Production bovine	759 688	9 427 728	2 062 000	2 356 932,02	5,039	41,047
Production porcine				199 000	0,990	2,0464
Production des volailles	847 617	18 562,81	15 778,390	475 000	0,097	69,892
Production des dindons	819 569	17 948,56	15 256,276	79 000	0,376	11,624
Production des moutons	66 804	1 267 940	3 000	126 793,992	0,033	0,5715
MB						
Production laitière	95 400	1 800 000	1 106 000	1 400 000	4,599	27,869
Production bovine	1 300 000	16 100 000	4 000 000	4 199 000	13,141	79,626
Production porcine	7 085 385	13 300 000	3 154 000	11 300 000	56,236	116,206
Production des volailles	7 300 000	200 000	100 000	137 000	14,714	14,71

Production des dindons			48 000	48 000	7,062	7,062
Production des moutons			3 000	3 000	0,571	0,571
SK						
Production laitière				641 000	2,105	2,105
Production bovine				8 810 000	28,94	28,94
Production porcine				1 593 000	7,92	7,92
Production des volailles				98 000	14,41	14,41
Production des dindons				29 000	4,26	4,26
Production des moutons				5 000	0,95	0,95

❖ Centre

Tableau A.24: Potentiel de production d'énergie du fumier dans les régions du Centre

Province	**Nombre de têtes (unités/an)**	**Production (t)**	**Disponibilité Min (t)**	**Disponibilité Max (t)**	**Potentiel Min (PJ)**	**Potentiel Max (PJ)**
ON						
Production laitière	785 400	10 854 881	8 205 000		6,75	6,75
Production bovine	1 264 100	12 053 578	3 037 000		5,51	5,51
Production porcine	314 3000	13 509	4 338 000		2,68	2,68
Production des volailles	197 574 000	1 095 730	939 000		1,37	1,37
Production des dindons	8 733 000	358 430	307 000		0,803	0,803
Production des moutons			11 000		2,09	2,09
QC						
Production laitière	785 300	31 303,4	8 636 000		6,97	6,97
Production bovine	525 800	13 434,8	1 236 000		2,26	2,26
Production porcine	3 759 100	15963	4 991 000		3,13	3,13
Production des volailles	158 573	2 205,36	684 000		1,59	1,59
Production des dindons	4 774 150	540,57	168 000		0,43	0,43
Production des moutons			10 000		1,905	1,905

❖ Est

Tableau A.25: Potentiel de production d'énergie du fumier dans les régions de l'Est

Province	**Nombre de têtes (unités/an)**	**Production (t)**	**Disponibilité Min (t)**	**Disponibilité Max (t)**	**Potentiel Min (PJ)**	**Potentiel Max (PJ)**
NB						
Production laitière	37 260	1 481,84			0,0718	0,332
Production bovine	61 140	1 620,87			0	0,270
Production porcine	125 000	520,02			0,0928	0,102
Production des volailles	16 064 000	202,43			0	0,127
Production des dindons	470 010	21,93			0	0,043
Production des moutons					0	0,01
NL						
Production laitière	5 050	251,83			0,008	2,99
Production bovine	913 000	29143,3			0,022	5,073
Production porcine	2 600	11,79			0,0036	0,003

Production des volailles	8 922 020	680,04			0,0006	0,065
Production des dindons	0	0			0,0006	0
Production des moutons					0	0
NS						
Production laitière	58 200	2 043,27			0,0728	0,47
Production bovine	59 300	1 678,91			33,758	0,281
Production porcine	129 000	528,26			0,0188	0,102
Production des volailles	20 699 900	263,85			0	0,153
Production des dindons	803 010	58,1			0	0,076
Production des moutons					0	0,01
PE						
Production laitière	30 830	1 178,75			0,0703	0,262
Production bovine	65 650	1 697,18			0,218	0,284
Production porcine	132 000	536			0,0592	0,105
Production des volailles	2 309 980	35,85			0,0055	0,0182
Production des dindons	0	0			0,0055	0
Production des moutons					0	0

- Nord

Tableau A.26: Potentiel de production d'énergie du fumier dans les régions du Nord

Province	Nombre de têtes (unités/an)	Production (t)	Disponibilité Min (t)	Disponibilité Max (t)	Potentiel Min (PJ)	Potentiel Max (PJ)
NT, NU, YT						
Production de fumier	0	0	0	0	0	0

Tableau A.27: Potentiel d'énergie des matières enfouies

Province	Potentiel Min (PJ)	Potentiel Max (PJ)	Quantité de matière enfouie (t)	Quantité de matière enfouie (lb)	Réacheminement (%)
AB	157,07	157,07	2 836 066	6 252 454 847	16,7
BC	119,66	119,66	2 160 704	4 763 536 602	23,3
MB	47,98	47,98	866 338	1 909 948 227	4,9
SK	38,69	38,69	698 631	1 540 217 605	4,3
ON	346,21	346,21	6 251 181	13 781 494 134	16,4
QC	345,41	345,41	6 236 765	13 749 712 297	13,7
NB	19,42	19,42	350 787	773 352 904,5	19,8
NL	20,97	20,97	378 733	834 963 284,2	
NS	15,11	15,11	272 933	601 714 226,3	29,7
PE	4,64	4,64	83 938	185 051 601,4	0
NU	0	0	0	0	0
NT	0	0	0	0	0
YT	0	0	0	0	0

Tableau A.28: Potentiel d'énergie des algues et de l'huile de poisson

Province	Potentiel des algues (PJ)	Potentiel de l'huile de poisson Min (PJ)	Potentiel de l'huile de poisson Max (PJ)
AB	50[13]	0	0
BC	50	0	0
MB	50	0	0
SK	50	0	0
ON	50	0	0
QC	50	59,73	59,73
NB	50	0	0
NL	50	53,88	53,88
NS	50	0	0
PE	50	0	0
NU	50	0	0
NT	50	0	0
YT	50	0	0

[13] Faute de disponibilité d'informations, le potentiel d'énergie des algues a été estimé de façon arbitraire égale à 50 PJ dans toutes les provinces.

B. ANNEXE B

❖ Ouest

Tableau B.1: Estimation du potentiel d'énergie de la biomasse en 2050 dans les régions de l'Ouest

Catégorie	**Coefficient**	**Potentiel Min (PJ) AB**		**Potentiel Min (PJ) BC**		**Potentiel Min (PJ) MB**		**Potentiel Min (PJ) SK**	
		2007	**2050**	**2007**	**2050**	**2007**	**2050**	**2007**	**2050**
Maïs	3,87	0,11	0,43	0	0	0,83	3,19	0	0
Blé	3,87	4,11	15,89	0,56	2,17	13,08	50,61	46,70	180,74
Culture d'amidon	3,87	8,86	34,29	1,01	3,90	0	0	33,49	129,6
Sucre à canne	3,87	23,07	89,28		0	0	0	0	0
Soja	3,87	0	0	0	0	0,02	0,08	0	0
Colza	3,87	12,57	48,66	0,23	0,88	7,54	29,19	15,09	58,39
Huile végétale	3,87	0	0	0	0	0,60	2,32	0	0
Huile de poisson	3	0	0	0	0	0	0	0	0
Résidus graisseux	1,2	1,70	2,03	0,36	0,43	0,39	0,47	0,37	0,45
Déchets industriels	1,1	33,47	36,82	22,51	24,76	6,68	10,03	6,35	6,98
Déchets municipaux	1,1	27,00	29,70	29,44	32,38	0	0	8	8,8
Résidus agricoles	1,2	15,63	18,69	2,30	2,75	28,41	33,98	78,38	93,77
Résidus forestiers	3,87	88,15	341,13	342,25	1 324,47	9,25	35,8	17,65	68,3
Enfouissement	1,1	157,07	172,78	119,67	131,64	47,98	71,97	38,69	42,56
Fumier	1,1	57,40	63,14	162,05	178,26	246,05	369,07	224,16	336,23
Cultures dédiées	3,87	0	0	88,32	341,79	0	0	0	0
Liqueur noire	3,87	5,08	19,64	62,04	240,09	5,08	19,64	5,08	19,64
Algues	3	50	150	50	150	50	150	50	150
Biosolides	1,1	1,06	1,17	1,41	1,55	0,39	0,59	0,35	0,38

❖ Centre

Tableau B.2: Estimation du potentiel d'énergie de la biomasse en 2050 dans les régions du Centre

Catégorie	**Coefficient**	**Potentiel Min (PJ) ON**		**Potentiel Min (PJ) QC**	
		2007	**2050**	**2007**	**2050**
Maïs	3,87	101,17	391,52	11,21	43,37
Blé	3,87	37,51	145,17	0,83	3,19
Culture d'amidon	3,87	1,41	5,46	4,21	16,3

Sucre à canne	3,87	0	0	0	0
Soja	3,87	37,1	143,57	0,05	0,2
Colza	3,87	0,01	0,04	0,01	0,02
Huile végétale	3,87	0	0	0	0
Huile de poisson	3	0	0	59,73	179,19
Résidus graisseux	1,2	1,63	1,95	1,39	1,66
Déchets industriels	1,1	77,69	85,46	54,67	60,14
Déchets municipaux	1,1	75	82,5	67	73,7
Résidus agricoles	1,2	49,82	59,6	30,69	36,72
Résidus forestiers	3,87	113,45	439,04	199,20	770,88
Enfouissement	1,1	346,22	380,84	345,42	379,96
Fumier	1,1	453,83	499,22	7,15	7,86
Cultures dédiées	3,87	50,7	196,2	0	0
Liqueur noire	3,87	70,5	272,83	98,70	381,96
Algues	3	50	150	50	150
Biosolides	1,1	4,11	4,52	2,54	2,79

- Est

Tableau B.3: Estimation du potentiel d'énergie de la biomasse en 2050 dans les régions de l'Est

Catégorie	**Coefficient**	**Potentiel Min (PJ) NB**		**Potentiel Min (PJ) NL**		**Potentiel Min (PJ) NS**		**Potentiel Min (PJ) PE**	
		2007	**2050**	**2007**	**2050**	**2007**	**2050**	**2007**	**2050**
Maïs	3,87	0,01	0,05	0	0	0,07	0,29	0	0
Blé	3,87	0,06	0,24	0	0	0,03	0,12	0,09	0
Culture d'amidon	3,87	1,35	5,24	0	0	0,19	0,75	1,25	4,83
Sucre à canne	3,87	0	0	0	0	0	0	0	0
Soja	3,87	0	0	0	0	0	0	0	0,01
Colza	3,87	0	0	0	0	0	0	0	0
Huile végétale	3,87	0	0	0	0	0	0	0	0
Huile de poisson	3	0	0	3,88	161,64	0	0	0	0
Résidus graisseux	1,2	0,08	0,09	0,04	0,04	0,08	0,1	0,04	0,05
Déchets industriels	1,1	2,75	3,02	2,15	2,36	2,73	3	0	0
Déchets municipaux	1,1	5	5,5	4	4,4	4	4,4	0,88	0,97
Résidus agricoles	1,2	0,89	1,06	0,02	0,03	0,51	0,61	0,81	0,97
Résidus forestiers	3,87	21,50	83,2	5,55	21,48	7,65	68,3	1,74	6,74
Enfouissement	1,1	19,43	21,37	20,98	23,07	15,12	16,63	4,65	5,11
Fumier	1,1	0,88	0,96	8,14	8,96	34,56	8,02	0,68	0,75
Cultures dédiées	3,87	0	0	0	0	0	0	0	0
Liqueur noire	3,87	5,08	19,64	5,08	19,64	5,08	9,64	5,08	19,64
Algues	3	50	150	50	150	50	150	50	150
Biosolides	1,1	0,26	0,28	0,18	0,20	0,32	0,35	0,05	0,05

❖ Nord

Tableau B.4: Estimation du potentiel d'énergie de la biomasse en 2050 dans les régions du Nord

Catégorie	**Coefficient**	**Potentiel Min (PJ) NT**		**Potentiel Min (PJ) NU**		**Potentiel Min (PJ) YT**	
		2007	**2050**	**2007**	**2050**	**2007**	**2050**
Maïs	3,87	0,11	0,42	0,11	0,42	0	0
Blé	3,87	0,02	0,07	0,02	0,07	0,11	0,44
Culture d'amidon	3,87	0,13	0,50	0,13	0,50	1,19	4,61
Sucre à canne	3,87	0	0	0	0	0	0
Soja	3,87	0	0	0	0	0	0
Colza	3,87	0	0	0	0	0	0
Huile végétale	3,87	0	0	0	0	0	0
Huile de poisson	3	0	0	0	0	0	0
Résidus graisseux	1,2	0	0	0	0	0	0
Déchets industriels	1,1	0,33	0,36	0	0	0,22	0,24
Déchets municipaux	1,1	0,22	0,24	0,22	0,24	0,22	0,24
Résidus agricoles	1,2	0	0	0	0	0	0
Résidus forestiers	3,87	0,17	0,66	0	0	0	0
Enfouissement	1,1	0	0	0	0	0	0
Fumier	1,1	0	0	0	0	0	0
Cultures dédiées	3,87	0	0	0	0	0	0
Liqueur noire	3,87	5,08	19,64	5,08	19,64	5,08	19,64
Algues	3	50	150	50	150	50	150
Biosolides	1,1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

- Les données suivantes sur la demande d'énergie sont en PJ

Tableau B.5: Évolution de la consommation d'énergie dans le BAU par secteur

Secteur	**2007**	**2008**	**2010**	**2012**	**2015**	**2020**	**2025**	**2030**	**2040**	**2050**
Agriculture	216	219	221	239	257	288	311	333	373	409
Commercial	1 592	1 607	1 640	1 740	1 780	1 943	2 099	2 263	2 547	2 802
Industriel	2 024	1 933	1 902	1 963	2 007	2 054	2 205	2 324	2 541	2 783
Résidentiel	1 444	1 454	1 459	1 462	1 497	1 532	1 591	1 656	1 768	1 827
Transport	2 257	2 278	2 337	2 494	2 669	2 893	3 001	3 012	2 832	2 693
Total	7 533	7 490	7 559	7 899	8 210	8 711	9 207	9 588	10 061	10 514

Tableau B.6: Évolution de la consommation d'énergie finale dans le BAU par province

Province	2007	2008	2010	2012	2015	2020	2025	2030	2040	2050
AB	1 174	1 185	1 194	1 253	1 329	1 403	1 453	1 470	1 511	1 565
BC	896	891	904	945	986	1 060	1 143	1 185	1 246	1 315
MB	253	251	254	265	276	291	308	316	334	357
NB	157	173	176	182	190	200	216	231	254	266
NL	104	105	108	108	112	115	119	121	123	125
NS	175	183	185	191	198	206	219	227	237	245
NT	11	11	11	11	12	14	15	15	17	18
NU	3	3	3	3	3	4	4	4	4	5
ON	2 727	2 665	2 686	2 826	2 906	3 113	3 319	3 492	3 768	3 929
PE	25	24	25	27	28	31	33	34	35	35
QC	1 717	1 698	1 705	1 766	1 831	1 903	1 989	2 089	2 121	2 216
SK	287	295	303	316	332	365	382	393	402	430
YT	6	6	6	6	7	7	8	8	8	9
Total	7 533	7 490	7 559	7 899	8 210	8 711	9 207	9 588	10 061	10 514

Tableau B.7: Évolution de la consommation d'énergie finale dans le BAU par région

Région	2007	2008	2010	2012	2015	2020	2025	2030	2040	2050
Ouest	2 610	2 622	2 655	2 779	2 923	3 119	3 286	3 364	3 494	3 667
Centre	4 444	4 363	4 391	4 591	4 738	5 015	5 308	5 581	5 889	6 145
Est	460	485	494	508	528	552	587	615	649	670
Nord	19	19	19	20	22	25	26	27	30	32
Total	7 533	7 490	7 559	7 899	8 210	8 711	9 207	9 588	10 061	10 514

Tableau B.8: Évolution de la consommation d'énergie finale dans le BAU selon la source

Énergie	2007	2008	2010	2012	2015	2020	2025	2030	2040	2050
Biomasse	106	172	234	241	246	356	441	544	778	818
Charbon	164	237	263	318	345	368	309	276	343	319
Électricité	1 748	1 644	1 653	1 712	1 662	1 800	1 867	1 927	2 044	2 703
Gaz naturel	1 951	2 060	2 074	2 113	2 270	2 298	2 480	2 637	2 697	2 733
Produits pétroliers	3 262	3 128	3 112	3 263	3 377	3 467	3 578	3 591	3 488	3 252
Autres renouvelables	-	2	2	2	19	25	46	91	127	90
Total	7 231	7 242	7 337	7 649	7 918	8 313	8 720	9 065	9 476	9 915

Tableau B.9: Consommation d'énergie dans les trois scénarios BAU, GES1 et GES2

	2007	**2050**	**2050**	**2050**
		BAU	**GES1**	**GES2**
Biomasse	106	818	829	554
Charbon	160	311	248	166
Électricité	1 776	2 837	3 377	3 670
Gaz naturel	1 951	2 735	2 346	1 215
Produits pétroliers	3 267	3 256	2 483	1 412
Autres renouvelables	-	90	153	317
Hydrogène	-	0	0	-

Tableau B.10: Consommation de la biomasse dans les trois scénarios BAU, GES1 et GES2

Scénario	**2007**	**2008**	**2010**	**2012**	**2015**	**2020**	**2025**	**2030**	**2040**	**2050**
BAU	106	172	234	241	246	356	441	544	778	818
GES1	106	173	237	261	316	627	727	810	927	829
GES2	106	173	238	287	341	623	797	1 043	1 092	554

- Les données sur les émissions sont en Mt de CO_{2eq}

Tableau B.11: Émissions de GES dans les trois scénarios BAU, GES1 et GES2

Scénario	**2007**	**2008**	**2010**	**2012**	**2015**	**2020**	**2025**	**2030**	**2040**	**2050**
BAU	583	541	540	560	592	599	604	612	633	605
GES1	583	541	539	557	586	467	455	441	424	394
GES2	583	543	541	558	579	470	421	365	252	139

- Les données ci-dessous sont en PJ

Tableau B.12:Composantes de l'électricité dans les trois scénarios BAU, GES1 et GES2

	2007	**2050**		
		BAU	**GES1**	**GES2**
Thermique	558	286	115	11
Nucléaire	299	542	807	1 087
Biomasse	24	4	151	47
Hydraulique	1 311	1 818	1 967	2 003
Autres renouvelables	17	878	1 007	1 098

Bibliographie

Agriculture et Agroalimentaire Canada. *Résidus d'agriculture.* Vers. modifiée. 12 11 2008. http://www4.agr.gc.ca/AAFC-AAC/display-afficher.do?id=1226510406028&lang=fra (accès le 01 03, 2012).

Agri-Facts. «Biogas Energy Potential in Alberta.» 2011: p.5.

Agri-Food, Agricultural and. «The Canadian Cane and Beet Sugar Industry.» 2010.

ASSOUMOU, Edi. «Modélisation MARKAl pour la planification énergetique long terme dans le contexte français.» Thèse de doctorat, Mines Paris, Paris, 2006, p.227.

Bahn, O., A. Haurie, et D.S. Zachary. «Mathematical modeling and simulation methods in energy systems.» 2005, p.8.

Base de données nationales sur les forêts. 2011. http://nfdp.ccfm.org/silviculture/quick_facts_f.php (accès le 13 01, 2012).

Bibeau, E. *Biomass Inventory and Distributed Biopower Production in Manitoba.* Mechanical & Industrial Engineering Department, Gasification Workshop, 2004, p.41.

BIOCAP. «An Information Guide on Pursuing Biomass Energy Opportunities and Technologies in British Columbia.» British Columbia, 2008, p.80.

Biocarburant. s.d. http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=1057 (accès le 29 02, 2012).

Boulanger, Paul-Marie, et Thierry Bréchet. «Une analyse comparatives de classes de modèles.» 2003, p.32.

Boundy, Bob, Susan W.Diegel, Lynn Wright, et Stacy C.Davis. «Biomass Energy Data Book.» U.S Department of Energy, Oak Ridge National Laboratory, 2011, p.254.

Brodeur , Catherine, David Crowley, Xavier Desmeules, Sylvain Pigeon, et Rosalie-Maude St-Arnaud. «La biométhanisation à la ferme.» Centre de référence en agriculture et agrocalimentaires du Québec, Québec, 2008, p.18.

Brodeur, Catherine, Jacques Cloutier, David Crowley, Xavier Desmeules, Sylvain Pigeon, et Rosalie-Maud St-Arnaud. *''La production d'éthanol à partir des grains de maïs et de céréales''.* Québec: Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire, 2008, p.15.

Bureau du vérificateur général du Canada. 08 05 2012. http://www.oag-bvg.gc.ca/internet/Francais/att__f_36778.html (accès le 21 05, 2012).

CAAAQ. «Bioénergie et produits issus de plantes à fibre.», p.8.

CanmetÉNERGIE. *''Bio-Énergie et Biomasse''.* Centre de la technologie de l'énergie de CANMET, Ottawa: Ressources naturelles Canada, 2007, p.4.

Cantin, Isabelle. «La production du biodiesel à partir des microalgues ayant un métabolisme hétérotrophe.» Essai, Centre Universitaire de formation en environnement, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, 2010, p.97.

''Carburant renouvelable — biocarburants''. Canada: Technologies du Développement Durable Canada, 2009, p.124.

Comment transforme-t-on la biomasse en énergie? Vers. Mise à jour. 2002-2003. http://www.centreinfo-energie.com/silos/biomass/biomassOverview04.asp (accès le 29 02, 2012).

Daynard, K., et T. Daynard. «What are the Effects of Biofuels and Bioproducts on the Environment, Crop and Food Prices and World.» 2011, p.117.

Déchets agricoles. Vers. modifiée. 04 02 2008. http://www.ferme-energie.ca/IReF/index.php?page=agricultural-residues (accès le 01 03, 2012).

Eia. *Renewable and Alternate Fuels.* 03 2007. http://www.eia.gov/oiaf/analysispaper/biomass.html (accès le 03 2012).

Ekbom, T., M. Lindblom, N. Berglin, et P. Ahlvik. *Technical and Commercial Feasibility Study of Black Liquor Gasification with Methanol/DME Production as Motor Fuels for Automotive Uses-BLGMF.* ALTENER II, 2003, p.293.

Environnement Canada. *Déchets solides municipaux.* Vers. modifiée. 02 11 2010a. http://www.ec.gc.ca/gdd-mw/default.asp?lang=Fr&n=EF0FC6A9-1 (accès le 14 04, 2012).

Environnement Canada . *Déchets solides municipaux traitement thermique.* Vers. modifiée. 06 04 2010b. http://www.ec.gc.ca/gdd-mw/default.asp?lang=Fr&n=D54033E4-1&offset=1&toc=show (accès le 14 04, 2012).

Environnement Canada. *Gaz à effet de serre et des déchets solides municipaux.* Vers. modifiée. 20 05 2010c. http://www.ec.gc.ca/gdd-mw/default.asp?lang=Fr&n=6F92E701-1 (accès le 14 04, 2012).

Environnement Canada. *La gestion et la réduction de nos déchets.* Vers. modifiée. 20 05 2010d. http://www.ec.gc.ca/gdd-mw/Default.asp?lang=Fr&n=678F98BC-1 (accès le 01 03, 2012).

Environnement Canada. *Rapport d'inventaire national.* Sommaire, Canada: Environnement Canada, 2012, p.17.

Faaij, André, Monique Hoogwijk, Bas Eickhout, Bert de Vries, et Wim Turkenburg. «Potential of biomass energy out to 2100, for four IPCC SRES.» Department of Science, Technology and Society, Copernicus Institute, Utrecht University, Bilthoven, The Netherlands, 2005, p.33.

Fenton, J., S. Sokhansanj, et S. Mani. «Benefits and Costs of Shifts to Biomass Crops: Producer and Public Perspectives.» Canada, 2006a, p.61.

Fogt, Robert. *Energy Conversion.* 2010. http://www.onlineconversion.com/energy.htm (accès le 22 01, 2012).

Foundation, BIOCAP. «An Information Guide on Pursuing Biomass Energy Opportunities and Technologies in British Columbia.» British Columbia, 2008, p.80.

Frederic, Sylvain. *Méthanisation.* Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement, INRA. 2012. http://www.methanisation.info/methanisation.html (accès le 16 03, 2012).

Helwig, T., R. Jannasch, R. Samson, A. DeMaio, et D. Caumartin. «Agricultural Biomass Residue Inventory and Conversion Systems for Energy Production in Eastern Canada.» Final Report Prepared for Natural Resources Canada, Québec, 2002, p.70.

IEA-ETSAP. *Markal.* 2011. http://www.iea-etsap.org/web/Markal.asp (accès le 20 06, 2012).

Industrie Canada. *PIB.* Vers. modifiée . 22 11 2011. http://www.ic.gc.ca/eic/site/cis-sic.nsf/fra/h_00013.html (accès le 03 04, 2012).

Jeanmaire, Myriam. 1999. http://lbewww.epfl.ch/DA/JEANMAIRE_1999/1fumiers.htm (accès le 14 04, 2012).

Kajat, Birgit. *''Bioenergy and Biofuels Canadian Industry and Market Opportunities''.* IRAP Pacific Group, 2006, p.71.

Kelly, David L., et Charles D. Kolstad. «Integrated Assessment Models For Climate Change Control.» US, 1998, p.35.

Layzell, D. B., J. Stephen, et S. M. Wood. «Exploring the Potential for Biomass Power in Ontario.» BIOCAP Canada Foundation, Ontario, 2006, p.27.

Le biodiésel. http://www.biodieselquebec.org/Pages/biodiesel.html (accès le 01 03, 2012).

«Les centres de valorisation des matières organiques.» Division de la gestion des matières résiduelles, Service des travaux publics, Ville de Québec, 2011, p.15.

Les forêts du Canada. 2010. http://www.treecanada.ca/site/?page=publication_download_canadaforest&lang=fr (accès le 01 03, 2012).

Loulou, Richard, Uwe Remne, Amit Kanudia, Antti Lehtila, et Gary Goldstein. «Documentation for the TIMES Model.» 2005, p.78.

M.Wood, Susan, et David B.Layzell. *A Canadian Biomass Inventory: Feedstock for a Bio-based Economy.* Queen's University, Kingston: Industry Canada, 2003, p.42.

Maizi, Nadia, et Edi Assoumou. «Exercices Prospectifs via le modèle MARKAL:spécificités françaises.» Énergie et Développement durable, École des Mines de Paris, Paris, 2007, p.8.

Marcoux, Aude Marie. «Biocarburants canadiens : impacts écologiques et économiques significatifs.» *lesaffaires.com*, 02 2011: p.1.

McDonald, I. «Ontario's Present and Future Sources, Volumes and Distribution of Agricultural Biomass.» Ontario, 2006, p.31.

McDonald, I., et S. Banks. «Biomass Feedstock, Residues, Forages or Dedicated Feedstocks.» Ontario, 2009, p.39.

Méthanisation. http://www.methanisation.info/methanisation.html (accès le 16 03, 2012).

Minnes, Gordon. *Industrie des pâtes et papiers.* 2012. http://www.thecanadianencyclopedia.com/articles/fr/industrie-des-pates-et-papiers (accès le 21 07, 2012).

National Energy Board. «2009 Reference Case Scenario: Canadian energy demand and supply to 2020.» Canada, 2009, p.66.

Net Communications Inc. *Biométhanisation.* 2011. http://www.mrcroussillon.qc.ca/cgi-bin/index.cgi?page=matiere0_10&langue=fra (accès le 04 14, 2012).

Palluet, Élodie, et Pierre-Olivier Pineau. «Notes Thématiques: Les biocarburants : matières premières, transformation et produits.» GRIDD-HEC, Montréal, 2012, p.41.

Paradis, Julie. «Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2009 et leur évolution depuis 1990.» Développement durable, Environnement et Parcs, 2011, p.20.

Paré, David. «Perspectives sur la bioénergie forestière dans le monde et au Canada : leçons du rapport du G.I.E.C sur les énergies renouvelables.» 2011, p.56.

Pêches et Océans Canada. *Faits et chiffres saillants sur l'aquaculture au Canada.* Vers. modifiée. 15 11 2011. http://www.dfo-mpo.gc.ca/aquaculture/stats/index-fra.htm (accès le 29 02, 2012).

Pêches et Océans Canada. «Favoriser le développement durable de l'aquaculture au Canada.» Ontario, 2009, p.32.

Penner, M., K. Power, C. Muhairwe, R. Tellier, et Y. Wang. «Canada's Forest Biomass Resources: Deriving Estimates from Canada's Forest Inventory.» Information report, Pacific Forestry Centre, British Colombia, 1997, p.42.

Pineau, Pierre Olivier. «Biomethanation of Municipal Waste.» HEC, Montréal, 2010, p.17.

Prospective et évaluation de la demande d'énergie à l'aide de modèles couplant analyse technologique et économique : exemple des modèles MARKAL. 25 12 2011.

http://energiechallenge.wordpress.com/2011/12/25/prospective-et-evaluation-de-la-demande-denergie-a-laide-de-modeles-couplant-analyse-technologique-et-economique-exemple-des-modeles-markal/ (accès le 07 04, 2012).

Ralevic, Peter, et David B. Layzell. «An Inventory of the Bioenergy Potential of British Columbia.» Queen's University, 2006, p.8.

Ressources naturelles Canada . *Forêt boréale.* Vers. modifiée. 15 09 2011c. http://scf.rncan.gc.ca/pages/151 (accès le 01 03, 2012).

Ressources naturelles Canada. «Canada's emissions trends.» 2011a, p.60.

Ressources naturelles Canada *Faits importants sur les ressources naturelles du Canada.* Vers. modifiée. 05 08 2011b. http://www.rncan.gc.ca/statistiques-faits/forets/896 (accès le 01 03, 2012).

Ressources naturelles Canada. *Industrie.* Vers. modifiée. 10 02 2012. http://scf.rncan.gc.ca/pages/65 (accès le 03 01, 2012).

Ressources naturelles Canada. *L'Atlas du Canada.* Vers. modifiée. 30 01 2004. http://atlas.nrcan.gc.ca/site/francais/maps/environment/forest/forestcanada (accès le 01 03, 2012).

Ressources naturelles Canada. *L'Atlas du Canada.* Vers. modifiée. 03 12 2003a. http://atlas.nrcan.gc.ca/site/francais/maps/environment/forest/forestcanada/forestedecozones (accès le 01 03, 2012).

Ressources naturelles Canada. *Sites de rejets industriels.* Vers. modifiée. 03 12 2003b. http://atlas.nrcan.gc.ca/site/francais/maps/environment/ecology/threats/industrialdischarge (accès le 14 04, 2012).

Ressources naturelles Canada. *Terres humides.* Vers. modifiée. 25 03 2009. http://atlas.nrcan.gc.ca/site/francais/maps/freshwater/distribution/wetlands/1 (accès le 14 04, 2012).

Ressources naturelles Canada. *Potentiel commercial de la production d'électricité à partir de la digestion anaérobie du fumier animal au Canada.* Vers. modifiée. 14 07 2010a. http://www.cbin.gc.ca/pro/barclay-5-fra.php (accès le 2012).

Ressources naturelles Canada. *Ressources de la biomasse.* Vers. modifée. 13 05 2010b. http://canmetenergie.rncan.gc.ca/systemes-bioenergie/1152 (accès le 04 14, 2012).

Samson, R., C. Ho Lem, et S. Bailey. «Biomass Resource Options: Creating a Bioheat supply for the Canadian Greenhouse Industry.» 2006, p.68.

Seck, Gondia Sokhna . «Modélisation prospective de l'industrie diffuse pour l'évaluation de l'impact de politiques de Maîtrise De l'Energie (MDE) à partir du générateur de modèle TIMES.» Économie et Finance, 2012, p.210.

Smith, C.T, P. Ralevic, et B. Lattimore. «Emerging Biofuels Sustainability Issues in Canada.» University of Toronto, 2009, p.153.

Sokhansanj, S., S. Mani, M. Stumborg, R. Samson, et J. Fenton. «Production and distribution of cereal straw on the Canadian Prairies.» Department of Chemical and Biological Engineering, University of British Columbia, Vancouver, British Columbia, 2006b, p.1.

Sparling, D., J. Cranfield, S. Henson, et P. Laughland. «Enquête sur le développement des bioproduits.» Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2006, p.120.

Stanton, C. R. *Forêt.* s.d. http://www.thecanadianencyclopedia.com/articles/fr/foret (accès le 01 03, 2012).

Statistics Canada . «Study: Sugar beets in Canada.» *The Dairy*, 23 May 2008.

Statistics Canada. «Field Crop Reporting Series.» 2007: p.34.

Statistique Canada . *Série « Analyses » du Recensement de 2006 - Résultats.* 22 09 2009. http://www12.statcan.ca/census-recensement/2006/as-sa/97-550/table/t1-fra.cfm (accès le 23 06, 2012).

Statistique Canada. *Enquête sur l'industrie de la gestion des déchets : secteur des entreprises et des administrations publiques.* Vers. modifiée. 17 11 2008. http://www.statcan.gc.ca/pub/16f0023x/2006001/5212375-fra.htm (accès le 14 04, 2012).

Statistique Canada. *Population par année, par province et territoire.* Vers. modifée . 28 09 2011. http://www.statcan.gc.ca/tables-tableaux/sum-som/l01/cst01/demo02a-eng.htm (accès le 23 12, 2011).

T.Adams, Thomas. «A Demonstration of Fat and Grease as an Industrial Boiler Fuel.» Georgia, 2002, p.35.

Taillefer, Sophie. «Les matières organiques.» Recyc-Québec, Québec, 2010, p.15.

Tampier, M., S. Doug, E. Bibeau, et P. Beauchemin. *Identifying Enviromentally Preferable Uses for Biomass Resources.* Natural Resources Canada, 2004, p.65.

The Engineering ToolBox. *Fuel Gases-Heating Values.* 2011. http://www.engineeringtoolbox.com/heating-values-fuel-gases-d_823.html (accès le 20 12, 2011).

«Thermochemical process development unit.» Department of energy, National Renewable Energy Laboratory, USA, 2009, p.4.

Thierry. *Le développement durable.* 2012. http://www.astrosurf.com/luxorion/terre-devel-durable2.htm (accès le 01 03, 2012).

Tosato, GianCarlo. «Introduction to ETSAP and theMARKAL-TIMES models generators.» Network of Expertise in Energy Technology, Brazil, 2007, p.41.

Touzi, A., S. Igoud, et I. Tou. «Production de biométhane à partir des déjections animales.» Centre de Développement des Énergies Renouvelables, Alger, 2001, p.6.

Trevor, J.N. *''Biofuels Potential for Alberta, Feedstock, Technology and Opportunity''.* CABREE Alberta School of Business, 2006, p.21.

Vaillancourt, Kathleen. «Données sur les pouvoirs énergetiques.» Communication personnelle, GERAD, Montréal, 2012.

Vedura. *Incinération des déchets.* 2010. http://www.vedura.fr/environnement/dechets/incineration-dechets (accès le 14 04, 2012).

Wikipédia. *Provinces et territoires du Canada.* Vers. modifiée . 12 05 2012. http://fr.wikipedia.org/wiki/Provinces_et_territoires_du_Canada (accès le 25 06, 2012).

Wood, Susan M., et David B. Layzell. *''A Canadian Biomass Inventory: Feedstock for a Bio-based Economy''.* Queen's University, Kingston: Industry Canada, 2003, p.42.