

**VALORISATION SYLVICOLE DES BIOSOLIDES MUNICIPAUX AU QUÉBEC :
BILAN ET PERSPECTIVES D'AVENIR**



Septembre 2010

*Développement durable,
Environnement
et Parcs*

Québec 

ÉQUIPE DE RÉALISATION

Auteurs :

Anne-Pascale Pion, agronome, M. Sc.
Direction du secteur agricole et des pesticides
Marc Hébert, agronome, M. Sc.
Direction des matières résiduelles et des lieux
contaminés

Dépôt légal – Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2010

ISBN 978-2-550-60286-6 (PDF)
© Gouvernement du Québec, 2010

RÉSUMÉ

Au Québec, la valorisation des biosolides municipaux par épandage est effectuée depuis plus de 20 ans. Bien que la grande majorité des biosolides soient valorisés par épandage sur des terres agricoles et par compostage, la valorisation en milieu forestier offre aussi un potentiel intéressant.

Le présent document retrace d'abord l'origine de la valorisation sylvicole à partir des années 1990. Il fait aussi état des recherches effectuées dans la province et de leurs répercussions sur l'évolution du cadre technique et légal par le Ministère. Il comporte ensuite une analyse des principaux avantages et inconvénients de cette pratique et présente les récentes initiatives d'épandage dans différentes régions du Québec. La dernière section décrit les perspectives d'avenir pour la valorisation sylvicole des biosolides, notamment en ce qui a trait à la réduction des gaz à effet de serre (GES), à la production d'énergie renouvelable et à l'acceptabilité sociale.

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	1
2	ORIGINE DE LA VALORISATION SYLVICOLE DES BIOSOLIDES MUNICIPAUX AU QUÉBEC	1
3	TRAVAUX DE RECHERCHE QUÉBÉCOIS DANS LES ANNÉES 1990	3
4	ÉVOLUTION DU CADRE TECHNIQUE ET LÉGAL	8
5	ANALYSE DU DÉVELOPPEMENT DE LA VALORISATION SYLVICOLE.....	10
6	TRAVAUX RÉCENTS.....	12
7	PERSPECTIVES D'AVENIR	15
8	CONCLUSION.....	16
9	REMERCIEMENTS.....	17
10	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	17

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU I	Résumé des projets de recherche réalisés ou soutenus par le ministère des Ressources naturelles et de la Faune dans les années 1990.	4
TABLEAU II	Résumé des projets de recherche soutenus par le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs dans les années 1990.	5
TABLEAU III	Principaux avantages et inconvénients des valorisations agricole et sylvicole des biosolides municipaux pour les producteurs agricoles et forestiers (sans considérer les GES).....	10

LISTE DES FIGURES

Figure 1 :	Localisation des sites expérimentaux de valorisation sylvicole des biosolides municipaux dans les années 1990.	3
Figure 2	Épandage de boues d'épuration provenant de Victoriaville dans une plantation de pins rouges à Sainte-Clotilde-de-Horton dans le cadre d'un projet de recherche (MRNF, 1992).6	
Figure 3	Publications ministérielles au sujet de l'encadrement de la valorisation sylvicole des biosolides municipaux au Québec du début des années 1990 à aujourd'hui.....	9
Figure 4	Coupe transversale d'un sapin de Douglas montrant l'élargissement des cernes annuels de croissance à la suite d'un épandage de biosolides municipaux (NBMA, 2009)	12
Figure 5	Épandage de biosolides municipaux dans une plantation de peupliers hybrides de la compagnie Domtar à Saint-Fortunat (MDDEP, 2009).	13
Figure 6	Épandage manuel de biosolides municipaux dans un champ de saules à Saint-Roch-de-l'Achigan (Agro Énergie, 2009).	14

1 INTRODUCTION

Au Québec, la valorisation des biosolides municipaux, aussi appelés « boues d'épuration municipales », est effectuée en agriculture depuis une vingtaine d'années, mais elle est peu utilisée pour la fertilisation des plantations d'arbres et des forêts. Pourtant, des études menées ici et ailleurs ont démontré les bénéfices de cette pratique tant sur le plan sylvicole que pour l'environnement.

Le présent document vise à faire un bilan de la situation pour ce type de valorisation. Nous expliquerons d'abord l'origine de cette pratique. Nous présenterons ensuite les initiatives de recherche en valorisation sylvicole réalisées dans la province. Par la suite, l'évolution du cadre légal et réglementaire et les principaux éléments ayant freiné le développement de cette pratique seront revus et analysés. Finalement, nous brosserons un portrait de la situation actuelle et aborderons les perspectives d'avenir pour cette valorisation, notamment en ce qui concerne la réduction des GES.

2 ORIGINE DE LA VALORISATION SYLVICOLE DES BIOSOLIDES MUNICIPAUX AU QUÉBEC

Jusqu'au début des années 1970, la majorité des eaux usées en provenance du réseau d'égouts des municipalités et des industries se déversaient directement dans les cours d'eau et les lacs du Québec. Ces rejets chargés de matière organique, de nutriments, d'agents pathogènes, de métaux et d'autres contaminants entraînaient une dégradation marquée de la qualité de l'eau, favorisaient le phénomène d'eutrophisation et menaçaient la survie de nombreuses espèces aquatiques. En 1978, le Programme d'assainissement des eaux usées du Québec (PAEQ) a été mis en œuvre pour réduire la pollution hydrique d'origine municipale. Des subventions étaient alors octroyées aux municipalités pour la construction d'usines de traitement des eaux. Il existe de nos jours plus de 700 stations d'épuration qui ont presque toutes été construites dans le cadre du PAEQ. Ainsi, 7,1 milliards de dollars ont été investis pour l'assainissement des eaux. Ces usines traitent plus de 90 % des eaux usées produites dans la province, ce qui représente au-delà de 6 millions de mètres cubes d'eau par jour (ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire (MAMROT), 2009). À cela s'ajoutent des dizaines de milliers de systèmes de traitement autonomes pour les résidences isolées (fosses septiques).

L'assainissement des eaux usées génère cependant une importante quantité de résidus organiques riches en nutriments : les boues d'épuration. Au milieu des années 1980, les méthodes envisagées pour gérer cette matière étaient l'enfouissement, l'incinération ou la valorisation en tant que matière fertilisante. Les deux premières options étaient les plus coûteuses et représentaient environ 50 % des coûts de fonctionnement des usines d'épuration des eaux (Grenier, 1989). La valorisation de cette matière organique par épandage sur le sol était donc l'option à privilégier sur le plan économique. De plus, les boues étaient considérées comme un engrais organique valable contenant beaucoup d'azote et de phosphore (Grenier, 1989). Ainsi, les éléments nocifs pour les cours d'eau (nutriments, matière organique) pouvaient s'avérer bénéfiques pour les sols et les cultures, à condition de respecter certains critères environnementaux afin que les boues puissent être épandues. On parlait alors du concept de valorisation des « boues de qualité ».

À la fin des années 1980, la valorisation agricole des boues d'épuration de qualité a donc commencé à se développer au Québec. Comme la fertilisation des sols et des cultures était déjà chose courante en agriculture, l'épandage de cette nouvelle matière fertilisante pouvait s'effectuer avec la même machinerie que pour les fumiers, en fonction des besoins agronomiques. Parallèlement, différents organismes de recherche effectuaient des études agronomiques et environnementales en collaboration avec plusieurs municipalités du Québec. Le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) publiait aussi le *Guide de bonnes pratiques de la valorisation agricole des boues municipales* (MDDEP, 1987). Ce guide établissait les teneurs limites en contaminants chimiques acceptables dans les boues pour permettre leur épandage, les exigences minimales de désinfection, les critères de gestion des nutriments (azote et phosphore) et d'autres bonnes pratiques d'épandage. Un certificat d'autorisation conforme aux normes établies dans ce guide devait être délivré avant toute activité de valorisation. Les boues qui ne satisfaisaient pas aux critères devaient être éliminées.

Au début des années 1990, l'épandage en milieu forestier apparaissait comme une nouvelle solution pour la gestion des boues de qualité. Ce type de valorisation pouvait servir de complément à la valorisation agricole lorsque le contexte régional était propice ou que cette dernière devenait contestée. En 1991, le MDDEP, le ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) et le ministère de la Santé et des Services sociaux publiaient conjointement le document *Valorisation sylvicole des boues de stations d'épuration des eaux usées municipales – Guide de bonnes pratiques* pour encadrer le développement de cette pratique. Les principaux critères de valorisation contenus dans ce guide étaient analogues à ceux du guide de valorisation agricole. Ils portaient à la fois sur la nature de la boue et le milieu récepteur. Un certificat d'autorisation devait aussi être délivré pour assurer la pratique sécuritaire de cette activité.

Dans le but de valider le contenu du guide de bonnes pratiques et de définir les besoins de recherches en valorisation sylvicole au Québec, le MDDEP et le MRNF ont organisé une mission scientifique en 1991 dans l'État de Washington. À ce moment-là, la ville de Seattle faisait figure de pionnière en valorisation sylvicole de biosolides à l'échelle de la planète.

3 TRAVAUX DE RECHERCHE QUÉBÉCOIS DANS LES ANNÉES 1990

Au début des années 1990, le gouvernement du Québec a entrepris des efforts soutenus de recherche sur la valorisation sylvicole des biosolides municipaux par le versement de subventions à même le Fonds de recherche et de développement technologique en environnement (FRDT-E), administré par le MDDEP, et au moyen de divers projets de recherche réalisés par le MRNF. Cette stratégie conjointe visait essentiellement à valider et à perfectionner le guide de bonnes pratiques pour qu'il convienne au contexte québécois. La majorité des sites expérimentaux étaient situés dans la partie sud de la province (figure 1), étant donné la proximité des stations d'épuration, le climat plus propice à la production sylvicole et la présence de plantations en rangées. Le tableau I résume les projets réalisés ou chapeautés par le MRNF au cours de cette période et le tableau II, ceux que le MDDEP subventionnait.



Figure 1 Localisation des sites expérimentaux de valorisation sylvicole des biosolides municipaux dans les années 1990.

TABLEAU I Résumé des projets de recherche réalisés ou soutenus par le ministère des Ressources naturelles et de la Faune dans les années 1990

Durée	Organismes	Titre du projet	Localités	Principaux résultats	Principales recommandations
1989-1994	Ministère des Ressources naturelles et de la Faune	Recherches sur l'utilisation de boues de stations municipales d'épuration en milieu forestier – essais en plantations de feuillus de grande valeur	Saint-Albert	<ul style="list-style-type: none"> Les boues ont fait accélérer la croissance des chênes rouges et des bouleaux jaunes. Les plantations en sols pauvres n'ont pas atteint les rendements des plantations en sols fertiles même avec l'application de boues de stations d'épuration. 	<ul style="list-style-type: none"> Il faudrait privilégier les plantations de résineux en sols pauvres, car le rendement des feuillus est inférieur (dans une optique de production forestière). On devrait privilégier des feuillus moins exigeants (chêne rouge, bouleau jaune) pour l'implantation en sol pauvre et l'épandage des boues (dans une optique de reboisement).
1992-1997	Ministère des Ressources naturelles et de la Faune	Traitements de parcelles d'épinettes blanches, de pins gris, rouges et sylvestres avec des boues de stations d'épuration	Notre-Dame-du-Bon-Conseil Saint-Samuel Sainte-Clotilde-de-Horton Tingwick	<ul style="list-style-type: none"> Deux ans après l'épandage, la hauteur et le diamètre des plants avaient augmenté respectivement de 25 à 29 % et de 15 à 40 %. On a mesuré une augmentation significative des teneurs en azote dans les sols des plantations. Le lessivage des métaux est négligeable. Il y a une concurrence plus forte des herbacées. 	<ul style="list-style-type: none"> Il faudrait utiliser des boues pâteuses ou granulaires plutôt que des boues liquides afin de diminuer les volumes à transporter. Le type de machinerie pour l'épandage devrait être adapté aux caractéristiques du site afin de favoriser un épandage plus uniforme.
1993	Cogisol inc.	Revue de la littérature sur les métaux, l'azote et le phosphore dans les boues d'origine municipale, de pâtes et papiers et de désencrage en prévision de leur valorisation en milieux agricole et forestier	—	<ul style="list-style-type: none"> Les boues augmentent de façon significative les teneurs en métaux traces dans les sols. La chaîne alimentaire est protégée de l'entrée indue de plusieurs éléments toxiques par la barrière sol/plante. Le cadmium est l'élément le plus problématique pour la valorisation des boues. 	<ul style="list-style-type: none"> Les programmes de valorisation devraient assurer un suivi rigoureux des concentrations en cadmium avant, pendant et après l'épandage. On devrait faire un suivi à long terme des parcelles où des boues ont été épandues.
1993	Institut national de recherche scientifique	Risques environnementaux associés à la présence de contaminants organiques de synthèse dans différentes boues résiduelles lors de leur valorisation en milieux agricole et forestier	—	<ul style="list-style-type: none"> L'action immédiate et future des composés organiques de synthèse des boues résiduelles appliquées sur la surface de la litière forestière est mal connue. La plupart des composés organiques de synthèse auraient peu tendance à s'accumuler de façon notable dans les milieux valorisés. Les connaissances concernant les surfactants (LAS, nonylphénols ethoxylates) sont limitées. 	<ul style="list-style-type: none"> Une enquête à l'échelle provinciale devrait être réalisée afin de dresser un portrait précis de la contamination des boues résiduelles produites au Québec par les composés organiques de synthèse. Des travaux pourraient être entrepris afin de vérifier le degré d'accumulation chez quelques espèces de l'écosystème forestier québécois.
1993	Institut Armand-Frappier	Risques d'exposition des travailleurs à des virus entériques à la suite de l'épandage de boues provenant de stations d'épuration d'eaux usées municipales	—	<ul style="list-style-type: none"> Les boues d'épuration peuvent contenir des virus entériques humains transmissibles à l'homme. Le risque d'exposition aux virus entériques est toutefois négligeable et ne justifie pas le port d'un équipement de sécurité. 	<ul style="list-style-type: none"> Si un travailleur désire éviter tout risque de contamination, mettre un masque léger et s'abstenir de porter les mains à sa bouche seraient suffisants.
1995	Ministère des Ressources naturelles et de la Faune	Suivi environnemental effectué à la suite de l'épandage de boues d'épuration des eaux usées municipales à la pépinière de Normandin	Normandin	<ul style="list-style-type: none"> Il n'y a pas de lessivage d'ammonium (NH_4^+) en profondeur. On note un lessivage important des nitrates (NO_3^-). Aucun phosphore n'a été observé dans les eaux de percolation. Le lessivage des métaux n'est pas plus important. 	<ul style="list-style-type: none"> La quantité de boues à appliquer devrait être établie en fonction du type de plantation et de la capacité de support du milieu. La dose maximale d'épandage recommandée devrait être révisée, car elle ne prévient pas le lessivage des nitrates.

TABLEAU II Résumé des projets de recherche soutenus par le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs dans les années 1990

Durée	Organismes	Titre du projet	Localités	Principaux résultats	Principales recommandations
1992-1997	Consortium GL-UDA et Université McGill	Évaluation sylvicole, environnementale et technico-économique de la valorisation de trois types de boues de stations d'épuration municipales dans la région des Laurentides	Arundel Harrington Mirabel	<ul style="list-style-type: none"> Il n'y a aucun effet significatif sur la disponibilité des éléments fertilisants un an après l'épandage (sauf le potassium). Aucune augmentation significative des teneurs en métaux dans l'horizon B (10-30 cm) des sols n'a été observée après un an. Il n'existe pas de risque de contamination bactérienne pour l'environnement. 	<ul style="list-style-type: none"> Effectuer un suivi à long terme pour évaluer la réponse en croissance des arbres. Réaliser d'autres essais afin de confirmer la dose limite recommandée (200 kilogrammes d'azote par hectare). Adapter les distances séparatrices au type de boues utilisé. Informar la population locale avant d'entreprendre tout projet d'épandage pour un meilleur succès.
1993-1995	Institut national de recherche scientifique	Évaluation environnementale et sylvicole de différentes pratiques de valorisation des boues de stations d'épuration des eaux usées urbaines en érablières et en plantations de sapins de Noël	Tingwick Saint-Fortunat	<ul style="list-style-type: none"> Deux ans après l'épandage, la croissance des érables n'a pas augmenté de façon significative. On note une augmentation importante de la croissance des sapins de Noël. Les risques de contamination des eaux de ruissellement sont faibles. Les teneurs en éléments fertilisants dans les eaux de percolation (surtout dans les érablières) augmentent de façon considérable. 	<ul style="list-style-type: none"> Réduire la dose de 200 kilogrammes d'azote par hectare recommandée dans le guide (dose optimale observée de 160 kilogrammes par hectare pour la culture de sapins de Noël). Interdire la valorisation sur des sols ayant un pH inférieur à 5,5. Fixer une teneur limite en aluminium dans les boues.
1993-1996	Groupe HBA	Analyse des impacts environnementaux de la valorisation sylvicole de boues de stations d'épuration municipales en plantation de pins rouges et en peuplement naturel mixte	Tingwick Sainte-Séraphine	<ul style="list-style-type: none"> Il y a une augmentation significative de la croissance des feuillus (surtout les peupliers). La croissance du pin rouge n'augmente pas de façon notable. Les métaux analysés sont demeurés dans la couche superficielle du sol. Il n'existe pas de bioaccumulation par ingestion de tissus végétaux par la faune. 	<ul style="list-style-type: none"> Établir la dose maximale d'application en fonction de la siccité des boues, de la capacité de réception du site et des besoins nutritifs des peuplements. Déterminer le potentiel d'accumulation des métaux lourds par la faune en mesurant les teneurs en métaux dans les tissus animaux exposés à des aires de valorisation.
1994-1999	Institut de recherche en biologie végétale	Reboisement de sites dégradés en milieu urbain par l'utilisation des bois raméaux fragmentés et des boues de stations d'épuration des eaux	Montréal	<ul style="list-style-type: none"> Aucun effet significatif n'a été observé entre les doses de boues appliquées (100, 200, 300 kilogrammes d'azote par hectare); pas de traitement témoin sans boue. La combinaison d'une forte dose de bois raméaux fragmentés (200 m³) avec une faible dose de boues (125 kilogrammes d'azote par hectare) permet un meilleur équilibre du ratio azote/phosphore foliaire, une réduction de l'indice de minéralisation de l'azote du sol et une diminution du lessivage des nitrates. 	<ul style="list-style-type: none"> Fractionner les épandages afin d'augmenter l'immobilisation des nitrates produits et de limiter les teneurs dans la solution du sol. Ajouter plus de bois raméaux fragmentés (entre 300 et 500 m³) aux boues afin de réduire la nitrification.
1995-1999	Consortium GL-UDA et Université de Sherbrooke	Valorisation sylvicole de boues municipales – impacts sur la faune	Sherbrooke	<ul style="list-style-type: none"> L'apport de boues a profité à la végétation (chênes et plantes herbacées). Une bioaccumulation a été observée pour le plomb chez les campagnols et pour le cadmium et le mercure chez les musaraignes, mais les concentrations trouvées dans le foie et les reins étaient inférieures aux quantités jugées toxiques. Un plus grand nombre d'herbivores ont été attirés sur les sites à la suite de l'épandage. 	<ul style="list-style-type: none"> Établir des critères plus stricts pour la qualité des boues et pour les taux d'application dans le cas des boues ne respectant pas les meilleurs critères de qualité. Garder des sites de référence pour mener des études à plus long terme. Déterminer une fréquence d'application limitant la bioaccumulation dans les organismes fauniques.

Projets de recherche du ministère des Ressources naturelles et de la Faune

Les projets de recherche sur le terrain réalisés par le MRNF visaient à évaluer le comportement d'espèces feuillues et résineuses en plantations à la suite de l'application de biosolides. Les parcelles étaient surtout localisées dans la région du Centre-du-Québec et il s'agissait pour la plupart d'anciennes terres agricoles. La figure 2 montre un épandage de boues d'épuration sous forme liquide réalisé dans le cadre d'un projet de recherche sur une plantation de pins rouges à Sainte-Clotilde-de-Horton. Après deux saisons de croissance, les résultats préliminaires ont démontré un gain de croissance significatif de 29 % en hauteur et de 40 % en diamètre, dans une plantation de pins gris, et de 25 % en hauteur et 15 % en diamètre dans une plantation d'épinettes blanches (MRNF, 1995c; 1995d). Les arbres traités étaient donc généralement plus hauts, plus gros et plus vigoureux, en plus de présenter une couleur plus foncée et une biomasse plus importante (MRNF, 1995b). Le hersage du sol après l'épandage des boues (avant la plantation des arbres) a aussi eu un effet positif sur la croissance des épinettes blanches (MRNF, 1995d). Néanmoins, la compétition plus forte entre les espèces herbacées et forestières s'avérait préoccupante (MRNF, 1995d). Les chercheurs du MRNF ont également observé des augmentations de rendement dans des plantations de feuillus (MRNF, 1994).



Figure 2 Épandage de boues d'épuration provenant de Victoriaville dans une plantation de pins rouges à Sainte-Clotilde-de-Horton dans le cadre d'un projet de recherche (MRNF, 1992).

À la suite de ces résultats préliminaires, le MRNF a formulé la recommandation suivante : dans un contexte de production ligneuse en sols pauvres, on doit favoriser la fertilisation des espèces résineuses plutôt que des espèces feuillues, qui sont généralement plus exigeantes. Toutefois, la fertilisation d'espèces feuillues en sols moyennement fertiles, ou dans un contexte de reboisement de milieux dégradés, pourrait aussi s'avérer bénéfique (MRNF, 1994). On conseillait également d'utiliser des boues

pâteuses ou granulées lorsque la ressource est disponible, car la concentration en éléments fertilisants est plus élevée et le transport peut être plus facile que pour des boues liquides (MRNF, 1993)¹.

Au début des années 1990, le MRNF a aussi fait réaliser quelques analyses documentaires qui traitaient des risques environnementaux et des risques pour la santé des travailleurs (tableau I). Certaines études rapportaient que l'épandage en milieu forestier n'est pas une activité sans risque pour l'environnement et qu'un suivi rigoureux devait être effectué à la suite des épandages, notamment en ce qui concerne l'accumulation du cadmium dans le sol (Cogisol, 1993) et le lessivage des nitrates suivant la nitrification de l'azote organique fourni par les biosolides (Cogisol, 1993; MRNF, 1995a). Par contre, une autre étude révélait que les composés organiques de synthèse avaient peu tendance à s'accumuler de façon importante dans le milieu et que le risque de contamination pour les humains et l'environnement s'avérait plutôt faible (Institut national de la recherche scientifique (INRS), 1993). Elle suggérait toutefois de poursuivre les recherches à plus long terme. Une analyse documentaire de l'Institut Armand-Frappier (Payment, 1993) rapportait la présence de virus entériques dans les boues d'épuration qui n'étaient pas entièrement désinfectées, mais faisait état d'un risque minime pour la santé des travailleurs compte tenu des bonnes pratiques à adopter.

Projets de recherche du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs

Les projets de recherche sur le terrain financés par le MDDEP se sont échelonnés sur deux à trois ans et ont été réalisés par des universités et des firmes privées. Contrairement aux essais du MRNF, les arbres de certains dispositifs n'ont pas démontré d'accroissement significatif, un ou deux ans après l'épandage (GL-UDA, 1997; INRS, 1995). Cette situation pourrait s'expliquer par le fait que certaines plantations forestières ont habituellement une faible vitesse de croissance, comparativement aux cultures agricoles, et que les peuplements matures (érablières) ne réagissent pas à la fertilisation. Par contre, les plantations de sapins de Noël, qui requièrent une importante fertilisation azotée, et les arbres feuillus d'un peuplement naturel mixte en croissance, principalement les peupliers, démontraient une croissance significativement plus importante à la suite de l'épandage des boues d'épuration (INRS, 1995; HBA, 1996).

En ce qui a trait aux impacts environnementaux, deux études subventionnées par le MDDEP ont conclu à un faible risque de contamination des eaux de ruissellement par des éléments fertilisants si l'application est effectuée dans le respect du guide de bonnes pratiques (INRS, 1995; HBA, 1996). Un risque potentiel de contamination à l'azote demeurerait toutefois pour ce qui est des eaux de percolation (INRS, 1995). Par contre, en ce qui concerne les métaux contenus dans les boues, le risque de contamination des nappes d'eau s'avérait faible, car les cations métalliques se fixent principalement dans l'horizon de surface du sol (HBA, 1996).

L'augmentation de la productivité des arbres et des herbacées a favorisé la présence de la faune, mais a entraîné une hausse de la teneur en cadmium, en plomb et en mercure dans l'organisme de petits rongeurs (GL-UDA, 1999). Même si les teneurs en métaux dans les tissus animaux n'étaient pas toxiques, on recommandait de poursuivre la recherche sur les risques à plus long terme (GL-UDA, 1999).

En résumé, il ressort de toutes ces études réalisées dans les années 1990 que la performance sylvicole et la prévention de la contamination de l'eau étaient directement liées à l'adéquation entre la fourniture d'éléments nutritifs et les besoins des arbres. Quelques auteurs ont donc suggéré de moduler la dose d'azote aux caractéristiques des boues, des espèces forestières et du milieu récepteur (INRS, 1995; GL-UDA, 1997). En ce qui a trait aux métaux, la principale préoccupation concernait les accumulations dans les sols à long terme et leur incidence sur la faune après des épandages répétés, notamment pour le cadmium, le mercure et le plomb. C'est pourquoi deux études recommandaient de conserver des sites de

1. La section 6 présente quelques observations récentes sur les parcelles expérimentales du MRNF, plusieurs années après l'épandage.

recherche à long terme pour consigner de l'information sur les risques environnementaux et la bioaccumulation de métaux dans les organismes herbivores (GL-UDA, 1997; 1999)².

4 ÉVOLUTION DU CADRE TECHNIQUE ET LÉGAL

En vue d'assurer une pratique sécuritaire sur le plan de l'environnement et de la santé humaine, trois générations de critères de bonnes pratiques se sont succédé pour l'encadrement des certificats d'autorisation relatifs à la valorisation sylvicole des biosolides municipaux (figure 3). La première génération de critères est apparue avec le document *Valorisation sylvicole des boues de stations d'épuration des eaux usées municipales – Guide de bonnes pratiques* (MDDEP, 1991). À la suite des résultats et des recommandations découlant des travaux de recherche, une deuxième génération de critères a été établie quelques années plus tard dans les *Critères provisoires pour la valorisation des matières résiduelles fertilisantes* (MDDEP, 1997), qui ont fait l'objet d'une révision en 2001 et 2002. Ces nouveaux critères concernaient à la fois les valorisations agricole et sylvicole et visaient également les autres types de boues (agroalimentaires et biosolides papetiers). Les teneurs limites en contaminants chimiques (critères C1 et C2) avaient alors été fixées selon la première norme canadienne sur les composts (CAN/Bureau de normalisation du Québec (BNQ), 1995). On abandonnait l'exigence relative à l'analyse des biphényles polychlorés pour la remplacer par l'analyse des dioxines et des furannes. Les critères de désinfection (catégories P1 et P2) consistaient pour leur part en une adaptation de la réglementation américaine sur l'épandage des boues (United States Environmental Protection Agency, 1993) précisant les catégories A et B. On ajoutait également plusieurs bonnes pratiques d'épandage et de stockage des biosolides ainsi que des exigences en matière de communication avec les citoyens. Désormais, les biosolides et les composts de biosolides certifiés conformes par le Bureau de normalisation du Québec pouvaient être épandus pour des besoins sylvicoles et agricoles sans que le MDDEP délivre un certificat d'autorisation.

À l'époque des critères provisoires, le Bureau d'audiences publiques sur l'environnement (BAPE) recommandait « qu'une préférence soit accordée à la valorisation des boues à des fins agricoles, sylvicoles et horticoles plutôt qu'à la valorisation thermique dans la mesure où ces boues présentent des caractéristiques compatibles avec l'usage que peuvent en faire les secteurs concernés; la mise en décharge ne devrait être autorisée qu'en dernier recours » (BAPE, 1997). Peu après, la Politique québécoise de gestion des matières résiduelles 1998-2008 du gouvernement du Québec est venue concrétiser cette idée en précisant l'objectif de n'enfouir aucune boue « [...] sans démonstration qu'il n'est pas économiquement viable de la valoriser » (gouvernement du Québec, 2000).

Quelques années plus tard, la troisième génération de critères de bonnes pratiques a fait son apparition dans le *Guide sur la valorisation des matières résiduelles fertilisantes* (guide MRF), qui a d'ailleurs fait l'objet d'une révision récente (MDDEP, 2008). Ce guide comporte une section distincte sur la valorisation sylvicole et précise notamment la responsabilité des ingénieurs forestiers quant à l'établissement des doses d'azote en fonction du type de peuplement. Les catégories de contaminants chimiques, les mesures adéquates pour la santé et la sécurité des travailleurs qui manipulent des boues P2 ainsi que les catégories d'odeurs (O1, O2 et O3) ont également été mises à jour selon des travaux récents.

Toutefois, comme le guide MRF ne couvrait pas la valorisation pour la restauration de la couverture végétale de sites dégradés, le MDDEP a également publié le *Guide sur l'utilisation de matières résiduelles fertilisantes (MRF) pour la restauration de la couverture végétale de lieux dégradés* (MDDEP, 2005).

La figure 3 présente les quatre documents produits par le MDDEP au sujet de l'encadrement de la valorisation sylvicole de biosolides municipaux au Québec.

2. La préoccupation concernant l'azote a été intégrée dans les guides de bonnes pratiques qui ont suivi (section 4). Par ailleurs, des études plus récentes ont montré que les teneurs en cadmium, en mercure et en plomb dans les boues municipales du Québec ont fortement diminué (Perron et Hébert, 2007). Ainsi, les épandages répétés, conformément aux besoins des plantes, n'entraînent pas d'accumulation à risque de ces trois métaux lourds dans les sols après plusieurs épandages sur les mêmes parcelles (Perron et Hébert, 2008).



Figure 3 Publications ministérielles au sujet de l'encadrement de la valorisation sylvicole des biosolides municipaux au Québec du début des années 1990 à aujourd'hui.

5 ANALYSE DU DÉVELOPPEMENT DE LA VALORISATION SYLVICOLE

En 2007, les municipalités du Québec produisaient environ 915 000 tonnes de boues d'épuration sur base humide (MDDEP, 2007). De cette quantité, 250 000 tonnes étaient valorisées par épandage, avec ou sans compostage préalable. Plus de 140 000 tonnes (base humide) de biosolides municipaux étaient valorisées chaque année au Québec, tandis que la valorisation sylvicole demeurait presque nulle, avec à peine plus de 1 000 tonnes annuellement durant les années 2000 (MDDEP, 2007). Ces chiffres démontrent clairement que la valorisation sylvicole des biosolides municipaux n'a jamais connu d'essor au Québec, contrairement à l'État de Washington et à la Colombie-Britannique, malgré les nombreuses recherches et la présence d'un cadre environnemental détaillé.

Diverses raisons peuvent expliquer cet échec par rapport à la valorisation agricole. Le tableau III présente un résumé des principaux avantages et inconvénients de la valorisation des biosolides pour les producteurs agricoles et forestiers. Nous traiterons de l'incidence de la valorisation sur la diminution des émissions de GES à la section 6.

TABLEAU III Principaux avantages et inconvénients des valorisations agricole et sylvicole des biosolides municipaux pour les producteurs agricoles et forestiers

	Valorisation agricole	Valorisation sylvicole
Avantages	<ol style="list-style-type: none"> 1. Apport de nutriments et de matière organique au sol; 2. Plus économique que les engrais de synthèse; 3. Retour rapide sur l'investissement (récolte annuelle); 4. Réduction des émissions de GES par rapport à l'enfouissement ou à l'incinération. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Apport de nutriments et de matière organique au sol; 2. Plus économique que les engrais de synthèse; 3. Augmentation des rendements ligneux pour certaines espèces d'arbres; 4. Valorisation en dehors de la chaîne de production pour l'alimentation humaine; 5. Sites généralement éloignés des secteurs résidentiels, ce qui réduit le risque de mauvaises odeurs; 6. Réduction des émissions de GES par rapport à l'enfouissement ou à l'incinération.
Inconvénients	<ol style="list-style-type: none"> 1. Odeurs; 2. Restrictions environnementales et administratives nombreuses; 3. Compaction du sol lors de l'épandage; 4. Craintes et contestations de la population rurale dans certaines régions; 5. Risque commercial pour les agriculteurs (si les acheteurs refusent d'acheter les produits à cause des craintes des consommateurs). 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Longue période de croissance des arbres avant la récolte (retour sur l'investissement); 2. Restrictions environnementales et administratives nombreuses; 3. Difficultés de transport et d'épandage; 4. Éloignement des sites forestiers; 5. Contestations possibles (clubs de chasseurs ou de pêcheurs, etc.); 6. Connaissances parfois imprécises sur les besoins nutritifs de plusieurs espèces d'arbres.

La longue période de croissance des arbres serait un des principaux freins au développement de la valorisation sylvicole. En effet, il faut d'habitude attendre plusieurs décennies avant de pouvoir observer l'ensemble des résultats de cette pratique. De plus, ses conséquences n'ont pas été documentées pour le Québec. D'ailleurs, de façon générale, la fertilisation est beaucoup moins répandue en foresterie qu'en agriculture. Jusqu'à aujourd'hui, on ne connaît toujours pas avec précision les besoins nutritifs de plusieurs espèces d'arbres (Éric Lapointe (Domtar), communication personnelle). Cette situation propre à la sylviculture québécoise explique donc la raison pour laquelle il a été plus difficile de susciter de l'intérêt pour cette pratique que pour la valorisation agricole.

Du côté de la faisabilité technique, il apparaît que les difficultés d'épandage sur le terrain et la complexité du transport de la station d'épuration jusqu'aux plantations forestières ont pu décourager certaines entreprises à se lancer dans cette activité. Les principaux problèmes éprouvés lors de l'épandage sont le manque de machinerie adaptée, le compactage du sol et surtout, la difficulté à réaliser un épandage uniforme (Gilles Sheedy (retraité du MRNF), communication personnelle). D'autre part, comme plusieurs stations d'épuration produisent des biosolides de façon continue, il est difficile de pratiquer la valorisation seulement sur des plantations forestières, qui ne nécessitent en général qu'une seule application. Comparativement à la valorisation agricole, il faut donc chercher davantage de sites où réaliser ce type d'épandage. De plus, les plantations forestières sont généralement plus éloignées des villes que les terres agricoles, ce qui a pour effet d'augmenter les coûts de transport.

Au chapitre de l'acceptabilité sociale, selon l'expérience américaine, la valorisation sylvicole se heurte souvent aux mêmes obstacles que la valorisation agricole. Par contre, elle n'est pas associée directement à la chaîne alimentaire humaine.

Finalement, dans le secteur institutionnel, les projets de recherche ont été abandonnés progressivement dans les années 1990 en raison d'un manque de financement et des nombreux départs à la retraite de chercheurs du MRNF.

6 TRAVAUX RÉCENTS

On assiste depuis quelques années à un regain d'intérêt pour la recherche sur la valorisation sylvicole des biosolides. Tout d'abord, en octobre 2009, une équipe du MDDEP et du MRNF a réalisé sur le terrain un suivi des parcelles de recherche du MRNF qui avaient été implantées dans les années 1990, afin d'observer l'incidence des épandages après presque 20 ans. Les sites les plus prometteurs se trouvent dans une plantation de pins rouges dans la région de Victoriaville et dans une plantation d'épinettes blanches près de Tingwick. La plantation privée d'épinettes blanches a réagi très fortement à l'application de biosolides municipaux en 1993. En effet, il était visuellement possible de faire une distinction entre les arbres fertilisés, qui étaient plus hauts et plus fournis, et les arbres n'ayant reçu aucune boue. Étant donné que les plantations de résineux représentent une proportion plus importante que les plantations d'arbres feuillus au Québec, cette technique sylvicole pourrait être avantageuse pour de nombreux propriétaires privés. Le chercheur Rock Ouimet du MRNF procédera, en 2010, à la quantification des gains de productivité, de la séquestration du carbone et de la qualité du sol une fois que les plantations ont atteint un stade avancé. Ces études permettront de déterminer si les effets sont semblables à ceux observés dans l'ouest du pays.

En effet, en Colombie-Britannique, les biosolides municipaux servent à fertiliser à la fois les forêts des secteurs public et privé. Des augmentations de croissance due à l'application de biosolides ont été observées en examinant les cernes annuels de croissance chez différentes espèces d'arbres, notamment le sapin de Douglas (figure 4). Les recherches effectuées ont démontré que même si la densité de la fibre était réduite d'environ 15 % à cause d'une croissance accélérée, la qualité du bois satisfaisait toujours aux exigences de l'industrie forestière. Les chercheurs pensent que la qualité du bois peut être grandement améliorée en combinant l'application de biosolides avec d'autres techniques d'aménagement sylvicole (coupe d'éclaircie, élagage des branches, fractionnement des épandages, etc.) (NBMA, 2004).



Figure 4 Coupe transversale d'un sapin de Douglas montrant l'élargissement des cernes annuels de croissance à la suite d'un épandage de biosolides municipaux (NBMA, 2009).

Au Québec, de la machinerie permettant d'épandre des biosolides pour stimuler la croissance du peuplier hybride a été mise au point en Estrie (figure 5). En 2009, quelque 2 000 tonnes de biosolides municipaux ont été épandues avec cet équipement (Éric Lapointe (Domtar), communication personnelle). L'utilisation de ce résidu fait partie d'un programme de valorisation incluant déjà des boues de papetières, des boues de chaux et des cendres. Les critères relatifs au choix des terrains forestiers pour épandre les biosolides avec ce type de machinerie sont les suivants : une profondeur de sol supérieure à un mètre et une pente maximale de 5 % (Vanier, 2008).



Figure 5 Épandage de biosolides municipaux dans une plantation de peupliers hybrides de la compagnie Domtar à Saint-Fortunat (MDDEP, 2009).

Dans Lanaudière, des recherches sur le saule énergétique réalisées par l'Institut de recherche en biologie végétale démontrent que le rendement annuel moyen augmente de 10 à 15 tonnes sèches par hectare avec l'application de biosolides municipaux, dès la première rotation de trois ans, ce qui correspond à une augmentation de 40 % annuellement (Labrecque, 2009). Le saule énergétique, qui est une plante pérenne, peut demeurer en production durant environ 25 ans (Agro Énergie, 2007). On prévoit agrandir les superficies cultivées de cette plante en vue de fournir une solution de rechange pour le chauffage institutionnel. Cela permettrait de valoriser une plus grande quantité de biosolides municipaux tout en produisant de l'énergie renouvelable.



Figure 6 Épandage manuel de biosolides municipaux dans un champ de saules à Saint-Roch-de-l'Achigan (Agro Énergie, 2009).

Finalement, on se sert aussi de l'épandage de biosolides municipaux pour restaurer la couverture végétale de sites dégradés. En effet, des parcelles situées sur une ancienne mine de résidus d'amiante ont été végétalisées avec quatre espèces d'arbres (pin rouge, pin gris, épinette blanche et peuplier hybride) et quatre types d'arbustes (sumac vinaigrier, physocarpe, aulne crispé et argousier). On y a épandu des doses variables de boues d'épuration mélangées avec d'autres types de matières résiduelles fertilisantes (compost, résidus de désencrage, gypse, etc.). Les travaux se sont terminés en 2008, mais un suivi de la croissance des arbres est prévu au cours des prochaines années (GSI Environnement, 2008).

7 PERSPECTIVES D'AVENIR

Le recyclage des matières résiduelles au Québec connaît actuellement de nouveaux développements qui pourraient favoriser la valorisation sylvicole. En effet, l'enfouissement des matières résiduelles devient de plus en plus dispendieux, à cause des nouvelles normes et des redevances à l'élimination. De plus, le gouvernement du Québec a publié, en novembre 2009, un *Projet de politique québécoise sur la gestion des matières résiduelles*. Celui-ci vise l'augmentation de la valorisation des matières résiduelles, dont les boues, et, à terme, le bannissement de l'enfouissement des matières organiques sur un horizon de 10 ans. Un des objectifs poursuivis est la réduction des émissions de GES associées à l'enfouissement des matières organiques.

À ce sujet, il importe de mentionner que la valorisation sylvicole des biosolides municipaux réduit énormément les émissions de GES par rapport à l'enfouissement ou à l'incinération. Une récente étude faite par la firme SYLVIS pour le Conseil canadien des ministres de l'Environnement fait état d'un bilan presque carboneutre pour la gestion des biosolides municipaux de la ville de Nanaïmo, en Colombie-Britannique, qui recycle tous ses biosolides municipaux par épandage en milieu forestier. En effet, la valorisation sylvicole permet la séquestration accrue de carbone dans les sols et dans la matière ligneuse. À l'inverse, les villes qui enfouissent ou incinèrent leurs boues d'épuration produiraient plus d'une tonne équivalent CO₂ par tonne de biosolides secs enfouis ou incinérés, principalement sous forme de méthane et d'oxydes nitreux (SYLVIS, 2009). L'étude démontre en outre que le transport des biosolides municipaux aux sites forestiers a une incidence relativement faible sur les bilans de GES.

Du côté du MRNF, on vise l'accroissement de la production de biomasse forestière et la production d'énergie verte. La nouvelle Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier prévoira la délimitation des sites à haut potentiel de production ligneuse. Dans ces zones, la priorité sera accordée à la réalisation de traitements sylvicoles permettant de doubler les rendements ligneux (MRNF, 2009b). Cette nouvelle stratégie d'action cadre bien avec la fertilisation sylvicole au moyen de biosolides municipaux étant donné que cette technique vise directement l'augmentation de la productivité des plantations. Également, le Plan d'action sur la valorisation de la biomasse forestière, aussi annoncé par le MRNF au début de l'année 2009, vise à faire de la biomasse forestière une solution de rechange pour les entreprises qui utilisent du mazout lourd (MRNF, 2009c). Or, la quantité de biomasse forestière générée pourrait être plus abondante en incluant des traitements sylvicoles de fertilisation des forêts avec des biosolides municipaux aux endroits où les conditions sont propices.

La fertilisation d'espèces ligneuses à croissance rapide telles que le saule énergétique et le peuplier hybride permettrait à la fois de produire de l'énergie renouvelable et de réduire les émissions de GES. Les cultures à croissance rapide constituent en effet les systèmes de production végétale les plus performants pour capter le CO₂ atmosphérique (Agro Énergie, 2007). Elles produisent également une source d'énergie de remplacement pour le bois de chauffage et les combustibles fossiles. Cette valorisation des biosolides municipaux pourrait à l'avenir donner droit à des crédits de carbone aux producteurs sylvicoles.

Dans un contexte où le compostage des boues s'avère plus coûteux que l'enfouissement et où l'épandage agricole est de plus en plus contesté dans certaines régions (Lalonde, 2009), plusieurs municipalités pourraient favoriser l'épandage des biosolides municipaux sur des cultures de plantes ligneuses et des sites dégradés. En effet, il ne s'agit pas de production alimentaire, et les milieux forestiers sont généralement plus éloignés des zones résidentielles que les terres agricoles, ce qui limite les risques associés aux odeurs.

8 CONCLUSION

La valorisation des biosolides municipaux en foresterie a suscité un certain engouement au début des années 1990. Les résultats des recherches préliminaires menées au Québec à cette époque ont démontré les avantages de cette pratique et aidé à la conception de guides de bonnes pratiques permettant la maîtrise des risques. Cependant, différents facteurs ont freiné le développement de la valorisation sylvicole au cours des deux dernières décennies, par exemple les difficultés liées au transport et à l'épandage des boues et les faibles coûts d'enfouissement sanitaire.

Néanmoins, la recherche sur cette pratique connaît actuellement un regain d'intérêt, notamment pour la production de peupliers hybrides et de saules énergétiques, et la restauration de la couverture végétale de sites dégradés. Par ailleurs, la nouvelle orientation gouvernementale qui vise à bannir progressivement la matière organique fera augmenter la quantité de biosolides municipaux à valoriser dans les années à venir. L'intensification de la valorisation sylvicole aurait comme effet d'accroître les rendements ligneux et la production de sources d'énergie de remplacement, tout en réduisant les émissions de GES associées à l'élimination des boues par enfouissement ou par incinération. Il semble donc y avoir encore un avenir pour ce type de valorisation au Québec.

Enfin, le développement de cette pratique implique une prise en charge de la part des acteurs socio-économiques régionaux, notamment une sensibilisation des propriétaires, des entreprises et des municipalités qui pourraient bénéficier de cette matière fertilisante encore trop souvent perçue à tort comme un déchet sans valeur dont il faut se débarrasser.

9 REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à souligner la contribution des personnes suivantes : Rock Ouimet (MRNF), Daniel St-Hilaire (SNG Foresterie-conseil), Gilles Sheedy, Éric Lapointe (Domtar), Michel Labrecque (Institut de recherche en biologie végétale), Francis Allard (Agro Énergie) et Maryse Dubé (MRNF).

10 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AGRO ÉNERGIE. 2007. Les cultures intensives sur courtes rotations pour la production d'énergie.
<http://www.agroenergie.ca/guide/GuideCICR.pdf>

BUREAU D'AUDIENCES PUBLIQUES SUR L'ENVIRONNEMENT. 1997. Déchets d'hier : ressources de demain – rapport de la Commission d'enquête sur la gestion des matières résiduelles au Québec.
<http://www.bape.gouv.qc.ca/sections/rapports/publications/bape115.pdf>

COGISOL INC. 1993. Revue de littérature sur les métaux, l'azote et le phosphore dans les boues d'origine municipale, de pâtes et papiers et de désencrage en prévision de leur valorisation en milieu agricole et forestier, 95 p.

CONSORTIUM GL-UDA ET UNIVERSITÉ MCGILL. 1997. Évaluation sylvicole, environnementale et technico-économique de la valorisation de trois types de boues de stations d'épuration municipales dans la région des Laurentides, rapport final.

CONSORTIUM GL-UDA ET UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE. 1999. Valorisation sylvicole de boues municipales – impacts sur la faune, rapport final.

GRENIER, Y. 1989. La valorisation des boues d'usine d'épuration des eaux pour la fertilisation des forêts, mémoire présenté à l'Institut national de la recherche scientifique (INRS-eau), 190 p.

GROUPE HBA. 1996. Analyse des impacts environnementaux de la valorisation sylvicole de boues de stations d'épuration municipales en plantation de pins rouges et en peuplement naturel mixte.

GSI ENVIRONNEMENT. 2008. Reboisement de haldes minières, présentation PowerPoint effectuée à Asbestos le 23 octobre 2008.

HÉBERT, M. 2007. Les boues : le mouton noir du recyclage, URBA (décembre), p. 22 à 25.

PAYMENT, P. 1993. Risques d'exposition des travailleurs à des virus entériques à la suite de l'épandage de boues provenant de stations d'épuration d'eaux usées municipales, Institut Armand-Frappier, 21 p.

INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE. 1993. Risques environnementaux associés à la présence de contaminants organiques de synthèse dans différentes boues résiduelles lors de leur valorisation en milieu agricole et forestier, 108 p.

INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE. 1995. Évaluation environnementale et sylvicole de différentes pratiques de valorisation des boues de stations d'épuration des eaux usées urbaines en érablières et en plantations de sapins de Noël, 399 p.

INSTITUT DE RECHERCHE EN BIOLOGIE VÉGÉTALE. 1999. Reboisement de sites dégradés en milieu urbain par l'utilisation des bois raméaux fragmentés et des boues de stations d'épuration des eaux, 54 p.

LABRECQUE, M. 2009. Recyclage des biosolides et des eaux usées pour la production de saules énergétiques, présentation PowerPoint à l'occasion de la journée portes ouvertes chez Agroénergie à Saint-Roch-de-l'Achigan.

LALONDE, M. 2009. « Oozing with controversy », *The Gazette*.
<http://www.globalmontreal.com/technology/Oozing+with+controversy/2079944/story.html>

MINISTÈRE DES AFFAIRES MUNICIPALES, DES RÉGIONS ET DE L'OCCUPATION DU TERRITOIRE. 2009. Ouvrages de surverse et stations d'épuration – Évaluation de performance des ouvrages municipaux d'assainissement des eaux pour l'année 2008, rapport annuel, 26 p.
http://www.mamrot.gouv.qc.ca/publications/infrastructures/eval_perform_rapport_2008.pdf

MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DES PARCS. 1998. Politique de gestion des matières résiduelles 1998-2008.
http://www.mddep.gouv.qc.ca/matieres/mat_res/index.htm

MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DES PARCS. 2005. Guide sur l'utilisation de matières résiduelles fertilisantes (MRF) pour la restauration de la couverture végétale de lieux dégradés, 35 p.
http://www.mddep.gouv.qc.ca/matieres/mat_res/fertilisantes/vegetal/guide.pdf

MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DES PARCS. 2007. Bilan 2007 de la valorisation des matières résiduelles fertilisantes, 16 p.
http://www.mddep.gouv.qc.ca/matieres/mat_res/fertilisantes/Bilan2007.pdf

MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DES PARCS. 2008. Guide sur la valorisation des matières résiduelles fertilisantes, 157 p.
http://www.mddep.gouv.qc.ca/matieres/mat_res/fertilisantes/critere/guide-mrf.pdf

MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DES PARCS. 1987. Valorisation sylvicole de boues de stations d'épuration des eaux usées municipales – Guide de bonnes pratiques, 83 p.

MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DES PARCS. 1991. Guide de bonnes pratiques de la valorisation agricole des boues municipales.

MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE. 1994. Recherches sur l'utilisation de boues de stations municipales d'épuration en milieu forestier – essais en plantations de feuillus de grande valeur.

MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE. 1995a. Suivi environnemental effectué à la suite de l'épandage de boues d'épuration des eaux usées municipales à la pépinière de Normandin, 95 p.

MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE. 1995b. La valorisation sylvicole des boues : résultats préliminaires des essais effectués par le MRN dans la région de Victoriaville, rapport interne n° 404, 11 p.

MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE. 1995c. Quelques résultats préliminaires de croissance d'une plantation de pin gris traitée avec des boues de station d'épuration, Note de recherche forestière n° 72, 9 p.

MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE. 1995d. Quelques résultats préliminaires de croissance d'une plantation d'épinettes blanches traitée avec des boues de station d'épuration, Note de recherche forestière n° 78, 11 p.

- MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE.** 2009a. Programme de mise en valeur des ressources du milieu forestier.
<http://www.mrnf.gouv.qc.ca/forets/amenagement/amenagement-programme.jsp>
- MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE.** 2009b. Document explicatif du projet de loi sur l'aménagement durable du territoire forestier, 39 p.
<http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/evolution/explicatif-projet-loi.pdf>
- MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE.** 2009c. Plan d'action sur la valorisation de la biomasse forestière.
<http://www.mrnf.gouv.qc.ca/forets/entreprises/entreprises-transformation-strategie-energie.jsp>
- NORTHWEST BIOSOLIDS MANAGEMENT ASSOCIATION.** 2004. Biosolids recycling – forestry (fact sheet).
<http://www.nwbiosolids.org/Pubs/Forestryweb.pdf>
- PERRON, V. ET M. HÉBERT.** 2008. Valorisation agricole de biosolides municipaux à Ville de Saguenay : impact à moyen terme sur le contenu en métaux des sols récepteurs.
http://www.irda.qc.ca/pages/Agrosolutions_vol19_no1_Perron.pdf
- PERRON, V. ET M. HÉBERT.** 2007. Caractérisation des boues d'épuration municipales – Partie II : éléments traces métalliques. http://www.mddep.gouv.qc.ca/matieres/articles/caract_boues2.pdf
- SYLVIS.** 2009. Le modèle d'évaluation des émissions associées aux biosolides (MEEB) : une méthode pour évaluer les émissions de gaz à effet de serre issues de la gestion des biosolides au Canada, 13 p.
- VANIER, R.** 2008. « La petite histoire du peuplier hybride chez Domtar Windsor », *Progrès forestier*, p. 26 à 30.