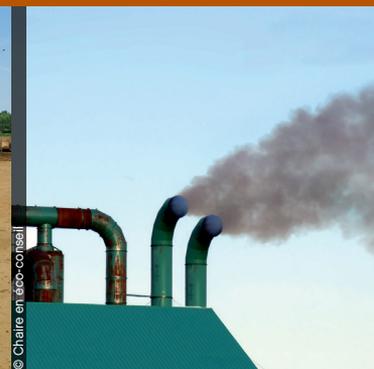


ARTICLE
SCIENTIFIQUE

La gestion des biosolides de papetières au Québec : quelle serait la meilleure option pour réduire les émissions de gaz à effet de serre?

Pulp and paper mill sludge management in Quebec: what should be the best option to reduce greenhouse gas emissions?

PAR **PATRICK FAUBERT**

Ph. D., professeur associé, Chaire en éco-conseil, Université du Québec à Chicoutimi, patrick1_faubert@uqac.ca

PAR **CATHERINE LEMAY-BÉLISLE**

B. Sc., éco-conseillère diplômée ©, postulante à la maîtrise, Chaire en éco-conseil, Université du Québec à Chicoutimi

PAR **NORMAND BERTRAND**

M. Sc., chercheur, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures

PAR **SYLVIE BOUCHARD**

Ph. D., professeure associée, Chaire en éco-conseil, Université du Québec à Chicoutimi

PAR **MARTIN CHANTIGNY**

Ph. D., chercheur, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures

PAR **SIMON DUROCHER**

M. Sc., éco-conseiller diplômé ©, Chaire en éco-conseil, Université du Québec à Chicoutimi

PAR **PHILIPPE ROCHETTE**

Ph. D., chercheur, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures

PAR **PASCAL TREMBLAY**

M. Sc. professionnel de recherche, Chaire en éco-conseil, Université du Québec à Chicoutimi

PAR **NOURA ZIADI**

Ph. D., chercheuse, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures

ET PAR **CLAUDE VILLENEUVE**

Professeur titulaire, directeur de la Chaire en éco-conseil, Université du Québec à Chicoutimi

Résumé

Les biosolides de papetières (BP) sont des matières organiques résiduelles provenant du processus d'épuration des effluents de l'industrie des pâtes et papiers. Le gouvernement québécois vise à réduire de 20 % les émissions de gaz à effet de serre (GES) par rapport au niveau de 1990 et à bannir la matière organique des lieux d'élimination d'ici 2020, ce qui affectera probablement la gestion des BP. Cette étude vise à quantifier les émissions de GES provenant des trois principales filières de gestion des BP : l'enfouissement, l'épandage sur sol agricole et la combustion avec récupération de chaleur. Les émissions de GES de l'enfouissement ont été mesurées à l'échelle pilote et celles de l'épandage, l'ont été pour des doses respectant les recommandations agronomiques. Les émissions de la combustion ont été mesurées à la cheminée de chaudières à biomasse utilisant entre 10 et 40 % de BP mélangés aux combustibles. L'enfouissement était la filière la plus émettrice de GES (0,90 t éq. CO₂ t⁻¹ BP secs), alors que les émissions étaient inférieures pour l'épandage (0,12 t éq. CO₂ t⁻¹ BP secs) et la combustion (0,00057-0,13 t éq. CO₂ t⁻¹ BP secs). L'épandage agricole et la combustion seraient de bonnes alternatives à l'enfouissement pour atténuer les émissions de GES. Toutefois, il serait nécessaire de multiplier les mesures d'émissions pour en augmenter la précision et assurer des scénarios robustes si l'on vise à initier l'élaboration d'un nouveau protocole d'obtention de crédits compensatoires pour le système de plafonnement et d'échange de droits d'émission de GES au Québec.

Mots clés : Biosolides de papetières, enfouissement, épandage agricole, valorisation énergétique, gaz à effet de serre, matière organique résiduelle

Abstract

Pulp and paper mill sludge (PPMS) is an organic residual generated from the paper mill wastewater treatments. The Quebec's government policies aim to reduce the greenhouse gas emissions (GHG) by 20% below the level of 1990 and to ban disposal (landfilling and incineration without energy recovery) of organic material by 2020, which will likely affect PPMS management. This study aims at quantifying GHG emissions from the three main practices currently used to manage PPMS: landfilling, land application in agriculture and combustion for energy recovery. GHG emissions from landfilling were measured at the pilot-scale and those from land were measured following PPMS application at rates based on local agronomic recommendations. GHG emissions from combustion were measured at the chimney of biomass boilers using 10 to 40% PPMS in the fuel. Landfilling had the highest GHG emissions (0.90 t CO₂e t⁻¹ dry PPMS) whereas those from land application (0.12 t CO₂e t⁻¹ dry PPMS) and combustion (0.00057-0.13 t CO₂e t⁻¹ dry PPMS) were lower. Application of PPMS to agricultural land and combustion would therefore be good alternatives to landfilling to abate GHG emissions. However, more measurements would be required to increase the accuracy on the emission quantifications and start building a new offset credit protocol to be used in the Quebec cap-and-trade system for GHG emission allowances applied bylaw.

Keywords: Pulp and paper mill sludge, landfilling, land application in agriculture, energy recovery, greenhouse gas, organic residual

Il faudra mesurer les émissions de GES de l'enfouissement sur des sites industriels afin de mieux caractériser son impact climatique.

INTRODUCTION

Les biosolides de papeteries (BP) sont des matières organiques résiduelles provenant du processus d'épuration des effluents de l'industrie des pâtes et papiers. La production mondiale annuelle de papier et carton est estimée à 400 millions de tonnes (FAOSTAT, 2014) et devrait atteindre 550 millions de tonnes d'ici 2050, ce qui augmenterait la production de BP de 46-86 % comparativement au taux actuel (Mabee et Roy, 2003). Au Québec, la production annuelle de pâtes, papiers et cartons est de 7 millions de tonnes, soit 34 % de la production canadienne (CIFQ, 2013). La gestion des BP a des impacts économiques, environnementaux et sociaux (Primeau, 2014) qui augmentent probablement dans le futur si des mesures ne sont pas prises pour les quantifier et les réduire plus vite que la production de papier n'augmente selon le marché. Parmi ces impacts, les émissions de gaz à effet de serre (GES) résultant de la disposition de ces matières organiques sont préoccupantes dans un contexte de changements climatiques. Certaines juridictions tendent à réduire ou interdire l'enfouissement de matières organiques résiduelles en améliorant l'efficacité de l'utilisation des ressources et le recyclage (Monte *et al.*, 2009; MDDEP, 2011; Gouvernement du Québec, 2012). Les émissions actuelles des GES provenant de la gestion des BP sont inconnues au Québec et gagneraient à être estimées. Cela revêt une importance particulière dans un contexte de réduction ou d'interdiction de l'élimination par l'enfouissement; les BP devant dès lors être détournés vers d'autres modes de gestion.

Les filières actuelles et communes de gestion des BP sont l'élimination par l'enfouissement, le recyclage par l'épandage sur sol agricole et la combustion avec récupération de chaleur (aussi appelée valorisation énergétique; CANMET, 2005; Camberato *et al.*, 2006; Primeau, 2014; MDDELCC, 2015). En 2012 au Québec, la production annuelle de 1,4 million de tonnes de BP était gérée à 29 % par enfouissement, 31 % par épandage sur sol agricole, 35 % par la combustion et 5 % par d'autres filières dont le compostage (MDDELCC, 2015). Ce portrait est appelé à changer alors que la Politique québécoise de gestion des matières

résiduelles (PQGMR) vise à bannir la matière organique des lieux d'élimination d'ici 2020 (MDDEP, 2011). Pour sa part, le plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques (PACC) vise à réduire de 20 % les émissions de GES par rapport au niveau de 1990 (Gouvernement du Québec, 2012). Ces objectifs affecteront la gestion des BP puisque l'industrie des pâtes et papiers génère le quart de la matière organique dans la province (RECYC-QUÉBEC, 2014) et que les fabriques de pâtes et papiers figurent parmi les grands émetteurs finaux de GES visés par le marché Western Climate Initiative (WCI) auquel le Québec a souscrit en 2012.

Cette étude vise à quantifier les émissions de GES provenant des trois principales filières de gestion des BP appliquées par l'industrie au Québec : l'enfouissement, l'épandage sur sol agricole et la combustion avec récupération de chaleur. Très peu de données existent sur les émissions de GES provenant de la gestion des BP au Québec ou en Amérique du Nord. La réduction ou l'interdiction de l'enfouissement pourrait représenter une mesure d'atténuation potentielle des émissions de GES, surtout dans le contexte nord-américain (Fischedick *et al.*, 2014). L'impact de l'industrie des pâtes et papiers sur les changements climatiques peut être estimé en calculant les émissions de GES à l'aide de modèles tels que celui élaboré par le *National Council for Air and Stream Improvement* (NCASI, 2005). Toutefois, les émissions de GES spécifiques à chaque filière de gestion des BP ne sont pas connues ou ne sont pas considérées dans le modèle actuel du NCASI, ni dans les lignes directrices du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2006). Ainsi, des mesures directes des émissions de GES liées aux filières de gestion des BP pourraient être intégrées dans des bases de données comme celle de Ecoinvent (Ecoinvent, 2013) ou servir à élaborer un nouveau modèle similaire au modèle d'évaluation des émissions associées aux biosolides municipaux (SYLVIS, 2009; Brown *et al.*, 2010). Une estimation des émissions de GES associées à la gestion des BP est essentielle à la planification responsable des changements de gestion qui devront faire suite à la réduction ou à l'interdiction de l'enfouissement.

ARTICLE SCIENTIFIQUE

La gestion des biosolides de papetières au Québec : quelle serait la meilleure option pour réduire les émissions de gaz à effet de serre?

MATÉRIEL ET MÉTHODES

GES mesurés

Les GES mesurés dans cette étude sont le protoxyde d'azote (N_2O), le méthane (CH_4) et le dioxyde de carbone (CO_2). Ces GES sont présentés en émissions d'équivalent (éq.) CO_2 incluant les émissions non biogéniques de CO_2 et les émissions biogéniques et non biogéniques de N_2O et de CH_4 . L'équivalent CO_2 d'un GES est calculé selon son potentiel de réchauffement global (PRG). Les PRG pour le N_2O , CH_4 et CO_2 sont de 265, 28 et 1, respectivement (IPCC, 2013). Les émissions de GES des trois filières de gestion de BP ont été comparées en utilisant l'unité de $t \text{ éq. } CO_2 \text{ t}^{-1} \text{ BP secs}$.

Mesure et analyse des émissions de GES de l'enfouissement et de l'épandage sur sol agricole

Il n'a pas été possible de mesurer les émissions de GES sur un site d'enfouissement sanitaire à l'échelle industrielle, chez une papetière, pour des raisons de sécurité et de logistique. Les dispositifs expérimentaux d'enfouissement et

d'épandage sur sol agricole étaient installés sur une parcelle de la ferme expérimentale du Collège d'Alma (Alma, Qc; 48°30'N, 71°35'O). Le dispositif expérimental d'enfouissement, à l'échelle pilote, était composé de six fosses de 8 m^3 ($2 \times 2 \times 2 \text{ m}$) construites le 15 mai 2013. Trois fosses contenaient des BP mixtes (mélange de BP primaires-secondaires) de la papetière Produits forestiers Résolu (PFR) Kénogami et les trois autres, des BP mixtes à dominance primaire (nommés ci-après BP primaires) de la papetière PFR Alma (tableau 1); la provenance des BP étant l'effet (traitement) étudié. La caractérisation physicochimique des BP a été faite au laboratoire privé AgroEnviroLab (Sainte-Anne-de-la-Pocatière, Qc, Canada; tableau 1). La structure des fosses avait pour objectif de recréer des conditions observées dans un site d'enfouissement à l'échelle industrielle. Pour ce faire, les parois des fosses ont été recouvertes d'une membrane en polythène imperméable aux gaz et à l'eau pour maintenir des conditions anaérobies, typiques d'un site d'enfouissement sanitaire, et empêcher tout flux de gaz latéral.

TABLEAU 1

Caractéristiques physicochimiques (moyenne, $n = 3$) des biosolides de papetières (BP) des fosses d'enfouissement installées à la ferme expérimentale du Collège d'Alma (Alma, Qc) contenant des BP provenant de PFR Kénogami et PFR Alma. Les BP ont été prélevés les 23 octobre 2013 et 30 octobre 2014.

VARIABLES	PROFONDEUR DE PRÉLÈVEMENT [M]	2013		2014	
		Provenance des BP		Provenance des BP	
		PFR Kénogami	PFR Alma	PFR Kénogami	PFR Alma
Siccité [%]	0-0,2	28,5	20,5	27,5	21,0
	0,75-1,25	18,4	14,5	18,4	15,0
	1,5-2,0	18,9	14,9	ND	ND
Rapport C : N	0-0,2	25,2	46,3	27,8	45,4
	0,75-1,25	15,3	61,7	20,7	64,4
	1,5-2,0	15,9	56,1	ND	ND
pH	0-0,2	5,0	6,0	4,6	6,7
	0,75-1,25	8,3	4,9	8,2	5,9
	1,5-2,0	7,6	4,8	ND	ND
Densité [g BP secs cm^{-3}]	0,75-1,25	ND	ND	0,179	0,152

ND : non déterminé

TABLEAU 2

Description des traitements appliqués sur le dispositif d'épandage de biosolides de papetières (BP) mixtes provenant de PFR Kénogami sur un sol agricole à la ferme expérimentale du Collège d'Alma (Alma, Qc) pour les saisons de mesure 2013-2014.

TRAITEMENT ^a	DOSES DE BP		AZOTE [kg N ha ⁻¹]				
	t BP humides ha ⁻¹	t BP secs ha ⁻¹	N-BP disponible ^b	N-engrais minéral	N-Sol	N-Total disponible	N-Total incorporé
Saison 2013							
Témoin	0	0	0	0	10,5	10,5	0
BP mixtes	37	15	54,8	54,8	10,5	120	376,1
Saison 2014							
Témoin	0	0	0	0	10,5	10,5	0
BP mixtes	29	8	29,4	82,1	10,5	122	255,0

^aD'autres traitements étaient appliqués mais ils ne sont pas présentés dans cet article.

^bSelon le coefficient d'efficacité de 0,17 et un facteur de perte d'efficacité de 1 pour une culture de blé (CRAAQ, 2010).

La toile de polythène avait une ouverture au bas afin de permettre un léger drainage de la fosse. Un gravier a été versé sous les BP, sur la toile de polythène, afin de servir de zone tampon et éviter une accumulation d'eau qui aurait créé des conditions anaérobies anormalement prolongées et non représentatives.

Le dispositif d'épandage était installé sur un sol lourd de type loam argileux (argile 34 %, sable 34 %, limon 32 %). Ce dispositif était composé d'unités témoins et d'un traitement d'épandage et d'incorporation de BP mixtes (provenant de PFR Kénogami) au sol. Les traitements étaient répliqués sur trois blocs complets aléatoires. Les unités expérimentales avaient une dimension de 4 m² (2 x 2 m). Le dispositif et la parcelle agricole ont été ensemencés avec une culture de blé (variété Touran) à un taux de 180 kg ha⁻¹ en 2013 et 2014. Le traitement de fertilisation suivait l'approche agronomique en combinant les BP mixtes et de l'engrais minéral azoté visant à combler le besoin optimal en azote du blé de 120 kg N ha⁻¹, en considérant la fertilité du sol et les coefficients de perte attribués à l'épandage de BP (tableau 2; CRAAQ, 2010). Les doses de BP correspondaient à la dose moyenne appliquée par la pratique agronomique de 31 t BP humides ha⁻¹ avec ajout d'engrais azoté (Larose et Hébert, 2014). La caractérisation physicochimique des BP et du sol (analyse de fertilité) ont été faites par le laboratoire AgroEnviroLab. En 2013, les biosolides avaient un pH de 7,8, une siccité de 40,2 % et un rapport C : N de 17,8; en 2014, ces valeurs étaient de 8,5, 27,7 % et 17,2. Un dispositif a été installé le 28 mai 2013 et répété sur une nouvelle superficie de la parcelle agricole le 28 mai 2014 (tableau 2).

Les émissions de GES ont été mesurées durant la saison de croissance, en absence de couvert nival, sur les dispositifs d'enfouissement et d'épandage par la méthode de chambre statique

développée par Rochette et Bertrand (2008). Brièvement, les chambres (enfouissement : longueur 0,55 m x largeur 0,55 m x hauteur 0,15 m; épandage : 0,75 m x 0,15 m x 0,15 m) étaient déposées chaque jour de mesure sur une base (mêmes dimensions que la chambre) insérée de façon permanente pour la saison à 0,1 m de profondeur dans le sol ou dans les BP entreposés dans les fosses. Les échantillons d'air étaient analysés par chromatographie en phase gazeuse à l'aide d'un détecteur à ionisation de flamme (CO₂ et CH₄) et d'un détecteur à capture d'électrons (N₂O). Les mesures des émissions de GES ont été prises sur un total de 25 à 33 jours en 2013 et 2014 sur les deux dispositifs, entre 9 h 00 et 12 h 00, selon une fréquence plus intense en début qu'en fin de saison (Chantigny *et al.*, 2013).

Le cumul des émissions de GES des saisons 2013 et 2014 a été utilisé pour la comparaison entre les filières. Pour l'enfouissement, les émissions en éq. CO₂ incluaient les émissions de N₂O et CH₄ biogéniques. La masse de référence pour l'estimation des émissions était celle contenue dans une couche de 0,5 m dont la densité a été mesurée pour chaque fosse entre 0,75-1,25 m de profondeur (tableau 1). Pour l'épandage, seules les émissions de N₂O biogéniques ont été comptabilisées en éq. CO₂ puisque les émissions de CH₄ étaient négligeables tel que démontré dans la littérature (Jones *et al.*, 2006). Les émissions du fertilisant (combinaison BP-engrais azoté) doivent être isolées de celles provenant du sol. Les facteurs d'émissions du N₂O ont été calculés sur la base des émissions de N₂O-N (azote émis sous forme de N₂O sur une base d'azote) induites par le fertilisant en fonction du N total appliqué au sol par le fertilisant, soit le facteur d'émission de N₂O-N induite par le fertilisant (FEIF-N₂O-N; GIÉC, 2006; Rochette *et al.*, 2008; Chantigny *et al.*, 2013).

L'enfouissement était la filière la plus émettrice de GES, à l'échelle pilote.

ARTICLE SCIENTIFIQUE

La gestion des biosolides de papetières au Québec :
quelle serait la meilleure option pour réduire les émissions de gaz à effet de serre?

Mesure et analyse des émissions de GES de la combustion

Les émissions de GES ont été mesurées en conditions réelles d'opération, à la cheminée de chaudières à biomasse de trois papetières pratiquant la combustion de BP mélangés aux autres composants du combustible. Les papetières sont nommées ci-après 1, 2 et 3 afin de respecter l'entente de confidentialité. Les conditions d'opération et la nature des combustibles aux trois papetières sont présentées au tableau 3.

Les mesures des émissions de GES aux trois papetières ont été effectuées par la firme Consulair avec un spectromètre infrarouge à transformée de Fourier (IRTF) selon la méthode USEPA 320 (USEPA, 1999). Il était essentiel de pouvoir isoler la contribution en GES des BP

lorsque mélangés à un combustible contenant d'autres résidus. Pour ce faire, les émissions biogéniques de N_2O et CH_4 issues de la combustion des biosolides ont été estimées en utilisant les taux de conversion de l'azote des BP en N_2O et du carbone en CH_4 . Ainsi, ces taux ont d'abord été calculés sur la base des émissions provenant de la combustion du combustible total, à savoir les BP plus les autres matières brûlées. L'hypothèse est que le taux de conversion de l'azote en N_2O et du carbone en CH_4 du combustible total est le même que pour les BP faisant partie du combustible.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

La filière de l'enfouissement de BP mixtes était la plus émettrice de GES, avec un total de 0,90 t éq. CO_2 t⁻¹ BP secs, lorsque comparée avec l'épandage et la combustion (figure 1).

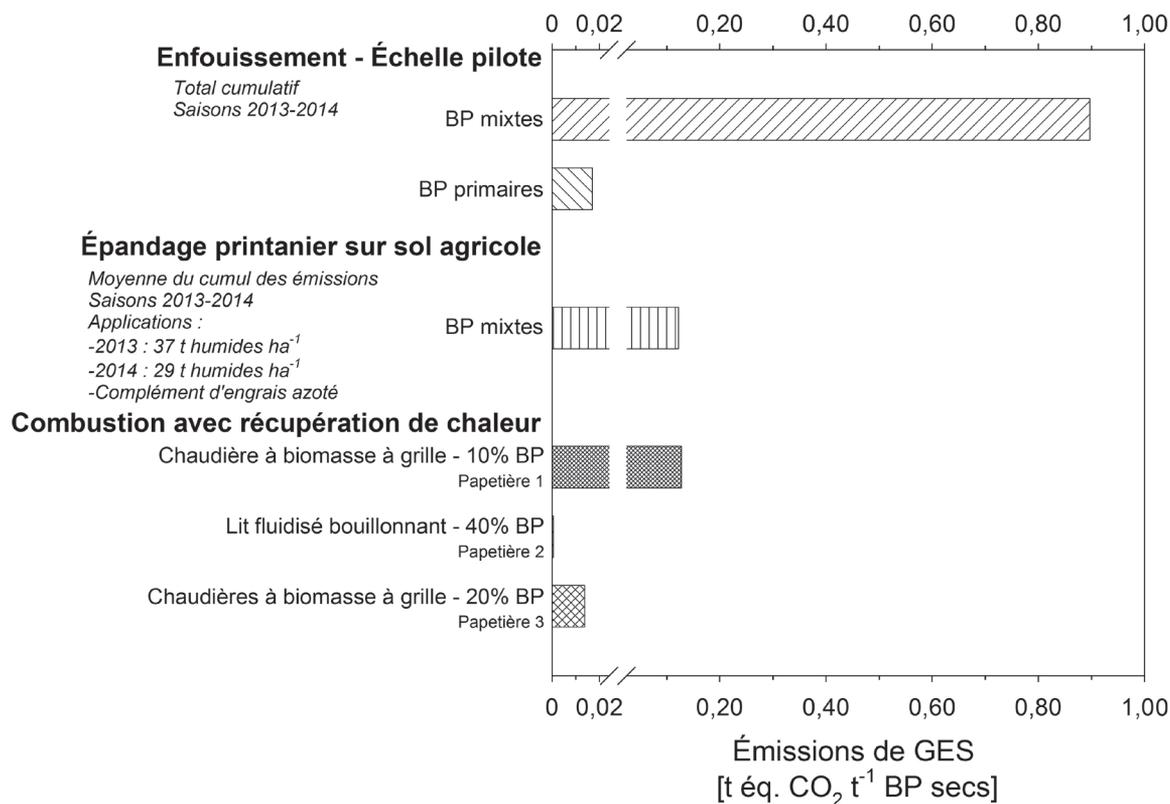
TABLEAU 3

Conditions d'opération des chaudières à biomasse et caractéristiques des combustibles lors de la mesure des émissions de GES provenant de la cheminée aux trois papetières pratiquant la combustion de biosolides de papetières (BP) mélangés au combustible.

PARAMÈTRES	PAPETIÈRE 1		PAPETIÈRE 2		PAPETIÈRE 3	
Type de chaudière	Chaudière à biomasse à grille		Lit fluidisé bouillonnant		Chaudières à biomasse à grille	
Date de la campagne de mesure	20 décembre 2012		29 janvier 2013		15 octobre 2014	
Période d'échantillonnage	9 h 05 – 12 h 19 (194 min)		12 h 06 – 14 h 59 (173 min)		18 h 50 – 21 h 50 (180 min)	
Fréquence de mesures des GES	1 min ⁻¹		2 min ⁻¹		1 min ⁻¹	
Température moyenne de combustion [°C]	993		Zone libre : 873		Chaudière 1 : 577 Chaudière 2 : 563	
Composition du combustible	-BP mixtes (primaires-secondaires) à dominance primaire		-BP (primaires-secondaires-désencrage)		-BP mixtes (primaires-secondaires)	
		10 %		40 %		20 %
	-Écorces	75 %	-Résidus de construction et démolition	29 %	-Écorces	80 %
	-Résidus de construction et démolition	15 %	-Résidus de dormant de chemin de fer	29 %		
			-Résidus de pneu	3 %		
<i>Caractéristiques des BP</i>						
Siccité [%]	24		44		32	
Alimentation [t sèches h ⁻¹]	1		8		0,6	
Rapport C : N	48		33		15	

FIGURE 1

Sommaire des émissions moyennes de GES provenant de la gestion de biosolides de papeteries (BP) par enfouissement (à l'échelle pilote), épandage printanier sur sol agricole et combustion avec récupération de chaleur.



Ces résultats semblent supporter l'orientation gouvernementale de bannir l'enfouissement de la matière organique dans le but d'en réduire les émissions de GES (MDDEP, 2011; Gouvernement du Québec, 2012). Un total de 0,017 t éq. CO₂ t⁻¹ BP secs a aussi été mesuré pour l'enfouissement de BP primaires (figure 1). Les différences d'émissions pourraient s'expliquer en grande partie par le type des BP. Le rapport C : N des BP primaires, supérieur à 40 : 1 (tableau 1), a probablement été responsable d'une immobilisation de l'azote dans les BP, ce qui s'est traduit par des émissions réduites de N₂O (Thangarajan *et al.*, 2013). Les BP secondaires, contenus dans les BP mixtes de PFR Kénogami, étaient probablement responsables de la présence d'une plus grande population de bactéries méthanogènes, ce qui expliquerait les plus grandes émissions de CH₄. Il est plutôt improbable que la faible émission des BP primaires puisse être représentative des émissions de BP gérés par enfouissement au Québec. Le traitement secondaire des effluents de papeteries, qui est impératif, génère des BP secondaires qui sont mélangés aux autres types

de BP. Ainsi, les émissions aux sites industriels d'enfouissement, qui incluent des BP secondaires, s'apparentent probablement davantage à celles mesurées pour les BP mixtes dans notre étude.

Certaines caractéristiques du dispositif d'enfouissement à l'échelle pilote tendent vers le constat que les émissions de GES mesurées seraient sous-estimées en comparaison avec l'enfouissement à l'échelle industrielle pour lequel aucune donnée n'est actuellement disponible, au meilleur de nos connaissances. Les fosses pilotes n'ont pas permis l'évaluation des effets de gestion du site, de la fenêtre temporelle réelle des émissions et de facteurs liés aux caractéristiques locales. La gestion d'un site d'enfouissement à l'échelle industrielle implique qu'il y ait un ajout régulier de biosolides sur plusieurs années et un compactage par la machinerie, ce qui n'était pas simulé par les fosses pilotes. La fenêtre temporelle des émissions mesurées à l'échelle pilote était pour deux saisons (excluant la période hivernale) et le dispositif ne permettait pas d'extrapoler des émissions pour les années à

La gestion des biosolides de papetières au Québec : quelle serait la meilleure option pour réduire les émissions de gaz à effet de serre?

venir. Ainsi, il est fort probable que les émissions à long terme de la gestion par enfouissement soient plus élevées que celles mesurées ici à l'échelle pilote en supposant que la décomposition anaérobie des matières organiques s'y poursuive, à l'instar de ce qui a été mesuré dans des sites d'enfouissement sanitaires municipaux (Brown *et al.*, 2010). Un suivi sur plusieurs années serait nécessaire pour établir une estimation à long terme des émissions de GES provenant de l'enfouissement. Les effets de la combinaison de facteurs liés aux caractéristiques locales d'un site d'enfouissement n'ont pas pu être évalués. Par exemple, l'effet de saison selon la région, la nature et l'abondance des précipitations et les caractéristiques édaphiques d'un site (régions à sols argileux vs sols légers) pourraient avoir une influence sur les émissions de GES.

Les émissions moyennes de la filière de l'épandage sur sol agricole étaient de 0,12 t éq. CO₂ t⁻¹ BP secs, et ce, pour des mesures sur deux saisons consécutives et un scénario d'épandage proche de la moyenne québécoise de 31 t humides ha⁻¹ (figure 1; Larose et Hébert, 2014). Le FEIF-N₂O-N moyen était de 1 % d'azote émis sous forme de N₂O, soit le même facteur que celui recommandé par le GIEC (2006) et similaire à celui de 0,9 % calculé dans l'étude de Chantigny *et al.* (2013) pour des émissions de N₂O provenant de l'épandage de BP mixtes sur un sol de type lourd (type de sol utilisé dans la présente étude). La fenêtre temporelle des émissions de GES mesurées dans le dispositif d'épandage est d'une année. L'utilisation du FEIF-N₂O-N permet d'estimer des émissions de N₂O complètes et définitives en fonction de l'azote total appliqué au sol (GIEC, 2006). Ainsi, les émissions de GES estimées dans la présente étude sont complètes et définitives dans le temps pour l'épandage agricole. Bien que le facteur d'émission mesuré soit comparable à ceux retrouvés dans la littérature, il est important de mettre en perspective que la présente étude est seulement la deuxième du genre au Canada à être publiée (Chantigny *et al.*, 2013) et possiblement la troisième au monde (Baggs *et al.*, 2002), au meilleur de nos connaissances. Les émissions de N₂O des sols agricoles sont variables parce qu'issues de processus complexes (Thangarajan

et al., 2013) et appellent à une poursuite de la recherche dans ce domaine.

Les émissions maximales de la combustion étaient de 0,13 t éq. CO₂ t⁻¹ BP secs à la papetière 1 (figure 1). Des émissions beaucoup plus faibles de 0,014 t éq. CO₂ t⁻¹ BP secs et de 0,00057 t éq. CO₂ t⁻¹ BP secs ont aussi été mesurées aux papetières 3 et 2, respectivement. Ces émissions de GES sont plus faibles que celles provenant de l'enfouissement et du même ordre de grandeur, ou sinon plus faibles, que de l'épandage agricole. Les conditions d'opération entre les chaudières à biomasse des trois papetières échantillonnées étaient variables. Des conditions d'opération différentes sont également observées dans les autres papetières qui pratiquent la combustion de BP au Québec. Pour le moment, il est difficile de quantifier l'influence des différentes conditions d'opération sur les émissions de GES. Selon cette perspective, il est plus que probable que les émissions de GES soient différentes d'une papetière à l'autre, empêchant l'application d'une moyenne globale d'émissions de GES à toutes les papetières québécoises.

Il a été déterminé que les émissions de N₂O atteignent un maximum à une température avoisinant 727 °C et qu'elles sont négligeables sous 527 °C ou au-dessus de 927 °C (IEA GHG R&D, 2000). L'effet de la température critique d'environ 727 °C n'a pu être mesuré dans le cas des trois papetières échantillonnées (tableau 3). De plus, il ne semblait pas avoir de corrélation entre les émissions de GES et la proportion de BP dans le combustible (variant entre 10 et 40 %). Un effort d'échantillonnage plus grand aurait pu éclaircir cette absence de corrélation, mais ce n'était pas possible dans le cadre de la présente étude. Des efforts d'échantillonnage sur plusieurs chaudières à biomasse de papetières et sur plus d'une journée pourraient amener des éléments de réponse (Suzuki *et al.*, 2003; NCASI, 2012). Il pourrait s'avérer nécessaire d'augmenter la pression d'échantillonnage, afin de mesurer l'effet d'une plage de température critique et d'augmenter la précision des données sur les émissions de GES issues de la combustion de BP. Toutefois, les coûts occasionnés par de telles campagnes d'échantillonnage devraient être

évalués et considérés compte tenu des résultats obtenus dans la présente étude et en fonction des bénéfices à mieux préciser les émissions. Les mesures prises aux trois papeteries établissent un ordre de grandeur pour les émissions de GES associées à la combustion de BP.

CONCLUSION

Les émissions de GES de l'enfouissement étaient les plus élevées, totalisant 0,90 t éq. CO₂ t⁻¹ BP secs, soit nettement supérieures à celles de l'épandage (0,12 t éq. CO₂ t⁻¹ BP secs) et de la combustion (0,00057-0,13 t éq. CO₂ t⁻¹ BP secs). Il est important de mettre en perspective que les mesures d'émissions de GES effectuées dans la présente étude excluent les émissions provenant des opérations en amont ou en aval de la manipulation des BP pour chacune des filières étudiées, ce qui devrait être considéré par une approche d'analyse de cycle de vie. Très peu de données, sinon aucune, n'existent dans la littérature sur les émissions de GES provenant de la combustion de BP mélangés à un combustible, de même que sur la décomposition de BP gérés par enfouissement ou épandage agricole. Une analyse de développement durable serait également nécessaire afin d'évaluer en profondeur les dimensions environnementale/écologique, sociale, économique, éthique et de gouvernance de ces trois filières (p. ex., Villeneuve et Riffon, 2011a, b).

Il est toutefois possible d'avancer certaines recommandations pour les décideurs en se basant sur les tendances observées et en considérant les limites de l'étude. Ainsi, les fortes émissions de GES de la filière de l'enfouissement pour les BP mixtes semblent conforter l'objectif du bannissement de l'enfouissement de BP mixtes afin de répondre aux objectifs du PACC 2013-2020 et de la PQGMR (MDDEP, 2011; Gouvernement du Québec, 2012). Il est toutefois recommandé de poursuivre la recherche et de mesurer les émissions de GES sur des sites d'enfouissement à l'échelle industrielle afin de mieux caractériser l'impact climatique de ce scénario de référence. Les émissions de GES mesurées pour les filières de l'épandage agricole et de la combustion incitent pour le moment à recommander la poursuite de ces pratiques

En termes de GES, l'épandage agricole et la combustion seraient de bonnes alternatives à l'enfouissement.

comme alternatives à l'enfouissement afin de diminuer les émissions de GES. Toutefois, une multiplication des mesures de GES serait aussi recommandable pour augmenter la précision des émissions et assurer des scénarios robustes si l'on vise à initier l'élaboration d'un nouveau protocole d'obtention de crédits compensatoires pour le système de plafonnement et d'échange de droits d'émission de GES en vigueur au Québec.

REMERCIEMENTS

Nous remercions le ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) qui a financé cette étude et apporté d'importantes contributions en nature. Nous remercions aussi le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec qui a contribué à une partie du financement. Les résultats et conclusions de cette étude relèvent toutefois uniquement des auteurs. Nous remercions Marc Hébert, agronome, responsable des matières résiduelles fertilisantes au MDDELCC, pour sa collaboration. Nous remercions le Conseil de l'industrie forestière du Québec pour son appui et sa collaboration. Finalement, nous remercions nos partenaires opérationnels qui ont permis les mesures des émissions de GES sur le terrain : les papeteries PFR Kénogami et Alma, les papeteries 1 à 3, Agrinova et le Collège d'Alma. ■

ARTICLE SCIENTIFIQUE

La gestion des biosolides de papetières au Québec :
quelle serait la meilleure option pour réduire les émissions de gaz à effet de serre?

RÉFÉRENCES

- Baggs, E.M., R.M. Rees, K. Castle, A. Scott, K.A. Smith et A.J.A. Vinten. (2002). « Nitrous oxide release from soils receiving N-rich crop residues and paper mill sludge in eastern Scotland ». *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 90, p. 109-123.
- Brown, S., N. Beecher et A. Carpenter. (2010). « Calculator tool for determining greenhouse gas emissions for biosolids processing and end use ». *Environmental Science and Technology*, 44, p. 9509-9515.
- Camberato, J.J., B. Gagnon, D.A. Angers, M.H. Chantigny et W.L. Pan. (2006). « Pulp and paper mill by-products as soil amendments and plant nutrient sources ». *Canadian Journal of Soil Science*, 86, p. 641-653.
- CANMET. (2005). *Pulp and paper sludge to energy – preliminary assessment of technologies*. Natural Resources Canada, CANMET Energy. Report (34) 0173e479.1. 152 p.
- Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). (2010). *Guide de référence en fertilisation – 2^e édition*. Parent L-E et Gagné G, éditeurs. Québec, Qc, 473 p.
- Chantigny, M.H., D.E. Pelster, M.-H. Perron, P. Rochette, D.A. Angers, L.-É. Parent, D. Massé et N. Ziadi. (2013). « Nitrous oxide emissions from clayey soils amended with paper sludges and biosolids of separated pig slurry ». *Journal of Environmental Quality*, 42, p. 30-39.
- Conseil de l'industrie forestière du Québec (CIFQ). (2013). *Statistiques. Siège de résineux et de feuillus. Pâtes, papiers, cartons et panneaux*. Québec, Québec, 10 p.
- Ecoinvent. (2013). Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Ecoinvent database version 3.1. Zürich, Suisse.
- Fischedick, M., J. Roy, A. Abdel-Aziz, A. Acquaye, J.M. Allwood, J.-P. Ceron, Y. Geng, H. Kheshgi, A. Lanza, D. Perczyk, L. Price, E. Santalla, C. Sheinbaum et K. Tanaka. (2014). *Industry*. Chapitre 10 dans *Climate change 2014: Mitigation of climate change*. Contribution of working group III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, É-U. p. 739-810.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations – Statistics Division (FAOSTAT). (2014). Domain forestry. Base de données accédée en octobre 2014 : <http://faostat3.fao.org/download/F/FO/E>.
- Gouvernement du Québec. (2012). *Le Québec en action vert 2020. Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques. Phase 1*. 55 p.
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2006). *Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre*. Institut des stratégies environnementales mondiales, Hayama, Japon.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2013). *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, É-U. 1535 p.
- International Energy Agency Greenhouse Gas R&D Programme (IEA GHG R&D). (2000). *Abatement of other greenhouse gases – nitrous oxide. Report number PH3/29*. 85 p.
- Jones, S.K., R.M. Rees, D. Kosmas, B.C. Ball et U.M. Skiba. (2006). « Carbon sequestration in a temperate grassland; management and climatic controls ». *Soil Use and Management*, 22, p. 132-142.
- Larose, M. et M. Hébert. (2014). *Bilan 2012 du recyclage des matières résiduelles fertilisantes*. Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, Québec, Québec, 40 p.
- Mabee, W. et D.N. Roy. (2003). « Modeling the role of papermill sludge in the organic carbon cycle of paper products ». *Environmental Reviews*, 11, p. 1-16.
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). (2015). *Bilan annuel de conformité environnementale 2012. Secteur des pâtes et papiers*. Québec, Québec, 74 p.
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP). (2011). *Politique québécoise de gestion des matières résiduelles. Plan d'action 2011-2015*. Québec, Québec, 33 p.
- Monte, M.C., E. Fuente, A. Blanco et C. Negro. (2009). « Waste management from pulp and paper production in the European Union ». *Waste Management*, 29, p. 293-308.
- National Council for Air and Stream Improvement (NCASI). (2012). *Methane and nitrous oxide emissions from biomass-fired boilers and recovery furnaces*. Technical bulletin no. 0998. Research Triangle Park, NC, 30 p.
- NCASI. (2005). *Calculation tools for estimating greenhouse gas emissions from pulp and paper mills*. Report version 1.1. A project of the climate change working group of the International Council of Forest and Paper Associations. Research Triangle Park, NC, 140 p.
- Primeau, C. (2014). *Modes de gestion des biosolides des usines de pâtes et papiers au Québec : analyse comparative*. Mémoire – Maîtrise en Environnement. Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, 94 p.
- RECYC-QUÉBEC. (2014). Bilan 2012 de la gestion des matières résiduelles au Québec. Québec, Québec, 31 p.
- Rochette, P. et N. Bertrand. (2008). *Soil-surface gas emissions*. Dans Carter, M. et Gregorich, E.G., éditeurs. Soil sampling and methods of analysis. CRC Press, Boca Raton, FL, 851-861 p.
- Rochette, P., D.E. Worth, R.L. Lemke, B.G. McConkey, D.J. Pennock, C. Wagner-Riddle et R.J. Desjardins. (2008). « Estimation of N₂O emissions from agricultural soils in Canada. I. Development of a country-specific methodology ». *Canadian Journal of Soil Science*, 88, p. 641-654.
- Suzuki, Y., S.-I. Ochi, Y. Kawashima et R. Hiraide. (2003). « Determination of emission factors of nitrous oxide from fluidized bed sewage sludge incinerators by long-term continuous monitoring ». *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 36, p. 458-463.
- SYLVIS. (2009). *The biosolids emissions assessment model (BEAM): A method for determining greenhouse gas emissions from Canadian biosolids management practices*. New Westminster, Colombie-Britannique, 178 p.
- Thangarajan, R., N.S. Bolan, G. Tian, R. Naidu et A. Kunhikrishnan. (2013). « Role of organic amendment application on greenhouse gas emission from soil ». *Science of the Total Environment*, 465, p. 72-96.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). (1999). *Test method 320 – measurement of vapor phase organic and inorganic emissions by extractive Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy*. 109 p.
- Villeneuve, C. et O. Riffon, (2011a). *Comment réaliser une analyse de développement durable? Grille d'analyse de la Chaire de recherche en éco-conseil*. Département des sciences fondamentales, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, Québec.
- Villeneuve, C. et O. Riffon, (2011b). *Comment réaliser une analyse de développement durable? Guide d'utilisation de la grille d'analyse de la Chaire de recherche en éco-conseil*. Département des sciences fondamentales, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, Québec. 30 p.