

Avis technique

SGEF-30

Direction de la recherche forestière

Titre :	Doses de biosolides municipaux à appliquer pour correspondre à la quantité d'azote immobilisée dans les plantations d'épinette blanche
Auteurs :	Rock Ouimet, Luca Serban et Isabelle Auger
Date :	Décembre 2023

Les recherches ont démontré que les biosolides municipaux sont une matière résiduelle fertilisante de grande valeur en sylviculture des plantations forestières. Dans cet avis technique, nous avons estimé les doses de biosolides municipaux à appliquer au sol pour correspondre à la quantité d'azote immobilisée d'une plantation d'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss), dans le but de faire croître celle-ci selon un indice de qualité de station de 14 m à 25 ans. Les calculs précisent que les doses opérationnelles de biosolides à appliquer surviennent surtout durant les 30 premières années de la plantation.

1. Contexte

Les biosolides municipaux sont des boues issues du traitement des eaux usées municipales et traitées afin de réduire les agents pathogènes. En raison de leurs propriétés fertilisantes, leur valorisation par recyclage sur les terres agricoles et forestières constitue une avenue très intéressante du point de vue environnemental et économique (Kimberley *et al.* 2004; Ramlal *et al.* 2009). L'utilisation de biosolides municipaux pour fertiliser les plantations peut également entraîner un stockage de carbone (C), puisqu'elle augmente à la fois la biomasse végétale et la matière organique dans le sol. La réaction des forêts à la fertilisation en biosolides municipaux a été testée dans de multiples contextes à travers le monde, principalement pour stimuler la croissance des arbres. La plupart des études ont démontré l'augmentation de la biomasse récoltable en réponse à l'application de biosolides (Bilodeau-Gauthier *et al.* 2022, Lu *et al.* 2012, Ouimet *et al.* 2015) ainsi que l'augmentation du C emmagasiné dans le sol (Leonard *et al.* 2021; Villa et Ryals 2021). En raison du rapport azote : phosphore (N:P) relativement bas des biosolides municipaux, le phosphore du sol est un autre élément dont la concentration s'accroît généralement en réponse à de telles applications (Keys *et al.* 2018, Lu *et al.* 2012). Quant aux métaux traces (Cu, Cd, Cr, Ni, Pb, Zn), ils demeurent en concentration acceptables dans les sols (Lu *et al.* 2012, McLaren *et al.* 2007; Ouimet *et al.* 2015, Su *et al.* 2008, Webber et Sidhwa 2007).

Il y a quelques années, l'Institut national de santé publique du Québec a publié un avis scientifique sur les risques pour la santé associés à l'épandage de biosolides municipaux sur les terres agricoles (Samuel *et al.* 2016). Se basant sur la littérature scientifique existante et sur leur propre analyse, les auteurs concluent que les risques infectieux et chimiques potentiels sont généralement négligeables lorsque de bonnes pratiques de gestion sont mises en place. L'une de ces pratiques consiste à respecter les besoins des cultures en éléments nutritifs, en particulier l'azote, afin d'éviter les pertes par volatilisation et par lessivage du sol qui contaminerait les eaux souterraines en nitrates.

Le *Guide sur le recyclage des matières résiduelles fertilisantes* du MELLCCFP (Hébert 2015) mentionne que, pour des fins sylvicoles, l'épandage de biosolides municipaux, même les boues activées qui ont un fort potentiel de minéralisation de l'azote, peut se faire de façon sécuritaire pour l'environnement et la santé humaine à des taux de l'ordre de 20 Mg de matière sèche (m. s.) par hectare (Pion et Hébert 2010). Cependant, il y est aussi mentionné que l'on doit considérer les besoins en azote à moyen terme de la plantation afin d'éviter les pertes de cet élément. C'est dans le but de préciser les doses d'épandage de biosolides municipaux que nous nous sommes penchés sur les besoins en azote des plantations forestières, en particulier celles en épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss), une essence parmi les plus plantées dans le Québec méridional.

2. Matériel et méthodes

Afin d'évaluer l'immobilisation en azote dans la biomasse des plantations d'épinette blanche au Québec, nous avons employé les tables de rendement publiées par Prigent *et al.* (2010). Ces tables s'échelonnent de 8 à 60 ans et fournissent le volume total et la surface terrière à l'hectare selon l'âge de la plantation, la densité de reboisement et l'indice de qualité de station (IQS). Puisque l'objectif de l'épandage de biosolides est d'améliorer la croissance des plantations pour qu'elles atteignent un maximum de rendement, nous avons sélectionné l'IQS le plus élevé, soit 14 m à 25 ans, ainsi qu'une densité de reboisement de 2 000 tiges·ha⁻¹ pour les besoins de l'exercice.

Nous avons estimé la quantité d'azote immobilisée dans la biomasse épigée (bois de la tige, écorce, branches, aiguilles) des arbres vivants à partir des équations de conversion de la surface terrière en biomasse et des concentrations moyennes en éléments nutritifs publiées par Paré *et al.* (2013) pour chacun de ces compartiments de l'épinette blanche. Pour calculer la quantité d'azote immobilisée dans la biomasse hypogée (souches + racines ayant un diamètre > 5 mm), nous avons supposé 1) que le facteur d'échelle était de 0,256 fois la biomasse totale épigée (Smyth *et al.* 2013, si l'on suppose que le rapport C hypogée/C épigé est égal au rapport biomasse hypogée/biomasse épigée) et 2) que la concentration moyenne en azote est de 0,197 % dans les parties hypogées (Alban *et al.* 1978).

Nous avons calculé les quantités d'azote que devraient apporter les biosolides aux 10 ans pour combler les besoins nutritifs associés aux quantités de cet élément qui sont immobilisées dans la biomasse en

raison de l'accroissement décennal des arbres. Nous avons supposé que le taux d'application d'azote à l'âge 0 de la plantation équivalait à celui appliqué à l'âge de 10 ans, en raison du très faible coefficient d'utilisation de l'azote par les plants lors du premier épandage et du faible taux de minéralisation de l'azote par les biosolides (Cogger *et al.* 2001). Nous avons aussi supposé que l'apport des biosolides comblerait 100 % des besoins en azote des plants d'épinette blanche afin de compenser la part importante de N immobilisé dans le sol et dans la biomasse. Nous avons calculé cet apport (exprimé en $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{m}\cdot\text{s.}$) en supposant que les biosolides avaient une concentration moyenne en azote disponible de 2,3 % de matière sèche, soit environ 35 % de leur azote total (Ouimet *et al.* 2015).

3. Résultats

3.1 Productivité potentielle des plantations d'épinette blanche

L'IQS des plantations d'épinette blanche recensées au Québec par Prément *et al.* (2010) varie de 3,78 à 15,83 m à 25 ans (valeurs minimale et maximale). Les tables de rendement montrent que cette essence peut atteindre un volume total de $572\text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ à l'âge de 60 ans (IQS =14 m, figure 1a), ce qui correspond à une surface terrière totale de $50,7\text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$ (figure 1b), une densité de tiges survivantes de $889\text{ tiges}\cdot\text{ha}^{-1}$ et un diamètre moyen quadratique de 26,9 cm.

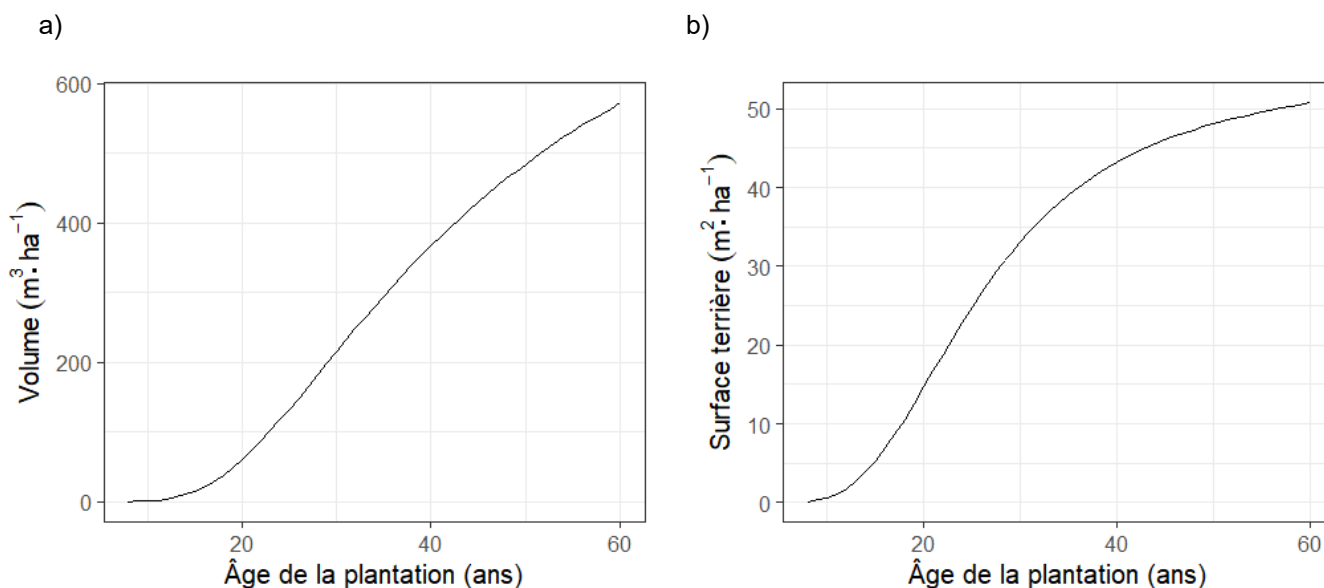


Figure 1. a) Volume total et b) surface terrière totale en fonction de l'âge d'une plantation d'épinette blanche dont l'indice de qualité de station est de 14 m à 25 ans, d'après Prément *et al.* (2010). Pour ces calculs, la densité de plantation au temps 0 est de $2\,000\text{ tiges}\cdot\text{ha}^{-1}$.

3.2 Immobilisation en azote

Les concentrations moyennes en azote employées dans cet exercice sont présentées au tableau 1. Sur 60 ans, une plantation d'épinette blanche ayant un IQS de 14 m et une densité de reboisement de $2\,000\text{ plants}\cdot\text{ha}^{-1}$ devrait avoir accumulé $560\text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$ dans sa biomasse vivante (tableau 2, figure 2a). La

quantité totale de biosolides à épandre pour combler cette immobilisation s'élève donc à 31 Mg·ha⁻¹ (figure 2b).

La figure 2b montre que l'on peut répartir cette quantité totale de biosolides en plusieurs épandages à intervalles de 10 ans, à des taux allant de 7 Mg·ha⁻¹ au moment de la plantation à un maximum de 9 Mg·ha⁻¹ à l'âge de 20 ans. Évidemment, une fois le couvert refermé vers l'âge de 30 ans, les besoins en azote de la plantation diminuent fortement, et celle-ci aura besoin de beaucoup moins de matière fertilisante pour combler ses besoins nutritifs (figure 2b).

La figure 2b indique également que passé l'âge de 30 ans, le taux d'épandage requis est considérablement réduit. Sur le plan économique, des épandages à des taux d'application aussi faibles ne sont probablement pas rentables.

Tableau 1. Concentration moyenne en azote dans les différents compartiments de l'épinette blanche (d'après Paré *et al.* 2012 et Alban *et al.* 1978).

	Compartiment				
	Bois	Aiguilles	Branches	Écorce	Souches et racines (diamètre > 5 mm)
Concentration moyenne en azote	0,058 %	1,175 %	0,363 %	0,303 %	0,197 %

Tableau 2. Quantité d'azote immobilisée par une plantation d'épinette blanche au cours de chaque décennie selon son âge (densité de reboisement = 2 000 plants·ha⁻¹), et dose de biosolides (avec 2,3 % d'azote disponible) à appliquer au début de chaque décennie pour combler ce besoin.

Âge de la plantation (ans)	Quantité d'azote immobilisée dans la biomasse (kg·ha ⁻¹)	Taux d'application de biosolides avec 2,3 % de N disponible (Mg·ha ⁻¹ m. s.)
0-10	9	6,9*
10-20	158	6,9
20-30	202	8,8
30-40	110	4,8
40-50	53	2,3
50-60	29	1,2
Total	560	30,9

* Le taux d'application est considéré le même que celui à l'âge 10-20 ans.

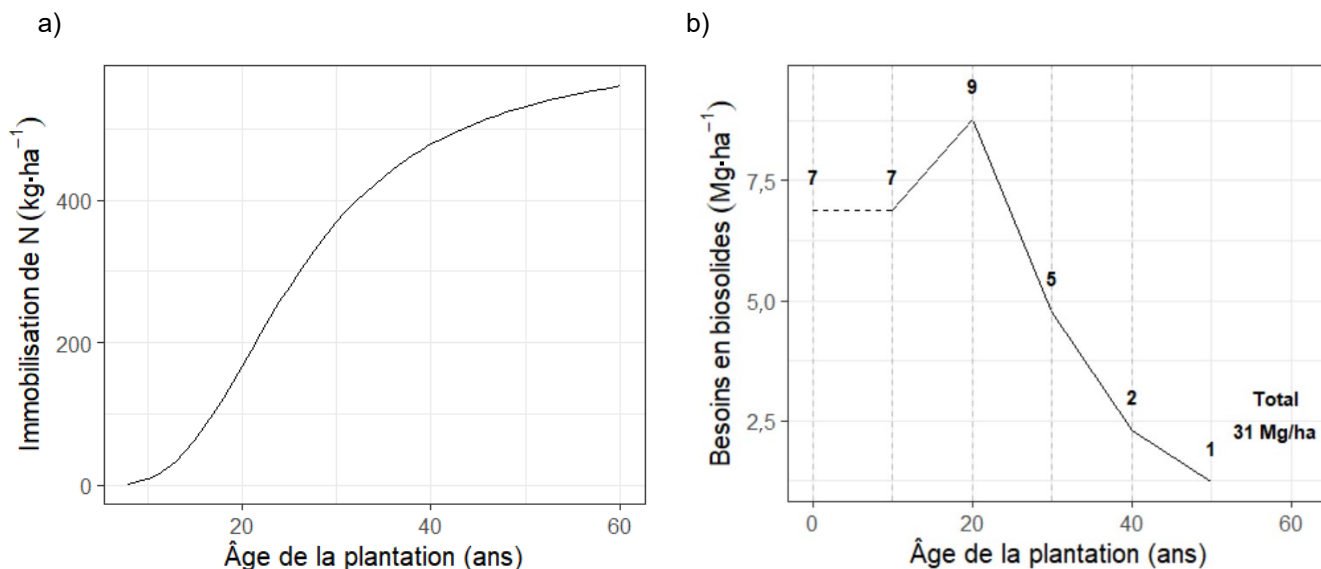


Figure 2. a) Quantité d'azote (N) immobilisée en fonction de l'âge d'une plantation d'épinette blanche dont l'indice de qualité de station est de 14 m à 25 ans; b) dose de biosolides à appliquer aux 10 ans (au début de chaque décennie, en Mg·ha⁻¹ m. s.) et dose cumulative requise (Mg·ha⁻¹ m. s.) pour combler les besoins en azote de la plantation. Pour ces calculs, la densité de plantation au temps 0 est de 2 000 tiges·ha⁻¹.

3.3 Taux d'épandage d'un biosolide en fonction de sa concentration en azote disponible

Dans le cas où le biosolide à épandre posséderait une concentration d'azote disponible différente de celle de 2,3 % que nous avons employée dans cet avis technique, l'équation suivante et les valeurs du tableau 2 peuvent servir à calculer la bonne dose de biosolide à appliquer :

$$\text{Biosolides (Mg} \cdot \text{ha}^{-1}\text{)} = 0,1 \times \left(\frac{\text{Quantité d'azote immobilisé selon l'âge de la plantation [tableau 2]}}{\text{Concentration en azote (en \%)} } \right)$$

Par exemple, pour un biosolide dont la concentration en azote disponible est de 5 %, la dose de biosolide à appliquer à l'âge de 10 ans serait de $0,1 \times 158 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ m. s.} / 5 \% = 3,2 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ m. s.}$ de biosolides.

Ainsi, lorsque la concentration d'azote disponible augmente dans le biosolide, la quantité d'azote à appliquer dans la plantation demeure la même, mais le taux d'application diminue.

4. Discussion — Relation entre le taux d'application des biosolides et les besoins nutritifs des plants

Pour minimiser le lessivage des nitrates, le taux d'application de biosolides devrait être établi en fonction des besoins en azote de la plantation. C'est la démarche que nous avons suivie ici en partie. Des quantités excessives d'azote apportées à la plantation seront très peu retenues dans le sol et risquent donc à moyen terme d'être emportées vers les eaux souterraines par l'eau d'écoulement.

Cependant, notre démarche ne prend pas en compte, entre autres, les pertes d'azote des biosolides par volatilisation lors de l'épandage. Les pertes sous forme de N₂O peuvent être non négligeables (jusqu'à 1,2 % de l'azote total appliqué; Charles *et al.* 2017) selon le type de biosolide (liquide ou séché), la méthode d'épandage employée, les conditions climatiques (précipitations) et les propriétés du sol (texture et classe de drainage). Quant aux pertes de méthane (CH₄), elles sont en général assez minimes, sauf durant les 2 à 3 premiers jours après l'épandage de biosolides municipaux (Ball *et al.* 2004).

L'épandage de biosolides en plantation est une pratique courante depuis plusieurs décennies dans l'Ouest américain (Sullivan *et al.* 2022). Le taux d'application à chaque épandage est plutôt variable (moyenne ± écart-type : 8 ± Mg·ha⁻¹ m. s.). Le premier épandage se fait dans les plantations forestières à partir de l'âge de 5 ans, et il est suivi 2 à 3 autres applications avant la fermeture du couvert (Leonard *et al.* 2021). Cette répartition dans le temps des épandages est très semblable à ce que nous avons évalué pour les plantations d'épinette blanche au Québec.

Les taux d'épandage échelonnés aux 10 ans que nous présentons ici sont beaucoup plus bas que ceux rapportés lors d'expériences effectuées dans le passé, qui sont de l'ordre de 30 Mg·ha⁻¹ m. s. en application unique au moment de la plantation ou quelques années après (Arellano et Fox 2010, Ouimet *et al.* 2015, Wang *et al.* 2006). Des taux d'épandage aussi élevés n'avaient cependant pas pour seul but de satisfaire les besoins potentiels en azote de la plantation, et il est fort probable qu'une bonne part de cet azote ait été lessivée du sol. Nous croyons qu'il y aurait des avantages environnementaux à répartir les épandages à des intervalles d'environ 10 ans, même si l'opération devient plus compliquée lorsque les arbres atteignent quelques mètres de hauteur. Pour remédier à ce problème, il faut prévoir faire des sentiers d'accès compatibles avec l'équipement et la consistance du matériel (liquide, boue, séchée) que l'on prévoit épandre. Ces sentiers pourraient aussi servir de chemins d'accès pour effectuer d'autres traitements comme l'éclaircie commerciale.

Les doses calculées pour l'application des biosolides correspondent à la quantité d'azote immobilisé par une plantation qui atteindrait un IQS de 14 m à 25 ans. Il est cependant possible que l'azote ne soit pas le seul facteur limitant la croissance d'une plantation. Par conséquent, l'application de ces doses d'azote sous forme de biosolides pourrait ne pas suffire à elle seule pour atteindre la productivité attendue. En plus de la quantité d'azote disponible dans le sol, la profondeur de sol explorable par les racines, sa texture et son régime hydrique sont des facteurs qui déterminent l'IQS de l'épinette blanche (Wang 1995; Wang et Klinka 1996). Cette essence est gourmande en éléments minéraux nutritifs (potassium, calcium, magnésium), et sa croissance est souvent limitée par la faible disponibilité de ceux-ci (Quesnel et Côté 2009). Heureusement, les biosolides contiennent aussi de nombreux autres éléments minéraux recherchés par l'épinette blanche et pouvant combler ses besoins nutritionnels.

5. Conclusion

Le but de cet avis technique était de déterminer les doses de biosolides municipaux à appliquer pour combler les besoins en azote des plantations d'épinette blanche afin qu'elles atteignent un IQS de 14 m à 25 ans. Les résultats montrent que le taux d'épandage requis varie avec l'âge de la plantation. Durant la vie de la plantation d'épinette blanche, un total d'environ 31 Mg·ha⁻¹ m. s. de biosolides ayant une concentration en azote disponible de 2,3 % peut combler l'immobilisation potentielle en azote. Si les applications à l'échelle opérationnelle sont réparties à des intervalles de 10 ans, nous recommandons d'épandre environ 7 Mg·ha⁻¹ m. s. de biosolides au moment de la plantation et d'atteindre un maximum de 9 Mg·ha⁻¹ m. s. à l'âge de 20 ans, puis environ 5 Mg·ha⁻¹ m. s. à l'âge de 30 ans.

Références bibliographiques

- Alban, D.H., D.A. Perala et B.E. Schlaegel, 1978. *Biomass and nutrient distribution in aspen, pine, and spruce stands on the same soil type in Minnesota*. Can. J. For. Res. 8: 290-299.
<https://doi.org/10.1139/x78-044>
- Arellano, E.C. et T.R. Fox, 2010. « Effect of biosolids on a loblolly pine plantation forest in the Virginia piedmont ». Dans : Stanturf, J.A. (édit.) *Proceedings of the 14th biennial southern silvicultural research conference*. 25-27 février 1997. Asheville, NC (États-Unis). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station, Gen. Tech. Rep. SRS-121. p. 79-83.
<https://www.fs.usda.gov/research/treearch/35392>
- Ball, B.C., I.P. McTaggart et A. Scott, 2004. *Mitigation of greenhouse gas emissions from soil under silage production by use of organic manures or slow-release fertilizer*. Soil Use Manage. 20(3): 287-295. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2004.tb00371.x>
- Bilodeau-Gauthier, S., G. Palma Ponce, J. C. Miquel, B. Lafleur, S. Brais et N. Bélanger, 2022. *Growth and foliar nutrition of a hybrid poplar clone following the application of a mixture of papermill biosolids and lime mud*. Can. J. For. Res. 52(1): 117-128. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2021-0086>
- Charles, A., P. Rochette, J.K. Whalen, D.A. Angers, M.H. Chantigny et N. Bertrand, 2017. *Global nitrous oxide emission factors from agricultural soils after addition of organic amendments: A meta-analysis*. Agric. Ecosyst. Environ. 236: 88-98. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.11.021>
- Cogger, C.G., A.I. Bary, S.C. Fransen et D.M. Sullivan, 2001. *Seven years of biosolids versus inorganic nitrogen applications to tall fescue*. J. Environ. Qual. 30(6): 2188-2194.
<https://doi.org/10.2134/jeq2001.2188>
- Hébert, M., 2015. *Guide sur le recyclage des matières résiduelles fertilisantes : critères de référence et normes réglementaires — édition 2015*. Gouvernement du Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. 216 p.
https://www.environnement.gouv.qc.ca/matieres/mat_res/fertilisantes/critere/guide-mrf.pdf

- Keys, K., D.L. Burton, G.W. Price et P.N. Duinker, 2018. *Forest floor chemistry and mineral soil ion exposure after surface application of alkaline-treated biosolids under two white spruce (Picea glauca) plantations in Nova Scotia, Canada*. For. Ecol. Manage. 417: 208-221.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.02.040>
- Kimberley, M.O., H. Wang, P.J. Wilks, C.R. Fisher et G.N. Magesan, 2004. *Economic analysis of growth response from a pine plantation forest applied with biosolids*. For. Ecol. Manage. 189(1-3): 345-351. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.09.003>
- Leonard, E., J. Bodas, S. Brown et B. Axt, 2021. *Carbon balance for biosolids use in commercial Douglas Fir plantations in the Pacific Northwest*. J. Environ. Manage. 295: 113115.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113115>
- Lu, Q., Z.L. He et P.J. Stoffella, 2012. *Land application of biosolids in the USA: A review*. Appl. Environ. Soil Sci. 2012 : Article ID 201462: 11 p. <https://doi.org/10.1155/2012/201462>
- McLaren, R.G., L.M. Clucas, T.W. Speir et A.P. van Schaik, 2007. *Distribution and movement of nutrients and metals in a Pinus radiata forest soil following applications of biosolids*. Environ. Pollut. 147(1): 32-40. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.08.027>
- Ouimet, R., A.P. Pion et M. Hébert, 2015. *Long-term response of forest plantation productivity and soils to a single application of municipal biosolids*. Can. J. Soil Sci. 95(2): 187-199.
<https://doi.org/10.4141/cjss-2014-048>
- Paré, D., B.D. Titus, B. Lafleur, D.G. Maynard et E. Thiffault, 2012. *Canadian tree nutrient database*.
<https://apps-scf-cfs.rncan.gc.ca/calc/static/files/data/Canadian%20Tree%20Species%20Nutrient%20Database.zip>
- Paré, D., P. Bernier, B. Lafleur, B.D. Titus, E. Thiffault, D.G. Maynard et X. Guo, 2013. *Estimating stand-scale biomass, nutrient contents, and associated uncertainties for tree species of Canadian forests*. Can. J. For. Res. 43(7): 599-608. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2012-0454>
- Pion, A.P. et M. Hébert, 2010. *Valorisation sylvicole des biosolides municipaux au Québec : bilan et perspectives d'avenir*. Gouvernement du Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. 19 p. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/matieres/articles/valorisation-sylvicole-biosolide.pdf>
- Prégent, G., G. Picher et I. Auger, 2010. *Tarif de cubage, tables de rendement et modèles de croissance pour les plantations d'épinette blanche au Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources et de la Faune du Québec, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 160. 73 p.
<https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/recherche/Memoire160.pdf>
- Quesnel, P.O. et B. Côté, 2009. *Prevalence of phosphorus, potassium, and calcium limitations in white spruce across Canada*. J. Plant Nutr. 32(8): 1290-1305.
<https://doi.org/10.1080/01904160903006002>

- Ramlal, E., D. Yemshanov, G. Fox et D. McKenney, 2009. *A bioeconomic model of afforestation in Southern Ontario: Integration of fiber, carbon and municipal biosolids values*. J. Environ. Manage. 90(5) : 1833-1843. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.11.029>
- Samuel, O., M. Gagné, M.H. Bourgault, P. Chevalier, L. Saint-Laurent et M. Valcke, 2016. *Risques pour la santé associés à l'épandage de biosolides municipaux sur des terres agricoles*. Avis scientifique. Institut de la Santé publique du Québec, Direction de la santé environnementale et de la toxicologie. Publication n° 2140. 172 p. <https://www.inspq.qc.ca/publications/2140>
- Smyth, C.E., W.A. Kurz, E.T. Neilson et G. Stinson, 2013. *National-scale estimates of forest root biomass carbon stocks and associated carbon fluxes in Canada*. Glob. Biogeochem. Cycles 27(4): 1262-1273. <https://doi.org/10.1002/2012GB004536>
- Su, J., H. Wang, M.O. Kimberley, K. Beecroft, G.N. Magesan et C. Hu, 2008. *Distribution of heavy metals in a sandy forest soil repeatedly amended with biosolids*. Aust. J. Soil Res. 46(7): 502-508. <http://dx.doi.org/10.1071/sr07203>
- Sullivan, D.M., A. Tomasek, Griffin, D. LaHue, B. Verhoeven, A.D. Moore, L.J. Brewer, A.I. Bary, C.G. Cogger et D. Biswanath, 2022. *Fertilizing with biosolids*. Pacific Northwest Extension Publication, Oregon State University, Washington State University, University of Idaho. Report n°. PNW 508. 31 p. <https://catalog.extension.oregonstate.edu/pnw508>
- Villa, Y. B. et R. Ryals, 2021. *Soil carbon response to long-term biosolids application*. J. Environ. Qual. 50(5): 1084-1096. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20270>
- Wang, G.G., 1995. *White spruce site index in relation to soil, understory vegetation, and foliar nutrients*. Can. J. For. Res. 25: 29-38. <https://doi.org/10.1139/x95-004>
- Wang, G.G. et K. Klinka, 1996. *Classification of moisture and aeration regimes in sub-boreal forest soils*. Environ. Monit. Assess. 39(1-3): 451-469. <https://doi.org/10.1007/BF00396161>
- Wang, H., M.O. Kimberley, G.N. Magesan, R.B. McKinley, J.R. Lee, J.M. Lavery, P.D.F. Hodgkiss, T.W. Payn, P.J. Wilks, C.R. Fisher et D.L. McConchie, 2006. *Midrotation effects of biosolids application on tree growth and wood properties in a Pinus radiata plantation*. Can. J. For. Res. 36(8): 1921-1930. <https://doi.org/10.1139/x06-084>
- Webber, M.D. et P. Sidhwa, 2007. « Land application of sewage biosolids: Are Canadian trace metal guidelines/regulations over-protective for crop production? » Dans : International Water Association (édit.). *Conference proceedings — Moving forward wastewater biosolids sustainability: Technical, managerial and public synergy*. June 24-27, 2007. Moncton (Nouveau-Brunswick). p. 463-470.

Rock Ouimet, ing.f., Ph. D.,
Service de la génétique et de l'écologie forestière

Luca Serban, ing.f., Ph. D.
Service de la sylviculture et du rendement des forêts

Isabelle Auger, Stat. ASSQ, M. Sc.
Service du soutien scientifique

Correspondance :

Rock Ouimet
Ministère des Ressources naturelles et des Forêts
Direction de la recherche forestière
2700, rue Einstein, bureau C1.305
Québec (Québec) G1P 3W8
Tél. : 418 643-7994 poste 706533
Courriel : rock.ouimet@mrfn.gouv.qc.ca
luca.serban@mrfn.gouv.qc.ca

On peut citer ce texte en indiquant la référence. Citation recommandée :

Ouimet, R., L. Serban et I. Auger, 2023. *Doses de biosolides municipaux à appliquer pour correspondre à la quantité d'azote immobilisée dans les plantations d'épinette blanche*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et des Forêts, Direction de la recherche forestière, Avis technique SGEF-30. 10 p.