



# Synthèse des dispositifs et méthodes de recherche d'AshNet et recommandations en vue d'un protocole normalisé

C.E. Emilson<sup>1</sup>, K. Hannam<sup>2</sup>, I. Aubin<sup>1</sup>, N. Basiliko<sup>3</sup>, N. Bélanger<sup>4</sup>, S. Brais<sup>5</sup>,  
A. Diochon<sup>6</sup>, R. Fleming<sup>1</sup>, T. Jones<sup>7</sup>, R. Kabzems<sup>8</sup>, J. Laganière<sup>9</sup>,  
J. Markham<sup>10</sup>, D. Morris<sup>11</sup>, P.M. Rutherford<sup>12</sup>, K. Van Rees<sup>13</sup>, L. Venier<sup>1</sup>,  
K. Webster<sup>1</sup>, P. Hazlett<sup>1</sup>



Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts  
Rapport d'information GLC-X-22F

# Synthèse des dispositifs et méthodes de recherche d'AshNet et recommandations en vue d'un protocole normalisé

---

C.E. Emilson<sup>1</sup>, K. Hannam<sup>1,2</sup>, I. Aubin<sup>1</sup>, N. Basiliko<sup>3</sup>, N. Bélanger<sup>4</sup>, S. Brais<sup>5</sup>, A. Diochon<sup>6</sup>, R. Fleming<sup>1</sup>, T. Jones<sup>7</sup>, R. Kabzems<sup>8</sup>, J. Laganière<sup>9</sup>, J. Markham<sup>10</sup>, D. Morris<sup>11</sup>, P.M. Rutherford<sup>12</sup>, K. Van Rees<sup>13</sup>, L. Venier<sup>1</sup>, K. Webster<sup>1</sup>, P. Hazlett<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie des Grands Lacs, 1219, rue Queen Est, Sault Ste. Marie (Ontario), Canada, P6A 2E5

<sup>2</sup>Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement de Summerland, 4200, route no 97 Sud, Summerland (Colombie-Britannique), Canada, V0H 1Z0

<sup>3</sup>Laurentian University, Department of Biology and the Vale Living with Lakes Centre, 935 Ramsey Lake, Road, Sudbury (Ontario), Canada, P3E 2C6

<sup>4</sup>Université TÉLUQ, Département Science et Technologie, 5800 rue Saint-Denis, Bureau 1105, Montréal (Québec), Canada, H2S 3L5

<sup>5</sup>Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Institut de recherche sur les forêts, 445 boulevard de l'Université, Rouyn-Noranda (Québec), Canada, J9X 5E4

<sup>6</sup>Lakehead University, Department of Geology, 955 Oliver Road, Thunder Bay (Ontario), Canada, P7B 5E1

<sup>7</sup>Ontario Ministry of Natural Resources and Forestry, Forest Research and Monitoring Section, 1235 Queen Street East, Sault Ste. Marie (Ontario), Canada, P6A 2E5

<sup>8</sup>British Columbia Ministry of Forests, Lands, Natural Resource Operations and Rural Development, 9000 17th Street, Dawson Creek (Colombie-Britannique), Canada, V1G 4A4

<sup>9</sup>Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie des Laurentides, 1055, rue du P.E.P.S., C.P. Box 10380, succ. Sainte-Foy, (Québec) Canada, G1V 4C7

<sup>10</sup>University of Manitoba, Department of Biological Sciences, 50 Sifton Road, Winnipeg (Manitoba), Canada, R3T 2N2

<sup>11</sup>Ontario Ministry of Natural Resources, Centre for Northern Forest Ecosystem Research, 421 James Street South, Thunder Bay (Ontario), Canada P7E 2V6

<sup>12</sup>University of Northern British Columbia, Natural Resources and Environmental Studies Institute, 3333 University Way, Prince George (Colombie-Britannique), Canada, V2N 4Z9

<sup>13</sup>University of Saskatchewan, Department of Soil Science, 51 Campus Drive, Saskatoon (Saskatchewan), Canada, S7N 5A8

\* Autorisations des photos de la page titre (de gauche à droite, de haut en bas) : 1-Robin Sevean, 2&3-Hugues B. Massicotte, 4-Beatrix Schwarz, 5&6-Ken Van Rees, 7-Toma Guillemette, 8-Olivier Jeffrey, 9-Robin Sevean

**Publié par :**  
Ressources naturelles Canada  
Service canadien des forêts  
Centre de foresterie des Grands Lacs  
1219, rue Queen Est  
Sault Ste. Marie (Ontario) P6A 2E5

Rapport d'information : GLC-X-22F  
2018

Bibliothèque et Archives Canada offre des renseignements sur le catalogage de cette publication.

Synthèse des dispositifs et méthodes de recherche d'AshNet et recommandations en vue d'un protocole normalisé

(Rapport d'information, ISSN 2562-0746 , GLC-X-22F)

Publié aussi en anglais sous le titre : « Synthesis of Current AshNet Study Designs and Methods with Recommendations towards a Standardized Protocol ».

C.E. Emilson<sup>1</sup>, K. Hannam<sup>1,2</sup>, I. Aubin<sup>1</sup>, N. Basiliko<sup>3</sup>, N. Bélanger<sup>4</sup>, S. Brais<sup>5</sup>, A. Diochon<sup>6</sup>, R. Fleming<sup>1</sup>, T. Jones<sup>7</sup>, R. Kabzems<sup>8</sup>, J. Laganière<sup>9</sup>, J. Markham<sup>10</sup>, D. Morris<sup>11</sup>, P.M. Rutherford<sup>12</sup>, K. Van Rees<sup>13</sup>, L. Venier<sup>1</sup>, K. Webster<sup>1</sup>, P. Hazlett<sup>1</sup>

Monographie électronique en format PDF.

Comprend des références bibliographiques.

ISBN 978-0-660-27942-8

N° de catal. : Fo123-2/22-2018F-PDF

Le contenu de cette publication ou de ce produit peut être reproduit en tout ou en partie, et par quelque moyen que ce soit, sous réserve que la reproduction soit effectuée uniquement à des fins personnelles ou publiques mais non commerciales, sans frais ni autre permission, à moins d'avis contraire.

On demande seulement :

- de faire preuve de diligence raisonnable en assurant l'exactitude du matériel reproduit;
- d'indiquer le titre complet du matériel reproduit et le nom de l'organisation qui en est l'auteur; et
- d'indiquer que la reproduction est une copie d'un document officiel publié par Ressources naturelles Canada (RNCAN) et que la reproduction n'a pas été faite en association avec RNCAN ni avec l'appui de celui-ci.

La reproduction et la distribution à des fins commerciales sont interdites, sauf avec la permission écrite de RNCAN. Pour de plus amples renseignements, veuillez communiquer avec RNCAN à

[droitdauteur.copyright@rncan-nrcan.gc.ca](mailto:droitdauteur.copyright@rncan-nrcan.gc.ca).

©Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre de Ressources naturelles Canada, 2018

## Table des matières

Liste des tableaux et des figures .....	vi
Remerciements .....	2
Résumé .....	2
<b>1.0 Introduction .....</b>	<b>3</b>
<b>2.0 Méthodes et sites d'étude actuels d'AshNet.....</b>	<b>4</b>
2.1 Survol des types de sites d'étude d'AshNet.....	4
2.2 Évaluation avant l'application des cendres et dispositif expérimental .....	9
2.3 Évaluations après l'application des cendres .....	13
<b>3.0 Analyse et recommandations.....</b>	<b>16</b>
3.1 Analyse d'ordre pratique .....	16
3.2 Dispositif expérimental et recommandations en matière de suivi.....	17
3.3 Recommandations clés et considérations particulières .....	18
<b>4.0 Résumés propres à chaque site.....</b>	<b>19</b>
4.1 Essai de cendres de bois à Johnson Creek .....	19
4.2 Essai de cendres de bois dans la forêt expérimentale d'Aleza Lake (N. et S.) .....	20
4.3 Essai de cendres de bois de Mistik (route Burness).....	23
4.4 Essai de cendres de bois à Pineland.....	24
4.5 Essai de cendres de bois à la pépinière de 25e Sideroad .....	25
4.6 Expérience de récolte de biomasse à Island Lake .....	26
4.7 Essai de cendres de bois à Haliburton .....	28
4.8 Essai de cendres de bois à Senneterre 1.....	29
4.9 Essai de cendres de bois à Senneterre 2.....	30
4.10 Essai de cendres de bois à Senneterre 3.....	31
4.11 Essai de cendres de bois à Valcartier .....	32
4.12 Essai de cendres de bois dans les Cantons-de-l'Est – Peuplements d'érables à sucre.....	34
4.13 Essai de cendres de bois dans les Cantons-de-l'Est – Peuplements de peupliers hybrides .....	35
<b>5.0 Ouvrages cités.....</b>	<b>36</b>
Annexes.....	38
<i>Annexe A – Caractéristiques des sols et des peuplements pour chaque site d'étude d'AshNet. ....</i>	<i>39</i>
<i>Annexe B – Évaluations avant l'application de cendres effectuées sur chaque site d'étude d'AshNet.</i>	
<i>*CE = conductivité électrique, CEC = capacité d'échange cationique .....</i>	<i>40</i>
<i>Annexe C – Approches expérimentales comprenant les détails des dispositifs d'étude et des amendements pour chacun des sites d'étude d'AshNet. ....</i>	<i>41</i>
<i>Annexe D – Évaluations après application effectuées sur chaque site d'étude d'AshNet. *CE = conductivité électrique, CEC = capacité d'échange cationique .....</i>	<i>42</i>

## Liste des tableaux et des figures

**Table 2.2.1** Résumé des mesures avant l'application des cendres menées sur les 14 sites d'étude d'AshNet.

**Table 2.2.2** Résumé des approches expérimentales des 14 sites d'étude d'AshNet comprenant le dispositif de l'étude et l'application des cendres.

**Table 2.3.1** Résumé des mesures après l'application des cendres menées sur les 14 sites d'étude d'AshNet.

**Figure 2.1.1** Localisation des sites d'étude d'AshNet (triangles), ainsi que deux essais d'épandage de cendres qui n'ont pas été maintenus au Canada (cercles) en lien avec les principales zones forestières de la Classification nationale de la végétation du Canada.

**Figure 2.1.2** Sites d'étude d'AshNet par classe de sol et par profondeur de la couverture morte.

**Figure 2.1.3** Sites d'étude d'AshNet par espèces principales d'arbres et par âge de peuplement au moment de l'application des cendres.

**Figure 2.1.4** Sites d'étude d'AshNet par type de perturbation historique et par durée écoulée entre les perturbations et l'application des cendres.

**Figure 2.2.1** Relation entre les doses d'application des cendres (poids sec Mg/ha) et les doses d'application de Ca (kg/ha) parmi les sites d'étude d'AshNet.

**Figure 4.2.1** Dispositif expérimental d'application de cendres de bois comme amendement dans la forêt expérimentale d'Aleza Lake nord (a) et sud (b).

**Figure 4.6.1** Expérience de récolte de biomasse à Island Lake.

**Figure 4.11.1** Expérience d'application de cendres de bois comme amendement à Valcartier.

## Remerciements

Le financement du projet AshNet provient du Programme de recherche et de développement énergétiques (PRDE) de Ressources naturelles Canada, par l'intermédiaire du projet « Amélioration des sites dont la biomasse est récoltée à l'aide de cendres de bois inutilisées : augmenter la productivité et la durabilité forestière canadienne au moyen d'une autre approche que la gestion des déchets bioénergétiques ». Un financement supplémentaire est offert par le projet de recherche collaborative 3.3 du Centre canadien sur la fibre de bois, intitulé « Approvisionnement durable en fibres de bois pour faire naître des possibilités en matière de bioéconomie ».

Nous souhaiterions également remercier les collaborateurs en recherche de chaque site d'étude d'AshNet:

Les collaborateurs du site Johnson Creek sont représentés par Don Scott, de Chetwynd Forest Industries, West Fraser.

Les collaborateurs d'Aleza Lake nord et sud sont Hugues Massicotte, Bill McGill, Ché Elkin, Kerry Reimer, Steve Helle, Trevor de Zeeuw et Karl Domes (Université du nord de la Colombie-Britannique); Mike Jull, Colin Chisholm, Samantha Gonzalez (Forêt expérimentale d'Aleza Lake (ALRF)); James Spankie, Joel Fowler et Paul Bicho (Canfor Pulp); Richard Kabzems (BC Ministry of Forests, Lands, Natural Resource Operations and Rural Development (FLNRORD)). Le financement d'Aleza Lake nord et sud est assuré par le CRSNG, Canfor Pulp, le Conseil du bassin du Fraser (par Terry Robert), la ALRF, les Services des installations de l'UNBC, et le BC Ministry of FLNRORD (par R. Kabzems).

Les collaborateurs des essais sur la cendre de bois Mistik (Route Burness) sont représentés par Roger Nesdoly de Mistik Management Ltd. et le financement pour le projet a été fourni par Mistik Management Ltd.

Les collaborateurs de Pineland sont Trevor Stanley (Pépinière forestière de Pineland) et Mike Doig (Manitoba Sustainable Development).

Les collaborateurs de l'essai sur la cendre de bois de la pépinière située à 25e Sideroad sont représentés par Nancy Luckai (Université Lakehead), qui a joué un rôle clé dans le dispositif expérimental et l'établissement de l'essai.

Les collaborateurs d'Island Lake sont Zoë Lindo et Paul George (Université Western), Genevieve Noyce (Université de Toronto), Tanya Handa et Laurent Rousseau (Université du Québec à Montréal), et Neal Scott et Bill Peng (Université Queen's).

Les collaborateurs de Haliburton sont John Caspersen, Honghi Tran, Adam Gorgolewski, Genevieve Noyce, Emma Horrigan (Université de Toronto), Shaun Watmough, Holly Deighton, Carolyn Reid (Université Trent). Le financement est assuré par une subvention en développement et recherche collaborative du NSERC accordée à Honghi Tran, Nathan Basiliko et coll. (2012-2016), et un important soutien logistique et en nature est offert par la réserve sauvage et forestière de Haliburton.

Les collaborateurs de Valcartier sont David Paré, Christine Martineau, Armand Séguin et l'Unité technique du couloir boréal dirigée par Sébastien Dagnault (tous issus du Centre de foresterie des Laurentides du Service canadien des forêts).

Les collaborateurs de l'essai sur l'érable à sucre dans la forêt des Cantons-de-l'Est sont Angélique Dupuch, David Rivest, Christian Messier et Francois Lorenzetti (Université du Québec en Outaouais), Rock Ouimet

du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, et le financement provient d'une subvention en développement et en recherche collaborative du CRSNG avec Domtar.

Les collaborateurs du peuplier hybride des Cantons-de-l'Est et de Senneterre 1, 2 et 3 sont Pascal Drouin (Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue) et Simon Bilodeau-Gauthier (Université TÉLUQ), le financement provient d'une subvention en développement et en recherche collaborative du CRSNG avec Domtar et Resolute.

## Résumé

AshNet est un réseau de représentants du gouvernement du Canada, d'universitaires, de chercheurs de l'industrie, de forestiers et de décideurs politiques qui étudient les avantages potentiels d'utiliser les cendres de bois, issue de l'industrie grandissante de la bioénergie et normalement envoyée dans les centres d'enfouissement au Canada, pour amender les sols forestiers. AshNet se compose actuellement de 14 expériences d'application de cendres de bois établies sur des sites représentant différents peuplements et types de sols, âges de peuplements, et différentes espèces d'arbres. Ces essais utilisent des cendres de différente composition chimique et diverses doses d'application. Le présent rapport vise principalement à orienter les prochaines recherches du Canada concernant les cendres utilisées comme amendement en (1) synthétisant les pratiques et approches expérimentales actuelles dans les études d'AshNet, et (2) en formulant des recommandations et des commentaires quant à un protocole normalisé et aux domaines de recherche importants. Les recommandations essentielles sont le recours à des parcelles témoins, à des zones tampons et à des dispositifs aléatoires complets par blocs ou à d'autres adaptations (p. ex., parcelle subdivisée, bassin versant ou toposéquence) fondées sur l'objectif des études et les caractéristiques du site. Il est également recommandé de procéder à un suivi de la composition chimique des cendres, des réservoirs de nutriments du sol disponibles pour les plantes, du pH des sols, de la croissance des arbres, des nutriments dans les feuilles et de l'influence de l'ajout de cendre de bois sur le sol et du biote aquatique lié à l'hydrologie. D'autres analyses pourraient être effectuées sur la qualité, l'entreposage, le traitement préalable, les doses et méthodes d'application des cendres de bois. En s'appuyant sur les essais actuels d'application de cendres au Canada, il conviendrait de procéder à d'autres recherches visant à mieux comprendre les caractéristiques essentielles des cendres et des sites qui facilitent une application favorable et sécuritaire des cendres de bois sur différents sols forestiers et types de peuplements, et à traiter des enjeux de l'application des cendres à l'échelle opérationnelle.

## 1.0 Introduction

AshNet est un réseau de représentants du gouvernement du Canada, d'universitaires, de chercheurs de l'industrie, de forestiers et de décideurs politiques qui étudient les avantages potentiels d'utiliser les cendres de bois (également appelée « cendres » dans le présent document), issue de l'industrie grandissante de la bioénergie et normalement envoyées dans les centres d'enfouissement au Canada, pour amender les sols forestiers (Hannam et coll. 2017, Ressources naturelles Canada 2018a). La majorité des cendres produites au Canada est enfouie, car elles sont souvent classées comme matière résiduelle. Peu de solutions de remplacement viables peuvent facilement être mise en œuvre (Hannam et coll. 2018). Toutefois, les cendres peuvent être utilisées comme un amendement bénéfique pour le sol, à l'image des exemples en contexte agricole (Gill et coll. 2015) et forestier (Huotari et coll. 2015). L'économie (Hope et coll. 2017), les exigences réglementaires (Hannam et coll. 2016), la qualité des cendres, les types de peuplements, les nutriments du sol et les exigences en matière de chaulage (Pitman 2006) sont des facteurs qui influencent la viabilité des pratiques d'utilisation des cendres comme amendement.

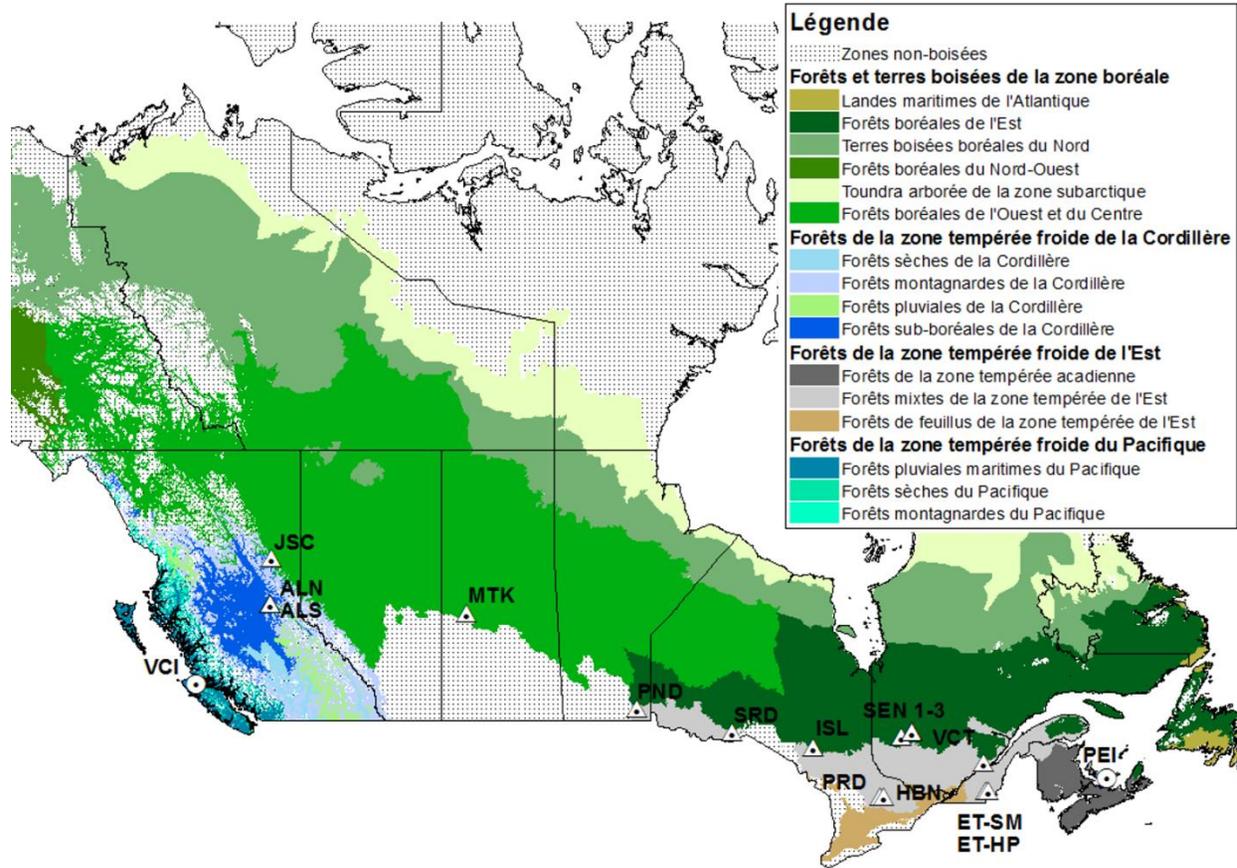
En général, l'utilisation des cendres comme amendement est une pratique plus acceptée en agriculture. En Europe, cependant, l'application de cendres sur les sols des forêts nordiques est courante (Emilsson 2006, Hannam et coll. 2016). L'application de cendres sur les sols forestiers peut notamment retarder l'acidification, contribuer à la productivité des peuplements grâce à l'ajout ou au remplacement de macronutriments importants (Ca, Mg, K, P), et aussi permettre d'imiter l'effet d'un feu de forêt (Hannam et coll. 2018). Toutefois, il a été démontré que la nature avantageuse de l'application de cendres sur les sols forestiers varie en fonction de la composition chimique des cendres, du type de sol et des espèces d'arbres sur le site d'application, ainsi que du temps écoulé après l'application des cendres (Pitman 2006, Augusto et coll. 2008, Reid et Watmough 2014, Brais et coll. 2015). L'application de cendres sur la couverture morte évite que cette matière résiduelle se retrouve enfouie, tout en favorisant la productivité forestière (p. ex. Domes et coll. 2018). D'autres recherches sont nécessaires pour garantir l'absence de tout effet néfaste sur l'environnement, et pour augmenter les avantages de l'application de cendres par site en tenant compte des différentes caractéristiques des cendre et de la nature des sites destinataires.

Dans le but d'étudier l'application potentiellement avantageuse des cendres de bois sur les sols forestiers au Canada, 14 dispositifs expérimentaux au sein du réseau AshNet ont été établis dans cinq provinces (C.-B., Sask., Man., Ont., Qc). Ces essais pratiques permettent d'étudier les répercussions de l'application de cendres sur une variété de peuplements forestiers et de types de sols, d'espèces d'arbres, d'âges de peuplement, ainsi que les répercussions des compositions chimiques et de doses d'application des cendres. À l'issue de ces projets de recherche actuellement en cours au Canada, il existe une abondance de renseignements sur les protocoles et les méthodes d'application de cendres. Le présent rapport vise principalement à orienter les prochaines recherches du Canada en matière d'utilisation des cendres comme amendement, en (1) synthétisant les pratiques et approches expérimentales actuelles dans les études d'AshNet, et (2) en formulant des recommandations et des commentaires quant à un protocole normalisé et aux domaines de recherche importants.

## 2.0 Méthodes et sites d'étude actuels d'AshNet

### 2.1 *Survol des types de sites d'étude d'AshNet*

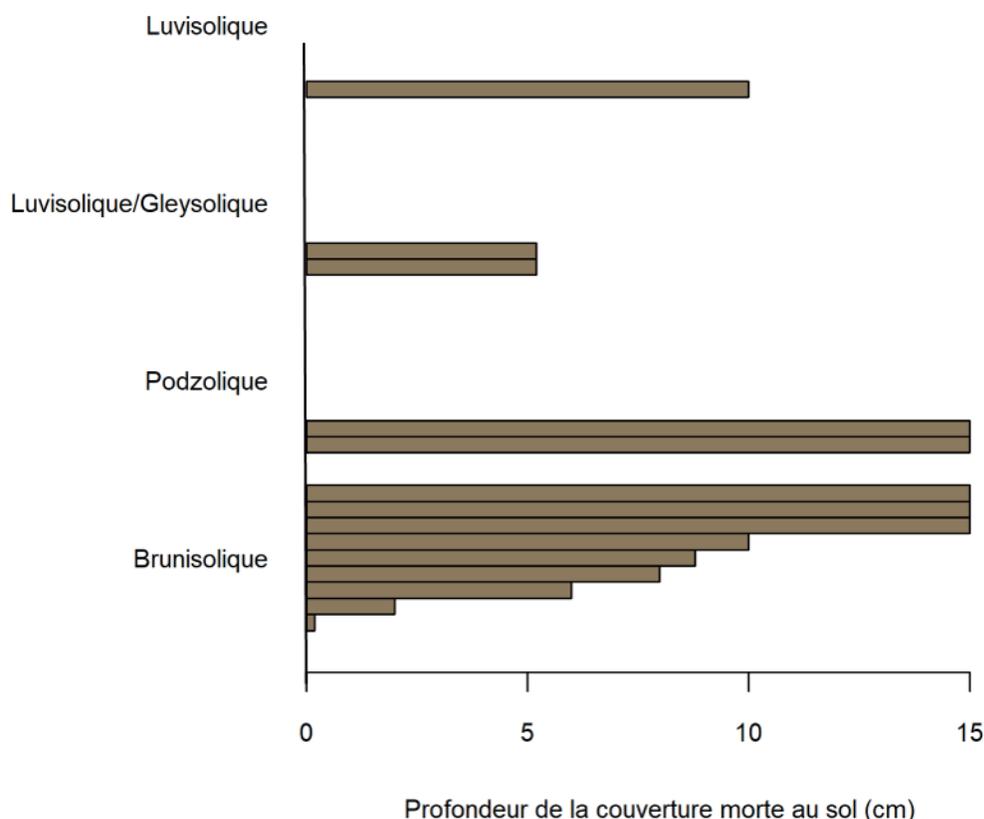
AshNet se compose actuellement de dix groupes de recherche différents, représentant un total de 14 sites définis dans quatre zones de végétation, dont la forêt subboréale de la cordillère (Meidinger et Baldwin 2017), la forêt boréale du centre-ouest (Baldwin et coll. 2016a), la forêt boréale de l'Est (Baldwin et coll. 2016b), et la forêt mixte et tempérée de l'Est (Baldwin et coll. 2018) (Figure 2.1.1). On prévoit également une application sur un site supplémentaire dans la forêt mixte et tempérée de l'Est (lac Porridge) en 2018 (Figure 2.1.1). Aucun site d'étude n'est pour le moment défini dans les zones de végétation de la forêt tempérée froide du Pacifique, située à l'ouest du pays, ni dans la zone de végétation de la forêt tempérée acadienne, située à l'est. Toutefois, des études sur l'épandage de cendres ont eu lieu dans chacune de ces zones de végétation, dont une sur l'île de Vancouver (Prescott et Brown 1998), et une sur l'Île-du-Prince-Édouard (Mahendrappa et coll. 2006), lesquelles n'ont toutefois pas été maintenues (Figure 2.1.1).



5

**Figure 2.1.1** Localisation des sites d'étude d'AshNet (triangles), ainsi que deux essais d'épandage de cendres qui n'ont pas été maintenus (cercles) au Canada en lien avec les principales zones forestières de la Classification nationale de la végétation du Canada (Canadian National Vegetation Classification [online] 2018). Les formes courtes des sites : l'île de Vancouver (VCI), le site de Johnson Creek (JSC), Aleza Lake nord et sud (ALN & ALS), Mistik (MTK), Pineland (PND), 25<sup>e</sup> Sideroad (SRD), Island Lake (ISL), Lac Porridge (PRD), Haliburton (HBN), Senneterre 1-3 (SEN 1-3), Valcartier (VCT), Érable à sucre et peuplier hybride de la forêt des Cantons-de-l'Est (ES-CE, PH-CE), et l'Île-du-Prince-Édouard (PEI).

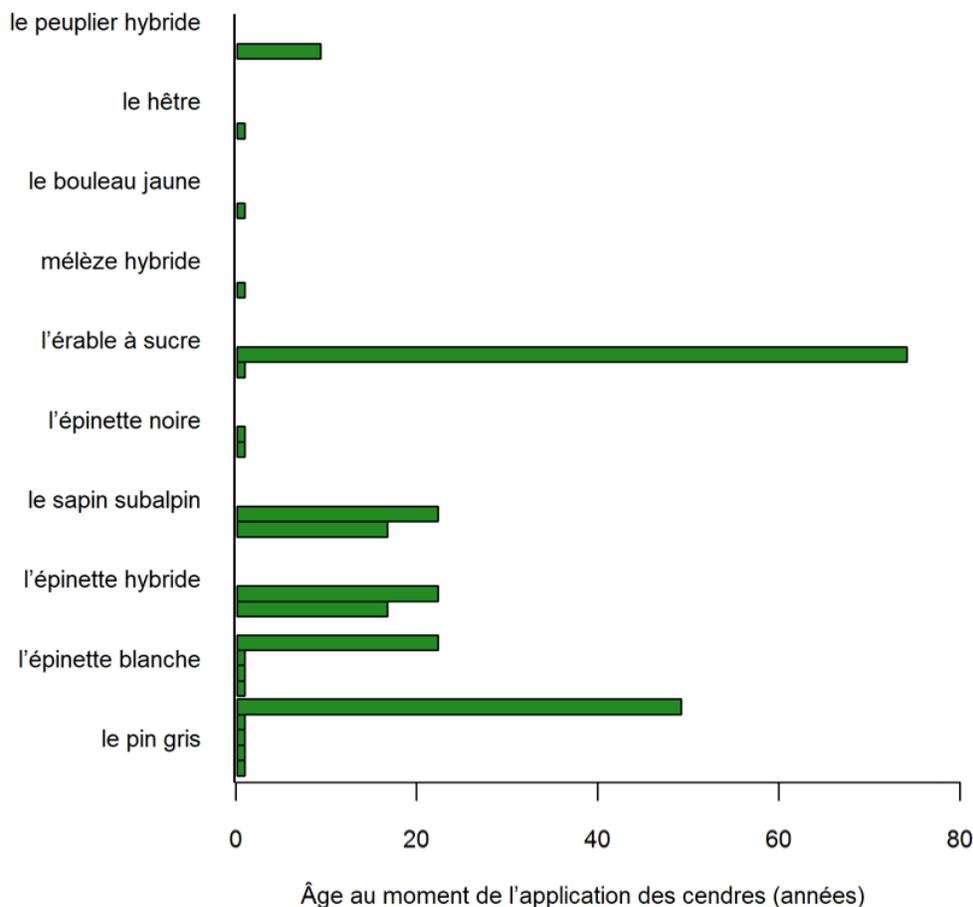
Des essais d’AshNet ont été menés sur différents dépôts meubles (glaciolacustre – 3, fluvioglaciale – 3, et dépôt morainique – 6) et ont révélé un éventail de textures de sol (loams limono-argileux aux sables) et de classes de sol. Les sols de la classe brunisolique ont été les types de sol les plus étudiés, et présentent des profondeurs de couverture morte variées (jusqu’à 15 cm de profondeur) (Figure 2.1.2). Les autres classes de sol en cours d’étude comprennent les luvisols, les gleysols et les podzols, dont les profondeurs de couverture morte varient de modérées (5 à 10 cm) à importantes (10 à 15 cm) (Figure 2.1.2). Aucun site d’AshNet ne se trouve dans les forêts supportées par des sols de la classe organique. De plus, les sols à texture fine et les sols ayant des matériaux apparentés issus du cumulose, du sable lœssique/éolien ou de colluvions sont sous-représentés sur les sites d’AshNet (voir l’annexe A pour une présentation des caractéristiques individuelles des sites d’étude).



**Figure 2.1.2** Sites d’étude d’AshNet par classe de sol et par profondeur de la couverture morte. Chaque barre représente une seule étude pour chacune des classes de sol. La barre juste au-dessus du zéro représente un sol brunisolique avec 0 cm de couverture morte (25e Sideroad).

De nombreux sites (10) ont été établis dans des peuplements à dominance de conifères, alors que seuls trois ont été établis dans des forêts de feuillus mixtes et un dans une plantation de peupliers hybrides. Le pin gris (*Pinus banksiana*) représente l’espèce de conifère la plus courante, suivie de l’épinette (épinette blanche [*Picea glauca*], épinette noire [*Picea mariana*], épinette hybride [*Picea engelmannii* x *glauca*]), avec un âge de peuplement lors de l’application de cendres allant de moins d’un an à 53 ans (Figure 2.1.3). Parmi tous les sites d’étude d’AshNet et toutes les espèces d’arbres, la moitié des études portaient sur les

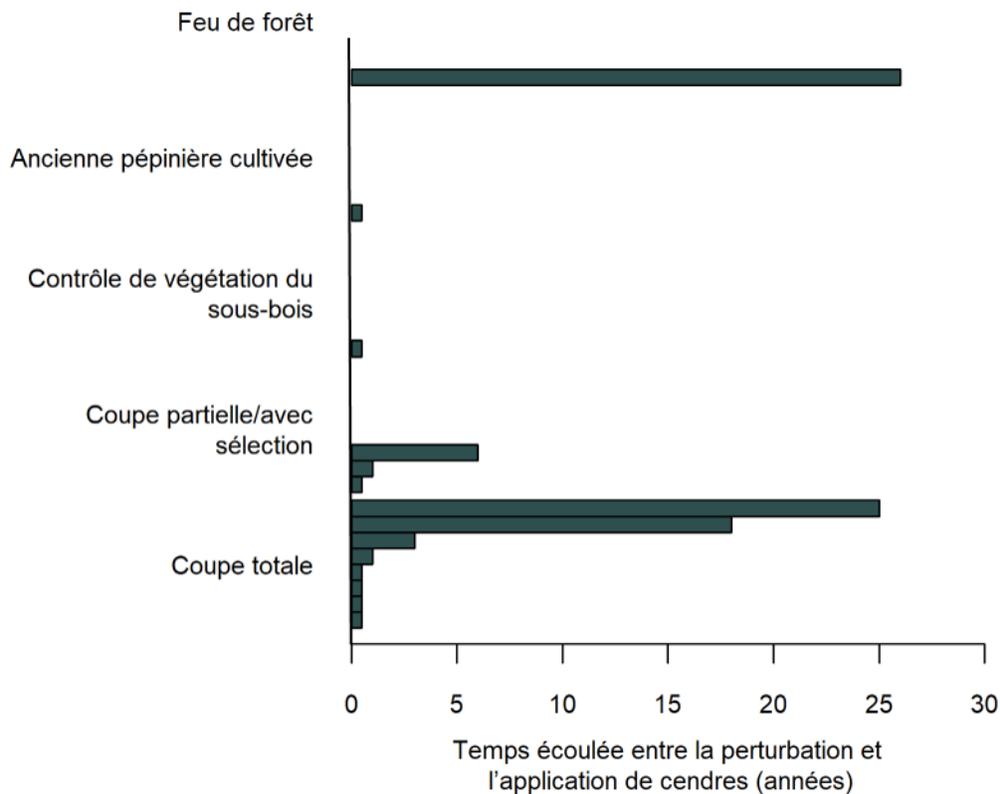
effets de l'application de cendres au cours de la phase du semis (c.-à-d. juste avant ou après la plantation des semis, ou avant la régénération naturelle), et la moitié des sites portaient sur les effets des cendres sur des peuplements matures âgés entre 7 à 80 ans (Figure 2.1.3). Tous les peuplements d'AshNet étudiés n'avaient pas le même âge au moment de l'application des cendres, ce qui reflète la réalité des pratiques de gestion forestière de peuplements inéquiennes couramment utilisées au Canada. Par exemple, le site de Haliburton est un peuplement inéquienne typique des coupes sélectives par arbre ou des systèmes de régénération progressive (voir l'annexe A pour une présentation des caractéristiques individuelles des sites d'étude). Des études ultérieures pourraient permettre d'approfondir l'étude des bénéfices d'ajouter des cendres sur des peuplements inéquiennes et équiennes qui se trouvent à différentes étapes de rotation (p. ex. étape intermédiaire à étape finale).



**Figure 2.1.3** Sites d'étude AshNet par espèces principales d'arbres et par âge de peuplement au moment de l'application des cendres. Chaque barre représente une seule étude pour chacune des espèces d'arbres. Les barres juste au-dessus de zéro représentent les peuplements nouvellement plantés (pin gris, épinette blanche, épinette noire, mélèze hybride) ou en régénération (érables à sucre, bouleau jaune, hêtre) âgés de moins d'un an au moment de l'application des cendres. L'érable à sucre de Haliburton, le hêtre à grandes feuilles, la pruche du Canada et le bouleau jaune n'ont pas été étudiés en raison des nombreux arbres d'âges différents au moment de l'application des cendres. Cette différence est attribuable aux pratiques de gestion qui maintiennent des peuplements inéquiennes dans le cadre de la rotation des récoltes.

Toutes les études d'AshNet portent actuellement sur l'application de cendres après la récolte, à l'exception de deux études (la vieille pépinière de 25<sup>e</sup> Sideroad – superficies continuellement cultivées, et Johnson Creek – feu de végétation) n'ayant pas d'antécédents de coupe à blanc, de coupe sélective par

arbre, de coupe de récupération ou de nettoyage de végétation de sous-bois (Figure 2.1.4). De plus, certains sites ont également connu des feux avant la récolte (Sennetterre 1-3), ou ont été soumis à un brûlage extensif prescrit après la récolte et avant la mise en œuvre expérimentale (Aleza Lake sud). Parmi les études d’AshNet, le type de récolte le plus courant était la coupe à blanc avec l’application de cendres à des différents intervalles après la coupe à blanc (<1 an – 25 ans) (Figure 2.1.4). Parmi tous les antécédents de perturbation, les cendres ont été appliquées immédiatement à la suite de la perturbation (c.-à-d. <1 an) sur la moitié des sites, et d’un an à vingt-six ans après la perturbation sur tous les autres sites (Voir l’annexe A pour une présentation des caractéristiques individuelles des sites d’étude). Étant donné le potentiel d’augmentation de l’enlèvement des nutriments à la suite de plusieurs rotations de récoltes, la possibilité de tirer un avantage accru de l’application de cendres sur les peuplements de deuxième et troisième rotation pourrait faire l’objet d’études ultérieures.



**Figure 2.1.4** Sites d’étude d’AshNet par type de perturbation historique et par durée écoulée entre les perturbations et l’application des cendres. Chaque barre représente une seule étude pour chacun des différents types de perturbation historique. Les barres juste au-dessus de zéro représentent l’application de cendres moins d’un an après la perturbation.

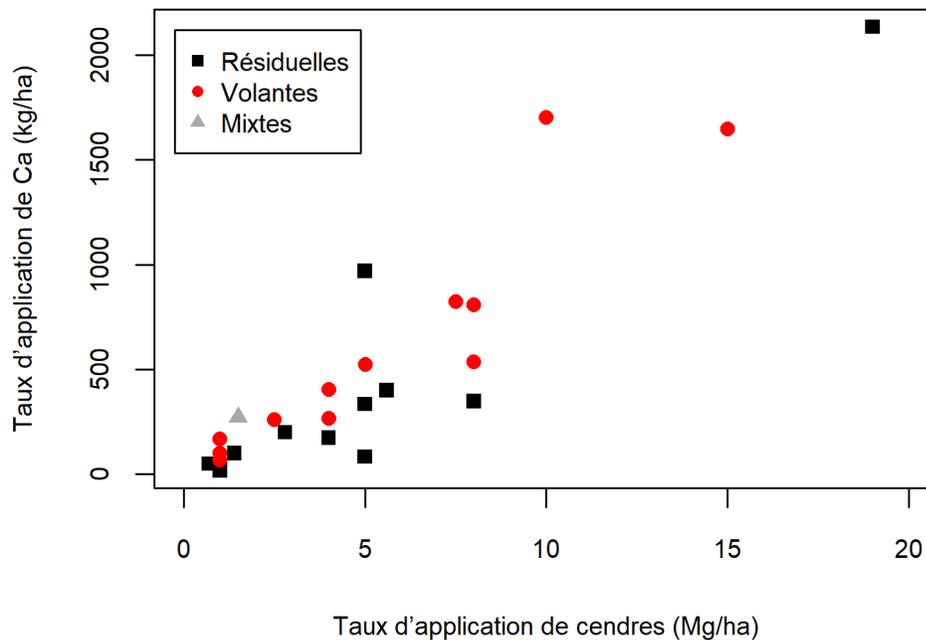
## *2.2 Évaluation avant l'application des cendres et dispositif expérimental*

La caractérisation des sites avant l'application des cendres peut fournir une condition de référence, ainsi qu'une indication quantitative de la réponse des sols et des arbres lorsque les mêmes caractéristiques sont mesurées après l'application des cendres. Presque toutes les études d'AshNet (n = 13 sur 14) comprenaient une certaine évaluation avant l'application des cendres. Les propriétés chimiques des sols, suivies par les caractéristiques des peuplements, ont été les types de données les plus couramment recueillis sur les sites d'étude d'AshNet avant l'application (tableau 2.2.1), à l'exception des caractéristiques des peuplements qui n'ont en général pas été recueillies avant l'application des cendres sur les sites où la récolte a été faite immédiatement avant la mise en place de l'expérience. Plus particulièrement, les données des sites avant l'application les plus couramment recueillies comprenaient le pH du sol et la surface terrière d'un peuplement (tableau 2.2.1). Lorsque les propriétés chimiques du sol étaient mesurées, les analyses comprenaient les éléments totaux (92 %), en particulier C et N, les nutriments et cations échangeables et extractibles (85 %), en particulier les cations échangeables Ca, Mg, K et Na. Bien qu'elle soit moins courante, une analyse complète des éléments totaux (42 %) et du contenu de la matière organique (25 %) a été réalisée (tableau 2.2.1). Les propriétés physiques du sol ont également été recueillies sur cinq sites et des renseignements sur la quantité et le contenu élémentaire des résidus de bois tombés au sol ont été recueillis (voir l'annexe B pour consulter les évaluations avant application propre à chaque site).

**Tableau 2.2.1** Résumé des mesures avant l'application des cendres menées sur les 14 sites d'étude d'AshNet.

Objet de mesure	Études d'AshNet avec types de mesures	Ensemble des mesures	Les plus représentées (% de la représentation)
<b>Peuplement</b>	Études portant sur des peuplements matures, ou avant récolte 64 % – 9 sur 14	Diamètre basal, surface basale, hauteur, densité des troncs, biomasse aérienne du bois + des branches + de l'écorce + du feuillage des arbres vivants et morts sur pied, recensement des espèces	Surface basale (56 % – 5 sur 9)
<b>Résidus de bois tombés au sol</b>	14 % – 2 sur 14	Biomasse aérienne et sous-terreine, volume, catégorie de décomposition et contenus en C, N, P, Ca, Mg et K (résidus de bois effilés et bruts tombés au sol)	Biomasse aérienne (100 % – 2 sur 2)
<b>Propriétés physiques du sol</b>	36 % – 5 sur 14	Texture du sol, épaisseur de la couverture morte, analyse de la taille des particules, densité apparente, texture et contenu des fragments bruts	Densité apparente (60 % – 3 sur 5)
<b>Propriétés chimiques du sol</b>	86 % – 12 sur 14	pH du sol, acidité échangeable, conductivité électrique, capacité d'échange cationique, saturation en bases, nutriments totaux et végétaux disponibles (N, P, S), azote inorganique, éléments totaux (Al, As, B, C, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Hg, Mo, Na, Ni, Se, Zn), matière organique (perte par calcination), carbone organique et inorganique, cations basiques échangeables (Ca, Mg, K, Na), éléments/composés extractibles (P, NH <sub>4</sub> , NO <sub>3</sub> , Fe, Al, Mn, Cu, Zn)	pH du sol (92 % – 11 sur 12)

Il est possible d'établir des doses d'application de cendres optimales en déterminant les exigences en matière de nutriments et d'alcalinité du site destinataire conjointement avec une détermination des propriétés physiques et chimiques des cendres. Bien que la caractérisation des cendres ait été effectuée avant la mise en œuvre de tous les essais pratiques (p. ex. pour assurer une concentration acceptable des métaux lourds), les doses d'application expérimentale n'ont en général pas été choisies en fonction des concentrations élémentaires de nutriments dans les cendres (c.-à-d. Ca, K, Mg, P) ou du potentiel de chaulage (c.-à-d. équivalent CaCO<sub>3</sub>). On a relevé deux exceptions, une sur le site d'Island Lake où la cendre expérimentale a été appliquée en fonction des doses d'application de Ca (kg/ha), et une à Valcartier, où la cendre a été appliquée selon l'équivalent CaCO<sub>3</sub>. Cela est important, car les propriétés chimiques des cendres peuvent grandement varier en fonction de plusieurs facteurs, tels que le type et la source de matière première (en particulier les combustibles propres et mixtes) et les conditions de combustion (Emilsson 2006). Le type et la source de matière première utilisés pour produire la cendre utilisée sur les sites d'AshNet allaient des boues d'effluent aux rémanents et des feuillus aux résineux, mais étaient principalement constitués d'espèces de résineux et d'écorce (tableau 2.2.2). Par ailleurs, les cendres appliquées au cours des études provenaient de différents types d'installations de bioénergie (la plupart étaient des chaudières industrielles, mais une partie des cendres utilisées sur les deux sites d'Aleza Lake provenait d'un gazogène classique). Par conséquent, les différentes cendres appliquées à la même dose affichaient souvent des doses d'éléments appliquées et des potentiels de chaulage très différents. Par exemple, les doses d'application de Ca allaient de 84 à 970 kg/ha sur les sites d'étude où les cendres étaient appliquées à la même dose de 5 Mg/ha (Figure 2.2.1). Concevoir des doses d'éléments appliquées en fonction de la concentration des macronutriments dans les cendres ou de la capacité des cendres à augmenter le pH du sol peut être une bonne approche pour tenir compte de ces différences et optimiser l'avantage souhaité de l'application.



**Figure 2.2.1** Relation entre les doses d'application des cendres (poids sec Mg/ha) et les doses d'application de Ca (kg/ha) parmi les sites d'étude d'AshNet. Les carrés noirs représentent les cendres résiduelles, les cercles rouges les cendres volantes et le triangle gris un mélange de cendres volantes et résiduelles.

On a entre autres envisagé d'utiliser des cendres de nature différente (cendres volantes, cendres résiduelles, ou mélange de cendres volantes et résiduelles) ainsi que le traitement préalable des cendres avant leur application. Les cendres volantes sont constituées de fines particules recueillies dans des gaz d'échappement ou de cheminée à la suite du processus de combustion, alors que les cendres résiduelles (parfois appelées cendres grises) sont les cendres recueillies sous la chaudière ou le gazogène (Emilsson 2006). Parmi les études d'AshNet, 57 % portaient sur l'application de cendres résiduelles, 43 % sur les cendres volantes, et une étude utilisait un mélange de cendres volantes et résiduelles (tableau 2.2.2). De plus, une étude (25<sup>e</sup> Sideroad) portait également sur l'application de cendres semblables à celles du biocharbon. On a défini ce traitement comme étant du biocharbon en raison de sa haute teneur en charbon et de son apparence qui ressemblait à du vrai biocharbon. Ces cendres ont cependant été produites dans une chaudière à basse température plutôt que par pyrolyse (Sevean 2014).

Les propriétés chimiques des cendres volantes et résiduelles peuvent beaucoup varier en fonction de la température de combustion, de la circulation de l'air et du type de matière première employé (Hannam et coll. 2018); mais en général, les cendres volantes peuvent accumuler des concentrations plus importantes des éléments plus volatiles (Emilsson 2006). Un effort récent visant à recenser et à comparer les propriétés chimiques des cendres issues de différentes chaudières à résidus au Canada montre que les cendres volantes peuvent parfois avoir un pH plus alcalin et contenir de plus fortes concentrations des éléments K, Ca, S, Cd, Mo, Se, Ni, et Zn (Ressources naturelles Canada 2018b). La base de données montre également qu'il existe une fluctuation dans les concentrations d'éléments d'une chaudière à l'autre lorsque l'on compare les cendres volantes aux cendres résiduelles (Ressources naturelles Canada 2018b).

**Table 2.2.2** Résumé des approches expérimentales des 14 sites d'étude d'AshNet comprenant le dispositif de l'étude et l'application des cendres.

<b>Caractéristiques</b>	<b>Ensemble des caractéristiques parmi les études</b>	<b>Les plus représentées (% de la représentation)</b>
<b>Dispositif de l'étude</b>	Dispositif aléatoires complets/incomplets par blocs, dispositif en parcelles subdivisées, dispositif aléatoire complet	Dispositif aléatoire complet par blocs (57 %)
<b>Surface des parcelles</b>	De 0,0008 à 5 ha	< 0,05 ha (57 %)
<b>Nombre de réplifications</b>	De 3 à 12 (parcelles)	3 (43 %)
<b>Traitements supplémentaires</b>	Urée/engrais, exclos de chevreuil, biosolides de papier, désherbant, chaux, scarification des sols	Urée/engrais (50 %)
<b>Traitement préalable des cendres</b>	Aucun, autodurcissant et broyage	Aucun (93 %)
<b>Matière première de cendres</b>	Copeaux, sciure de bois, écorce, rabotures, tombées de sciage, boues de papier déshydratées, boues d'effluent, résidus de construction et de démolition	Écorce (86 %)
<b>Provenance des cendres</b>	Résineux (mélange non identifié, épinette-pin-sapin, pin gris, épinette noire, sapin baumier), feuillus (mélange non identifié, peuplier faux-tremble), mélange de résineux et de feuillus	Résineux (92 %)
<b>Type de cendres</b>	Cendres volantes, cendres résiduelles, mélange de cendres volantes et résiduelles, cendres semblables à celles du biocharbon (cendres à forte teneur de charbon, produites à basse température et non par pyrolyse)	Cendres résiduelles (57 %)
<b>Doses d'application des cendres</b>	Poids sec de 0,7 Mg/ha à 19 Mg/ha (poids frais de 20 Mg/ha)	≤ 5 Mg/ha (43 %)
<b>Méthodes d'application des cendres</b>	Application manuelle sur la surface (p. ex., avec une pelle), application manuelle et avec un râteau sur une profondeur de 10 cm, épandage mécanique sur la surface	Application manuelle sur la surface (57 %)

Le traitement préalable ou la stabilisation des cendres ne constitue pas une pratique courante dans les sites d'AshNet établis jusqu'à maintenant. Mistik est le seul site pour lequel les cendres ont subi un traitement préalable par broyage après leur autodurcissement au cours de l'entreposage. En plus des méthodes d'autodurcissement et de broyage, d'autres formes de traitement préalable peuvent comprendre la pelletisation et la granulation. Il peut être important d'envisager le traitement préalable des cendres avant l'application lorsque l'on applique les cendres à des échelles opérationnelles (p. ex., préoccupations en matière de santé en raison des particules en suspension dans l'air au cours du transport et de l'application, répartition uniforme), ainsi que l'efficacité des cendres comme amendement (p. ex., libération des éléments à un taux stable, influence sur les caractéristiques physiques du sol telles que la rétention d'eau) (Steenari et coll. 1999, Emilsson 2006, Hannam et coll. 2016).

Sur les sites d'étude d'AshNet, les cendres ont été appliquées à la main (p. ex., avec des seaux ou des pelles) ou par épandage mécanique sur des parcelles dont la surface allait de 0,0008 à 5 ha. En outre, une étude (peuplier hybride dans les Cantons-de-l'Est) concernait l'application de cendres sous forme de boue en mélangeant les cendres avec des biosolides. Les cendres ont presque toujours été appliquées sur la surface de la couverture morte, et une seule étude concernait le mélange de cendres sur une profondeur de 10 cm dans la couverture morte après l'application (25<sup>e</sup> Sideroad). Les doses d'application des cendres ont été modérées selon les recommandations de dosage européennes (Hannam et coll. 2016), s'élevant le plus couramment à < 5 Mg/ha sans dépasser 19 Mg/ha en poids sec ou 20 Mg/ha en poids frais (tableau 2.2.2).

Les dispositifs aléatoires complets par blocs ont été les dispositifs d'étude les plus couramment utilisés avec une application sur plus de la moitié des sites d'étude d'AshNet jusqu'à maintenant. Dans ces cas, plusieurs blocs contiennent tous les traitements appliqués sur les emplacements déterminés *a priori* parmi les sites expérimentaux (p. ex., en tenant compte des variations de la pente des sites, de l'état du sol, etc.). Des dispositifs en parcelles subdivisées plus complexes ont également été utilisés pour évaluer d'autres facteurs (c.-à-d. la maîtrise de la végétation et des herbivores ou les sous-parcelles d'espèces d'arbres). Dans certains cas, on a aussi établi des dispositifs aléatoires incomplets par blocs ou des dispositifs aléatoires complets. Toutes les études comprenaient des parcelles témoins (parcelles où aucune cendre n'a été appliquée) dans leur dispositif expérimental et certaines faisaient l'objet de traitements supplémentaires visant à observer l'influence des cendres utilisées comme amendement lorsqu'elles sont appliquées conjointement avec de l'engrais minéral azoté (un macronutriment végétal essentiel que l'on trouve en faible concentration dans les cendres) (Voir l'annexe C pour obtenir des détails sur les expériences à chaque site).

### 2.3 Évaluations après l'application des cendres

Toutes les études d'AshNet ont porté sur l'évaluation des caractéristiques des peuplements et des propriétés chimiques des sols après l'application des cendres. Les expériences d'AshNet établies sont relativement récentes, avec des expériences âgées d'au plus 11 ans depuis l'application des cendres, à l'exception de Mistik qui a été établie en 1995 et réévaluée 21 ans après l'application des cendres.

Une observation courante sur tous les sites, la croissance des arbres, a été évaluée au moment de l'application (temps 0) et au fil du temps après l'application des cendres. Les parcelles témoins (aucune application de cendres) ont également été remesurées. Les évaluations des semis portaient principalement sur la survie, la hauteur et le diamètre du collet des racines, alors que l'évaluation de la croissance des arbres matures comprenait le diamètre à hauteur de poitrine (tableau 2.3.1). On a également procédé à une analyse nutritionnelle foliaire sur tous les sites d'étude, à l'exception de deux, afin d'évaluer l'influence de l'application des cendres sur l'absorption des nutriments par les arbres. Seul un site (Johnson Creek) a recueilli des mesures de nutriments foliaires avant et après l'application des cendres, alors que tous les autres sites se sont intéressés aux différences dans les concentrations de nutriments foliaires entre les parcelles témoins et les parcelles traitées dans le cadre de l'évaluation des effets des cendres. L'analyse du statut nutritif des feuilles et des aiguilles se penche sur le C total et les macronutriments N, P, Ca, Mg, S et K, mais certaines études ont examiné d'autres éléments (p. ex. Al, B, Cu, Fe, Mn, Zn) (Tableau 2.3.1). Les autres caractéristiques de végétation évaluées incluent la biomasse et les nutriments des racines et des tiges, la caractérisation du recouvrement, de la biomasse et de la composition de la végétation de sous-bois, ainsi que la mesure du rayonnement solaire (tableau 2.3.1).

Les propriétés chimiques du sol les plus couramment recueillies après l'application des cendres sont : l'alcalinité et le pH, les cations échangeables, le C et N total, ainsi que l'élément P disponible (tableau 2.3.1). Les autres caractéristiques du sol observées comprenaient l'analyse élémentaire totale, l'acidité échangeable, le carbone organique, la saturation en bases, la capacité d'échange cationique, la conductivité électrique et la densité apparente. Quelques études ont également porté sur l'analyse des propriétés chimiques de la solution du sol afin d'examiner les concentrations de nutriments et de métaux dans les eaux de lixiviation des sols (consulter l'annexe D pour obtenir les évaluations après l'application sur chaque site).

**Table 2.3.1** Résumé des mesures après l'application des cendres menées dans les 14 sites d'étude d'AshNet.

Objet de mesure	Études d'AshNet avec types de mesures	Ensemble des mesures	Les plus représentées (% de la représentation)
<b>Peuplement</b>	93 % – 13 sur 14	Survie, santé, hauteur, accroissement de la hauteur, diamètre (diamètre du collet des racines, base, ou diamètre à hauteur de poitrine), biomasse, éléments foliaires (C, N, P, S, Ca, Mg, K, Al, B, Cu, Fe, Mn, Zn), masse des aiguilles, biomasse des racines et des pousses, nutriments des racines et des pousses, recensement des arbres.	Diamètre (100 % – 13 sur 13), nutriments foliaires (92 % – 12 sur 13), hauteur (69 % – 9 sur 13)
<b>Sous-bois</b>	50 % – 7 sur 14	Diversité des espèces, composition des espèces, pourcentage de couverture, proportion de surface occupée, biomasse, biomasse des racines et des pousses des mauvaises herbes, semis (dénombrement, hauteur, montaison), pourcentage de couverture, mesures de la lumière	Composition des espèces (57 % – 4 sur 7), pourcentage de couverture (57 % – 4 sur 7)
<b>Résidus de bois tombés au sol</b>	14 % – 2 sur 14	Biomasse aérienne et souterraine, volume, classe de décomposition, contenu en C, N, P, Ca, Mg et K (débris ligneux fins et grossiers)	Biomasse aérienne (100 % – 2 sur 2)
<b>Stocks de carbone et de nutriments</b>	29 % – 4 sur 14	Éléments C, N, P, Ca, Mg et K contenus dans la biomasse aérienne ou souterraine, y compris les résidus de bois tombés au sol, les racines brutes, la couverture morte, le sol minéral et la proportion d'arbres.	S.O.
<b>Propriétés chimiques du sol</b>	100 % – 14 sur 14	pH du sol, acidité échangeable, conductivité électrique, capacité d'échange cationique, saturation en bases, nutriments totaux et végétaux disponibles (N, P, S), azote inorganique, éléments totaux (Al, As, B, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Hg, Mo, Na, Ni, Pb, Se, Zn), matière organique (perte par calcination), carbone organique et inorganique, cations basiques échangeables (Ca, Mg, K, Na), éléments/composés extractibles (P, NH <sub>4</sub> , NO <sub>3</sub> , Fe, Al, Mn, Cu, Zn)	pH du sol (93 % – 13 sur 14)
<b>Propriétés chimiques de la solution du sol</b>	29 % – 4 sur 14	Concentrations de nutriments et de métaux lourds, pH, carbone, (à 15, 30, 50, 60 ou 100 cm) par lysimétrie ou partiellement par sondes PRS.	Nutriments et métaux lourds (75 % – 3 sur 4)
<b>Biote du sol</b>	36 % – 5 sur 14	Microorganismes du sol (biomasse, respiration, tests d'activité enzymatique, composition des communautés, bactéries, champignons, protozoaires), faune du sol (collemboles, acariens, nématodes, salamandres cendrées), faune épigée (carabes, araignées, staphylins, millipèdes, fourmis)	Microorganismes du sol (80 % – 4 sur 5)

On a également examiné l'influence possible de l'ajout de cendres sur le biote du sol (p. ex. diversité, abondance, structure des communautés) dans cinq sites d'étude d'AshNet différents. Le biote examiné dans ces études comprenait des communautés microbiennes du sol, la faune du sol allant des acariens aux salamandres et une faune épigée diverse (tableau 2.3.1). Un projet commun en cours vise à examiner l'effet de l'application de cendres sur la biodiversité du sol, notamment les invertébrés et les champignons du sol recueillis sur différents sites d'AshNet. L'analyse de ces groupes taxonomiques permettront d'améliorer notre compréhension des possibles répercussions néfastes de l'application de cendres sur le biote de la forêt et les fonctions de l'écosystème. Il existe également des possibilités d'évaluer les conséquences de l'application des cendres sur les propriétés chimiques de l'eau des cours d'eau et de lacs en établissant les liens hydrologiques avec les eaux d'écoulement et les eaux souterraines des sites fertilisés. Il a été démontré que l'augmentation de nutriments et d'ions dans les eaux d'écoulement et les

eaux souterraines à la suite de feux de forêt pouvait avoir des répercussions sur la qualité de l'eau et le biote aquatique (Earl et Blinn 2003, Mast et coll. 2016).

### 3.0 Analyse et recommandations

#### 3.1 Analyse d'ordre pratique

Il est important d'étudier la production, l'entreposage, le traitement préalable, les méthodes d'application et les sites d'application de cendres de bois dans le cadre de toute application expérimentale de cendres, car ces facteurs peuvent avoir des répercussions sur les effets adverses ou bénéfiques possibles des cendres utilisées comme amendement. Différentes sources de matière première (c.-à-d. espèces d'arbres, bois chargés de sel) et différents types de matières premières (p. ex., écorce, sciure de bois, rabotures, qu'elles soient propres ou qu'elles contiennent des métaux ou d'autres impuretés) ainsi que les conditions de combustion (c.-à-d. température, circulation de l'air) ont des conséquences sur la qualité des cendres utilisées comme produit d'amendement. Des recherches visant à comprendre quels **caractéristiques de matière première et de combustion génèrent des cendres de meilleure qualité** ont été menées en Europe (Emilsson 2006) et pourraient être étudiées avec plus de détail ici au Canada afin de permettre une plus grande homogénéité dans les propriétés chimiques des cendres comme sous-produit de la production de l'énergie de la biomasse (Hannam et coll. 2017).

Il est également important d'étudier **l'entreposage des cendres** avant l'application, car des eaux de lixiviation très concentrées en contaminants peuvent être issues de l'entreposage de grandes quantités de cendres peuvent présenter un risque environnemental. De plus, l'entreposage de longue durée peut altérer la qualité des cendres en changeant les propriétés chimiques (p. ex., perte de micronutriments ou de macronutriments par lixiviation et processus microbiens) et physiques (p. ex., autodurcissement en bouquets) des cendres (Etiégni et Campbell 1991, Steenari et coll. 1999). Ces changements peuvent à leur tour nécessiter la mise en place de traitements supplémentaires, comme le broyage des cendres avant leur application, afin d'assurer une application adéquate et une libération uniforme des nutriments dans le sol. Les autres solutions de traitements préalables utilisées en Europe pour améliorer les propriétés physiques (p. ex., la rétention de l'humidité du sol) et chimiques (p. ex., lente libération des nutriments au fil du temps) du sol à la suite de l'application des cendres comprennent la pelletisation et la granulation, et représentent des domaines de recherche importants en matière d'application opérationnelle au Canada (Emilsson 2006, Hannam et coll. 2016).

Il est important de prendre en considération le **lieu et l'échelle** de l'application des cendres afin de déterminer la viabilité de la pratique au niveau opérationnel. Les expériences actuelles ne sont pas encore opérationnelles, mais sont menées sur des peuplements et dans des écosystèmes où l'on prévoit l'application de cendres. La priorité devrait être plus particulièrement accordée à l'étude de l'application de cendres sur les peuplements et dans les écosystèmes prévus pour la récolte, sensibles à l'épuisement des nutriments, pouvant tirer avantage du pH du sol, et possiblement situés à proximité d'installations produisant des cendres, car ils sont les plus viables sur le plan économique et représentent un meilleur potentiel pour des applications au niveau opérationnel. Par ailleurs, les méthodes d'application des cendres au niveau opérationnel doivent également être étudiées, car les études actuelles consistaient seulement à appliquer des cendres manuellement (c.-à-d. avec des seaux et des pelles) ou à l'aide d'épandeur mécanique sur une surface  $\leq 5$  ha. Les recherches à venir doivent être pensées en fonction des méthodes qui sont actuellement utilisées à un niveau opérationnel (p. ex. en Europe et au sud du Québec) de façon à améliorer les méthodes pour un usage extensif à travers le Canada. La possibilité d'appliquer des cendres en hiver a été évoquée par des gestionnaires de terres et devrait être examinée.

Le choix des **doses d'application des cendres** est en général fondé sur les concentrations de métaux lourds (c.-à-d. pour garantir des concentrations de métaux lourds sécuritaires aux sites destinataires) et les doses expérimentales types (p. ex., issues de la documentation, d'autres études ou d'autres territoires comme l'Europe), et moins sur les concentrations actuelles de nutriments dans les cendres (c.-à-d. demande et offre de nutriments) ou sur la nécessité de chaulage du sol. Dans des études ultérieures, on pourrait envisager de quantifier les concentrations de macronutriments et micronutriments dans les cendres ainsi que la nécessité de chaulage du sol (c.-à-d. équivalent  $\text{CaCO}_3$ ) afin de choisir les doses optimales, qui avantageraient ainsi la croissance et la productivité des arbres par l'ajout de nutriments ou l'augmentation du pH du sol.

### *3.2 Dispositif expérimental et recommandations en matière de suivi*

Le dispositif expérimental relatif à toute application de cendres doit être choisi en fonction des objectifs de l'étude, car ils définiront l'échelle adéquate de l'expérience ainsi que le type et la durée du contrôle avant et après l'application de cendres. Par exemple, les expériences d'application de cendres devraient cibler différents seuils et évaluer la capacité des cendres à imiter une perturbation naturelle (feu de forêt) et favoriser la croissance et la productivité des arbres.

Pour évaluer les effets de l'application de cendres, on recommande l'utilisation de **parcelles témoins dans un dispositif aléatoire complet par blocs**, ce qui permet de comparer les parcelles témoins et les parcelles de traitement au fil du temps, tout en tenant compte a priori des variations dans les conditions des sites (p. ex., pente, topographie, humidité, etc.). On recommande également de définir une zone tampon pour s'assurer que les traitements ne se chevauchent pas entre les parcelles. En outre, une répétition accrue des observations augmentera la possibilité de capturer les différences entre les parcelles en tenant mieux compte de la diversité des conditions de site et des parcelles. D'autres dispositifs plus complexes, comme des dispositifs en parcelles subdivisées ou factoriels fractionnés, peuvent également s'avérer efficaces en fonction des questions posées. Des expériences dans des bassins versants ou le long de toposéquences devraient être envisagées afin d'évaluer en profondeur les effets de l'application de cendres sur les milieux aquatiques. Jusqu'à maintenant, les variables qui illustrent le mieux l'influence bénéfique possible de l'utilisation de cendres comme amendement au fil du temps concernent la **disponibilité de nutriments** (p. ex., cations échangeables du sol, azote total et P disponible), **le pH du sol et la croissance des arbres**. De plus, **l'analyse élémentaire foliaire** permet de suivre les effets bénéfiques en fournissant une évaluation rapide de l'état des nutriments foliaires des arbres à la suite de l'amendement.

On devrait, en plus des effets bénéfiques des cendres, contrôler les **effets adverses possibles de l'application des cendres** en évaluant les **concentrations de métaux lourds**, ainsi que les dioxines et les furanes le cas échéant (présents dans les cendres issues de bois contaminé ou de bois exposé à l'eau de mer), dans les cendres avant l'application et en contrôlant les effets de l'utilisation des cendres comme amendement sur le **biote du sol, les eaux de lessivage du sol, les propriétés chimiques des cours d'eau et le biote aquatique**, ainsi que la **croissance des arbres**. Il peut être également intéressant d'analyser les propriétés chimiques des cendres pour déterminer l'apport en métaux lourds et en nutriments (c.-à-d. cendres volantes, cendres résiduelles ou cendres volantes et résiduelles mélangées). On devrait effectuer les premières analyses des propriétés chimiques des cendres à partir de plusieurs échantillons de la même source afin de bien capturer la variabilité de la source.

Jusqu'à maintenant, dans les études AshNet, on a évalué les effets de l'amendement sur les peuplements sur une durée relativement courte, la plupart des études portant sur des peuplements âgés de moins d'un an à onze ans. Une seule concernait un peuplement de 21 ans. On devrait étudier en priorité les effets de

l'application de cendres sur de longues périodes afin d'évaluer la durée des effets de l'amendement, d'étudier s'ils évoluent au fil du temps et de définir un calendrier de nouvelle application. Aux fins de contrôle à long terme, il faut veiller à ce que la surface des parcelles soit assez grande pour éviter que les différents traitements ne se chevauchent pendant la croissance des arbres. De plus, en s'appuyant sur les essais actuels d'application de cendres au Canada, il conviendrait de procéder à des recherches visant à mieux comprendre les caractéristiques essentielles de la cendre et des sites qui sont susceptibles d'être favorables à l'application de cendres. Il faut aussi tenter de savoir quels sites peuvent recevoir des cendres en toute sécurité sur différents types de sol et de peuplements, ce point étant essentiel à la mise en œuvre concrète de l'application de cendres à une échelle opérationnelle dans un contexte où des politiques forestières provinciales sur l'applications de cendres étaient élaborées.

### 3.3 *Recommandations clés et considérations particulières*

- **Choisir les sites d'étude** parmi des emplacements et des écosystèmes dont le potentiel en matière d'application de cendres de bois est reconnu (p. ex., un site ou un écosystème dédié à la récolte, sensible à l'exportation des résidus de récolte comme les sites pauvres en nutriments ou les sites de deuxième ou de troisième rotation de récolte, les sites dont les demandes en nutriments sont élevées comme les peuplements à rotation intermédiaire, les sites dont les espèces d'arbres tireraient avantage d'un pH du sol plus élevé comme l'érable à sucre dans des peuplements mixtes, et les sites à proximité de chaudières à biomasse).
- **Concevoir des expériences** qui comptent des parcelles témoins dans un dispositif aléatoire complet par blocs, un dispositif en parcelles subdivisées, des études en bassin versant ou le long d'une toposéquence, ou d'autres adaptations fondées sur les questions et objectifs expérimentaux de base (p. ex., imiter la perturbation naturelle, augmenter la croissance des arbres) et les caractéristiques propres à chaque site.
- **Évaluer la qualité des cendres de bois** en ce qui concerne les concentrations en métaux lourds et les dioxines et les furanes le cas échéant (Hannam et coll. 2016), mais également les nutriments, l'équivalent CaCO<sub>3</sub> et le pH, afin de déterminer les **doses optimales de cendres** et le type de cendres à appliquer (c.-à-d. volantes, résiduelles ou mélange de cendres volantes et résiduelles).
- **Valider les méthodes d'entreposage, de traitement préalable et d'application des cendres.** Cela est particulièrement important à mesure que les expériences d'application sont de plus en plus vastes et s'orientent vers une échelle opérationnelle.
- Évaluer la pertinence des techniques d'échantillonnage, la fréquence d'échantillonnage et la durée écoulée depuis l'application des cendres afin de déterminer les effets sur les **nutriments du sol, le pH du sol ainsi que la productivité et la santé des peuplements.**
- **Étudier l'influence sur le biote du sol et, à l'échelle des bassins versants, sur le biote aquatique qui peut avoir un lien hydrologique** avec les cendres et les eaux de lixiviation (p. ex., les communautés microbiennes, les invertébrés) afin d'évaluer les répercussions possibles sur l'écosystème.

## 4.0 Résumés propres à chaque site

### 4.1 Essai de cendres de bois à Johnson Creek

#### **Climat**

(Modélisation des estimations ponctuelles du climat à l'échelle mensuelle (1981-2010) décrite à l'adresse suivante : <http://cfs.nrcan.gc.ca/projects/3/1>)

**Précipitations moyennes annuelles** : 555 mm

**Température moyenne minimale en janvier** : -15,2 °C

**Température moyenne maximale en juillet** : 21,4 °C

#### **Description du site**

Avant l'expérience, un peuplement à dominance d'épinettes blanches de seconde venue mélangées à du peuplier baumier (*Populus balsamifera*), à du bouleau à papier (*Betula papyrifera*) et à du pin tordu latifolié (*Pinus contorta*) se trouvait sur le site. Les sols se sont constitués à partir de dépôts de placage de sédiments fluvio-glaciaires et sont caractérisés par un loam limoneux en surface et d'un loam argileux sous-jacent. Il s'agit d'un luvisol gris brunisolique avec une couverture morte d'environ 6 cm.

#### **Description des cendres**

Les cendres utilisées pour l'essai de cendres de bois à Johnson Creek ont été recueillies sur des brûleurs de biomasse multicônes de l'installation de cogénération Chetwynd Forest Industries West Fraser, à Chetwynd, en Colombie-Britannique. La matière première des cendres se composait d'écorce, de rabotures et de sciure de résineux. Les cendres utilisées pour l'expérience étaient principalement des cendres volantes et n'avaient reçu aucun traitement préalablement à l'application.

#### **Description du traitement**

Avant l'installation de la parcelle, le site de Johnson Creek avait connu une réhabilitation de conifères en 1987 et un feu de friches en 1991. En 1993, on a planté des épinettes blanches (et des pins tordus latifoliés dans une moindre mesure) selon une densité de 2 400 arbres/ha<sup>-1</sup>. En juin 2007, on a appliqué quatre traitements différents, dont une parcelle témoin (aucune cendre ni urée), des cendres à une dose de 5,0 Mg/ha<sup>-1</sup>, de l'urée à une dose de 100 kg N/ha<sup>-1</sup>, et des cendres à une dose de 5,0 g/ha<sup>-1</sup> + de l'urée à une dose de 100 kg N/ha<sup>-1</sup>. Les doses d'application des cendres ont été calculées en fonction d'un poids sec et les cendres ont été appliquées manuellement sur le sol. Les parcelles de traitement et les parcelles témoins ont été reproduites trois fois.

#### **État**

Le suivi des effets du traitement sur les arbres et les propriétés chimiques du sol est en cours.

#### **Personne-ressource principale**

Richard Kabzems, chercheur en sylviculture, BC Ministry of Forests, Lands, Natural Resource Operations and Rural Development

## 4.2 Essai de cendres de bois dans la forêt expérimentale d'Aleza Lake (N. et S.)

### **Climat**

(Modélisation des estimations ponctuelles du climat à l'échelle mensuelle (1981-2010) décrite à l'adresse suivante : <http://cfs.nrcan.gc.ca/projects/3/1>).

**Précipitations moyennes annuelles** : 714 mm (site nord); 719 mm (site sud)

**Température moyenne minimale en janvier** : -12,2 °C

**Température moyenne maximale en juillet** : 23,1 °C (site nord); 22,9 °C (site sud)

[Remarque : Plan de gestion de l'ALRF 2005 (p. 21) à [http://alrf.unbc.ca/?page\\_id=17](http://alrf.unbc.ca/?page_id=17)

*Précipitations moyennes annuelles : 895 mm; température moyenne minimale en janvier : env.-9 °C; température moyenne maximale en juillet : 32,2 °C]*

### **Description du site**

Les deux sites (distancés d'environ 2,5 km) sont situés en Colombie-Britannique dans la zone biogéoclimatique sub-boréale à épinette et dans la sous-zone de travail 1. Avant l'expérience, une coupe à blanc avait été faite sur chaque site (site sud, à l'hiver 1989/1990; site nord, à l'hiver 1996/1997). En septembre 1990, le site sud a connu un brûlage extensif intense. Au moment de l'établissement, chaque site abritait une plantation d'épinettes hybrides de 24 ans (site sud) ou de 18 ans (site nord), ainsi que des espèces régénérées naturellement (p. ex., le douglas vert, le pin tordu latifolié, la pruche de l'Ouest, le peuplier faux-tremble, le bouleau à papier, le peuplier). Sur les deux sites, les sols se sont constitués sur des formations glacio-lacustres et sont caractérisés par un loam limono-argileux en surface et de l'argile sous-jacent. Il s'agit principalement d'un luvisol gris ainsi que d'un gleysol luvique avec une couverture morte d'environ 5,2 cm.

### **Description des cendres**

Deux types de cendres ont été utilisés pour l'essai de cendres de bois d'Aleza Lake : (1) des cendres résiduelles produites au gazogène classique Nexterra à l'installation de bioénergie de l'Université du nord de la Colombie-Britannique, et (2) des cendres résiduelles produites dans une chaudière à lit fixe dans l'une des installations de Canfor Pulp Limited Partnership (CPLP) à Prince George, en Colombie-Britannique (chaudière à pâte de Prince George, numéro 2). Dans les deux cas, la matière première des cendres se composait de déchets propres de résineux (copeaux, écorce ou sciure). Seules les cendres résiduelles ont été utilisées pour l'expérience (le gazogène de l'Université du nord de la Colombie-Britannique produit également des cendres volantes) et les cendres n'avaient reçu aucun traitement préalable à l'application. Cependant, la cendre du gazogène de l'Université du nord de la Colombie-Britannique a été humidifiée en octobre 2014 et a retenu l'humidité dans une caisse couverte jusqu'à son utilisation en mai 2015.

### **Description du traitement**

Sur chacun des deux sites, on a utilisé un dispositif aléatoire par blocs. Sur chacun des sites, on a réalisé trois traitements de cendres (0 (témoin), 5 Mg de cendres par ha<sup>-1</sup> du gazogène de l'Université du nord de la Colombie-Britannique ou 5 Mg de cendres par ha<sup>-1</sup> de la chaudière de CPLP) x 2 traitements à l'urée (0 (témoin) ou 100 kg d'urée-N ha<sup>-1</sup>) x trois blocs (reproductions), soit un total de six combinaisons de traitements réparties sur plus de 18 parcelles. À l'été 2014, on a accumulé des parcelles circulaires (rayon de 8 m). Fin mai 2015, on a effectué des traitements de cendres et d'engrais. On a appliqué les cendres et les engrais manuellement avec une pelle. Les doses d'application des cendres étaient basées sur des cendres sèches.

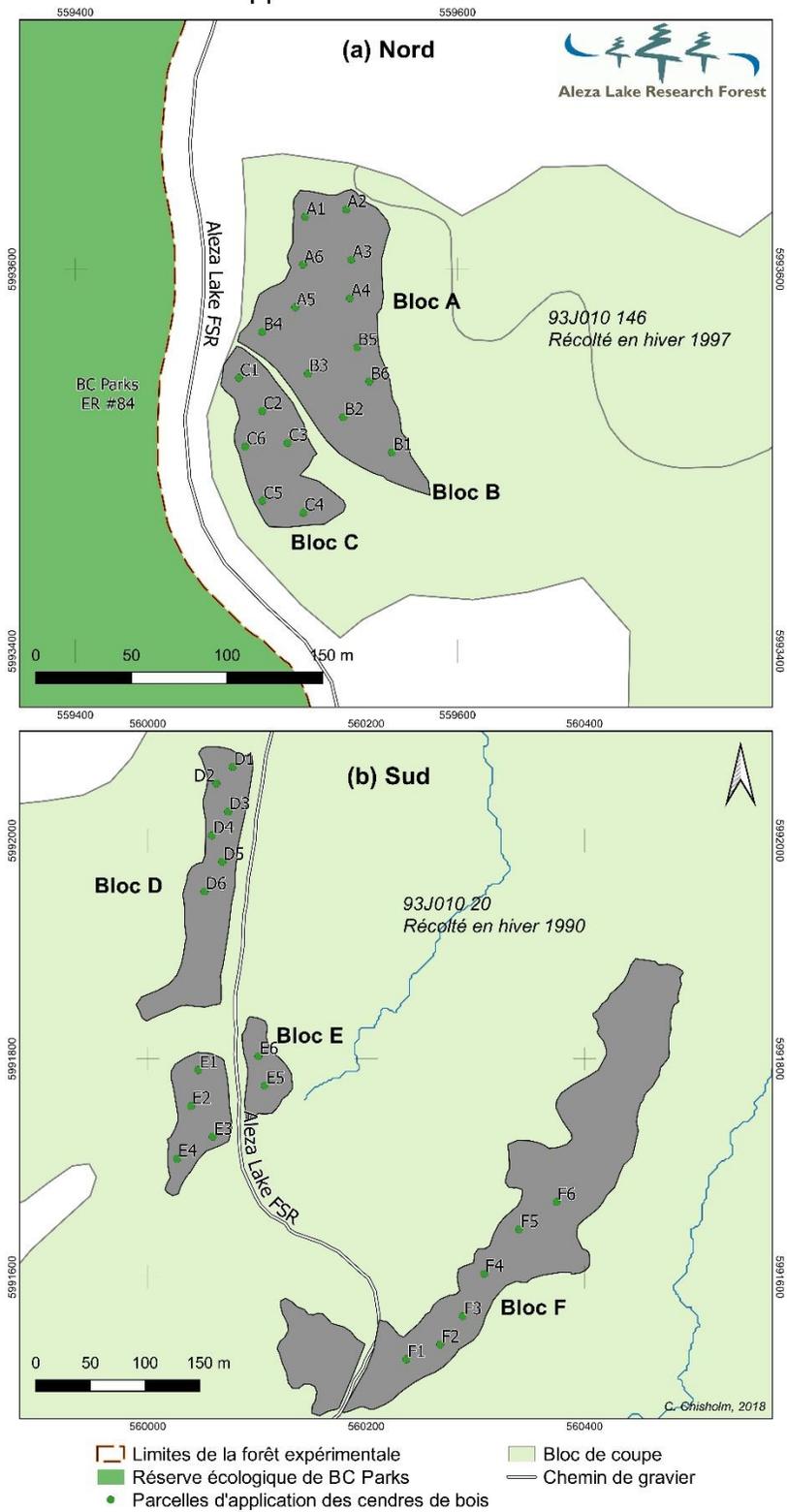
### **État**

Le suivi des effets du traitement sur les arbres et les propriétés chimiques du sol est en cours.

**Personne-ressource principale**

P. Michael Rutherford, professeur, Université du nord de la Colombie-Britannique

## Forêt expérimentale d'Aleza Lake Tests d'application des cendres de bois



**Figure 4.2.1** Dispositif expérimental d'application de cendres de bois comme amendement dans la forêt expérimentale d'Aleza Lake nord (a) et sud (b).

### 4.3 Essai de cendres de bois de Mistik (route Burness)

#### **Climat**

(Modélisation des estimations ponctuelles du climat à l'échelle mensuelle (1981-2010) décrite à l'adresse suivante : [http://scf.rncan.gc.ca/projets/3/1?lang=fr\\_CA](http://scf.rncan.gc.ca/projets/3/1?lang=fr_CA))

**Précipitations moyennes annuelles** : 431 mm

**Température moyenne minimale en janvier** : -22,2 °C

**Température moyenne maximale en juillet** : 22,4 °C

#### **Description du site**

Avant l'expérience, le site abritait un peuplement de peupliers faux-trembles (*Populus tremuloides*) de 60 à 69 ans et d'épinettes blanches. Il s'agit d'un luvisol gris orthite qui s'est développé à partir d'une moraine d'ablation. Le sol est un loam argileux contenant des poches de loam sableux, et il est aussi caractérisé par une pierrosité modérée à élevée.

#### **Description des cendres**

Les cendres utilisées dans l'essai de cendres de bois de Mistik (route Burness) ont été produites dans un brûleur olivine au Millar Western Mill, à Meadow Lake, en Saskatchewan. La matière première des cendres se composait à 85 % d'écorce et de copeaux de peuplier faux-tremble, et à 15 % de boue de pâte déshydratée. Seules les cendres résiduelles ont été utilisées pour l'expérience. Comme les cendres se sont durcies au cours de l'entreposage à l'extérieur, elles étaient broyées avant d'être appliquées.

#### **Description du traitement**

Une coupe à blanc avait été effectuée sur le site grâce à une récolte intégrale à l'hiver 1995 et une trancheuse à disques a été passée sur le site en mai 1995. Fin juin, début juillet de cette même année, on a planté des semis d'épinettes blanches selon une densité d'environ 6 944 plants par ha<sup>-1</sup>. Après la plantation, on a appliqué des cendres selon trois doses : 0 Mg de cendre par ha<sup>-1</sup> (témoin); 1 Mg a de cendre par ha<sup>-1</sup>; et 5 Mg de cendres par ha<sup>-1</sup>. Les doses d'application ont été calculées en fonction d'un poids sec et les cendres ont été appliquées manuellement sur le sol. On a reproduit les traitements trois fois.

#### **État**

On fait le suivi de ce site pour observer les effets à long terme.

#### **Personne-ressource principale**

Ken Van Rees, professeur, Département des sciences du sol, Université de Saskatchewan

#### 4.4 Essai de cendres de bois à Pineland

##### **Climat**

(Modélisation des estimations ponctuelles du climat à l'échelle mensuelle (1981-2010) décrite à l'adresse suivante : <http://cfs.nrcan.gc.ca/projects/3/1>)

**Précipitations moyennes annuelles** : 635 mm

**Température moyenne minimale en janvier** : -22,5 °C

**Température moyenne maximale en juillet** : 25,0 °C

##### **Description du site**

Avant l'expérience, le site abritait un peuplement de pins gris d'environ 30 ans. Les sols se sont développés à partir d'un dépôt fluvioglaciaire et ont une texture sableuse. Il s'agit principalement d'un brunisol avec une couverture morte d'environ 2 cm.

##### **Description des cendres**

Les cendres utilisées pour l'essai de cendres de bois à Pineland ont été produites dans une chaudière de biomasse à la pépinière forestière de Pineland, à Hadashville, au Manitoba. La matière première des cendres se composait principalement de copeaux de pin gris avec un peu d'écorce. Pour l'expérience, on a utilisé un mélange de cendres volantes et résiduelles et les cendres n'avaient reçu aucun traitement préalable à l'application.

##### **Description du traitement**

Avant de définir les parcelles, l'essai de cendres de bois à Pineland a subi une coupe à blanc grâce à une récolte intégrale des arbres. En mai 2015, quatre traitements de cendres et d'urée ont été appliqués dans un dispositif factoriel. Les traitements comprenaient : 0 Mg de cendres par ha<sup>-1</sup> (témoin) ou 1,5 Mg de cendres par ha<sup>-1</sup> et 0 kg d'urée par ha<sup>-1</sup> (témoin) ou 70 kg d'urée par ha<sup>-1</sup>. Les doses d'application des cendres ont été calculées en fonction d'un poids sec et les cendres ont été appliquées manuellement sur le sol. On a reproduit les traitements cinq fois. En mai 2015, on a planté des semis de pins gris selon une densité de 2 500 plants par ha<sup>-1</sup>.

##### **État**

Le suivi des effets du traitement sur les arbres, la végétation de sous-bois et les propriétés chimiques du sol est en cours.

##### **Personne-ressource principale**

John Markham, professeur, Département des sciences biologiques, Université du Manitoba

#### 4.5 Essai de cendres de bois à la pépinière de 25e Sideroad

##### **Climat**

(Modélisation des estimations ponctuelles du climat à l'échelle mensuelle (1981-2010) décrite à l'adresse suivante : <http://cfs.nrcan.gc.ca/projects/3/1>)

**Précipitations moyennes annuelles** : 694 mm

**Température moyenne minimale en janvier** : -19,2 °C

**Température moyenne maximale en juillet** : 23,8 °C

##### **Description du site**

Ce site a été établi sur une ancienne pépinière d'arbres. Les sols se sont développés sur un dépôt fluvioglaciaire et sont caractérisés par un loam sableux. Il s'agit d'un brunisol eutrique orthite sans couverture morte typique car le site a été sans arrêt labouré.

##### **Description des cendres**

Les cendres utilisées dans l'essai de cendres de bois à la pépinière de 25<sup>e</sup> Sideroad ont été produites dans une chaudière électrique à grille oscillante de l'installation de produits forestiers de Resolute, à Thunder Bay, en Ontario. La matière première des cendres se composait principalement d'écorce, de sciure et de copeaux de résineux, ainsi que 8 % à 14 % de boue d'effluent secondaire. On a appliqué deux matériaux semblables à de la cendre : (1) des cendres volantes de texture fine, grises, à faible teneur en carbone, et (2) des cendres volantes semblables à celles du biocharbon léger, noir et à teneur élevée de carbone. Les cendres semblables à celles du biocharbon ont été produites à basse température. Aucune des cendres n'a reçu un traitement avant d'être appliquées, mais les cendres semblables à celle du biocharbon étaient entreposées à l'extérieur depuis trois ans.

##### **Description du traitement**

En mai 2012, neuf traitements de cendres et de biocharbon ont été appliqués dans un dispositif factoriel, dont cinq par blocs. Les neuf traitements concernés représentaient des combinaisons par paire de : 0 Mg de cendres à faible teneur en carbone par ha<sup>-1</sup> (témoin); 1 Mg de cendres à faible teneur en carbone par ha<sup>-1</sup>; ou 10 Mg de cendres à faible teneur en carbone par ha<sup>-1</sup>; et 0 Mg de biocharbon par ha<sup>-1</sup> (témoin); 1 Mg de biocharbon par ha<sup>-1</sup>; ou 10 Mg de biocharbon par ha<sup>-1</sup>. Les doses d'application ont été calculées selon un poids sec. On a appliqué les cendres manuellement puis on les a réparties à la surface à l'aide d'un râteau. Immédiatement après le traitement, on a planté des épinettes blanches ou noires sur la moitié de chaque parcelle (subdivisée). Des pins gris ont été plantés au bord de chaque parcelle. On a planté les semis selon une densité de 25 600 plants par ha<sup>-1</sup>.

##### **État**

Le suivi des effets du traitement sur les arbres, la végétation de sous-bois, les propriétés chimiques du sol et les microbes du sol est en cours.

##### **Personne-ressource principale**

Amanda Diochon, professeure agrégée, Département de géologie, Université de Lakehead

#### 4.6 Expérience de récolte de biomasse à Island Lake

##### **Climat**

(Modélisation des estimations ponctuelles du climat à l'échelle mensuelle (1981-2010) décrite à l'adresse suivante : <http://cfs.nrcan.gc.ca/projects/3/1>)

**Précipitations moyennes annuelles** : 927 mm

**Température moyenne minimale en janvier** : -20,6 °C

**Température moyenne maximale en juillet** : 23,1 °C

##### **Description du site**

Avant l'expérience, le site abritait un peuplement de seconde venue de pins gris d'environ 40 ans qui s'était régénéré après une coupe à blanc conventionnelle. Les sols se sont développés à partir d'un dépôt fluvioglaciaire et sont caractérisés par une texture allant du sable au loam sableux. Il s'agit d'un brunisol dystrique éluvié ayant une couverture morte d'environ 10 cm.

##### **Description des cendres**

Les cendres utilisées lors de l'expérience de récolte de la biomasse à Island Lake ont été produites à l'installation de cogénération Tembec, à Chapleau, en Ontario. La matière première des cendres était principalement de l'écorce, des rabotures et de la sciure de pin gris et d'épinette noire. Pour l'expérience, on a utilisé que des cendres résiduelles qui n'avaient reçu aucun traitement préalablement à l'application.

##### **Description du traitement**

En décembre 2010 et janvier 2011, le site a fait l'objet d'une coupe à blanc au moyen d'une récolte intégrale des arbres avec enlèvement de la biomasse. Tous les résidus d'exploitation ont été enlevés. En octobre 2011, on a appliqué des cendres selon cinq doses : 0 Mg par ha<sup>-1</sup> (témoin); 0,7 Mg par ha<sup>-1</sup>; 1,4 Mg par ha<sup>-1</sup>; 2,8 Mg par ha<sup>-1</sup> ou 5,6 Mg par ha<sup>-1</sup>. Les doses d'application ont été calculées en fonction d'un poids sec et les cendres ont été appliquées manuellement sur le sol. On a répété les traitements quatre (parcelles traitées par cendres) ou cinq (parcelles témoin) fois. En mai 2012, on a planté des semis de pins gris selon une densité de 2 645 plants par ha<sup>-1</sup>. Une plantation intercalaire a été réalisée sur le site en mai 2013.

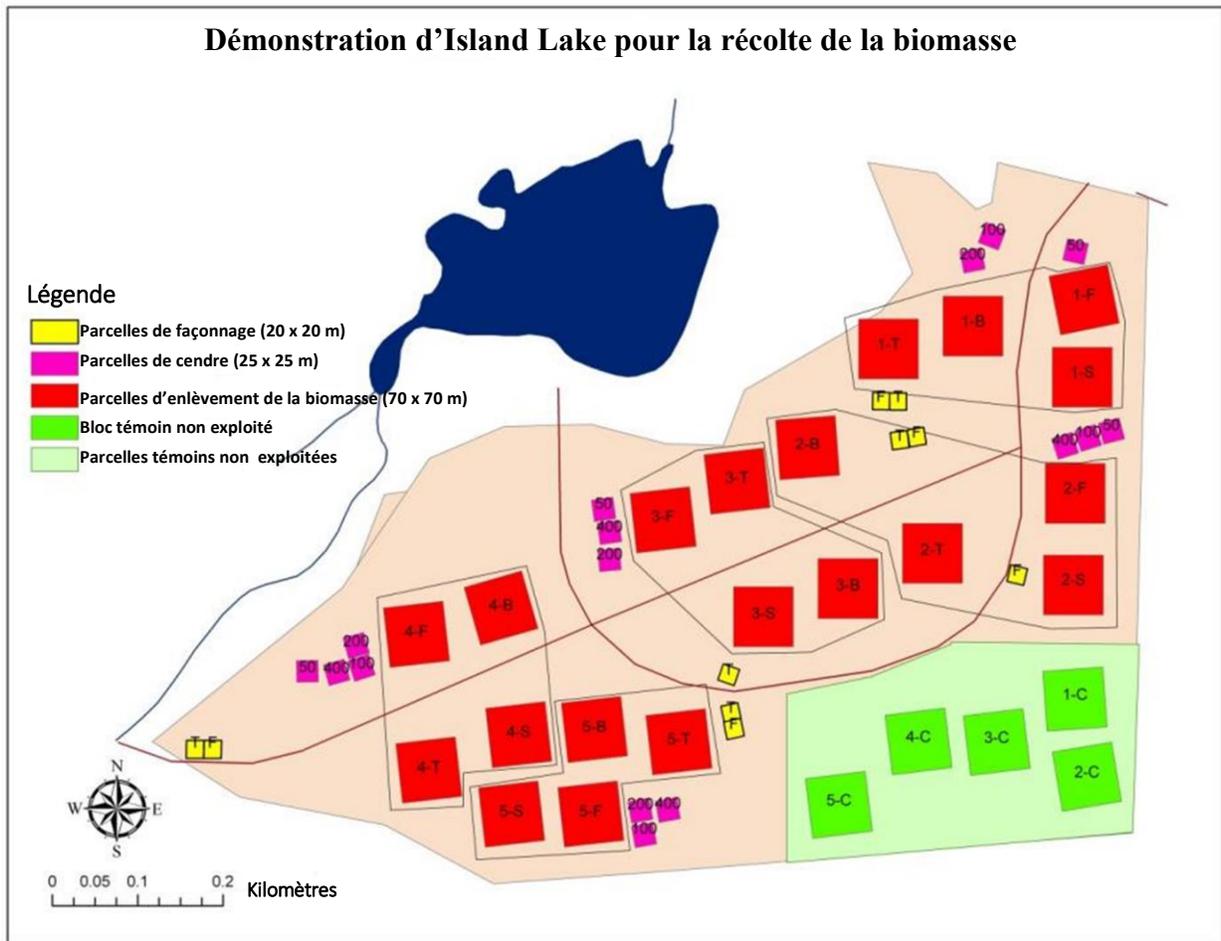
##### **État**

Le suivi des effets du traitement sur les arbres, la végétation de sous-bois, le sol, les propriétés chimiques du sol et le biote du sol est en cours.

##### **Personnes-ressources principales**

Dave Morris, chercheur, ministère des Ressources naturelles et des Forêts de l'Ontario

Paul Hazlett, chercheur, Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie des Grands Lacs



**Figure 4.6.1** Expérience de récolte de biomasse à Island Lake.

#### 4.7 Essai de cendres de bois à Haliburton

##### **Climat**

(Modélisation des estimations ponctuelles du climat à l'échelle mensuelle (1981-2010) décrite à l'adresse suivante : <http://cfs.nrcan.gc.ca/projects/3/1>)

**Précipitations moyennes annuelles** : 1 074 mm

**Température moyenne minimale en janvier** : -17,0 °C

**Température moyenne maximale en juillet** : 24,7 °C

##### **Description du site**

Avant l'expérience, on gérait le site grâce à une coupe sélective par arbre suivi par une coupe de récupération du hêtre à grandes feuilles (*Fagus grandifolia*), et le site abritait un peuplement inéquienne de feuillus mixtes, composé d'érables à sucre (*Acer saccharum*), de hêtres à grandes feuilles, de pruches du Canada (*Tsuga canadensis*) et de bouleaux jaunes (*Betula alleghaniensis*). Les sols se sont développés à partir de granite peu météorisé ou de gneiss granitique du bouclier précambrien et sont caractérisés par un loam sableux. Il s'agit d'un brunisol dystrique orthite ou éluvié ayant une couverture morte de 5 à 8 cm.

##### **Description des cendres**

Les cendres utilisées lors de l'essai de cendres de bois de Haliburton ont été produites dans une chaudière de biomasse à grille oscillante d'une usine de pâtes et papiers. La matière première des cendres était de l'écorce d'épinette, de pin et de sapin recueillie au cours de l'étape d'écorçage du processus de production de la pâte. Pour l'expérience, on a utilisé des cendres résiduelles et volantes. Aucun type de cendres n'a reçu de traitement avant l'application.

##### **Description du traitement**

On a appliqué sept traitements de cendres en août et septembre 2013. Les traitements comprenaient : 0 Mg de cendres par ha<sup>-1</sup> (témoin); 1 Mg de cendres volantes par ha<sup>-1</sup>; 4 Mg de cendres volantes par ha<sup>-1</sup>; 8 Mg de cendres volantes par ha<sup>-1</sup>; 1 Mg de cendres résiduelles par ha<sup>-1</sup>; 4 Mg de cendres résiduelles par ha<sup>-1</sup>; et 8 Mg de cendres résiduelles par ha<sup>-1</sup>. Les doses d'application ont été calculées en fonction d'un poids sec et les cendres ont été appliquées manuellement sur le sol. On a reproduit les traitements quatre fois.

##### **État**

Le suivi des effets du traitement sur les arbres, le sol, les propriétés chimiques des solutions du sol et le biote du sol est en cours.

##### **Personnes-ressources principales**

Nathan Basiliko, professeur, Département de biologie et Centre pour la vitalité des lacs Vale, Université Laurentienne

Trevor Jones, chercheur, ministère des Richesses naturelles et des Forêts de l'Ontario, Section de surveillance de la forêt et de recherche

#### 4.8 Essai de cendres de bois à Senneterre 1

##### **Climat**

(Modélisation des estimations ponctuelles du climat à l'échelle mensuelle (1981-2010) décrite à l'adresse suivante : <http://cfs.nrcan.gc.ca/projects/3/1>)

**Précipitations moyennes annuelles** : 992 mm

**Température moyenne minimale en janvier** : -24,1 °C

**Température moyenne maximale en juillet** : 22,5 °C

##### **Description du site**

Avant l'expérience, le site abritait un peuplement de pins gris d'environ 53 ans qui s'est régénéré après un feu de friche. Le peuplement avait fait l'objet d'une éclaircie commerciale en 1999. Les sols se sont développés à partir d'un dépôt morainique et sont caractérisés par une texture allant du sable au sable loameux. Il s'agit d'un brunisol dystrique éluvié ayant une couverture morte de 10 à 15 cm, principalement de l'hypne.

##### **Description des cendres**

Les cendres utilisées lors de l'essai de cendres de bois à Senneterre 1 ont été produites à l'installation Boralex, à Senneterre, au Québec. La matière première des cendres se composait principalement d'écorce et de rabotures de résineux. Pour l'expérience, on a utilisé que des cendres volantes qui n'avaient reçu aucun traitement préalablement à l'application.

##### **Description du traitement**

En mai 2005, dix traitements de cendres et d'urée ont été appliqués dans un dispositif factoriel. Les traitements comprenaient : (1) 0 Mg de cendres par ha<sup>-1</sup> (témoin); 1 Mg de cendres par ha<sup>-1</sup>; 2 Mg de cendres par ha<sup>-1</sup>; 4 Mg de cendres par ha<sup>-1</sup> ou 8 Mg de cendres par ha<sup>-1</sup>, et (2) 0 kg d'urée par ha<sup>-1</sup> ou 280 kg d'urée par ha<sup>-1</sup>. Les doses d'application ont été calculées en fonction d'un poids sec et les cendres ont été appliquées sur le sol au moyen d'un épandeur mécanique. On a reproduit les traitements quatre fois.

##### **État**

On ne fait plus le suivi de cet essai, le peuplement ayant été récolté.

##### **Personnes-ressources principales**

Nicolas Bélanger, professeur, Département science et technologie, Université TÉLUQ  
Suzanne Brais, professeure retraitée, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

#### 4.9 Essai de cendres de bois à Senneterre 2

##### **Climat**

(Modélisation des estimations ponctuelles du climat à l'échelle mensuelle (1981-2010) décrite à l'adresse suivante : <http://cfs.nrcan.gc.ca/projects/3/1>)

**Précipitations moyennes annuelles** : 934 mm et 920 mm

**Température moyenne minimale en janvier** : -23,3 °C et -23,6 °C

**Température moyenne maximale en juillet** : 23,6 °C et 23,5 °C

##### **Description du site**

Avant l'expérience, le site abritait un peuplement de pins gris qui s'étaient régénérés après un feu de friche. Les sols se sont développés à partir d'un dépôt glaciolacustre et sont caractérisés par une texture allant du loam au sable loameux. Il s'agit majoritairement d'un brunisol dystrique éluvié ayant une couverture morte de 10 à 15 cm, principalement de l'hypne.

##### **Description des cendres**

Les cendres utilisées lors de l'essai de cendres de bois à Senneterre 2 ont été produites à l'installation Boralex, à Senneterre, au Québec. La matière première des cendres se composait principalement d'écorce et de rabotures de résineux. Pour l'expérience, on a utilisé que des cendres volantes qui n'avaient reçu aucun traitement préalablement à l'application.

##### **Description du traitement**

En 2005, le site a fait l'objet d'une coupe à blanc. À l'automne 2006, on a appliqué les traitements de cendres selon trois doses : 0 Mg de cendres par ha<sup>-1</sup> (témoin); 2,5 Mg de cendres par ha<sup>-1</sup>; et 5 Mg de cendres par ha<sup>-1</sup>. Les doses d'application ont été calculées selon un poids sec et varient par bloc, en fonction des besoins en chaux du sol. On a appliqué les cendres sur le sol au moyen d'un épandeur mécanique. Après l'application des cendres, une trancheuse à disques a passé sur les sites. On a reproduit les traitements dans trois blocs. En mai 2007, on a planté des semis d'épinette blanche, de pins gris et de mélèze hybride (*Larix marschlinsii*) selon une densité de 2 500 plants par ha<sup>-1</sup>.

##### **État**

Le suivi des effets du traitement sur les arbres et les propriétés chimiques du sol est en cours.

##### **Personnes-ressources principales**

Nicolas Bélanger, professeur, Département science et technologie, Université TÉLUQ  
Suzanne Brais, professeure retraitée, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

#### 4.10 Essai de cendres de bois à Senneterre 3

##### **Climat**

(Modélisation des estimations ponctuelles du climat à l'échelle mensuelle (1981-2010) décrite à l'adresse suivante : <http://cfs.nrcan.gc.ca/projects/3/1>)

**Précipitations moyennes annuelles** : 969 mm et 979 mm

**Température moyenne minimale en janvier** : -23,9 °C et -24,0 °C

**Température moyenne maximale en juillet** : 23,0 °C et 22,8 °C

##### **Description du site**

Avant l'expérience, le site abritait un peuplement de pins gris et d'épinettes noires qui s'étaient régénérés après un feu de friche. Les sols se sont développés à partir d'un dépôt morainique grossière et sont caractérisés par un sable loameux. Il s'agit majoritairement d'un brunisol dystrique éluvié ayant une couverture morte de 10 à 15 cm, principalement de l'hypne.

##### **Description des cendres**

Les cendres utilisées lors de l'essai de cendres de bois à Senneterre 3 ont été produites à l'installation Boralex, à Senneterre, au Québec. La matière première des cendres se composait principalement d'écorce et de rabotures de résineux. Pour l'expérience, on a utilisé que des cendres volantes qui n'avaient reçu aucun traitement préalablement à l'application.

##### **Description du traitement**

À l'été 2007, le site a fait l'objet d'une coupe à blanc. À l'automne 2007, on a appliqué les traitements de cendres selon trois doses : 0 Mg de cendres par ha<sup>-1</sup> (témoin); 7,5 Mg de cendres par ha<sup>-1</sup>; et 15 Mg de cendres par ha<sup>-1</sup>. Les doses d'application ont été calculées en fonction d'un poids sec et les cendres ont été appliquées sur le sol au moyen d'un épandeur mécanique. Après l'application des cendres, une trancheuse à disques a passé sur les sites. On a reproduit les traitements trois fois. En juin 2008, on a planté des semis d'épinettes noires et de pins gris selon une densité de 2 500 plants par ha<sup>-1</sup>. Dans la moitié des parcelles, on a fertilisé les semis avec de l'engrais 26-21-0-4.6 (NPKS).

##### **État**

Le suivi des effets du traitement sur les arbres et les propriétés chimiques du sol est en cours.

##### **Personnes-ressources principales**

Nicolas Bélanger, professeur, Département science et technologie, Université TÉLUQ  
Suzanne Brais, professeure retraitée, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

#### 4.11 Essai de cendres de bois à Valcartier

##### **Climat**

(Modélisation des estimations ponctuelles du climat à l'échelle mensuelle (1981-2010) décrite à l'adresse suivante : <http://cfs.nrcan.gc.ca/projects/3/1>)

**Précipitations moyennes annuelles** : 1 373 mm

**Température moyenne minimale en janvier** : -18,9 °C

**Température moyenne maximale en juillet** : 23,7 °C

##### **Description du site**

L'essai est réalisé dans un peuplement mature d'érables à sucre, de bouleaux jaunes et de hêtres à grandes feuilles d'environ 70 ans. Les sols se sont développés à partir d'un dépôt morainique. L'évaluation du type et de la texture du sol est prévue, mais n'a pas encore été effectuée.

##### **Description des cendres**

Les cendres utilisées lors de l'essai de Valcartier ont été produites dans la chaudière de biomasse de Produits forestiers de Résolu, située à Château-Richer, près de la ville de Québec, au Québec. La matière première des cendres était principalement de l'écorce d'épinette noire, de sapin baumier (*Abies balsamea*) et de pin gris. Pour l'expérience, on a utilisé que des cendres résiduelles qui n'avaient reçu aucun traitement préalablement à l'application.

##### **Description du traitement**

En septembre et octobre 2017, on a retiré la strate de sous-bois (principalement des gaules de hêtres) sur chaque emplacement de parcelles. Tous les résidus ont été enlevés. En mai 2018, on a appliqué des cendres selon une dose de 0 Mg par ha<sup>-1</sup> (témoin) et 19 Mg par ha<sup>-1</sup> (équivalent CaCO<sub>3</sub> de 5 Mg par ha<sup>-1</sup>). Les autres traitements consistaient en une légère scarification du sol, et en l'ajout de chaux et d'engrais (NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>). Les doses d'application ont été calculées en fonction d'un poids sec et les cendres ont été appliquées manuellement sur le sol. On a répété les traitements dans 12 blocs au sein du peuplement.

##### **État :**

Le suivi des effets du traitement sur les arbres et les propriétés chimiques du sol est en cours.

##### **Personne-ressource principale**

Jérôme Laganière, chercheur, Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie des Laurentides

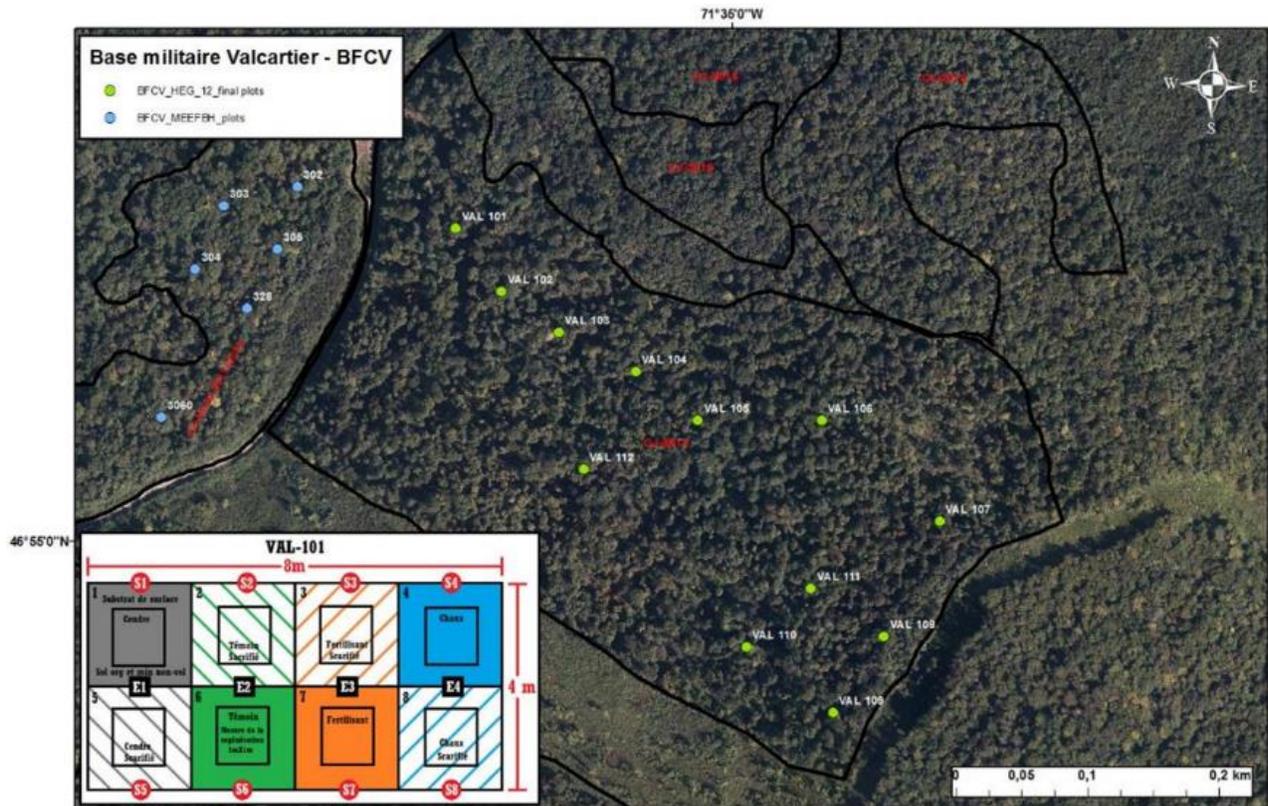


Figure 4.11.1 Expérience d'application de cendres de bois comme amendement à Valcartier.

#### 4.12 Essai de cendres de bois dans les Cantons-de-l'Est – Peuplements d'érables à sucre

##### **Climat**

(Modélisation des estimations ponctuelles du climat à l'échelle mensuelle 1981-2010 décrite à l'adresse suivante : <http://cfs.nrcan.gc.ca/projects/3/1>)

**Précipitations moyennes annuelles** : 1 264 mm

**Température moyenne minimale en janvier** : -16,6 °C

**Température moyenne maximale en juillet** : 23,7 °C

##### **Description du site**

Avant l'expérience, chacun des 15 sites d'étude abritait un peuplement de feuillus mixtes de 60 à 80 ans, constitué principalement d'érables à sucre, de quelques tilleuls d'Amérique (*Tilia americana*), hêtres à grandes feuilles, frênes blancs d'Amérique (*Fraxinus americana*) ou noyers cendrés (*Juglans cinerea*). Tous les peuplements avaient auparavant fait l'objet de coupe à blanc ou de coupe sélective. Les sols se sont développés sur des moraines aux pentes douces à modérées et sont caractérisés par un sableuse, un sable loameux ou loam sableux. Il s'agit en général d'un podzol humo-ferrique orthite avec une couverture morte de 10 à 15 cm, principalement composée de feuilles et de branches.

##### **Description des cendres**

Les cendres utilisées pour cet essai ont été produites à l'usine Domtar, située à Windsor, au Québec. La matière première des cendres se composait de 80 % d'écorce de feuillus et de résineux, et de 20 % de résidus de construction et de démolition. Pour l'expérience, on a utilisé que des cendres résiduelles qui n'avaient reçu aucun traitement préalablement à l'application.

##### **Description du traitement**

Avant la définition des parcelles, chaque site a fait l'objet d'une coupe sélective (2012-2014). De l'été au début de l'automne 2015, on a établi une parcelle traitée et une parcelle témoin sur chacun des 15 sites. Les traitements comprenaient : 0 Mg de cendres par ha<sup>-1</sup> (témoin) ou 20 Mg de cendres par ha<sup>-1</sup>. Les doses d'application ont été calculées en fonction d'un poids frais et les cendres ont été appliquées sur le sol au moyen d'un épandeur mécanique. On a également placé de petits exclos de chevreuil dans chaque parcelle afin d'examiner l'influence du broutement des chevreuils.

##### **État :**

Le suivi des effets du traitement sur les arbres et les propriétés chimiques du sol est en cours.

##### **Personne-ressource principale**

Nicolas Bélanger, professeur, Département science et technologie, Université TÉLUQ

#### 4.13 Essai de cendres de bois dans les Cantons-de-l'Est – Peuplements de peupliers hybrides

##### **Climat**

(Modélisation des estimations ponctuelles du climat à l'échelle mensuelle (1981-2010) décrite à l'adresse suivante : <http://cfs.nrcan.gc.ca/projects/3/1>)

**Précipitations moyennes annuelles** : 1 204 mm

**Température moyenne minimale en janvier** : -16,5 °C

**Température moyenne maximale en juillet** : 24,2 °C

##### **Description du site**

Avant l'expérience, chacun des 15 sites d'étude abritait un peuplement de feuillus mixtes de 60 à 80 ans, constitué principalement d'érables à sucre, de quelques tilleuls d'Amérique (*Tilia americana*), hêtres à grandes feuilles, frênes blancs d'Amérique (*Fraxinus americana*) ou noyers cendrés (*Juglans cinerea*). Tous les peuplements avaient auparavant fait l'objet de coupe à blanc ou de coupe sélective. Les sols se sont développés sur des moraines aux pentes douces à modérées et sont caractérisés par un sableuse, un sable loameux ou loam sableux. Il s'agit en général d'un podzol humo-ferrique orthite avec une couverture morte de 10 à 15 cm, principalement composée de feuilles et de branches.

##### **Description des cendres**

Les cendres utilisées pour cet essai ont été produites à l'usine Domtar, située à Windsor, au Québec. La matière première des cendres se composait d'écorce et de rabotures de feuillus et de résineux. Pour l'expérience, on a utilisé que des cendres résiduelles qui n'avaient reçu aucun traitement préalablement à l'application.

##### **Description du traitement**

Avant la définition des parcelles, les trois sites ont fait l'objet d'une coupe à blanc (2009-2012). On a ensuite appliqué 120 Mg par ha<sup>-1</sup> de biosolides papier + 10 Mg par ha<sup>-1</sup> de boue de chaux sur chaque site avant de planter des peupliers selon une densité de 1 111 pieds par ha<sup>-1</sup>. À l'été 2015, quatre traitements ont été appliqués dans un dispositif factoriel. Les traitements comprenaient : (1) aucun amendement supplémentaire de sol, (2) une application de 100 Mg par ha<sup>-1</sup> de biosolides de papier + 15 Mg par ha<sup>-1</sup> de cendres de bois, (3) aucun désherbage, et (4) un désherbage à l'aide d'herbicide. Les doses d'application de cendres ont été calculées en fonction d'un poids frais et les amendements ont été appliqués sur le sol au moyen d'un épandeur mécanique. On a répété les traitements dans deux blocs sur chacun des trois sites.

##### **État**

Le suivi des effets du traitement sur les arbres et les propriétés chimiques du sol est en cours.

##### **Personne-ressource principale**

Nicolas Bélanger, professeur, Département science et technologie, Université TÉLUQ

## 5.0 Ouvrages cités

- Augusto, L.; Bakker, M.R.; Meredieu, C. 2008. Wood ash applications to temperate forest ecosystems - potential benefits and drawbacks. *Plant Soil* 306(1–2):181–198. doi:10.1007/s11104-008-9570-z.
- Baldwin, K.; Downing, D.; Meidinger, D.; Chapman, K. 2016a. Forêts boréales du Centre-ouest de l'Amérique du Nord [en ligne]. Sault Ste. Marie, Ontario, Canada : Classification nationale de la végétation du Canada. mai 2016; généré septembre-15-2016; cité 2018-01-30. Macro groupe (M496) : 1–11. Disponible à : <http://cnvc-cnvc.ca> (seulement anglais).
- Baldwin, K.; Saucier, J.-P.; Meades, B.; Chapman, K. 2016b. Forêts boréales de l'Est de l'Amérique du Nord [en ligne]. Sault Ste. Marie, Ontario, Canada : Classification nationale de la végétation du Canada. mai 2016; généré 15-September-2016; cité 2018-01-30. Macro groupe (M495):1–12. Disponible à : <http://cnvc-cnvc.ca> (seulement anglais).
- Baldwin, K.; Saucier, J.-P.; Uhlig, P. 2018. Forêt de feuillus tempérée – conifères de l'est de l'Amérique du Nord [en ligne]. Sault Ste. Marie, Ontario, Canada : Classification nationale de la végétation du Canada. version provisoire; cité 2018-01-30. Macro groupe (CM014): 1–12. Disponible à : <http://cnvc-cnvc.ca> (seulement anglais).
- Brais, S.; Bélanger, N.; Guillemette, T. 2015. Wood ash and N fertilization in the Canadian boreal forest: Soil properties and response of jack pine and black spruce. *For. Ecol. Manage.* 348:1–14. doi:10.1016/j.foreco.2015.03.021.
- Classification nationale de la végétation du Canada [sur ligne]. 2018. Sault Ste. Marie, Ontario, Canada. Disponible à : <http://cnvc-cnvc.ca/page.cfm?page=2306> [consulté 30 janvier 2018].
- Earl, S.R.; Blinn, D.W. 2003. Effects of wildfire ash on water chemistry and biota in South-Western U.S.A. streams. *Freshw. Biol.* 48(6):1015–1030. doi:10.1046/j.1365-2427.2003.01066.x.
- Emilsson, S. 2006. International Handbook. From Extraction of Forest Fuels to Ash Recycling. Swedish Forest Agency. 48 p.
- Etiégni, L.; Campbell, A.G. 1991. Physical and chemical characteristics of wood ash. *Bioresour. Technol.* 37(2):173–178. doi:10.1016/0960-8524(91)90207-Z.
- Gill, K.S.; Malhi, S.S.; Lupwayi, N.Z. 2015. Wood ash improved soil properties and crop yield for nine years and saved fertilizer. *J. Agric. Sci.* 7(12):72–83. doi:10.5539/jas.v7n12p72.
- Hannam, K.D.; Deschamps, C.; Kwiaton, M.; Venier, L.; Hazlett, P.W. 2016. Réglementation et directives sur l'utilisation de la cendre de bois comme amendement de sol dans les forêts canadiennes. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts. Rapport d'information GLC-X-17F. 62p. Disponible à : <http://cfs.nrcan.gc.ca/publications?id=37782>.
- Hannam, K.D.; Venier, L.; Allen, D.; Deschamps, C.; Hope, E.; Jull, M.; Kwiaton, M.; McKenney, D.; Rutherford, P.M.; Hazlett, P.W. 2018. Wood ash as a soil amendment in Canadian forests: what are the barriers to utilization? *Can. J. For. Res.* 48(4):442–450. doi:10.1139/cjfr-2017-0351.
- Hannam, K.D.; Venier, L.; Hope, E.; McKenney, D.; Allen, D.; Hazlett, P.W. 2017. AshNet: Facilitating the use of wood ash as a forest soil amendment in Canada. *For. Chron.* 93(1):17–20. doi:10.5558/tfc2017-006.

- Hope, E.S.; McKenney, D.W.; Allen, D.J.; Pedlar, J.H. 2017. A cost analysis of bioenergy-generated ash disposal options in Canada. *Can. J. For. Res.* 47(9):1222–1231. doi:10.1139/cjfr-2016-0524.
- Huotari, N.; Tillman-Sutela, E.; Moilanen, M.; Laiho, R. 2015. Recycling of ash - For the good of the environment? *For. Ecol. Manage.* 348: 226–240. doi:10.1016/j.foreco.2015.03.008.
- Mahendrappa, M.K.; Pitt, C.M.; Kingston, D.G.O.; Morehouse, T. 2006. Environmental impacts of harvesting white spruce on Prince Edward Island. *Biomass and Bioenergy* 30(4):363–369. doi:10.1016/j.biombioe.2005.07.016.
- Mast, M.A.; Murphy, S.F.; Clow, D.W.; Penn, C.A.; Sexstone, G.A. 2016. Water-quality response to a high-elevation wildfire in the Colorado Front Range. *Hydrol. Process.* 30(12):1811–1823. doi:10.1002/hyp.10755.
- Meidinger, D.; Baldwin, K. 2017. Forêts subboréales intermontagnardes des Rocheuses[sure ligne]. Sault Ste. Marie, Ontario, Canada : Classification nationale de la végétation du Canada . juillet, 2017; généré 31-décembre-2017; cité 2018-01-30. Macro groupe (M890) : 1–9. Disponible à <http://cnvc-cnvc.ca> (seulement anglais).
- Ressources naturelles Canada. 2018a. AshNet. Disponible à : <http://www.rncan.gc.ca/forets/centres-recherche/cfgl/ashnet/20280> .
- Ressources naturelles Canada. 2018b. Base de données canadienne de la chimie des cendres de bois. Disponible à : <http://www.rncan.gc.ca/forets/centres-recherche/cfgl/ashnet/20289>.
- Pitman, R.M. 2006. Wood ash use in forestry - a review of the environmental impacts. *Forestry* 79(5): 563–588. doi:10.1093/forestry/cpl041.
- Prescott, C.E.; Brown, S.M. 1998. Five-year growth response of western red cedar, western hemlock, and amabilis fir to chemical and organic fertilizers. *Can. J. For. Res.* 28: 1328–1334. doi:10.1139/x98-109.
- Reid, C.; Watmough, S.A. 2014. Evaluating the effects of liming and wood-ash treatment on forest ecosystems through systematic meta-analysis. *Can. J. For. Res.* 44(8): 867–885. doi:10.1139/cjfr2013-0488.
- Sevean, R. 2014. Impact of biochar and industrial ash amendments on soil properties, growth and nutrition of black and white spruce seedlings in a sandy loam soil (M.Sc. Thesis). Lakehead University.
- Steenari, B-M.; Karlsson, L.G.; Lindqvist, O. 1999. Evaluation of the leaching characteristics of wood ash and the influence of ash agglomeration. *Biomass and Bioenergy* 16(2):119–136.

Annexes

Annexe A – Caractéristiques des sols et des peuplements pour chaque site d'étude d'AshNet.

Site	Ordre de sols	Type de dépôt	Texture du sol	Épaisseur de la couverture morte (cm)	Type de peuplement	Espèce d'arbres dominante	Âge du peuplement lors de l'application des cendres (années)	Type de perturbation avant traitement (année)	Durée écoulée depuis la dernière perturbation lors de l'application de cendres (années)
Johnson Creek	Luvisolique/brunisolique	Fluvio-glaciaire	Loam limoneux et loam argileux sous-jacent.	6	81 % d'épinette blanche de seconde venue, 8 % de peuplier baumier, 7 % de bouleau à papier et 4 % de pin tordu latifolié.	81 % d'épinette blanche, 8 % de peuplier baumier, 7 % de bouleau à papier et 4 % de pin tordu latifolié.	24	Réhabilitation de conifères (1987); feu de friche (1991)	26
Aleza Lake N	Luvisolique/gleysolique	Glaciolacustre	Loam limono-argileux à argile (< 50 % de sable)	5,2	Plantation d'épinettes hybrides de 18 ans	Épinette hybride, sapin subalpin	18	Coupe à blanc (1996-1997)	18
Aleza Lake S	Luvisolique/gleysolique	Glaciolacustre	Loam limono-argileux à argile (< 50 % de sable)	5,2	Plantation d'épinettes hybrides de 24 ans	Épinette hybride, sapin subalpin	24	Coupe à blanc (1989-1990); brûlage extensif (1990)	25
Mistik	Luvisolique	Moraine d'ablation	Loam argileux, avec poches de loam sableux; Pierrosité modérée à élevée (> 50 % de sable)	5- 10	Plantation d'épinettes blanches	Épinette blanche	< 1	Coupe à blanc par arbres entiers + tranché par disque (1995)	0
Pineland	Brunisolique	Fluvioglaciale	Sable (> 50 % de sable)	2	Pin gris	Pin gris	< 1	Coupe à blanc par arbres entiers (2015)	0
25° Sideroad	Brunisolique	Fluvioglaciale	Loam sableux (> 50 % de sable)	0	Épinette noire et blanche	Épinette noire et blanche	< 1	Ancienne pépinière; cultivée	0
Island Lake	Brunisolique	Fluvioglaciale	Sable à loam sableux (> 50 % de sable)	10	Pin gris	Pin gris	< 1	Coupe à blanc par arbres entiers (2010-2011)	0
Haliburton	Brunisolique	Morainique	Loam sableux (> 50 % de sable)	5-8	Feuillus mixtes	Érable à sucre, hêtre à grandes feuilles, pruche du Canada, bouleau jaune	Peuplement inéquienne	Coupe sélective par arbre (2003); récupération de hêtre (2013)	0
Senneterre 1	Brunisolique	Morainique	Sable à sable loameux (> 50 % de sable)	10-15	Pin gris	Pin gris	53	Récolte et éclaircie commerciales (1999)	6
Senneterre 2	Brunisolique	Glaciolacustre	Loam à sable loameux (> 50 % de sable)	10-15	Épinette blanche, pin gris, mélèze hybride	Épinette blanche, pin gris, mélèze hybride	< 1	Coupe à blanc (2005)	1
Senneterre 3	Brunisolique	Morainique	Sable loameux (> 50 % de sable)	10-15	Pin gris, épinette noire	Pin gris et épinette noire	< 1	Coupe à blanc (2007)	0
Valcartier	Brunisolique	Morainique	À DÉTERMINER	8,8	Érable à sucre, bouleau jaune, hêtre	Érable à sucre, bouleau jaune, hêtre	< 1	Enlèvement de sous-bois (2017)	0
Érable à sucre des Cantons-de-l'Est	Podzolique	Morainique	Sable, sable loameux ou loam sableux (> 50 % de sable)	10-15	Feuillus mixtes	Érable à sucre, tilleul d'Amérique, hêtre à grandes feuilles, frêne blanc d'Amérique et noyer cendré	Env. 60-80	Coupe sélective (2012-2014)	1
Peuplier hybride des Cantons-de-l'Est	Podzolique	Morainique	Sable, sable loameux ou loam sableux (> 50 % de sable)	10-15	Peuplier hybride	Peuplier hybride	Env. 7-10	Coupe à blanc (2009-2012)	3

Annexe B – Évaluations avant l'application de cendres effectuées sur chaque site d'étude d'AshNet. \*CE = conductivité électrique, CEC = capacité d'échange cationique

Site	Peuplement	Résidus de bois tombés au sol	Propriétés physiques du sol	Propriétés chimiques du sol
Johnson Creek	Espèces, densité des troncs, diamètre des arbres sur pied vivants, nutriments foliaires de l'épinette	S.O.	Description du profil de sol	Échantillon de couverture morte et des premiers 10 cm du sol minéral pour le pH, C et N totaux, carbone inorganique (uniquement sol minéral), S total, azote d'ammonium et azote de nitrate, CE des extraits boueux, CEC et cations; As, B, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, K, Mg, Pb, Hg, Mo, Na, Ni, P, Se et Zn
Aleza Lake N	Espèces, diamètre, hauteur par espèce pour chaque arbre	-	Texture	Couverture morte et premiers 10 cm du sol minéral pour le pH, la CE, C, N, S (EA) totaux; As, B, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, K, Mg, Hg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Se, Zn; le carbone inorganique, la CEC effective + les cations échangeables; les nutriments extractibles Mehlich III
Aleza Lake S	Espèces, diamètre, hauteur par espèce pour chaque arbre	-	Texture	Couverture morte et premiers 10 cm du sol minéral pour le pH, la CE, C, N, S (EA) totaux; As, B, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, K, Mg, Hg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Se, Zn; le carbone inorganique, la CEC effective + les cations échangeables; les nutriments extractibles Mehlich III
Mistik	S.O.	-	-	-
Pineland	S.O.	-	-	Azote inorganique, phosphate extractible, carbone organique (perte par calcination)
25 <sup>e</sup> Sideroad	S.O.	S.O. (aucun résidu)	Densité apparente, texture	Matière organique, pH, CE, Ca, K, Mg, Na disponibles; azote d'ammonium et azote de nitrate extractibles, Al, B, Cu, Fe, Mn, Ni, P, Zn dans les 10 cm supérieurs du sol.
Island Lake	Espèces, densité des troncs, surface terrière, hauteur et diamètre moyens des arbres sur pied vivants et morts; biomasse aérienne du bois, des branches, de l'écorce et des feuilles des arbres sur pied vivants et morts	Biomasse aérienne et souterraine, volume, catégorie de décomposition et C, N, P, Ca, Mg et K contenant des résidus effilés et bruts de bois tombés au sol	Profondeurs des horizons, densité apparente, texture et contenu des fragments grossiers	pH, concentrations extractibles de Fe et d'Al, C et N total; P extractible; Ca, Mg, K échangeables
Haliburton	Surface terrière, trouée, diamètre des grands arbres (recensés séparément), dénombrement des semis et des échantillons (dans les sous-parcelles)	-	-	pH du sol, nutriments totaux et disponibles (cations échangeables, P disponible, minéralisation de l'azote), métaux et autres éléments
Senneterre 1	Recensement des arbres, surface terrière	-	-	-
Senneterre 2	S.O.	-	-	pH (eau), pH (tampon), éléments P, K, Al, CEC, matières oxydables
Senneterre 3	S.O.	-	-	Total des éléments C et N; Ca, Mg, K, Na échangeables, P disponible, pH (eau), pH (tampon), besoin en chaux
Valcartier	Recensement des grands arbres, des petits arbres et des arbres régénérés (espèce, diamètre, état)	S.O. (résidus enlevés)	Profondeurs des horizons, densité apparente, texture et contenu des fragments grossiers	pH, concentrations extractibles de Fe et d'Al, éléments C, N (total + inorganique), éléments P, Ca, Mg, K
Érable à sucre des Cantons-de-l'Est	Recensement des arbres, surface terrière	Autour des pièges d'insectes	-	pH, C et N total, cations échangeables, acidité échangeable, saturation en bases, CEC
Peuplier hybride des Cantons-de-l'Est	Recensement des arbres, surface terrière	-	-	pH du sol, C et N total, cations échangeables, acidité échangeable, saturation en bases, CEC (en parcelles témoins et en première fertilisation)

Annexe C – Approches expérimentales comprenant les détails des dispositifs d'étude et des amendements pour chacun des sites d'étude d'AshNet.

Site	Dispositif d'étude	Surface des parcelles (ha)	Nombre de parcelles reproduites	Traitements supplémentaires	Traitement préalable des cendres	Matière première et source des cendres	Type de cendres	Doses d'application des cendres	Méthodes d'application des cendres
Johnson Creek	Aléatoire, complet par blocs	0,02011	3	Urée à raison de 100 kg/ha d'azote actuel	-	Écorce rabotures et sciure de résineux de l'installation de cogénération des industries forestières de Chetwynd (ouest de Fraser)	Volantes	0, 5 Mg/ha selon le poids sec	Application manuelle sur la surface
Aleza Lake N	Aléatoire, complet par blocs	0,0201	3	0, 100 kg d'urée d'azote/ha	-	<i>CPLP</i> = copeaux, écorce et sciure de résineux (chaudière – cendres à teneur élevée en carbone); <i>Université du nord de la Colombie-Britannique</i> = tombées de sciage de résineux (gazogène – cendres à faible teneur en carbone) – Combustible propre de déchets de bois	Résiduelles	0, 5 Mg/ha de cendres sèches	Répandues à la main (appliquées avec une pelle) sur la surface
Aleza Lake S	Aléatoire, complet par blocs	0,0201	3	0, 100 kg d'urée d'azote/ha	-	<i>CPLP</i> = copeaux, écorce et sciure de résineux (chaudière – cendres à teneur élevée en carbone); <i>Université du nord de la Colombie-Britannique</i> = tombées de sciage de résineux (gazogène – cendres à faible teneur en carbone) – Combustible propre de déchets de bois	Résiduelles	0, 5 Mg/ha de cendres sèches	Répandues à la main (appliquées avec une pelle) sur la surface
Mistik	Aléatoire, complet par blocs	0,003	3	-	Broyage	85 % d'écorce et de copeaux de peuplier faux-tremble + 15 % de boue de pâte déshydratée (brûleur olivine du Millar Western Mill)	Résiduelles	1,5 Mg/ha de cendres sèches	Application manuelle sur la surface sur un mètre carré autour des semis
Pineland	Dispositif en parcelles subdivisées	0,0225	5	70 kg d'urée/ha	-	Copeaux et un peu d'écorce de pin gris (brûleur de biomasse de la pépinière forestière de Pineland)	Volantes et résiduelles	0, 1,5 Mg/ha de cendres sèches	Application manuelle sur la surface
25 <sup>e</sup> Sideroad	Aléatoire, complet par blocs	0,00165	5	Biocharbon	-	Écorce, sciure et copeaux de résineux, avec 8 % à 14 % de boue d'effluent (chaudière électrique à grille oscillante à l'installation de produits forestiers de Resolute)	Volantes	0, 1, 10 Mg/ha de cendres sèches	Application manuelle et avec un râteau sur les 10 cm supérieurs
Island Lake	Aléatoire, incomplet par blocs	Témoin = 0,49, traitement = 0,0625	5 témoins, 4 traitements	-	-	Écorce, rabotures et sciure de résineux (pin gris et épinette noire; installation de cogénération de Tembec)	Résiduelles	0, 0,7, 1,4, 2,8, 5,6 Mg/ha de cendres sèches	Application manuelle sur la surface
Haliburton	Aléatoire, incomplet par blocs	0,0009 et 0,04	4	-	-	Écorce d'épinette, de pin et de sapin (chaudière de biomasse à grille oscillante dans une usine de pâtes et papiers – Detroit Rotostoker)	Volantes et résiduelles	0, 1, 4, 8 Mg/ha de cendres sèches	Application manuelle sur la surface
Senneterre 1	Dispositif aléatoire complet	1	4	280 kg d'urée/ha	-	Écorce et rabotures de résineux (installation Boralex, au Québec)	Volantes	0, 1, 4, 8 Mg/ha de cendres sèches	Appliqué sur la surface par épandeur mécanique
Senneterre 2	Aléatoire, complet par blocs	Env. 2	3	-	-	Écorce et rabotures de résineux (installation Boralex, au Québec)	Volantes	0, 2,5, 5 Mg/ha de cendres sèches	Appliqué sur la surface par épandeur mécanique
Senneterre 3	Aléatoire, complet par blocs	2-4	3	Engrais localisé 26-21-0-4.6(NPKS)	-	Écorce et rabotures de résineux (installation Boralex)	Volantes	0, 7,5, 15 Mg/ha de cendres sèches	Épandeur mécanique, puis trancheur à disques
Valcartier	Dispositif complet par blocs	0,0008	12	Chaux, engrais, scarification du sol	-	Écorce de résineux (Chaudière de biomasse de Resolute située à Château Richer)	Résiduelles	0, 19 Mg/ha de cendres sèches	Application manuelle sur la surface
Érable à sucre des Cantons-de-l'Est	Parcelle subdivisée	3	5	Petits exclos de chevreuil	-	80 % d'écorce de feuillus et de résineux, 20 % de résidus de construction et de démolition (usine Domtar)	Résiduelles	0, 20 Mg/ha selon le poids frais	Appliqué sur la surface par épandeur mécanique
Peuplier hybride des Cantons-de-l'Est	Dispositif aléatoire complet	0,25-5	6	100 Mg/ha de biosolides de papier, désherbage à l'herbicide	-	Écorce et rabotures de feuillus et de résineux	Résiduelles	0 Mg/ha, 15 Mg/ha selon le poids frais	Appliqué sur la surface par épandeur mécanique

Annexe D – Évaluations après application effectuées sur chaque site d'étude d'AshNet. \*CE = conductivité électrique, CEC = capacité d'échange cationique

Site	Peuplement	Sous-bois	Résidus de bois tombés au sol	Stocks de carbone et de nutriments	Propriétés chimiques du sol	Propriétés chimiques de la solution du sol	Biote du sol
<b>Johnson Creek</b>	Nutriments foliaires 5 ans après application; diamètre 5 ans après application	-	-	Cendres, couverture morte, contenu du sol minéral en C et N total, azote d'ammonium et azote de nitrate, P et K disponibles et métaux lourds, pH	Échantillon de couverture morte et des premiers 10 cm du sol minéral pour le pH, C et N totaux, carbone inorganique (uniquement sol minéral), S total, azote d'ammonium et azote de nitrate, CE des extraits boueux, CEC effective et cations; As, B, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, K, Mg, Pb, Hg, Mo, Na, Ni, P, Se et Zn	-	-
<b>Aleza Lake N</b>	Espèces, diamètre, hauteur, nutriments foliaires : C, N, S, Al, B, Ca, Cu, Fe, Mg, Mn, P, K, S, Zn, masse des aiguilles	Diversité et composition des espèces	-	-	Couverture morte et les premiers 10 cm du sol minéral pour le pH, la CE, C, N, As, B, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, K, Mg, Hg, Mo, Na, Ni, P, S, Se, Zn; cations échangeables	-	-
<b>Aleza Lake S</b>	Espèces, diamètre, hauteur, nutriments foliaires : C, N, S, Al, B, Ca, Cu, Fe, Mg, Mn, P, K, S, Zn, masse des aiguilles	Diversité et composition des espèces	-	-	Couverture morte et les premiers 10 cm du sol minéral pour le pH, la CE, C, N, As, B, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, K, Mg, Hg, Mo, Na, Ni, P, S, Se, Zn; cations échangeables	-	-
<b>Mistik</b>	Survie; hauteur et diamètre des semis; biomasse des racines et des pousses; nutriments des racines et des pousses	-	-	-	pH, CE; P extractible, cations échangeables; azote minéral	Solution nutritive et concentrations en métaux lourds à 15 cm et 60 cm	-
<b>Pineland</b>	Hauteur, diamètre, biomasse, nutriments foliaires	Couverture, biomasse	-	-	Azote inorganique, phosphate extractible, carbone organique	-	-
<b>25<sup>e</sup> Sideroad</b>	Mortalité, hauteur, accroissement de la hauteur, diamètre et nutriments foliaires	Pourcentage de couverture; biomasse des racines et des pousses et mauvaises herbes	-	-	Matière organique, pH, CE, Ca, K, Mg, Na disponibles; C, N, S totaux; N, P, Fe, Mn, Cu, Zn, Al, B, Ni,	-	Biomasse et respiration microbiennes

Annexe D (suite) – Évaluations après application effectuées sur chaque site d'étude d'AshNet. \*CE = conductivité électrique, CEC = capacité d'échange cationique

Site	Peuplement	Sous-bois	Résidus de bois tombés au sol	Stocks de carbone et de nutriments	Propriétés chimiques du sol	Propriétés chimiques de la solution du sol	Biote du sol
<b>Island Lake</b>	Survie et santé; hauteur des arbres, diamètre et nutriments foliaires	Composition des espèces et pourcentage de couverture	Biomasse aérienne; biomasse, volume et catégorie de décomposition des résidus effilés et bruts de bois tombés au sol; total du contenu des résidus effilés et bruts de bois tombés au sol des éléments C,N,P, Ca, Mg et K	Contenu des résidus de bois mort aériens et souterrains des éléments C, N, P, Ca, Mg et K, rémanents d'exploitation, souches et racines brutes, couverture morte et sol minéral	pH, C et N total, cations; cations échangeables; minéralisation de l'azote	Solution de pH, carbone, nutriments et métaux lourds à une profondeur de 30 cm, 50 cm et 100 cm	Faune du sol (collemboles, acariens et nématodes), épigaïon (carabes, araignées, staphylins et millipèdes), microbes du sol (respiration microbienne, respiration par le substrat, tests d'activité enzymatique, biomasse microbienne, composition des communautés de microbes)
<b>Haliburton</b>	Diamètre des grands arbres, propriétés chimiques des tissus	Dénombrement, hauteur et montaison des semis	-	-	pH, C et N total, cations; cations échangeables; minéralisation de l'azote	Solution de pH, carbone, nutriments et métaux lourds à une profondeur de 30 cm, 50 cm et 100 cm	Faune du sol (salamandres cendrées), microbes du sol (bactéries, champignons, protozoaires)
<b>Senneterre 1</b>	Recensement des arbres, diamètre, nutriments foliaires (N, P, Ca, Mg, K)	-	-	-	pH, C et N total, P disponible; cations échangeables; acidité échangeable	-	-
<b>Senneterre 2</b>	Survie et santé; hauteur, diamètre au collet des racines et nutriments foliaires (C, N, P, Ca, Mg, K et traces)	-	-	-	pH, C et N total; P disponible, cations échangeables, acidité échangeable, spéciation de manganèse	-	-
<b>Senneterre 3</b>	Survie et santé; hauteur, diamètre et nutriments foliaires des arbres (C, N, P, Ca, Mg, K et traces)	-	-	-	pH, C et N total; P disponible, cations échangeables, acidité échangeable	-	-
<b>Valcartier</b>	-	Composition des espèces, proportion de surface occupée, biomasse et pourcentage de couverture, mesure de la lumière	-	-	pH, total du carbone et de l'azote, cations; cations échangeables	Sacs de résine	Microbiome du sol (bactéries et champignons)
<b>Érable à sucre des Cantons-de-l'Est</b>	Recensement des arbres, diamètre, nutriments foliaires (N, P, Ca, Mg, K, Al, Mn, Fe)	-	Autour des pièges d'insectes	Possible par allométrie (p. ex., Maliondo et coll. 1995); dendrométrie de 10 arbres par site (5 avec des cendres et 5 sans)	pH, total du carbone et de l'azote; élément P disponible, cations échangeables, acidité échangeable, CEC, saturation en bases	-	Épigaïon (fourmis, coléoptères, araignées)
<b>Peuplier hybride des Cantons-de-l'Est</b>	Hauteur, diamètre, nutriments foliaires (N, P, Ca, Mg, K, Al, Mn, Fe)	-	-	Possible par allométrie (Brazeau et Camiré, 1998)	pH, total du carbone et de l'azote; élément P disponible, cations échangeables, acidité échangeable, CEC, saturation en bases	Partiellement, par sondes PRS	-