

Écologie industrielle et lutte aux changements climatiques : applications pour le secteur forestier

Patrick Faubert, PhD

Professeur – Département des sciences fondamentales, Université du Québec à Chicoutimi

Codirecteur : Chaire en éco-conseil et Carbone boréal

Écologie industrielle et lutte aux changements climatiques

17^e Colloque du CEF

Université du Québec en Outaouais

1^{er} au 3 mai 2024



Patrick Faubert

Formation

- PhD en Sciences de l'environnement – University of Eastern Finland (2010)



- Maîtrise en biologie végétale – Université Laval (2004)



- Baccalauréat en biologie – Université Laval (2001)

Patrick Faubert

Thèmes de recherche

- **Mes recherches portent sur**
 - **Le développement de l'écologie industrielle**
 - Dans différents secteurs d'activités
 - Industries : pâtes et papiers, aluminium, minière, portuaire
 - Agriculture
 - Foresterie
 - **La lutte aux changements climatiques**
 - Par une gestion des GES
 - Quantification – Réduction – Compensation
 - **Échanges gazeux sol-atmosphère**
 - GES et composés organiques volatils
 - **Mes travaux touchent à plusieurs secteurs – Recherche transdisciplinaire**
 - Agriculture – Foresterie – Minier – Portuaire – Tourisme – Construction – Énergie – Gouvernemental – Santé
- **Membre régulier du CEF depuis octobre 2022**

Écologie industrielle pour le secteur forestier

- **L'écologie industrielle s'intègre à l'économie circulaire, dont les éléments importants sont :**

- **Les systèmes concernés**

- Production
- Échange
- Consommation

- **Les objectifs**

- **Utilisation optimale des ressources**
 - À toutes les étapes du cycle de vie d'un bien ou d'un service
- **Réduction des impacts environnementaux**
- **Impacts sur les personnes et la société**
 - Contribuer au bien-être des individus et des collectivités

Écologie industrielle

FIGURE 1 Schéma pédagogique de l'économie circulaire



Écologie industrielle pour le secteur forestier

Grands principes en écologie industrielle

Les résidus et/ou sous-produits d'une industrie

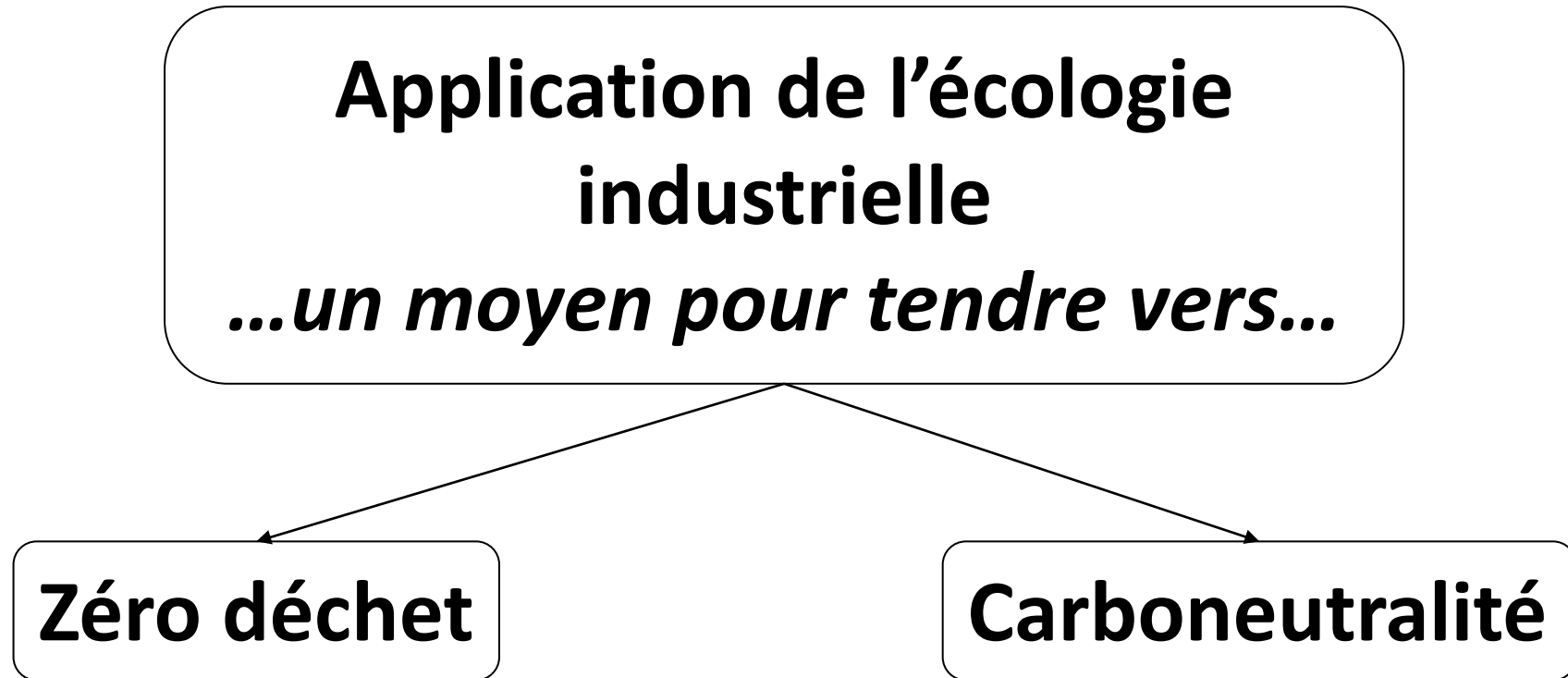


Matières premières pour une autre

Mutualisation des flux

- Flux entrants de matières et d'énergie
- Flux sortants pour le traitement de matières

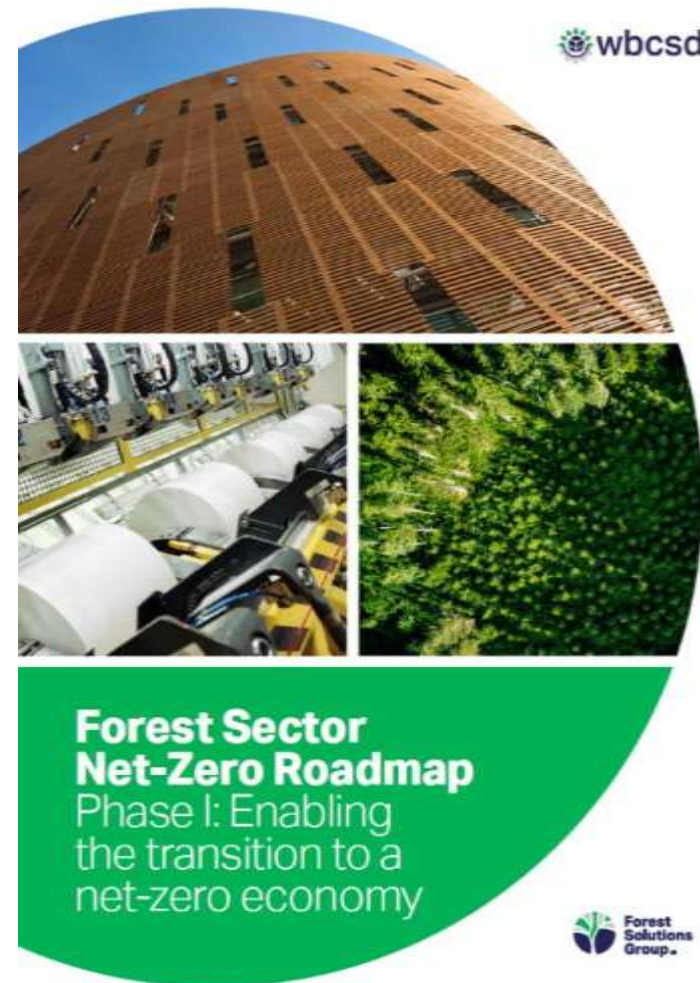
Écologie industrielle pour le secteur forestier



Écologie industrielle pour le secteur forestier

L'écologie industrielle pour le secteur forestier

- **Feuille de route 2021 du WBCSD**
(World Business Council for Sustainable Development)



Écologie industrielle pour le secteur forestier

Feuille de route du WBCSD pour le secteur forestier en 3 leviers

- **Réduction des GES des opérations** sur toute la chaîne de valeur
- **Augmentation de la séquestration du carbone** par un aménagement durable de la forêt et les produits du bois
- **Mise en oeuvre d'une économie circulaire** par la substitution de matière non-renouvelable par les produits de la forêt

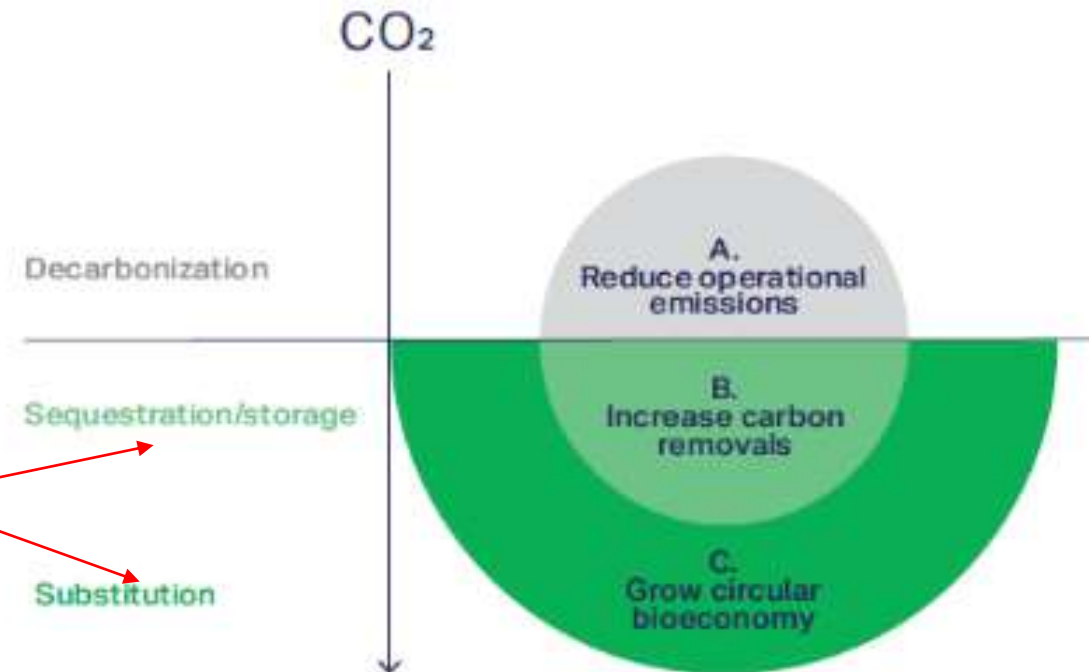
Écologie industrielle



Substitution



Figure 4: The forest sector's three levers of impact



Écologie industrielle
Recherche fondamentale et appliquée
Travaux de recherche réalisés et en cours depuis 2012

Gestion des biosolides de papetières
Quantification des émissions de GES
Un bilan



UQAC

Chaire en éco-conseil
Université du Québec à Chicoutimi

Que sont les biosolides de
papetières?

Biosolides de papetières (BP)

Sous-produits de la fabrication de pâtes et papiers

Matières organiques issues du traitement des eaux

BP Mixtes :
Primaires + secondaires



BP désencrage :
Recyclage du papier



Biosolides de papeteries (BP)

Sous-produits de la fabrication de pâtes et papiers

Matières organiques issues du traitement des eaux

BP Mixtes :
Primaires + secondaires

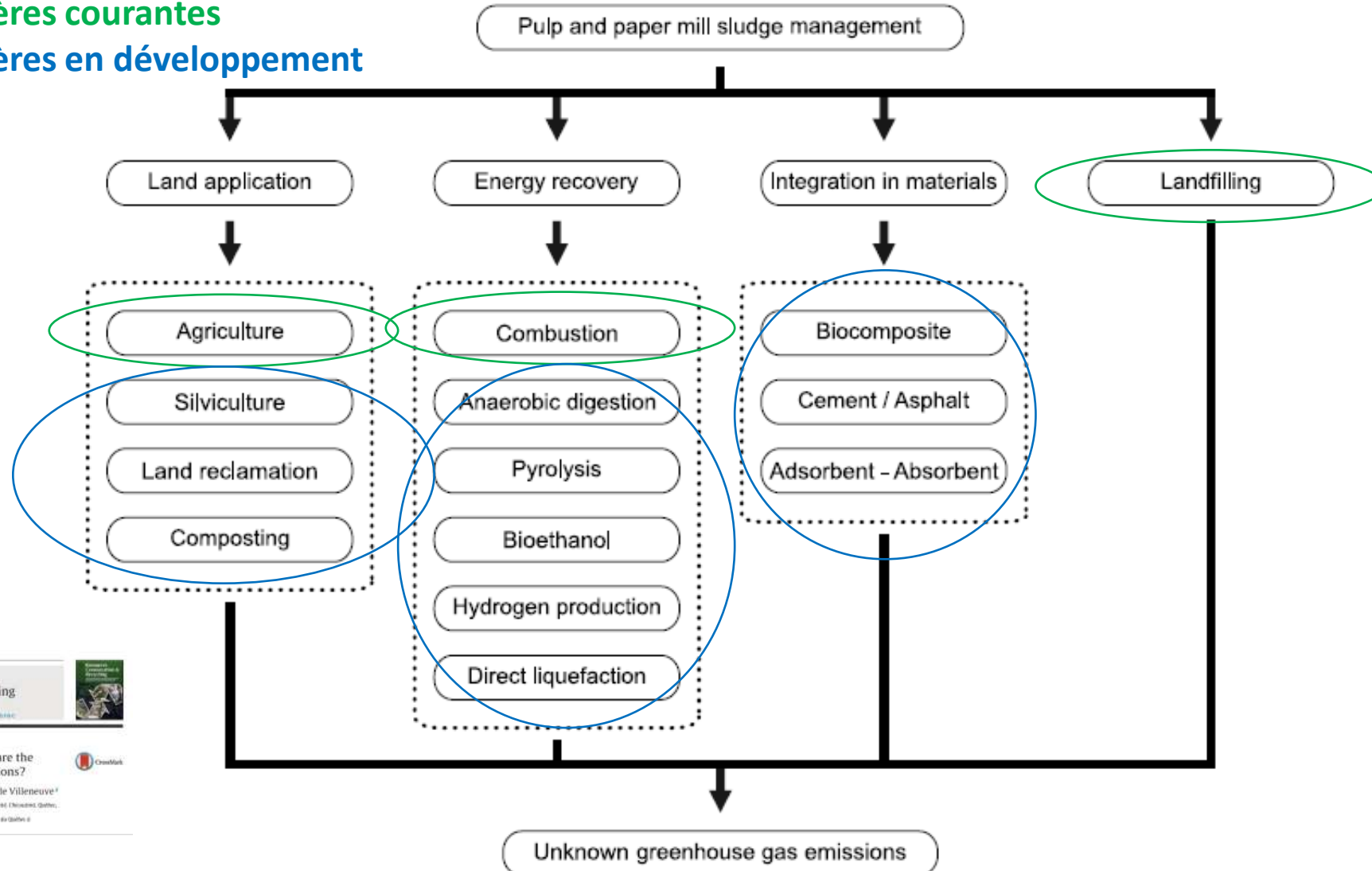


BP à l'étude dans nos projets de
quantification des GES

Portefeuille global de gestion des BP

Filières courantes

Filières en développement



Gestion des BP au Québec

Gisement : 0.9 M tonnes/an

Principales filières et objectif à long terme

	Élimination Enfouissement	Recyclage Épandage	Combustion/ Récupération de chaleur
2021	14%	48%	38%
Objectif à long terme	0%	-	-

Objectif principal

Quantifier les émissions de GES provenant des trois principales filières de gestion des BP au Québec :

Enfouissement



Épandage agricole



Combustion



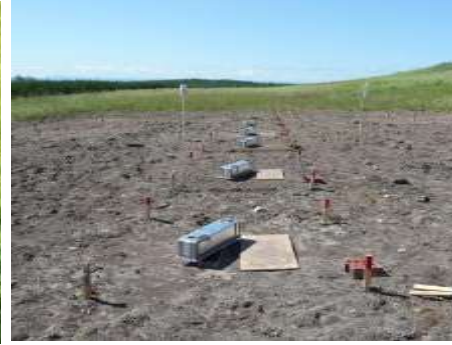
Sommaire : Méthodes

Enfouissement



- **Échelle pilote**
- **BP mixtes vs primaires**
 - Présentés ici : résultats des BP mixtes
- **GES mesurés durant 2 saisons sans neige :**
 - Mai/juin à Octobre
 - 25-33 jours
 - Intervalle de 1 à 2 semaines

Épandage agricole



- **BP « Frais »**
 - Directement de l'usine
 - Blé : N du fertilisant minéral substitué par N des BP à 0-25-50-75-100%
 - Application de N : 90-120 kg N ha⁻¹
- **BP enfouis et excavés**
 - Excavés d'un site d'enfouissement
 - Blé : mêmes traitements que pour BP frais
 - Sur terroir minier
 - Trèfle blanc : 0 et 500 à 1 500 kg N ha⁻¹
- **GES mesurés durant 2 saisons sans neige :**
 - Mai/juin à Octobre
 - 23-27 jours
 - 2-3 fois/semaine pour les 4 semaines suivant l'application et ensuite 1 fois/semaine à 1 fois/2 semaines

Combustion



- **3 usines**
- **Conditions de combustion différentes**
 - Proportions de BP dans la chaudière
 - Technologie de combustion
- **Mesures des GES : 1 ou 2 jours**
 - Principalement pour mesurer un ordre de grandeur¹⁶

GES mesurés

Facteurs d'émission de GES : $\text{N}_2\text{O} + \text{CH}_4$ rapportés en éq- CO_2
Unité : t éq- CO_2 t⁻¹ BP secs

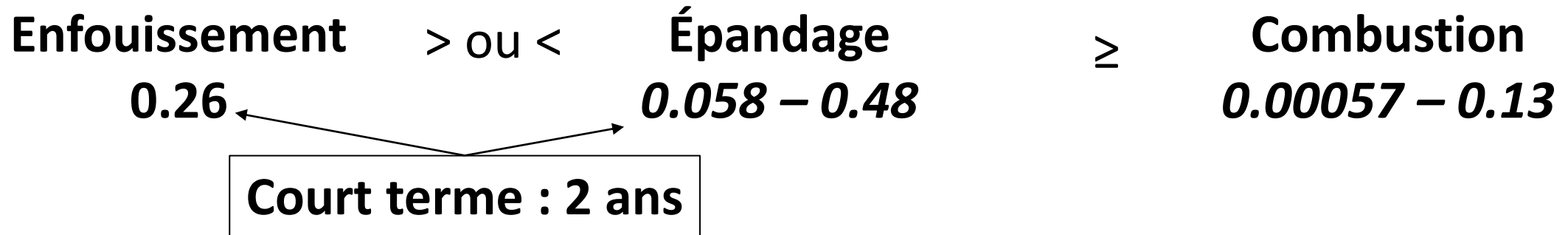
Calcul des facteurs d'émission :

- Enfouissement : Émissions cumulées d'une cellule / Masse sèche de BP
- Épandage : (Émissions cumulées du traitement – Émissions cumulées du CTL) / Masse sèche de BP
- Combustion : Émissions des BP / Masse sèche de BP

GES mesuré	Potentiel de réchauffement global (IPCC 2007)
N_2O	298
CH_4	25
CO_2	1

Sommaire des émissions de GES

Unité du facteur d'émission : $t \text{ éq-CO}_2 t^{-1} \text{ BP secs}$



Nouvelles connaissances :

- Émissions substantielles de N_2O de l'enfouissement (2% du N enfoui)
 - Cette source de N_2O est présentement négligée par les modèles

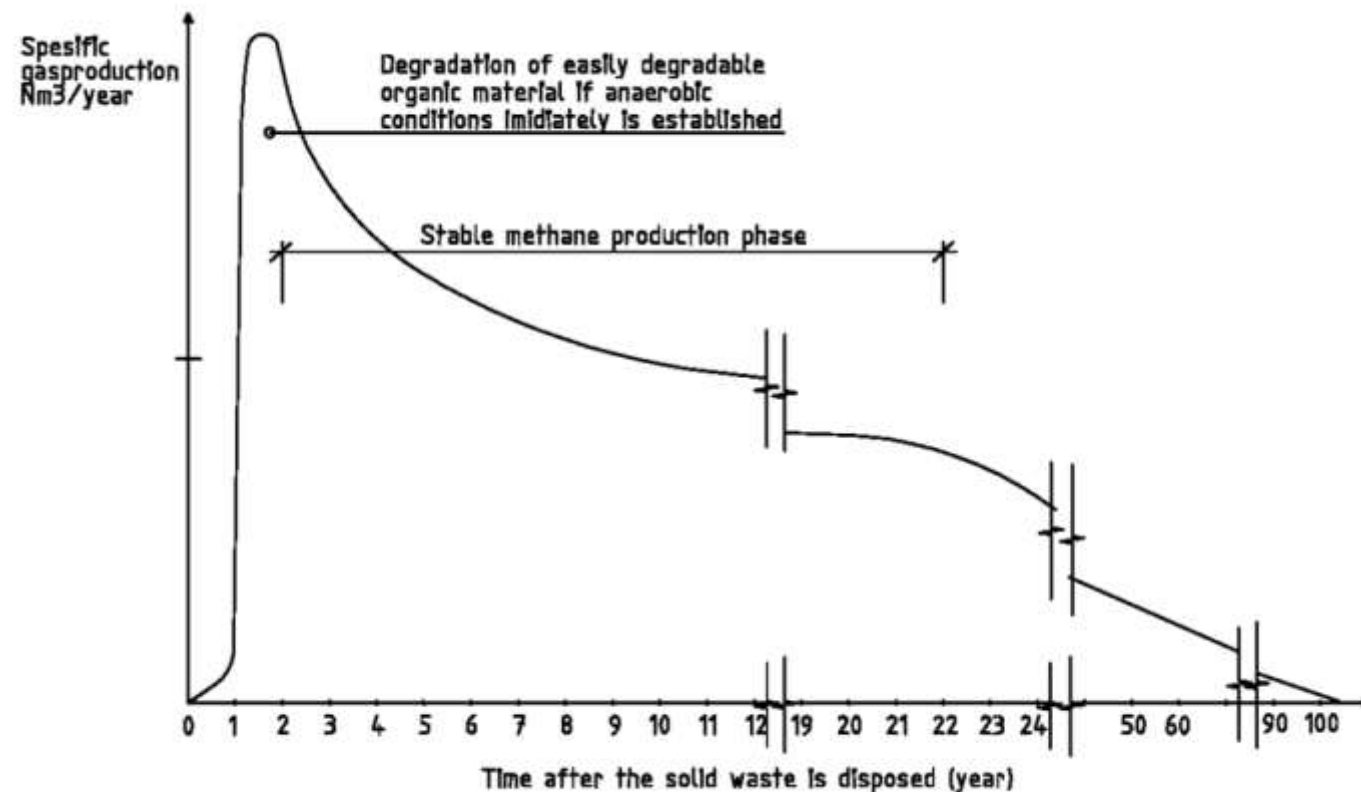
...MAIS... qu'en est-il des émissions à long terme?

Sommaire des émissions de GES

Enfouissement à long terme – projection

Évolution théorique des émissions de CH_4 de l'enfouissement – 100 ans

Principe de décomposition de premier ordre



Sommaire des émissions de GES

Unité du facteur d'émission : $t \text{ éq-CO}_2 t^{-1} \text{ BP secs}$

Enfouissement

Cour terme : 0.26

Estimé sur le long terme
pour 100 ans : 0.94 – 1.5

>

Épandage

0.058 – 0.48

≥

Combustion

0.00057 – 0.13

À long terme, l'enfouissement serait la filière la plus émettrice

GES de l'enfouissement jusqu'à 3 fois ↑ que l'épandage

Article à venir : émissions de GES à l'échelle industrielle

Projets en cours en écologie industrielle à l'UQAC liés au secteur forestier

Symbiose entre les industries du bleuet, de la forêt, des pâtes et papiers et de l'aluminium : fertilisation en forêt, bleuetière et haies brise-vent



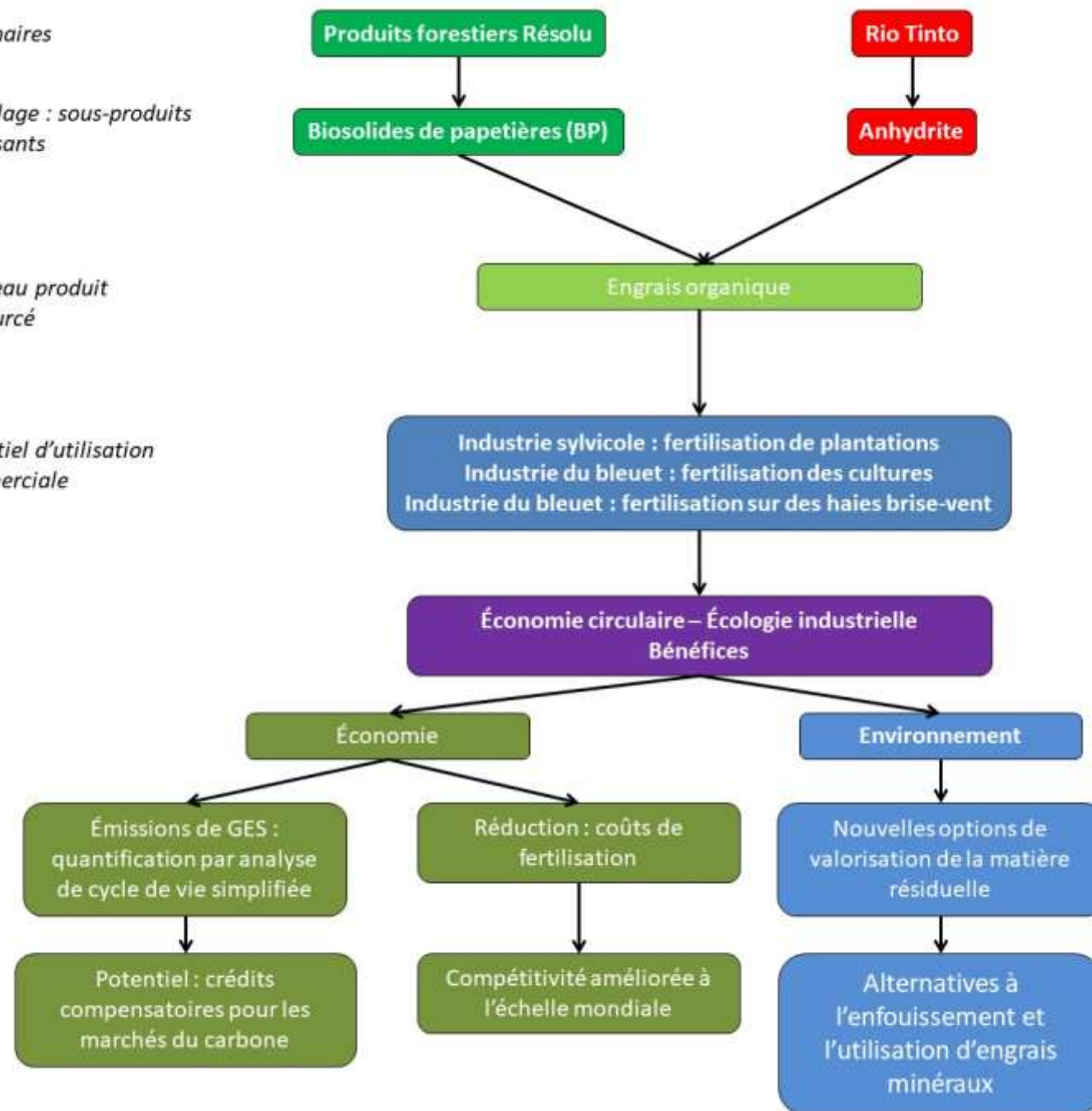
Laboratoire d'analyse
et de séparation des
essences végétales
(LASEVE)

Partenaires

Recyclage : sous-produits
fertilisants

Nouveau produit
biosourcé

Potentiel d'utilisation
commerciale



Anhydrite

- **Sulfate de calcium : CaSO_4**
 - Communément : anhydrite
- **Sous-produit de la production de fluorure d'aluminium**
 - Procédé similaire à la production d'anhydrite commerciale
- **Engrais homologué par l'Agence canadienne d'inspection des aliments (ACIA)**
- **Production annuelle au Saguenay–Lac-Saint-Jean**
 - 80 kt/an
- **L'anhydrite de RTA est présentement recyclée à 100%**
 - Recyclage chez RTA : en agriculture – dans l'industrie de la construction
- **Dans le monde, le sulfate de calcium est utilisé depuis > 250 ans en agriculture**
- **On cherche à diversifier le portefeuille de recyclage**
 - L'épandage sylvicole est une option prometteuse



Utilisation de cycles courts pour la gestion de sous-produits du bois et de l'aluminium

Biosolides de papetières + Anhydrite = Substitution d'engrais minéraux



Émissions de GES des biosolides de papetières
=
Jusqu'à 3 fois ↓ si épandus vs enfouis
sur 100 ans



https://diffusion.mern.gouv.qc.ca/public/DRF/Rvd-adf/2022/Sylviculture_foret_boreale.html

...Recherche en cours...

Gestion responsable de sous-produits du bois et de l'aluminium : Fertilisation en forêt et agriculture

*...Aussi un moyen crédible de lutte
aux changements climatiques*



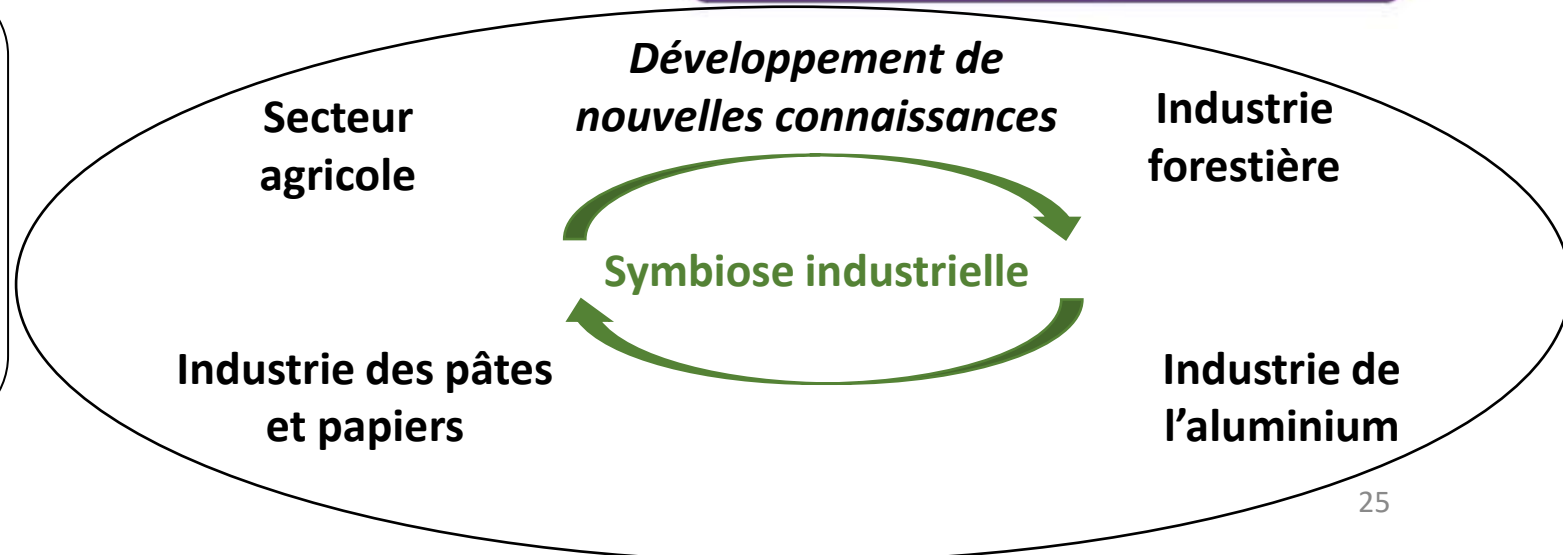
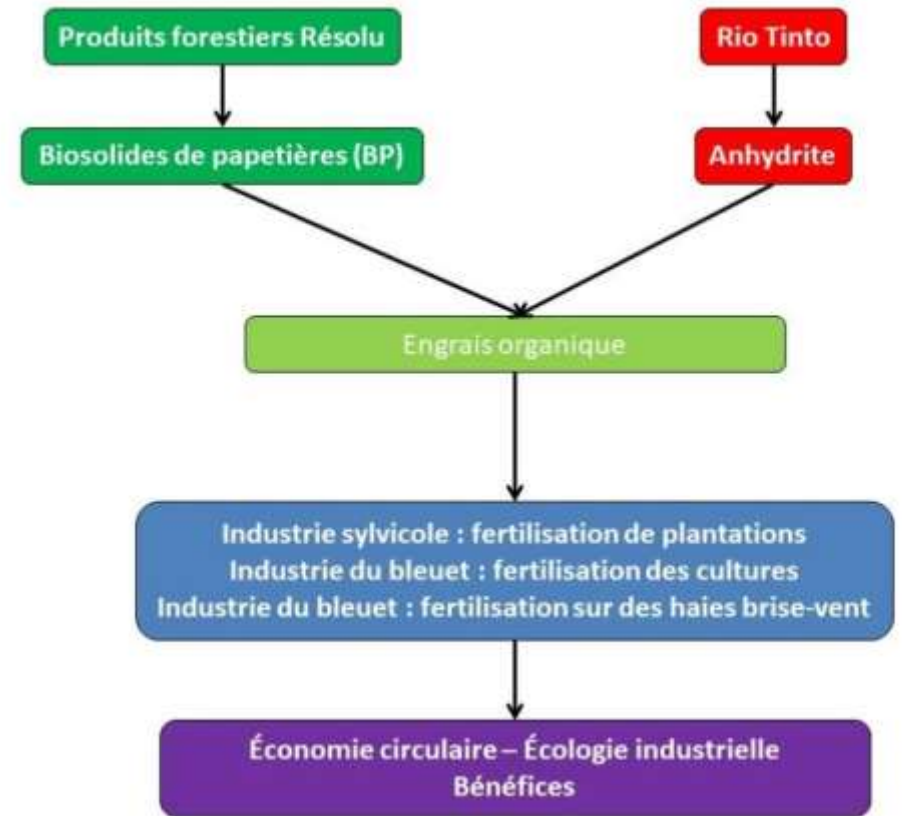
Les bénéfices potentiels :
Augmentation de la productivité
Réduction de GES
Un potentiel pour les marchés du carbone

Partenaires

Recyclage : sous-produits
fertilisants

Nouveau produit
biosourcé

Potentiel d'utilisation
commerciale



...L'équipe fait la force...!

Étudiantes, étudiants et postdocs

Catherine Lemay-Bélisle, Geneviève Telmosse,, Anthony Pelletier, Jean-Simon Boulianne, Lydia Ouellet, Bastien Maurin, N'Guessan Charles Yao, Carl Crête, Suyash Khare, Yves-André Alexis, Patrick Girard, Guillaume Bonvalot-Maltais, Alexandre Gonçalves Andrade, Lona Baudry, David Tremblay, Emna Marouani, Julie Lemieux, Ranieri Ribeiro Paula, Yasmine Benbelaid,...

Collègues et professionnels(elles)



UQAC

- Claude Villeneuve
- Sylvie Bouchard
- Hélène Côté
- Charles Marty
- Pierre-Luc Dessureault
- Olivier Fradette
- Maxime Paré
- Mathieu Cusson
- Jean-François Boucher
- Jean Legault
- André Pichette
- Sergio Rossi
- Catherine Tremblay
- Pascal Tremblay



Collègues

Ministères : fédéral et provincial

- Normand Bertrand
- Martin Chantigny
- Jean Lafond
- Rock Ouimet
- David Pelster
- Philippe Rochette
- Noura Ziadi



Collaborateurs et Partenaires



Centre québécois
de recherche et
de développement
de l'aluminium



Fonds AES



Fonds Vert



VIRIDIS
environnement



ZIP Saguenay-Charlevoix

Collaborateurs et Partenaires



Partenaires :



Merci pour votre écoute!



Patrick Faubert, PhD

Professeur agrégé

Codirecteur : Chaire en éco-conseil

Codirecteur : Carbone boréal

Département des sciences fondamentales

Université du Québec à Chicoutimi

418 545-5011, poste 2537

pfaubert@uqac.ca

<http://ecoconseil.uqac.ca/>

<https://carboneboreal.uqac.ca/>

<http://www.uqac.ca/borealie/>

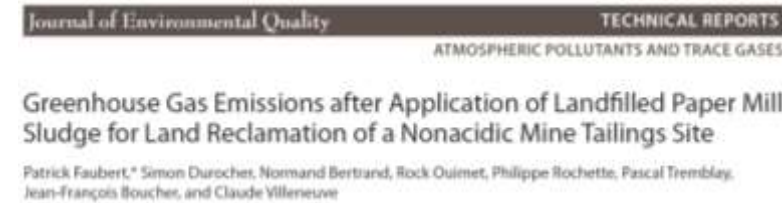
Toutes les références bibliographiques sont disponibles sur demande

Bibliographie

- Bakker MR. 1999. The effect of lime and gypsum applications on a sessile oak (*Quercus petraea* (m.) Liebl.) stand at la Croix-Scaille (French Ardennes) ii. Fine root dynamics. *Plant and Soil* 206: 109-121.
- Brown S, Beecher N et Carpenter A. 2010. Calculator tool for determining greenhouse gas emissions for biosolids processing and end use. *Environmental Science and Technology* 44: 9509-9515.
- Burgess D, Adams G, Needham T, Robinson C et Gagnon R. 2010. Early development of planted spruce and pine after scarification, fertilization and herbicide treatments in New Brunswick. *The Forestry Chronicle* 86: 444-454.
- Camberato JJ, Gagnon B, Angers DA, Chantigny MH et Pan WL. 2006. Pulp and paper mill by-products as soil amendments and plant nutrient sources. *Canadian Journal of Soil Science* 86: 641-653.
- CANMET ETC. 2005. Pulp and paper sludge to energy - preliminary assessment of technologies. *Natural resources canada, canmetenergy*. Report (34) 0173e479.1.
- Chen L et Dick WA. 2011. Gypsum as an agricultural amendment. General use guidelines. Bulletin 945. The Ohio State University. Lien : <https://fabe.osu.edu/sites/fabe/files/imce/files/Soybean/Gypsum%20Bulletin.pdf>
- Faubert P, Barnabé S, Bouchard S, Côté R et Villeneuve C. 2016. Pulp and paper mill sludge management practices: What are the challenges to assess the impacts on greenhouse gas emissions? *Resources, Conservation and Recycling* 108: 107-133.
- Faubert P, Durocher S, Bertrand N, Ouimet R, Rochette P, Tremblay P, Boucher J-F et Villeneuve C. 2017a. Greenhouse gas emissions after application of landfilled paper mill sludge for land reclamation of a nonacidic mine tailings site. *Journal of Environmental Quality* 46: 950-960.
- Faubert P, Lemay-Bélisle C, Bertrand N, Bouchard S, Chantigny M, Durocher S, Rochette P, Tremblay P, Ziadi N et Villeneuve C. 2015. La gestion des biosolides de papeteries 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? Vecteur Environnement* 48: 50-58.
- Faubert P, Lemay-Bélisle C, Bertrand N, Bouchard S, Chantigny MH, Durocher S, Paré MC, Rochette P, Tremblay P, Ziadi N et Villeneuve C. 2017b. Greenhouse gas emissions following land application of pulp and paper mill sludge on a clay loam soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 250: 102-112.
- Faubert, P., Lemay Bélisle, C., Bertrand, N., Bouchard, S., Chantigny, M.H., Paré, M.C., Rochette, P., Ziadi, N., Villeneuve, C., 2019. Land application of pulp and paper mill sludge may reduce greenhouse gas emissions compared to landfilling. *Resources, Conservation and Recycling* 150, 104415.
- Faubert P, Bouchard S, Morin Chassé R, Côté H, Dessureault P-L et Villeneuve C. 2020. Achieving carbon neutrality for a future large greenhouse gas emitter in quebec, canada: A case study. *Atmosphere* 11: 810. Lien : <https://www.mdpi.com/2073-4433/11/8/810>
- Gouvernement du Québec. 2012. Le Québec en action vert 2020. Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques. Phase 1.
- Guérin, J.É., Khiari, L., Lajili, A., Villeneuve, C., Faubert, P., Simard, M.-C., Séguin, M.-A., Lavoie, J., Poirier, S., 2022. From aluminium industry waste to soil amendment for cash crops and fertiliser for lowbush blueberry. Lazou, A., Daehn, K., Fleurial, C., Gökelma, M., Olivetti, E. and Meskers, C. (eds), pp. 189-199, Springer International Publishing, Cham
- Halmschlager E et Katzensteiner K. 2017. Vitality fertilization balanced tree nutrition and mitigated severity of siroccoccus shoot blight on mature Norway spruce. *Forest Ecology and Management* 389: 96-104
- IPCC. 2007. Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, et Miller HL, éditeurs. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jensen JE et Pipatti R. 2002. CH₄ emissions from solid waste disposal. Background papers. IPCC expert meetings on good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories, intergovernmental panel on climate change (ipcc)-national greenhouse gas inventories programme (nggip), iges. Hayama, Japan.
- Larney FJ et Angers DA. 2012. The role of organic amendments in soil reclamation: A review. *Canadian Journal of Soil Science* 92: 19-38.
- MDDELCC. 2016b. Bilan annuel de conformité environnementale 2013. Secteur des pâtes et papiers., Gouvernement du Québec.
- MDDEP. 2011. Politique québécoise de gestion des matières résiduelles. Plan d'action 2011-2015. 33 pages.
- MELCC. 2020. Stratégie de valorisation de la matière organique.
- Newton PF et Amponsah IG. 2006. Systematic review of short-term growth responses of semi-mature black spruce and jack pine stands to nitrogen-based fertilization treatments. *Forest Ecology and Management* 237: 1-14.
- Paula RR, Cusson M, Bertrand N, Bouchard S, Chantigny M, Lemieux J, Marouani E, Villeneuve C, Faubert P. 2024. Correction factors for large-scale greenhouse gas assessment from pulp and paper mill sludge landfill sites. *Waste Management* 177: 177-181.
- Québec circulaire. 2021. Enjeux et définition. Lien : <https://www.quebeccirculaire.org/static/Enjeux-et-definition.html>. 3 avril 2021.
- RECYC-QUÉBEC, 2023. Bilan 2021 de la gestion des matières résiduelles au Québec (Bilan GMR), RECYC-QUÉBEC Lien : <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/actualite/recyc-quebec-diffuse-les-resultats-du-bilan-2021-de-la-gestion-des-matieres-residuelles-au-quebec-bilan-gmr/>
- Sauvé S, Normandin D et McDonald M. 2016. L'économie circulaire. Une transition incontournable. Les Presses de l'Université de Montréal, Montréal, Canada.
- Thiffault N, Titus BD et English B. 2017. Twenty-five years post-treatment conifer responses to silviculture on a *Kalmia*-dominated site in eastern Canada. *The Forestry Chronicle* 93: 161-170.
- WBCSD. 2021. Forest sector net zero roadmap. Phase 1: Enabling the transition to a net-zero economy. Lien : <https://www.wbcd.org/Sector-Projects/Forest-Solutions-Group/Resources/Forest-Sector-Net-Zero-Roadmap>

Diapositives en extra

Synthèse de mes travaux



Enfouissement des BP

Quelques faits saillants:

- Captage du biogaz inefficace
- Solution souvent moins coûteuse



© Chaire en éco-conseil

Épandage des BP – Sous-produits fertilisants

Sols agricoles



© EnGlobe

Sylviculture



© Chaire en éco-conseil

Sols dégradés



© Chaire en éco-conseil

Épandage des BP – Sous-produits fertilisants

Bénéfices pour les sols :

- Fertilité ↑
- Matière organique ↑
- Nutriments (N-P-K) ↑
- pH ↑
- Agrégats ↑
- Rétention de l'eau ↑
- Capacité d'échange cationique ↑
- Remplacement d'engrais minéraux



Bénéfice pour les cultures :

BP → engrais organique = Rendement ↑



Combustion des BP

Quelques faits saillants:

- BP souvent mélangés avec d'autres combustibles
- Production de chaleur
 - Vapeur utilisée à l'usine
 - Électricité - cogénération



Analyse de cycle de vie

Documenter le bilan de GES

↑ GES

- Transport + Machinerie



↓ GES

- Évitement d'engrais minéraux
- Stockage de C dans les sols
- Évitement d'enfouissement



Chantigny et al. 1999, Brown et al. 2010

Effets des BP et de l'anhydrite pour l'application en sylviculture

Effets des BP		Effets de l'anhydrite	
<i>Ce qu'on sait</i>	<i>Ce qu'on voit ici</i> <i>Plantation de pin gris</i>	<i>Ce qu'on sait</i>	<i>Ce qu'on voit ici</i> <i>Plantation de pin gris</i>
En fertilisation conventionnelle (minérale) : Il faudrait minimalement une dose de 84 kg N ha⁻¹ pour induire un effet positif	La dose de 224 kg N ha⁻¹ apportée par les BP semble produire les effets les plus prometteurs	L'anhydrite peut augmenter - La croissance radiale - La concentration foliaire en Ca - La biomasse racinaire	Les concentrations foliaires en P, Ca et S ont augmenté par l'ajout d'anhydrite
			Les effets positifs sur la concentration foliaire ne semblent pas se traduire en une augmentation de croissance pour le moment
			Une dose plus élevée pourrait être nécessaire pour convertir le tout en une augmentation de croissance