PROGRAMME DE MISE EN VALEUR DES RESSOURCES DU MILIEU FORESTIER (2012-2013) – VOLET 1

Rapport final – 4e année

Implantation d'un dispositif de comparaison de traitements pour optimiser la fonction de régénération dans les érablières envahies par le hêtre - 4e année

Présenté à :

Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF)

Paul Bouchard, ing.f
Pierre Samson, ing.f.

Et

Scierie Dion et fils inc.

Éric Deslauriers, ing.f.

Par :

CERFO
Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc.

Philippe Bournival, ing.f., M.Sc.
Donald Blouin, ing.f., M.Sc
Guy Lessard, ing.f., M.Sc.
Jalal Khaldoune, Ph.D.

Août 2013

© CERFO 2013-21

Mots-clés : Érablière, hêtre à grandes feuilles, régénération, dispositif expérimental, coupe progressive irrégulière, chaulage

Référence à citer :
Bournival, P., D. Blouin, G. Lessard et J. Khaldoune. 2013. Implantation d'un dispositif de comparaison de traitements pour optimiser la fonction de régénération dans les érablières envahies par le hêtre - 4e année. Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. (CERFO). Rapport 2013-21. 52 pages + 2 annexes.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES ..... **II**

LISTE DES TABLEAUX ..... **II**

REMERCIEMENTS ..... **III**

RÉSUMÉ ..... **IV**

INTRODUCTION **1**

OBJECTIFS **3**

1. HYPOTHÈSES DE RECHERCHE 4
2. MÉTHODE 5
   - *2.1. Rappel des étapes réalisées précédemment* *5*
   - *2.2. Localisation du secteur à l'étude* *6*
   - *2.3. Dispositif expérimental* *7*
   - *2.4. Suivi de la qualité des travaux de chaulage aérien* *9*
   - *2.5. Inventaire de régénération* *11*
   - *2.6. Classification du degré d'occupation du couvert forestier* *13*
   - *2.7. Analyse statistique des données* *14*
3. RÉSULTATS 16
   - *3.1. Rappel du portrait du bois sur pied en 2011* *16*
   - *3.2. Régénération 2 ans après la récolte* *18*
     - **3.2.1. Évolution de la densité et du coefficient de distribution entre 2011 et 2012** **18**
     - **3.2.2. Portrait de la régénération en 2012** **20**
     - **3.2.3. Analyse de variance (densité et coefficient de distribution)** **27**
     - **3.2.4. Portrait des microsites suite au scarifiage** **30**
   - *3.3. Densité d'occupation du couvert forestier après la récolte* *31*
     - **3.3.1. Classification d'image supervisée** **31**
     - **3.3.2. Densiomètre** **34**
   - *3.4. Chaulage aérien* *34*
     - **3.4.1. Suivi de la qualité des travaux de chaulage aérien** **34**
     - **3.4.2. Bilan des travaux de chaulage aérien** **39**
4. DISCUSSION 40
5. RECOMMANDATIONS 46
   - *5.1. Conduite de peuplement* *46*
   - *5.2. Chaulage* *46*
   - *5.3. Suivi de l'effet des différentes modalités* *47*
   - *5.4. Suivis de l'effet de CPI* *47*
   - *5.5. Validation des choix des modalités pour la coupe progressive irrégulière* *48*

CONCLUSION **49**

RÉFÉRENCES **50**

ANNEXE 1. PORTRAIT DE LA RÉGÉNÉRATION EN 2011 ..... **53**

ANNEXE 2. PHOTOS DES PRÉCAUTIONS PRISES POUR PREVENIR L'INFILTRATION DE L'HUMIDITÉ DANS LA CHAUX **57**

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Localisation du secteur à l'étude 7
Figure 2. Plan du dispositif expérimental du secteur du lac des Lys 8
Figure 3. Récolte de la chaux dans les collecteurs après la tenue de l'épandage 9
Figure 4. Chaulage et plan d'échantillonnage associés au suivi de la qualité des travaux 10
Figure 5. Plan de sondage de l'inventaire de régénération après récolte et scarifiage 12
Figure 6. Utilisation du densiomètre 13
Figure 7. Utilisation du densiomètre sur le terrain 14
Figure 8. Densité par traitement et essence 27
Figure 9. Densité par essence et traitement 28
Figure 10. Coefficient de distribution par traitement et essence 29
Figure 11. Coefficient de distribution par essence et traitement 29
Figure 12. Couverture de la canopée à partir de la classification d'image supervisée 33
Figure 13. Quantité de chaux reçue par traitement et type de contenant 35
Figure 14. Réalisation de l'épandage aérien 35
Figure 15. Navigation effectuée par l'hélicoptère lors du chaulage aérien des traitements 3C et 3SC 36
Figure 16. Navigation effectuée par l'hélicoptère lors du chaulage aérien des traitements 1C, 2C et 2SC 37
Figure 17. Navigation effectuée par l'hélicoptère lors du chaulage aérien des traitements 2SC, 4C et 4SC 38

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Données climatiques par unité de paysage 6
Tableau 2. Nombre de grappes et d'unités expérimentales par bloc et traitement 11
Tableau 3. Synthèse des paramètres dendrométriques par traitement et par essence après récolte pour 2011 16
Tableau 4. Évolution de la densité de l'ERS, du HEG et du BOJ entre 2011 et 2012 19
Tableau 5. Évolution du coefficient de distribution de l'ERS, du HEG et du BOJ entre 2011 et 2012 20
Tableau 6. Densité (ti/ha) des essences en régénération par traitement 2 ans après récolte 23
Tableau 7. Coefficient de distribution (%) des essences en régénération 2 ans après récolte 25
Tableau 8. Présence de scarifiage dans les traitements scarifiés 30
Tableau 9. Classe de perturbation du sol par traitement 31
Tableau 10. Couverture de la canopée, de l'ombre et du sol en fonction des traitements 32
Tableau 11. Couverture de la canopée à partir du densiomètre 34
Tableau 12. Bilan financier des coûts reliés à l'opération de chaulage aérien 39

REMERCIEMENTS

Le Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. (CERFO) tient à remercier le ministère des Ressources naturelles et de la Faune dans le cadre du Programme de mise en valeur des ressources du milieu forestier (volet 1) pour leur soutien financier et leur appui tout au long du projet. Il en est de même pour la participation de la compagnie Scierie Dion et fils inc. Nous soulignons la collaboration de la Direction de la recherche forestière (DRF) pour leur soutien, expertise et contribution au niveau de la collecte de chaux sur le terrain, l'analyse en laboratoire et la logistique d'épandage. Plus spécifiquement, nos remerciements s'adressent à messieurs Rock Ouimet, Jean-David Moore et Louis Duschesne. Finalement, nos remerciements vont au Groupement forestier de Portneuf pour leur contribution technique tout au long des 4 années du projet.

RÉSUMÉ

Le dépérissement des érablières du Québec et l'envahissement du hêtre à grandes feuilles (*Fagus grandifolia* Ehrh) dans les forêts feuillues sont deux phénomènes qui ont été documentés par plusieurs auteurs au cours des dernières années. Pour étudier ces phénomènes, un dispositif expérimental à l'échelle opérationnelle a été mis en place dans le secteur du lac des Lys pour évaluer l'impact de différentes modalités de remise en production visant à favoriser la croissance et la régénération de l'érable à sucre.

Lors de la première année du projet, une démarche de prescription sylvicole complète, utilisant l'approche de prescription par diagnostic sylvicole, a été utilisée pour élaborer une prescription de coupe progressive irrégulière (CPI) adaptée à l'érable à sucre. Lors de la 2e année du projet, un échantillonnage des sols, un inventaire de régénération avant récolte et scarifiage, ainsi que des travaux de martelage et de récolte ont été réalisés. Lors de la 3e année du projet, des travaux de scarifiage et de chaulage aérien ont été réalisés pour compléter la liste des traitements prévus par le diagnostic sylvicole. Ces travaux ont été accompagnés d'une vérification de la qualité des travaux et d'un inventaire de régénération, une saison de croissance après les travaux de récolte et de scarifiage. Enfin, lors de la 4e année du projet, un inventaire de régénération 2 ans après la récolte et 1 an après le scarifiage et le chaulage, un inventaire de densité du couvert et une classification d'image pour évaluer la densité du couvert après la CPI ont été effectués. Finalement, des mesures de la qualité de l'épandage aérien accompagnées d'une évaluation financière documentant les coûts d'une telle opération ont également été réalisés.

Les résultats de 2012 indiquent que le coefficient de distribution de la régénération en érable à sucre est supérieur à celui du hêtre dans tous les traitements alors que les traitements de chaulage, scarifiage et scarifiage et chaulage présentaient des équivalences statistiques en 2011. Des résultats semblables ont été obtenus concernant la densité à l'exception que les traitements de scarifiage présentaient des densités plus faibles que celles observées dans les autres traitements. Ces résultats laissent présager une progression plus rapide de la régénération d'érable à sucre dans les stations ayant bénéficié d'un chaulage. Par ailleurs, les résultats indiquent une progression marquée du bouleau jaune, surtout dans les traitements ayant bénéficié du scarifiage.

Les résultats de la classification d'image et du densiomètre indiquent que la CPI a permis de respecter les objectifs de maintien de couvert, avec une densité de couvert supérieure à 60 % dans tous les traitements. L'épandage aérien de chaux a été effectué sur toute la superficie et de façon uniforme. Cependant, la quantité prescrite est moindre que celle épandue réellement. Le taux d'humidité, les débordements par rapport à la zone prescrite et la chaux restée collée dans les arbres sont identifiés comme étant les principaux facteurs influençant la qualité de l'épandage. Enfin, un bilan financier des coûts reliés à l'épandage aérien nous indique que ce traitement est comparable à celui d'une EPC, avec un taux de 1 185 $/ha. Il est encore trop tôt pour affirmer lequel des scénarios est le plus performant à tous les égards, mais les suivis de régénération permettent d'identifier les avenues les plus prometteuses. Pour l'instant, la CPI et le chaulage présentent des alternatives valables. La CPI permettant une bonne régénération en érable à sucre tout en limitant celle des espèces de lumières et le chaulage stimulant la régénération de l'érable à sucre.

Le projet profite d'une collaboration des plus stimulantes entre deux équipes de recherche complémentaires, soit celle de l'équipe de recherche sur les écosystèmes et l'environnement de la Direction de la recherche forestière (DRF) et celle de l'équipe de sylviculture et d'aménagement forestier durable du CERFO. Il s'agit également d'un complément au réseau de dispositifs des deux organismes et d'un exemple local d'intensification de la pratique sylvicole pour une chaîne de production de bois de haute valeur.

INTRODUCTION

Le dépérissement des érablières et l'envahissement du hêtre à grandes feuilles (*Fagus grandifolia* Ehrh) dans les forêts feuillues du Québec sont des phénomènes qui ont été documentés par plusieurs auteurs au courant des dernières années.

Plusieurs causes potentielles sont suggérées pour expliquer ce phénomène d'envahissement du hêtre au détriment des érables, comme l'action des pluies acides affectant la fertilité des sols (Duchesne *et al.,* 2005; Duchesne et Ouimet, 2008). Une étude récente a permis de constater que, suivant de petites perturbations naturelles, les sites avec de plus fortes concentrations en cations disponibles dans le sol étaient moins susceptibles d'être envahis par le hêtre (Nolet *et al*., 2007). Quelques études ont aussi démontré que le chaulage augmentait l'accroissement des érables matures et le coefficient de distribution de la régénération de cette essence (Moore *et al.,* 2009). Contrairement à l'érable à sucre, le hêtre semble beaucoup moins sensible à la disponibilité de cations basiques dans le sol (Long *et al.,* 1997, Park et Yanai, 2009, Bigelow et Canham, 2010).

La production de drageons par le hêtre lui donne un avantage dans le sous-couvert (Beaudet et Messier, 2008; Gravel, 2003). La prolifération végétative du hêtre lui permet de bien réagir à l'ouverture du couvert (Nyland *et al.,* 2006a; 2006b; Takahashi et Lechowicz, 2008). Les facteurs d'initiation de production de drageons sont variables et multiples. La prolifération de ceux-ci peut dépendre des conditions climatiques, de la température, de bris racinaires, de la luminosité et de l'âge de l'arbre (Nyland *et al.,* 2006b).

De plus, ces causes potentielles peuvent interagir entre elles et amplifier le faible rétablissement de l'érable à sucre. Ainsi, la faible régénération de l'érable à sucre dans les forêts feuillues pourrait être due, entres autres, à l'absence de microsites favorables, résultant des pratiques récentes et des conditions passées (ex. pluies acides).

Quelques études ont été réalisées afin d'explorer des traitements favorisant la régénération en érable à sucre par rapport à celle du hêtre à grandes feuilles dans les peuplements dégradés (Delagrange *et al*. 2008; Nyland *et al.,* 2006a). Parmi les traitements étudiés, nous pouvons observer que :

- L'application de **chaux** améliore les conditions de sol et de nutrition et favorise une meilleure croissance des érables à sucre et la régénération de l'érable à sucre au détriment de celle du hêtre à grandes feuilles (Moore et Ouimet*,* 2006; Moore *et al.,* 2008);
- Des traitements éliminant la régénération en hêtre, tels que le **dégagement mécanique ou chimique**, peuvent aussi être efficaces (ex. Hane, 2003). Les opérations qui endommagent les racines de hêtre à grandes feuilles favorisent son drageonnement, qui peut alors être abondant (Nyland *et al.,* 2006b). Cependant, les résultats d'une étude révèlent que suite à une coupe, les nouvelles tiges de hêtre à grandes feuilles issues de reproduction végétative étaient plus courtes que celles des érables à sucre issus de semences sur une période de 30 ans (Nyland *et al.,* 2004);
- Le **scarifiage** pourrait favoriser l'implantation d'une régénération abondante d'érable à sucre (Blouin *et al.,* 2009), selon des observations préliminaires effectuées à Duchesnay, dans un dispositif de coupe progressive irrégulière étudiant diverses intensités et diverses préparations de terrain;
- L'exploration de **différents degrés d'ouverture** de la canopée ne semble pas favoriser l'érable à sucre par rapport au hêtre à grandes feuilles si ce dernier est déjà bien établi (Takahashi et Lechowicz, 2008). Également, la réponse de l'érable à sucre varierait selon la fertilité du milieu.

OBJECTIFS

Dans la région de Portneuf (UAF 031-51), pour les érablières dans lesquelles le maintien et l'augmentation de la vigueur de l'érable à sucre sont primordiaux et où la régénération du hêtre prédomine celle de l'érable à sucre, le projet propose d'instaurer un dispositif permettant de :

1) Documenter l'impact des différents traitements sur la régénération 2 ans après la CPI et 1 an après les travaux de scarifiage et de chaulage aérien.
2) Évaluer la densité du couvert résiduel afin d'établir un lien entre la régénération en érable à sucre et la quantité de lumière disponible.
3) Documenter la qualité de l'épandage aérien de chaux.
4) Effectuer un bilan financier et une synthèse sommaire des recettes du succès opérationnel de l'épandage aérien.

1. HYPOTHÈSES DE RECHERCHE

Le présent rapport visera à répondre aux hypothèses de recherche suivantes :

1) La densité de la régénération de l'érable à sucre 2 ans après les travaux de CPI et 1 an après les travaux de scarifiage et de chaulage aérien est supérieure à celle du hêtre.
2) Le coefficient de distribution de la régénération de l'érable à sucre 2 ans après les travaux de CPI et 1 an après les travaux de scarifiage et de chaulage aérien est supérieur à celui du hêtre.
3) La CPI a permis de maintenir une densité du couvert supérieure à 60 %.
4) Le chaulage aérien a été réalisé à un coût acceptable.
5) Le chaulage aérien a été réalisé en respectant les cibles fixées par la prescription (3tonnes/ha).
6) Le suivi de la qualité des travaux de chaulage peut être effectué avec une bouteille en plastique munie d'un entonnoir au lieu d'une toile de 1 m².

2. MÉTHODE

Cette section présente un rappel des étapes précédentes du projet, la localisation du dispositif expérimental et son design, le suivi de la qualité des travaux d'épandage aérien, l'inventaire de régénération, la classification du degré d'occupation du couvert forestier et les analyses statistiques.

2.1. RAPPEL DES ÉTAPES RÉALISÉES PRÉCÉDEMMENT

Lors de la première année du projet, une photo-interprétation fine et un inventaire d'intervention (automne 2009) portant sur un secteur de 200 ha avaient été réalisés. Par la suite, une démarche de prescription sylvicole complète, utilisant l'approche de prescription par diagnostic sylvicole, a été appliquée (Bournival *et al.,* 2010). Deux prescriptions ont été proposées : une coupe progressive irrégulière pour les vieilles futaies irrégulières et une éclaircie irrégulière pour les jeunes futaies irrégulières[1].

Lors de la 2e année du projet, un dispositif expérimental a été élaboré sur le secteur de 90 ha retenu. Plusieurs travaux tels qu'un inventaire de bois sur pied avant et après coupe, un inventaire de régénération avant coupe et un échantillonnage des sols avant coupe ont été effectués pour répondre aux exigences scientifiques fixées par le projet (Bournival *et al.,* 2012). Un inventaire complémentaire du degré de dépérissement des érables a également été effectué par les professionnels de la Direction de la recherche forestière (DRF). De plus, un programme de formation visant à encadrer les activités sur le terrain a été réalisé en collaboration avec le Groupement forestier de Portneuf, Emploi Québec et le CERFO. La réalisation de la récolte et le suivi des opérations ont également été effectués lors de cette phase.

Lors de la 3e année du projet, des travaux de scarifiage et de chaulage aérien ont été réalisés. Ces travaux ont été accompagnés d'un contrôle de qualité et d'un inventaire de régénération après une saison de croissance (Bournival *et al.,* 2012). Les travaux de scarifiage ont eu lieu à la fin du

[1] Pour plus de détails concernant la démarche diagnostique utilisée, consulter le rapport de phase 1 de ce projet, en ligne à l'adresse suivante : http://www.cerfo.qc.ca/

mois de mai 2011 et au début de juin, l'inventaire de régénération au milieu octobre 2011 et le chaulage aérien a eu lieu au début décembre 2011.

La 4e année du projet a débuté par l'analyse des échantillons anhydres de chaux récoltés dans les collecteurs suite à l'épandage aérien. Les analyses des échantillons de terrain ont été effectuées dans les laboratoires de la DRF. Ensuite, une évaluation de la densité du couvert a été effectuée en utilisant une classification d'image supervisée et un inventaire de terrain à l'aide d'un densiomètre. Un inventaire de régénération a été effectué pour documenter la dynamique et l'effet des différents travaux sur la régénération d'érable à sucre et de hêtre. Enfin, un bilan financier des coûts reliés à l'épandage aérien est également présenté.

2.2. LOCALISATION DU SECTEUR À L'ÉTUDE

Le secteur à l'étude est situé dans l'érablière à bouleau jaune, à la limite de la sapinière à bouleau jaune dans la sous-région écologique 3c-T des hautes collines de Val-David (figure 1). Il fait partie de l'unité d'aménagement forestier 031-51 et de l'unité de paysage du lac Mékinac (Robitaille et Saucier, 1998). La température annuelle moyenne est de 2,5°C, la saison de croissance dure de 160 à 180 jours et les précipitations annuelles moyennes sont de 900 à 1 400 mm. Les données climatiques moyennes sont présentées au tableau 1. Le choix du secteur a été effectué parmi ceux présents au plan annuel d'aménagement forestier 2009-2010. Celui-ci a été retenu en raison de la présence de hêtres.

Tableau 1. Données climatiques par unité de paysage

Unité de paysage		Température annuelle moyenne	Degrés-jours de croissance	Longueur de la saison de croissance	Précipitations annuelles moyennes
Nom	No	(°C)	(°C)	(jours)	(mm)
Lac Mékinac	29	2,5	de 2 000 à 3 000	de 160 à 180	de 900 à 1 400

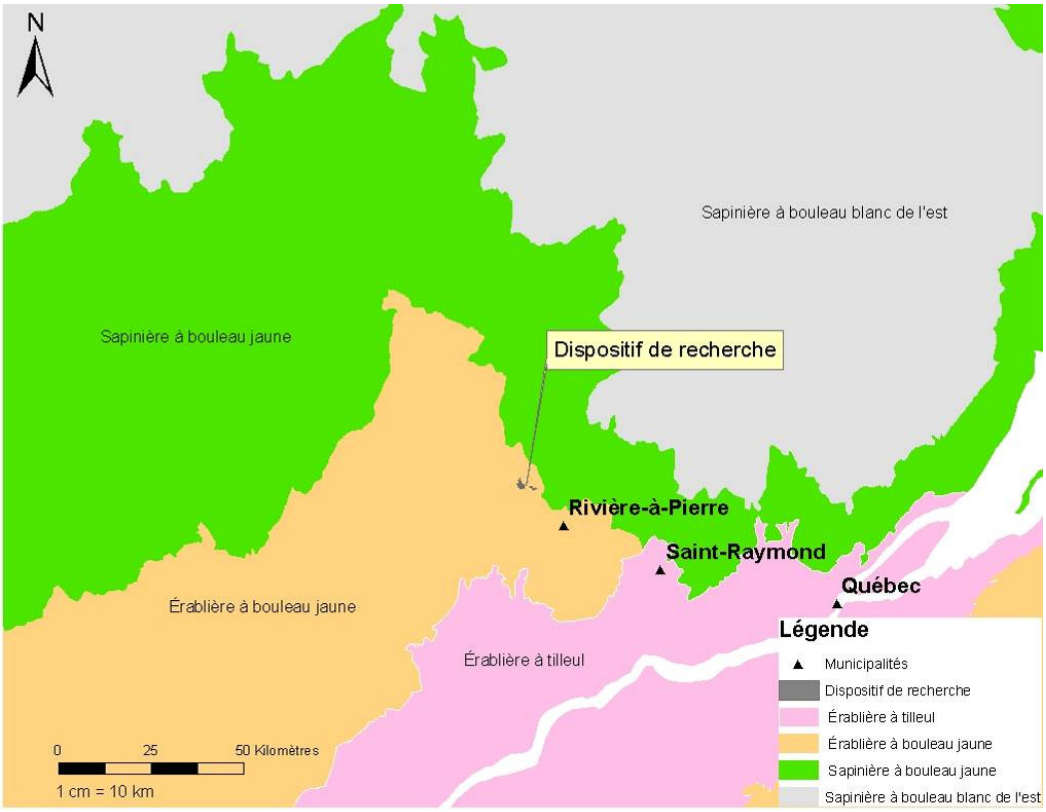

Figure 1. Localisation du secteur à l'étude

2.3. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Un dispositif expérimental en plan aléatoire par bloc complet a été élaboré pour étudier les modalités de préparation de terrain et de régénération naturelle. Le dispositif est constitué de 4 blocs, 2 intensités de couvert résiduel (CPI et sans coupe (témoin)) et de 4 traitements de préparation de terrain, pour un total de 20 unités expérimentales (UE).

La formation des blocs a été effectuée à partir des données recueillies lors de l'exercice de photo-interprétation fine et de l'inventaire d'intervention. La classe d'âge et le pourcentage de hêtre dans le peuplement ont été retenus pour constituer les blocs. Les blocs 1 et 2 font partie de la classe d'âge JIN et sont respectivement constitués de 10 et 20 % de hêtre dans la strate commerciale. Les blocs 3 et 4 appartiennent à la classe d'âge VIN et sont respectivement constitués de 10 et 20 % de hêtre. La figure 2 présente le plan du dispositif expérimental et indique les combinaisons de traitements retenues pour chacune des unités expérimentales.

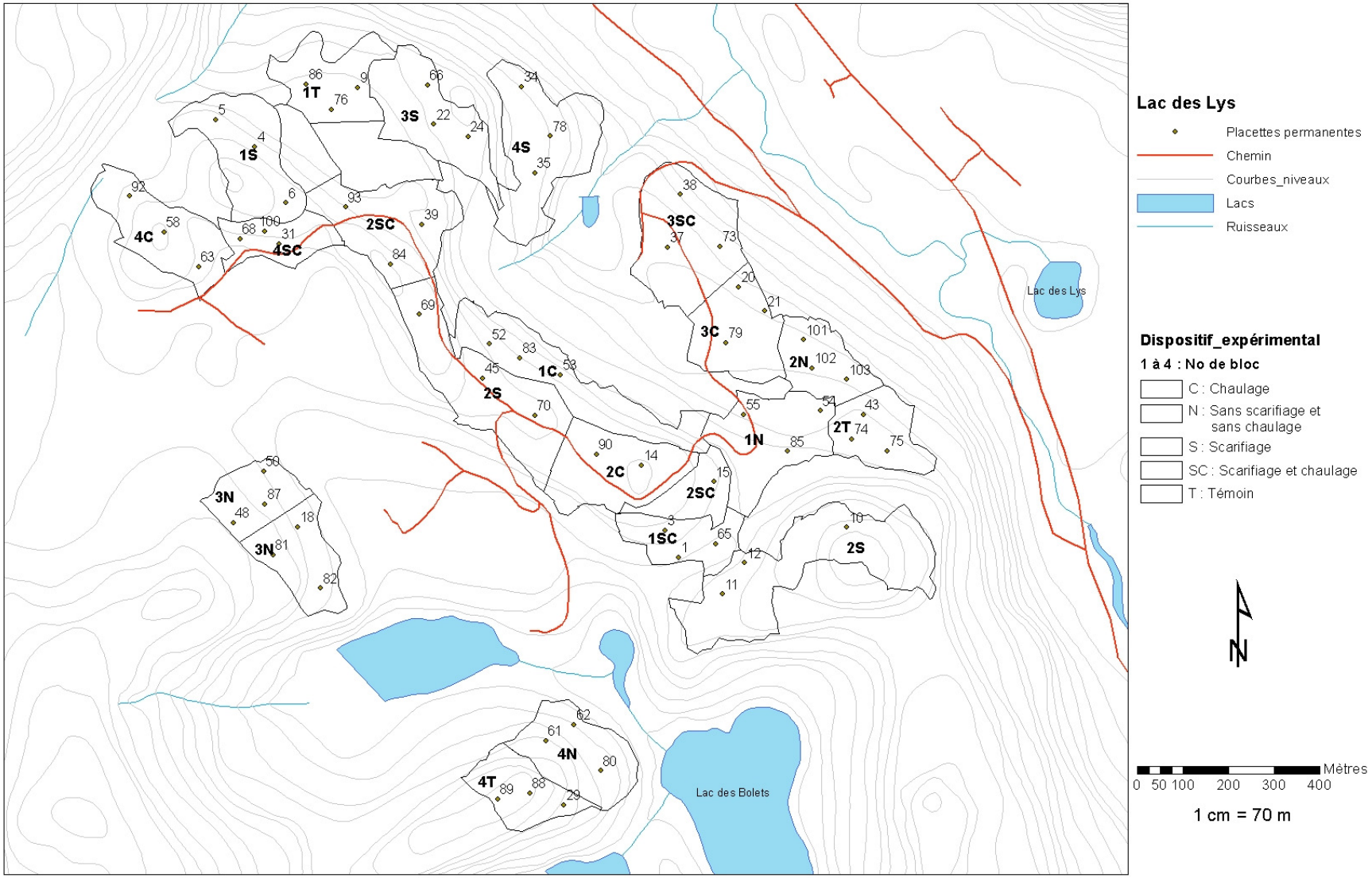

Figure 2. Plan du dispositif expérimental du secteur du lac des Lys

2.4. SUIVI DE LA QUALITÉ DES TRAVAUX DE CHAULAGE AÉRIEN

Une prescription de chaulage a d'abord été élaborée à partir des analyses de sol effectuées lors de la 2e phase du projet. Les analyses avaient identifié une carence en calcium et une faible teneur en magnésium dans l'érablière à l'étude (Bournival *et al.,* 2012). Il a été déterminé par les membres de la DRF que les secteurs présentaient des quantités limitées en calcium (Ca) et potentiellement en magnésium (Mg). Basé sur ce constat, un amendement de 3 tonnes à l'hectare de chaux a donc été prescrit (Rock Ouimet, comm. pers. 2010).

L'utilisation d'un hélicoptère au lieu d'un épandeur terrestre a été préférée et validée avec les professionnels de la Direction de la recherche forestière (DRF). La rugosité du terrain et les pentes prononcées de ce secteur ont justifié ce choix. Un total de 24,05 ha a été amendé avec de la chaux calcique granulaire (figures 3 et 4).

Pour le suivi de la qualité de l'épandage, 2 collecteurs de chaux (entonnoir vissé sur une bouteille), 1 récipient et 2 toiles de 1 m^2 ont été installés au sol dans chacune des placettes pour évaluer la quantité réelle de chaux déposée à la suite de l'épandage (figure 3). Les collecteurs ont été installés et nettoyés avant le début de chaque période d'épandage. Suite à la réalisation de l'épandage, la chaux a été récupérée dans chacun des collecteurs et a ensuite été rapportée au laboratoire de la DRF pour évaluer la quantité anhydre réelle de chaux dans chacun des collecteurs.

Figure 3. Récolte de la chaux dans les collecteurs après la tenue de l'épandage

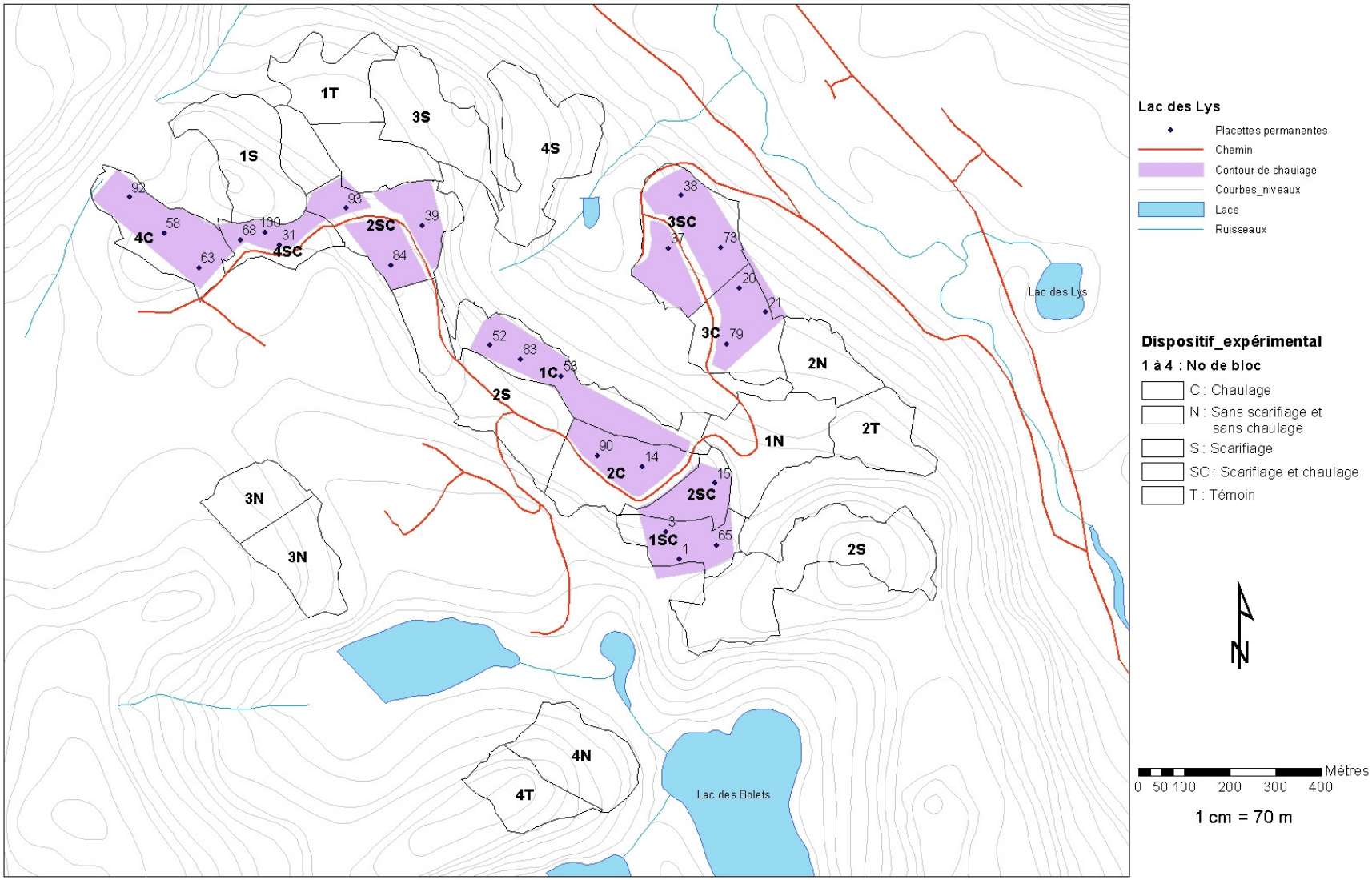

Figure 4. Chaulage et plan d'échantillonnage associés au suivi de la qualité des travaux

2.5. INVENTAIRE DE RÉGÉNÉRATION

Un premier inventaire de régénération avait été effectué 1 an après la récolte et les travaux de scarifiage. Un deuxième inventaire de régénération comprenant 62 grappes de 10 micro-placettes a été réalisé pendant le mois d'août 2012. Les points de départ des grappes sont les mêmes que ceux du premier inventaire. Le nombre de grappes par bloc et unité expérimentale est présenté au tableau 2 alors que le plan de sondage est présenté à la figure 5 .

Tableau 2. Nombre de grappes et d'unités expérimentales par bloc et traitement

	Bloc 1		Bloc 2		Bloc 3		Bloc 4		Total	
Traitement	**N placettes**	**N UE**	**N placettes**	**N UE**	**N placettes**	**N UE**	**N placettes**	**N UE**	**N placettes**	**N UE**
CPI + chaulage (C)	3	1	2	1	3	1	3	1	11	4
CPI sans scarifiage et sans chaulage (N)	3	1	3	1	6	2	3	1	15	5
CPI + scarifiage (S)	3	1	6	2	3	1	3	1	15	5
CPI + scarifiage et chaulage (SC)	3	1	3	1	3	1	3	1	13	4
Témoin (sans intervention) (T)	3	1	3	1	0	0	3	1	9	3
Total CPI	**12**	**4**	**14**	**5**	**15**	**5**	**12**	**4**	**53**	**18**
Total	**15**	**5**	**17**	**6**	**15**	**5**	**15**	**5**	**62**	**21**

La densité de la régénération a été mesurée en effectuant un dénombrement de toutes les tiges commerciales et non commerciales **de plus de 15 cm de hauteur** sur un rayon de 1,13 mètre dans toutes les micro-placettes. Les gaules ont été dénombrées par classe de DHP (2 cm à 8 cm). Le coefficient de distribution des tiges a, pour sa part, été évalué en notant la présence des essences commerciales et non commerciales dans un rayon de 1,69 mètre pour les feuillus intolérants et de 2,82 mètres pour les feuillus tolérants dans toutes les micro-placettes. Tout comme la densité, la distribution des semis et des gaules a été évaluée en considérant les classes de diamètre (15-60 cm, 60 cm à 1,6 m, 2 cm, 4 cm, 6 cm, 8 cm).

La présence de poquets accompagnée d'une évaluation du degré d'altération de la litière ont également été notées dans chacune des micro-placettes. Le degré d'altération de la litière a été évalué en utilisant les classes de perturbation de 0 %, 1-25 %, 25-50 %, et 51 % et +.

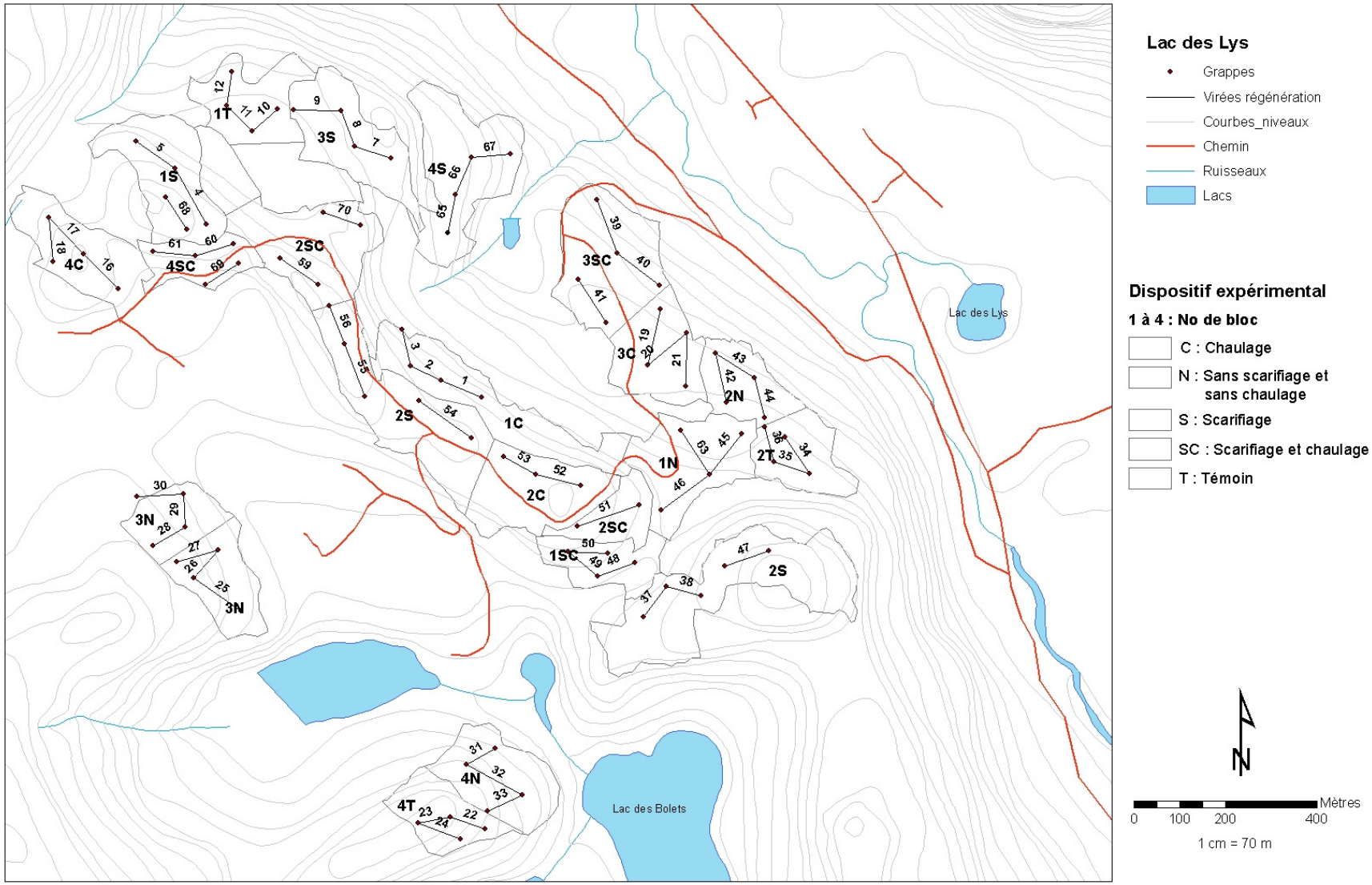

Figure 5. Plan de sondage de l'inventaire de régénération après récolte et scarifiage

2.6. CLASSIFICATION DU DEGRÉ D'OCCUPATION DU COUVERT FORESTIER

Deux méthodes d'évaluation du degré d'occupation du couvert forestier ont été utilisées. La première méthode a consisté en l'analyse d'image des photographies aériennes après coupe de 2011. Afin de définir les 3 classes retenues (sol nu, ombrage et forêt), un algorithme de classification supervisé a été élaboré (Maximum de vraisemblance ou « *Maximum Likelihood* »). Afin d'entraîner l'algorithme à reconnaître ces 3 classes, des sites d'entraînement ont été définis sur l'ensemble du territoire (c.-à-d. territoire traité et témoin). Par la suite, l'algorithme assigne, sur la base de la valeur numérique du pixel, son appartenance à une classe et on obtient donc une image matricielle de ces 3 classes. Les statistiques d'occupation du territoire ont été calculées à l'aide de l'outil Classification d'image d'Arc GIS 10.1.

Le densiomètre a également été utilisé lors de l'inventaire de régénération pour complémenter la classification d'image et documenter une méthode terrain de classification du degré d'occupation du couvert forestier après récolte. Le protocole consistait à prendre 30 lectures de couvert à tous les 2 mètres le long d'une virée de régénération. Ainsi, 30 lectures de couvert par virée ont été effectuées. La mesure prise avec le densiomètre consistait à indiquer la présence de couvert par un oui ou un non (figure 6 et 7). Un oui a été indiqué si de la végétation (feuille, branche vivante ou branche morte de plus de 10 cm) touchait l'intersection des 2 cordes. Sinon, l'observateur inscrivait un non.

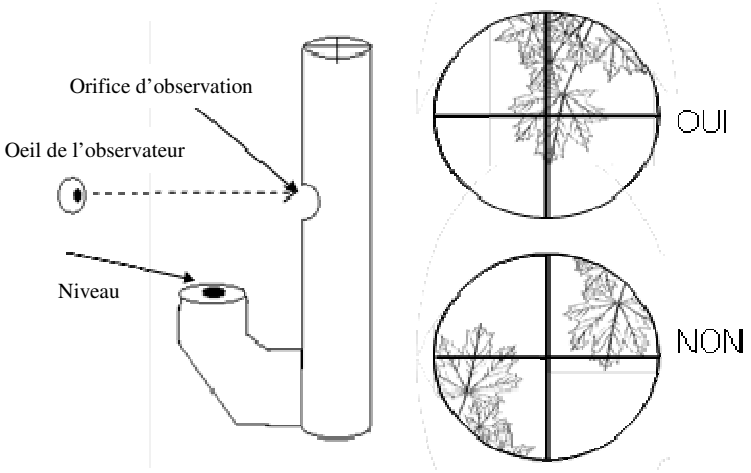

Figure 6. Utilisation du densiomètre

Figure 7. Utilisation du densiomètre sur le terrain

2.7. ANALYSE STATISTIQUE DES DONNÉES

Les compilations et analyses ont été réalisées à l'aide du logiciel SAS version 9.3. Pour le suivi du dispositif et pour les besoins scientifiques de l'étude, les données ont été compilées par traitement.

Les analyses de variance (ANOVA) ont été effectuées avec la procédure « MIXED ». Les analyses ont tenu compte de la disposition aléatoire en blocs du plan d'expérience. Cette procédure a permis de contrôler les effets aléatoires reliés à l'échantillonnage (blocs) et de mettre en lumière les effets fixes. La procédure « LSD » est venue compléter l'analyse de variance et a permis de déterminer s'il y avait des différences significatives entre les divers traitements étudiés (seuil $\alpha = 5\%$).

Les modèles empiriques développés dans le cadre de cette étude sont spécifiques à l'érablière du lac des Lys et sont valides seulement pour celle-ci. Ils ont été élaborés à l'intérieur de la base de données spécifique à cette étude et l'extrapolation des résultats à d'autres peuplements doit être faite avec précaution.

3. RÉSULTATS

Les sections suivantes présentent un rappel du portrait du bois sur pied après la CPI, le portrait de la régénération 2 ans après les travaux de récolte, le degré d'occupation du couvert forestier, l'évaluation de la qualité des travaux de chaulage aérien et un bilan des travaux de chaulage.

3.1. RAPPEL DU PORTRAIT DU BOIS SUR PIED EN 2011

Le tableau 3 présente la synthèse des paramètres dendrométriques pour chacun des traitements et des essences après récolte. Les lettres IC indiquent l'intervalle de confiance de chacun des paramètres au seuil α = 5 %. Il sert de référentiel pour documenter la condition du peuplement après les travaux de récolte effectués en décembre 2010 et janvier-février 2011.

Tableau 3. Synthèse des paramètres dendrométriques par traitement et par essence après récolte pour 2011

Traitement	Essence	Densité (ti/ha)	IC	G (m^2/ha)	IC	DHP moyen quadratique (cm)	Volume (m^3/ha)							
							Déroulage	IC	Sciage	IC	Pâte	IC	Total	IC
Chaulage	BOJ	159	53	6.6	2.3	22.9	1.2	1.0	13.3	6.0	22.3	9.6	45.7	19.3
	BOP	0	0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	EPB	7	10	0.2	0.4	21.2	0.0	0.0	1.5	2.9	0.1	0.2	1.7	3.4
	EPR	30	27	0.9	0.8	19.5	0.0	0.0	5.3	4.8	0.2	0.2	6.0	5.4
	ERR	52	43	1.3	1.0	17.9	0.0	0.0	0.0	0.0	7.7	6.3	8.3	6.8
	ERS	**159**	**42**	**7.1**	**2.7**	**23.8**	**0.0**	**0.0**	**19.5**	**11.2**	**28.5**	**9.5**	**52.6**	**21.8**
	FRN	5	9	0.2	0.4	22.4	0.0	0.0	0.4	0.7	0.7	1.4	1.3	2.6
	HEG	**20**	**16**	**0.4**	**0.3**	**14.8**	**0.0**	**0.0**	**0.0**	**0.0**	**1.9**	**2.0**	**2.0**	**2.1**
	PEG	2	5	0.1	0.1	18.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.4	0.7
	PET	0	0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	SAB	64	61	0.9	0.8	13.5	0.0	0.0	3.4	3.1	0.4	0.3	4.1	3.8
	Total	**498**	**115**	**17.5**	**2.8**	**21.2**	**1.2**	**1.0**	**43.4**	**10.0**	**62.2**	**11.8**	**122.0**	**27.6**
Sans scarifiage et sans chaulage	BOJ	90	40	6.6	3.8	30.6	1.5	1.2	16.2	11.2	22.1	12.3	51.2	31.6
	BOP	0	0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	EPB	7	8	0.1	0.1	13.2	0.0	0.0	0.3	0.4	0.0	0.0	0.4	0.5
	EPR	27	33	1.3	1.3	24.8	0.0	0.0	8.5	8.4	0.3	0.3	9.5	9.4
	ERR	12	12	0.7	1.1	27.5	0.0	0.0	0.0	0.0	4.8	8.0	5.2	8.7
	ERS	**253**	**51**	**10.2**	**3.2**	**22.7**	**0.0**	**0.0**	**27.8**	**12.8**	**41.2**	**11.4**	**74.5**	**25.8**
	FRN	0	0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	HEG	**27**	**20**	**0.6**	**0.5**	**17.5**	**0.0**	**0.0**	**0.0**	**0.0**	**4.2**	**3.7**	**4.4**	**3.9**
	PEG	0	0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	PET	0	0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	SAB	35	29	0.5	0.4	13.2	0.0	0.0	1.8	1.8	0.2	0.1	2.2	2.0
	Total	**450**	**63**	**20.0**	**3.0**	**23.8**	**1.5**	**1.2**	**54.6**	**12.5**	**72.7**	**11.5**	**147.3**	**25.7**

Tableau 3. Synthèse des paramètres dendrométriques par traitement et par essence après récolte pour 2011 (suite)

Traitement	Essence	Densité (ti/ha)	IC	G (m^2/ha)	IC	DHP moyen quadratique (cm)	Volume (m^3/ha)							
							Déroulage	IC	Sciage	IC	Pâte	IC	Total	IC
Scarifiage	BOJ	133	66	6.2	2.9	24.3	0.7	0.5	14.4	7.3	19.7	9.5	41.9	20.2
	BOP	0	0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	EPB	7	6	0.2	0.3	19.1	0.0	0.0	1.3	2.4	0.1	0.1	1.4	2.7
	EPR	23	17	0.9	0.9	22.5	0.0	0.0	5.9	5.9	0.2	0.2	6.7	6.6
	ERR	10	11	0.3	0.5	20.4	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	3.3	2.2	3.5
	ERS	**193**	**69**	**9.2**	**3.0**	**24.6**	**0.0**	**0.0**	**25.4**	**10.3**	**36.5**	**11.3**	**69.3**	**23.6**
	FRN	2	3	0.1	0.2	26.0	0.0	0.0	0.4	0.8	0.2	0.4	0.7	1.4
	HEG	**35**	**27**	**1.0**	**0.9**	**19.0**	**0.0**	**0.0**	**0.0**	**0.0**	**7.0**	**7.1**	**7.4**	**7.5**
	PEG	0	0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	PET	0	0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	SAB	17	14	0.2	0.2	11.7	0.0	0.0	0.5	0.5	0.1	0.1	0.6	0.6
	Total	**420**	**74**	**18.1**	**2.6**	**23.4**	**0.7**	**0.5**	**47.9**	**9.5**	**65.8**	**13.5**	**130.3**	**20.4**
Scarifiage et chaulage	BOJ	165	77	5.9	2.2	21.3	1.3	0.9	12.9	5.3	18.1	8.0	38.2	14.1
	BOP	2	4	0.0	0.1	18.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.5	0.3	0.5
	EPB	2	4	0.2	0.4	36	0.0	0.0	1.6	3.1	0.1	0.1	1.8	3.5
	EPR	25	14	1.1	1.0	23.7	0.0	0.0	7.1	7.0	0.2	0.1	7.9	7.7
	ERR	75	64	2.0	1.7	18.2	0.0	0.0	0.1	0.2	11.4	10.2	12.1	10.9
	ERS	**167**	**64**	**6.1**	**2.7**	**21.6**	**0.0**	**0.0**	**15.3**	**9.8**	**24.7**	**10.0**	**43.8**	**21.0**
	FRN	0	0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	HEG	**23**	**20**	**0.9**	**1.0**	**22.0**	**0.0**	**0.0**	**0.0**	**0.0**	**6.7**	**8.8**	**7.1**	**9.4**
	PEG	2	4	0.1	0.1	22.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0	0.5	1.0
	PET	0	0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	SAB	33	30	0.5	0.4	13.5	0.0	0.0	1.8	1.6	0.2	0.2	2.1	1.9
	Total	**494**	**82**	**16.7**	**2.4**	**20.7**	**1.3**	**0.9**	**38.7**	**10.8**	**62.0**	**12.9**	**113.8**	**20.0**
Témoin[2]	BOJ	172	112	7.8	3.6	23.9	2.3	1.3	18.9	7.9	24.3	13.8	54.6	25.1
	BOP	6	7	0.1	0.2	18.4	0.0	0.0	0.3	0.5	0.5	0.9	0.9	1.7
	EPB	3	6	0.1	0.3	26.0	0.0	0.0	1.0	2.0	0.1	0.1	1.1	2.3
	EPR	58	50	3.4	3.2	27.3	0.0	0.0	23.0	22.1	0.5	0.4	25.6	24.4
	ERR	47	38	2.0	1.6	23.3	0.0	0.0	0.0	0.0	13.3	10.9	14.3	11.8
	ERS	**186**	**114**	**9.5**	**6.2**	**25.5**	**0.0**	**0.0**	**28.3**	**22.7**	**37.6**	**23.2**	**72.5**	**48.3**
	FRN	0	0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	HEG	**25**	**26**	**1.5**	**1.4**	**27.7**	**0.0**	**0.0**	**0.0**	**0.0**	**12.4**	**11.0**	**13.3**	**11.9**
	PEG	0	0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	PET	0	0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	SAB	44	65	0.7	1.2	14.5	0.0	0.0	3.1	5.5	0.3	0.5	3.7	6.5
	Total	**542**	**25**	**25.3**	**4.2**	**24.4**	**2.3**	**1.3**	**74.6**	**23.6**	**88.9**	**16.5**	**185.9**	**32.9**

[2] Le témoin fait officie de station de contrôle qui n'a subi aucune intervention dans le dispositif

3.2. RÉGÉNÉRATION 2 ANS APRÈS LA RÉCOLTE

Cette section présente l'évolution de la densité et du coefficient de distribution de l'érable à sucre, du hêtre à grandes feuilles et du bouleau jaune entre 2011 et 2012, le portrait de la régénération 2 ans après la récolte, les résultats des analyses de variance et le portrait des microsites suite à l'intervention de récolte et de scarifiage.

3.2.1. Évolution de la densité et du coefficient de distribution entre 2011 et 2012

Le tableau 4 présente l'évolution de la densité, entre 2011 et 2012, de l'érable à sucre, du hêtre à grandes feuilles et du bouleau jaune. Il indique que les semis d'érable à sucre se sont accrus considérablement pendant cette période pour tous les traitements. Le chaulage est le traitement qui a bénéficié de l'accroissement le plus élevé, avec 17 133 tiges de plus qu'en 2011. De son côté, le hêtre a également présenté des accroissements, mais ils sont beaucoup plus faibles que ceux de l'érable à sucre. À l'exception du témoin, le bouleau jaune a présenté des accroissements notables et il se positionne maintenant (par rapport à 2011) à égalité avec le hêtre en termes de densité totale.

Le tableau 5 présente l'évolution du coefficient de distribution, entre 2011 et 2012, de l'érable à sucre, du hêtre à grandes feuilles et du bouleau jaune. Tout comme pour la densité, il indique que le coefficient de distribution de l'érable à sucre s'est accru considérablement pendant cette période pour tous les traitements. Par contre, les gaules d'érable à sucre ont vu leurs distributions baisser de 3 à 10 % selon les traitements. Le hêtre a également présenté de légers accroissements. L'accroissement le plus élevé a été observé dans le témoin, avec 21 %. De son côté, le bouleau jaune a présenté des accroissements notables variant entre 12 et 44 %. Les accroissements les plus élevés ont été observés dans les traitements de scarifiage et de scarifiage et chaulages tandis que les accroissements les plus faibles ont été observés dans le traitement sans scarifiage et sans chaulage et le témoin.

Tableau 4. Évolution de la densité de l'ERS, du HEG et du BOJ entre 2011 et 2012

			2011		2012		
Essence	**Traitement**	**Classe de DHP**	**Densité (ti/ha)**	**IC**	**Densité (ti/ha)**	**IC**	**Évolution de la densité (ti/ha)**
ERS	Chaulage	Semis	4 623	4 923	21 710	12 306	17 087
		Gaules	317	166	363	227	45
		Total	**4 940**	**4 862**	**22 073**	**12 211**	**17 133**
	Sans scarifiage et sans chaulage	Semis	4 487	3 117	16 702	8 766	12 215
		Gaules	316	191	249	206	(66)
		Total	**4 803**	**3 129**	**16 951**	**8 822**	**12 148**
	Scarifiage	Semis	1 389	620	12 630	7 266	11 241
		Gaules	374	220	199	111	(174)
		Total	**1 763**	**753**	**12 830**	**7 342**	**11 067**
	Scarifiage et chaulage	Semis	2 606	1 464	12 423	7 608	9 816
		Gaules	227	184	187	164	(40)
		Total	**2 833**	**1 490**	**12 610**	**7 623**	**9 777**
	Témoin	Semis	6 454	5 454	15 095	12 422	8 642
		Gaules	305	285	166	166	(138)
		Total	**6 758**	**5 678**	**15 262**	**12 469**	**8 503**
HEG	Chaulage	Semis	3 513	3 219	4 192	3 676	680
		Gaules	159	139	68	97	(91)
		Total	**3 671**	**3 301**	**4 260**	**3 749**	**589**
	Sans scarifiage et sans chaulage	Semis	1 313	989	2 676	1 259	1 363
		Gaules	199	163	116	118	(83)
		Total	**1 512**	**1 078**	**2 792**	**1 316**	**1 280**
	Scarifiage	Semis	2 172	2 055	4 138	3 319	1 966
		Gaules	89	112	66	76	(23)
		Total	**2 261**	**2 050**	**4 205**	**3 314**	**1 943**
	Scarifiage et chaulage	Semis	1 246	793	5 297	4 472	4 051
		Gaules	-	-	62	125	62
		Total	**1 246**	**793**	**5 360**	**4 478**	**4 113**
	Témoin	Semis	914	757	1 717	1 270	803
		Gaules	83	83	138	121	55
		Total	**997**	**752**	**1 856**	**1 263**	**859**
BOJ	Chaulage	Semis	272	264	6 028	2 572	5 756
		Gaules	68	70	181	270	113
		Total	**340**	**263**	**6 209**	**2 601**	**5 869**
	Sans scarifiage et sans chaulage	Semis	415	336	5 069	2 526	4 653
		Gaules	33	45	17	33	(17)
		Total	**449**	**338**	**5 085**	**2 525**	**4 637**
	Scarifiage	Semis	356	238	5 700	3 161	5 344
		Gaules	107	86	66	59	(40)
		Total	**463**	**266**	**5 767**	**3 164**	**5 304**
	Scarifiage et chaulage	Semis	385	288	4 695	2 656	4 310
		Gaules	227	264	249	325	23
		Total	**612**	**427**	**4 944**	**2 633**	**4 332**
	Témoin	Semis	277	495	471	281	194
		Gaules	28	55	55	111	28
		Total	**305**	**490**	**526**	**305**	**222**

Tableau 5. Évolution du coefficient de distribution de l'ERS, du HEG et du BOJ entre 2011 et 2012

			2011		2012		
Essence	**Traitement**	**Classe de DHP**	**Coefficient de distribution (%)**	**IC**	**Coefficient de distribution (%)**	**IC**	**Évolution du coefficient de distribution (%)**
ERS	Chaulage	Semis	43 %	21 %	90 %	8 %	47 %
		Gaules	39 %	12 %	35 %	6 %	-4 %
		Total	**64 %**	**17 %**	**92 %**	**7 %**	**28 %**
	Sans scarifiage et sans chaulage	Semis	55 %	12 %	94 %	4 %	39 %
		Gaules	38 %	13 %	33 %	10 %	-5 %
		Total	**72 %**	**11 %**	**95 %**	**4 %**	**23 %**
	Scarifiage	Semis	38 %	12 %	77 %	15 %	39 %
		Gaules	44 %	12 %	41 %	11 %	-3 %
		Total	**61 %**	**15 %**	**82 %**	**13 %**	**21 %**
	Scarifiage et chaulage	Semis	40 %	15 %	87 %	10 %	47 %
		Gaules	33 %	13 %	29 %	14 %	-4 %
		Total	**56 %**	**15 %**	**88 %**	**9 %**	**32 %**
	Témoin	Semis	59 %	24 %	78 %	18 %	19 %
		Gaules	42 %	17 %	32 %	15 %	-10 %
		Total	**68 %**	**24 %**	**79 %**	**19 %**	**11 %**
HEG	Chaulage	Semis	56 %	18 %	60 %	12 %	4 %
		Gaules	15 %	8 %	19 %	13 %	4 %
		Total	**61 %**	**16 %**	**64 %**	**13 %**	**3 %**
	Sans scarifiage et sans chaulage	Semis	44 %	15 %	53 %	15 %	9 %
		Gaules	15 %	9 %	15 %	13 %	0 %
		Total	**48 %**	**16 %**	**57 %**	**16 %**	**9 %**
	Scarifiage	Semis	40 %	14 %	51 %	13 %	11 %
		Gaules	10 %	6 %	15 %	7 %	5 %
		Total	**45 %**	**14 %**	**53 %**	**13 %**	**8 %**
	Scarifiage et chaulage	Semis	44 %	14 %	50 %	18 %	6 %
		Gaules	8 %	6 %	8 %	4 %	0 %
		Total	**45 %**	**13 %**	**52 %**	**17 %**	**7 %**
	Témoin	Semis	33 %	17 %	54 %	21 %	21 %
		Gaules	11 %	9 %	18 %	9 %	7 %
		Total	**36 %**	**18 %**	**57 %**	**19 %**	**21 %**
BOJ	Chaulage	Semis	25 %	16 %	60 %	15 %	35 %
		Gaules	9 %	5 %	16 %	9 %	7 %
		Total	**31 %**	**16 %**	**65 %**	**16 %**	**34 %**
	Sans scarifiage et sans chaulage	Semis	21 %	9 %	51 %	12 %	30 %
		Gaules	8 %	6 %	7 %	5 %	-1 %
		Total	**27 %**	**10 %**	**53 %**	**13 %**	**26 %**
	Scarifiage	Semis	15 %	6 %	63 %	12 %	48 %
		Gaules	12 %	5 %	9 %	5 %	-3 %
		Total	**22 %**	**8 %**	**66 %**	**11 %**	**44 %**
	Scarifiage et chaulage	Semis	19 %	11 %	71 %	11 %	52 %
		Gaules	21 %	11 %	20 %	12 %	-1 %
		Total	**32 %**	**12 %**	**75 %**	**11 %**	**43 %**
	Témoin	Semis	12 %	8 %	26 %	12 %	14 %
		Gaules	7 %	6 %	10 %	9 %	3 %
		Total	**19 %**	**6 %**	**31 %**	**10 %**	**12 %**

3.2.2. Portrait de la régénération en 2012

Les résultats indiquent que les essences commerciales ayant les plus fortes densités (tableau 6) et la meilleure distribution (tableau 7) de leur régénération sur le secteur à l'étude, 2 ans après récolte, sont l'érable à sucre, le bouleau jaune et le hêtre à grandes feuilles. Le bouleau jaune est

maintenant à égalité avec le hêtre à grandes feuilles en termes de densité et il est mieux distribué alors qu'il était nettement inférieur au hêtre en 2011. L'érable rouge présente une densité moins importante que ces trois essences, mais est assez bien représenté dans tous les traitements. Enfin, la densité et la distribution de régénération en épinette rouge et sapin baumier sont faibles, présentant des coefficients de distribution inférieurs à 15 %. La présence des peupliers et du bouleau à papier est plutôt marginale.

Les résultats indiquent qu'il y a beaucoup de variabilité de la densité de régénération et du coefficient de distribution en érable à sucre et en hêtre à grandes feuilles en fonction des traitements. La densité totale en érable à sucre varie entre 12 610 et 22 073 ti/ha. Les densités les plus faibles ont été observées dans les traitements avec scarifiage tandis que la densité la plus élevée a été observée dans le traitement de chaulage. Le coefficient de distribution de l'érable à sucre 2 ans après récolte varie de 79 à 95 % (tableau **7**). Le coefficient de distribution le plus faible a été observé dans le témoin tandis que le coefficient de distribution le plus élevé a été observé dans le traitement sans scarifiage et sans chaulage.

La variabilité de densité de la régénération en hêtre à grandes feuilles entre les traitements est également importante, mais moindre que pour l'érable à sucre (tableau 6). Elle varie de 1 856 à 5 360 ti/ha. La densité la plus faible a été observée dans le témoin alors que les densités les plus élevées se trouvaient dans les traitements avec scarifiage. Le coefficient de distribution du hêtre à grandes feuilles est assez stable entre les traitements et varie de 52 à 64 % (tableau 7). Les coefficients de distribution les plus faibles ont été observés dans les traitements avec scarifiage tandis que le coefficient de distribution le plus élevé a été observé dans le traitement de chaulage.

Dans l'ensemble, on observe que la densité en régénération de semis et de gaules d'érable à sucre est supérieure à celle du hêtre. La même tendance est observée pour le coefficient de distribution.

Les principales essences non commerciales de compétition identifiées sont, dans l'ordre, la viorne, l'érable de Pennsylvanie et l'érable à épis. D'autres essences non commerciales ont été identifiées, comme le chèvrefeuille, le noisetier à long bec, le cornouiller à feuilles alternes, le némopanthe mucroné et le cerisier de Pennsylvanie. Ces dernières ont été regroupées dans les

autres essences feuillues non commerciales (tableaux 6 et 7). La densité de la viorne varie entre 15 156 ti/ha (scarifiage) et 35 481 ti/ha (sans scarifiage et sans chaulage) et son coefficient de distribution varie entre 54 % (scarifiage et chaulage) et 69 % (témoin et sans scarifiage et sans chaulage). La densité de l'érable à épis varie entre 3 191 ti/ha (scarifiage) et 7 395 ti/ha (sans scarifiage et sans chaulage) en fonction des traitements. Son coefficient de distribution varie entre 31 % (scarifiage) et 52 % (sans scarifiage et sans chaulage). L'érable de Pennsylvanie a une densité variant de 3 573 ti/ha (témoin) à 9 639 ti/ha (sans scarifiage et sans chaulage). Son coefficient de distribution varie entre 35 % (scarifiage et chaulage) et 56 % (sans scarifiage et sans chaulage).

Globalement, les traitements de scarifiage semblent avoir diminué la densité et la distribution des essences non commerciales. À l'exception du bouleau jaune, les traitements de scarifiage ne semblent pas avoir favorisé les essences commerciales, mais il est encore trop tôt pour conclure à des différences statistiques[3].

[3] Pour plus de détails concernant la densité et le coefficient de distribution en 2011 des essences non commerciales, consulter l'annexe 1.

Tableau 6. Densité (ti/ha) des essences en régénération par traitement 2 ans après récolte

			Érable à sucre		Hêtre à grandes feuilles		Bouleau jaune		Épinette rouge		Érable rouge		Sapin baumier	
Traitement	**N grappes**	**Type**	**Densité (ti/ha)**	*IC*	**Densité (ti/ha)**	*IC*	**Densité (ti/ha)**	*IC*	**Densité (ti/ha)**	*IC*	**Densité (ti/ha)**	*IC*	**Densité (ti/ha)**	*IC*
Chaulage	11	Semis	21 710	*12 306*	4 192	*3 676*	6028	*2572*	23	*45*	3 581	*2 730*	317	*323*
		Gaules	363	*227*	68	*97*	181	*270*	23	*45*	-	-	45	*61*
		Total	**22 073**	***12 211***	**4 260**	***3 749***	**6209**	***2601***	**45**	***61***	**3 581**	***2 730***	**363**	***318***
Sans scarifiage et sans chaulage	15	Semis	16 702	*8 766*	2 676	*1 259*	5069	*2526*	249	*161*	931	*577*	216	*160*
		Gaules	249	*206*	116	*118*	17	*33*	50	*53*	33	*45*	133	*145*
		Total	**16 951**	***8 822***	**2 792**	***1 316***	**5085**	***2525***	**299**	***177***	**964**	***607***	**349**	***237***
Scarifiage	15	Semis	12 630	*7 266*	4 138	*3 319*	5700	*3161*	216	*188*	1 612	*1 393*	532	*486*
		Gaules	199	*111*	66	*76*	66	*59*	183	*241*	-	-	33	*45*
		Total	**12 830**	***7 342***	**4 205**	***3 314***	**5767**	***3164***	**399**	***386***	**1 612**	***1 393***	**565**	***514***
Scarifiage et chaulage	12	Semis	12 423	*7 608*	5 297	*4 472*	4695	*2656*	21	*42*	1 496	*1 312*	249	*213*
		Gaules	187	*164*	62	*125*	249	*325*	62	*65*	-	-	104	*96*
		Total	**12 610**	***7 623***	**5 360**	***4 478***	**4944**	***2633***	**83**	***94***	**1 496**	***1 312***	**353**	***256***
Témoin	9	Semis	15 095	*12 422*	1 717	*1 270*	471	*281*	305	*490*	2 548	*2 651*	609	*973*
		Gaules	166	*166*	138	*121*	55	*111*	28	*55*	28	*55*	111	*168*
		Total	**15 262**	***12 469***	**1 856**	***1 263***	**526**	***305***	**332**	***492***	**2 576**	***2 638***	**720**	***967***
Total	**62**	Semis	15 544	*4 157*	3 667	*1 383*	4652	*1248*	165	*95*	1 910	*769*	374	*197*
		Gaules	233	*79*	88	*47*	109	*82*	76	*62*	12	*14*	84	*49*
		Total	**15 777**	***4 170***	**3 755**	***1 390***	**4761**	***1250***	**241**	***128***	**1 922**	***769***	**458**	***205***

Tableau 6. Densité (ti/ha) des essences en régénération par traitement 2 ans après récolte (suite)

			Bouleau à papier		Peupliers		Érable à épis		Érable de Pennsylvanie		Viorne sp.		Autres feuillus non commerciaux	
Traitement	**N grappes**	**Type**	**Densité (ti/ha)**	*IC*	**Densité (ti/ha)**	*IC*	**Densité (ti/ha)**	*IC*	**Densité (ti/ha)**	*IC*	**Densité (ti/ha)**	*IC*	**Densité (ti/ha)**	*IC*
Chaulage	11	Semis	-	-	227	*406*	3 263	*1 419*	5 122	*3 426*	22 481	*10 480*	574	*265*
		Gaules	-	-	-	-	-	-	23	*45*	-	-	-	-
		Total	**-**	**-**	**227**	***406***	**3 263**	***1 419***	**5 144**	***3 419***	**22 481**	***10 480***	**574**	***265***
Sans scarifiage et sans chaulage	15	Semis	-	-	17	*33*	7 362	*2 246*	9 572	*5 720*	35 481	*12 466*	330	*210*
		Gaules	-	-	-	-	33	*45*	66	*103*	-	-	-	-
		Total	**-**	**-**	**17**	***33***	**7 395**	***2 262***	**9 639**	***5 717***	**35 481**	***12 466***	**330**	***210***
Scarifiage	15	Semis	-	-	266	*532*	3 141	*2 248*	3 723	*1 587*	15 156	*5 623*	1 410	*356*
		Gaules	-	-	-	-	50	*53*	83	*93*	-	-	3	*6*
		Total	**-**	**-**	**266**	***532***	**3 191**	***2 278***	**3 806**	***1 634***	**15 156**	***5 623***	**1 413**	***356***
Scarifiage et chaulage	12	Semis	-	-	602	*1 117*	3 532	*1 818*	4 570	*4 150*	18 800	*8 496*	1 316	*410*
		Gaules	-	-	-	-	104	*130*	21	*42*	21	*42*	-	-
		Total	**-**	**-**	**602**	***1 117***	**3 635**	***1 910***	**4 591**	***4 148***	**18 821**	***8 504***	**1 316**	***410***
Témoin	9	Semis	-	-	83	*166*	4 459	*3 143*	3 490	*1 917*	25 122	*7 373*	74	*74*
		Gaules	28	*55*	-	-	-	-	83	*83*	-	-	-	-
		Total	**28**	***55***	**83**	***166***	**4 459**	***3 143***	**3 573**	***1 991***	**25 122**	***7 373***	**74**	***74***
Total	**62**	Semis	-	-	237	*260*	4451	*1054*	5 516	*1 826*	23 525	*4 564*	788	*220*
		Gaules	4	*8*	-	-	40	*31*	56	*37*	4	*8*	1	*1*
		Total	**4**	***8***	**237**	***260***	**4491**	***1065***	**5 573**	***1 829***	**23 529**	***4 565***	**789**	***220***

Tableau 7. Coefficient de distribution (%) des essences en régénération 2 ans après récolte

			Érable à sucre		Hêtre à grandes feuilles		Bouleau jaune		Épinette rouge		Érable rouge		Sapin baumier	
Traitement	**N grappes**	**Type**	**CD (%)**	*IC*	**CD (%)**	*IC*	**CD (%)**	*IC*	**CD (%)**	*IC*	**CD (%)**	*IC*	**CD (%)**	*IC*
Chaulage	11	Semis	90 %	8 %	60 %	12 %	60 %	15 %	1 %	2 %	33 %	17 %	6 %	5 %
		Gaules	35 %	6 %	19 %	13 %	16 %	9 %	1 %	2 %	3 %	4 %	2 %	2 %
		Total	**92 %**	**7 %**	**64 %**	**13 %**	**65 %**	**16 %**	**2 %**	**2 %**	**35 %**	**16 %**	**8 %**	**5 %**
Sans scarifiage et sans chaulage	15	Semis	94 %	4 %	53 %	15 %	51 %	12 %	8 %	5 %	17 %	9 %	7 %	4 %
		Gaules	33 %	10 %	15 %	13 %	7 %	5 %	2 %	2 %	3 %	4 %	3 %	3 %
		Total	**95 %**	**4 %**	**57 %**	**16 %**	**53 %**	**13 %**	**9 %**	**6 %**	**18 %**	**9 %**	**9 %**	**5 %**
Scarifiage	15	Semis	77 %	15 %	51 %	13 %	63 %	12 %	5 %	3 %	27 %	18 %	9 %	6 %
		Gaules	41 %	11 %	15 %	7 %	9 %	5 %	3 %	4 %	3 %	5 %	1 %	2 %
		Total	**82 %**	**13 %**	**53 %**	**13 %**	**66 %**	**11 %**	**7 %**	**6 %**	**27 %**	**19 %**	**10 %**	**7 %**
Scarifiage et chaulage	12	Semis	87 %	10 %	50 %	18 %	71 %	11 %	1 %	2 %	34 %	34 %	8 %	8 %
		Gaules	29 %	14 %	8 %	4 %	20 %	12 %	3 %	3 %	4 %	4 %	3 %	3 %
		Total	**88 %**	**9 %**	**52 %**	**17 %**	**75 %**	**11 %**	**3 %**	**4 %**	**35 %**	**35 %**	**10 %**	**8 %**
Témoin	9	Semis	78 %	18 %	54 %	21 %	26 %	12 %	6 %	7 %	22 %	17 %	11 %	13 %
		Gaules	32 %	15 %	18 %	9 %	10 %	9 %	1 %	2 %	6 %	11 %	4 %	7 %
		Total	**79 %**	**19 %**	**57 %**	**19 %**	**31 %**	**10 %**	**7 %**	**7 %**	**28 %**	**17 %**	**14 %**	**13 %**
Total	**62**	Semis	85 %	5 %	54 %	7 %	56 %	7 %	4 %	2 %	26 %	7 %	8 %	3 %
		Gaules	34 %	5 %	15 %	*5 %*	12 %	4 %	2 %	1 %	4 %	3 %	3 %	1 %
		Total	**87 %**	**5 %**	**56 %**	***7 %***	**60 %**	**6 %**	**6 %**	**2 %**	**28 %**	**7 %**	**10 %**	**3 %**

Tableau 7. Coefficient de distribution (%) des essences en régénération 2 ans après récolte (suite)

			Peupliers		Érable à épis		Érable de Pennsylvanie		Viorne sp.		Autres feuillus non commerciaux	
Traitement	**N grappes**	**Type**	**CD (%)**	*IC*	**CD (%)**	*IC*	**CD (%)**	*IC*	**CD (%)**	*IC*	**CD (%)**	*IC*
Chaulage	11	Semis	6 %	9 %	43 %	12 %	55 %	16 %	62 %	14 %	30 %	9 %
		Gaules	0 %	0 %	0 %	0 %	1 %	2 %	0 %	0 %	0 %	0 %
		Total	**6 %**	**9 %**	**43 %**	**12 %**	**55 %**	**16 %**	**62 %**	**14 %**	**30 %**	**9 %**
Sans scarifiage et sans chaulage	15	Semis	1 %	*1 %*	52 %	11 %	56 %	13 %	69 %	10 %	17 %	9 %
		Gaules	0 %	*0 %*	1 %	2 %	1 %	2 %	0 %	0 %	0 %	0 %
		Total	**1 %**	***1 %***	**52 %**	**11 %**	**56 %**	**13 %**	**69 %**	**10 %**	**17 %**	**9 %**
Scarifiage	15	Semis	3 %	5 %	31 %	11 %	44 %	9 %	58 %	11 %	57 %	12 %
		Gaules	0 %	0 %	2 %	2 %	3 %	4 %	0 %	0 %	1 %	1 %
		Total	**3 %**	**5 %**	**31 %**	**11 %**	**44 %**	**9 %**	**58 %**	**11 %**	**57 %**	**12 %**
Scarifiage et chaulage	12	Semis	8 %	13 %	36 %	11 %	35 %	20 %	54 %	13 %	54 %	11 %
		Gaules	0 %	0 %	3 %	4 %	1 %	2 %	1 %	2 %	0 %	0 %
		Total	**8 %**	**13 %**	**36 %**	**11 %**	**35 %**	**20 %**	**54 %**	**13 %**	**54 %**	**11 %**
Témoin	9	Semis	3 %	7 %	34 %	17 %	42 %	18 %	69 %	14 %	8 %	6 %
		Gaules	0 %	0 %	0 %	0 %	3 %	3 %	0 %	0 %	0 %	0 %
		Total	**3 %**	**7 %**	**34 %**	**17 %**	**42 %**	**18 %**	**69 %**	**14 %**	**8 %**	**6 %**
Total	62	Semis	4 %	3 %	40 %	6 %	47 %	7 %	62 %	5 %	35 %	7 %
		Gaules	0 %	0 %	1 %	1 %	2 %	1 %	0 %	0 %	0 %	0 %
		Total	**4 %**	**3 %**	**40 %**	**6 %**	**47 %**	**7 %**	**62 %**	**5 %**	**35 %**	**7 %**

3.2.3. Analyse de variance (densité et coefficient de distribution)

La densité de régénération totale de l'érable à sucre est significativement supérieure à celle du hêtre dans les traitements de chaulage, sans scarifiage et sans chaulage, scarifiage et témoin (figure 8). Bien que la densité en érable à sucre soit supérieure à celle du hêtre dans le traitement de scarifiage et chaulage, les résultats indiquent que les densités du hêtre et de l'érable à sucre sont équivalentes. De son côté, le bouleau jaune a fait une percée notoire dans le dispositif à l'étude et les résultats confirment qu'il est maintenant aussi dense que le hêtre. La densité de bouleau jaune est même équivalente à celle de l'érable à sucre dans les traitements de scarifiage et de scarifiage et chaulage.

La densité de l'érable à sucre est significativement inférieure dans les traitements de scarifiage et de scarifiage et chaulage, les autres traitements étant équivalents. Le hêtre et le bouleau jaune ne présentent pas de différence significative entre les traitements, même si les résultats ont démontré qu'il y avait beaucoup moins de bouleau jaune dans le témoin (figure 9).

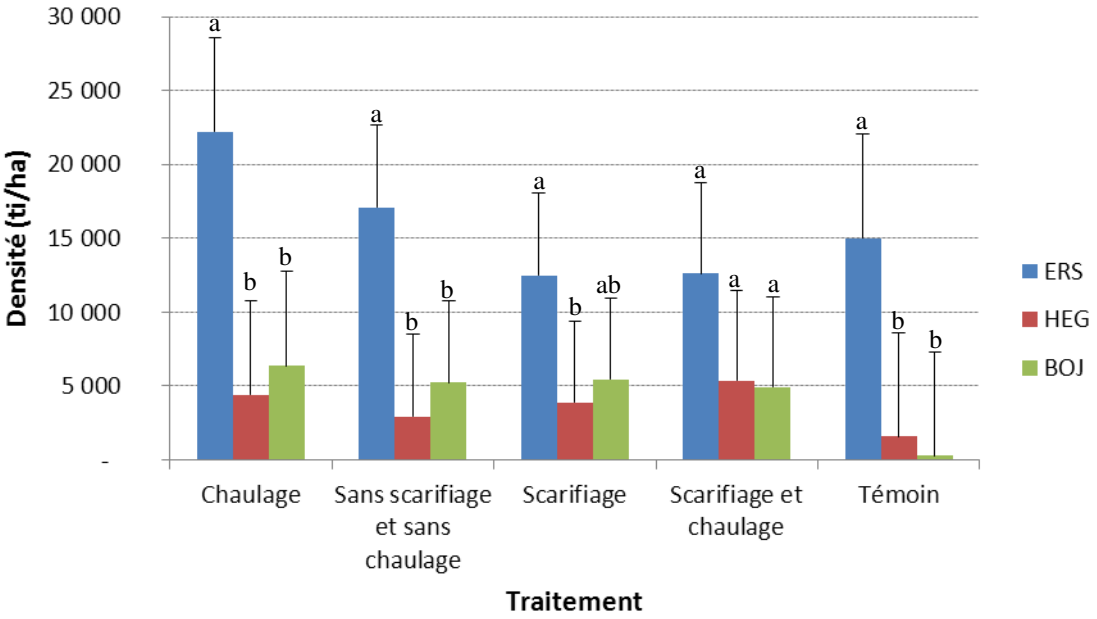

Figure 8. Densité par traitement et essence[4]

[4] Les lettres a et b indiquent des différences significatives entre les essences pour chacun des traitements au seuil α = 5 %.

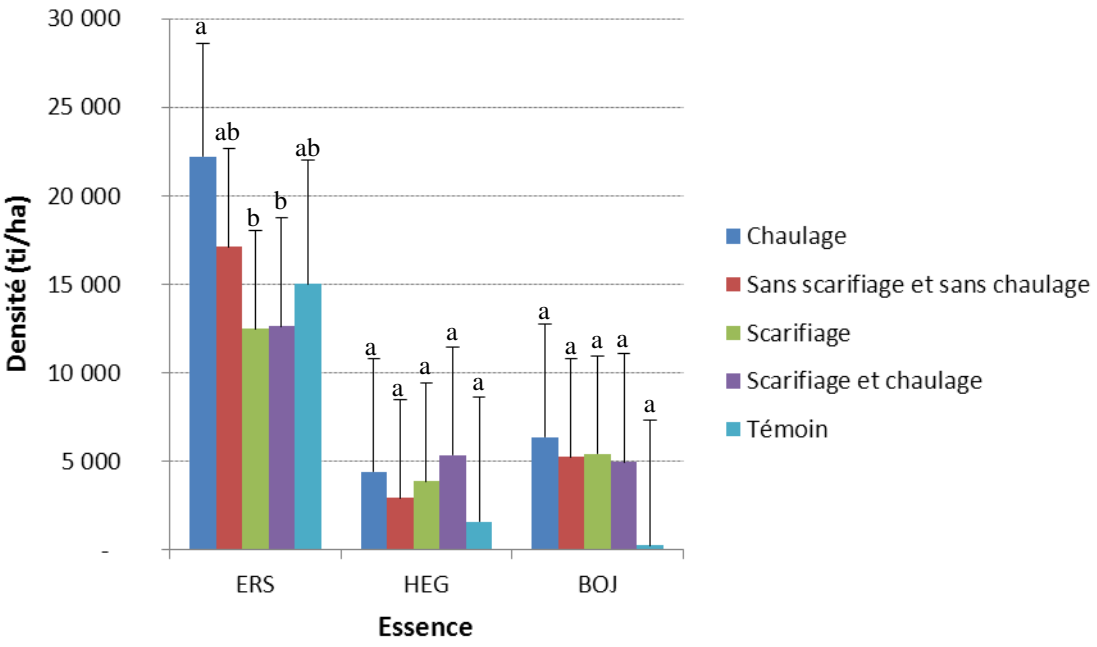

Figure 9. Densité par essence et traitement[5]

Le coefficient de distribution de l'érable à sucre est significativement supérieur à celui du hêtre dans tous les traitements (figure 10). Il est également supérieur au bouleau jaune dans les traitements n'ayant pas bénéficié de sacrifiage, les traitements de scarifiage et de scarifiage et chaulage présentant des coefficients de distribution équivalents entre l'érable à sucre et le bouleau jaune. Entre 2011 et 2012, le bouleau jaune a rejoint le hêtre dans tous les traitements à l'exception du témoin et il a même surpassé le hêtre dans le traitement de scarifiage et chaulage.

Aucune différence significative entre les traitements n'a été observée pour l'érable à sucre et le hêtre (figure 11). Par contre, le bouleau jaune présente de meilleurs coefficients de distribution dans les traitements de chaulage, scarifiage et scarifiage et chaulage alors que les traitements sans scarifiage et sans chaulage et témoin présentent les coefficients de distribution les plus bas.

[5] Les lettres a et b indiquent des différences significatives entre les traitements pour chacune des essences au seuil $\alpha = 5$ %.

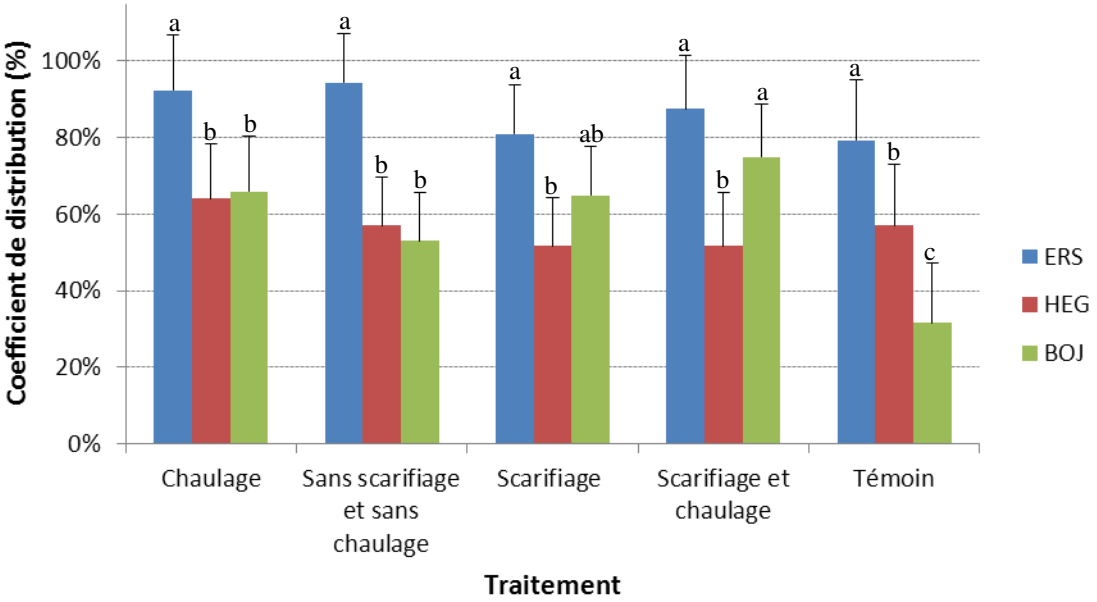

Figure 10. Coefficient de distribution par traitement et essence[6]

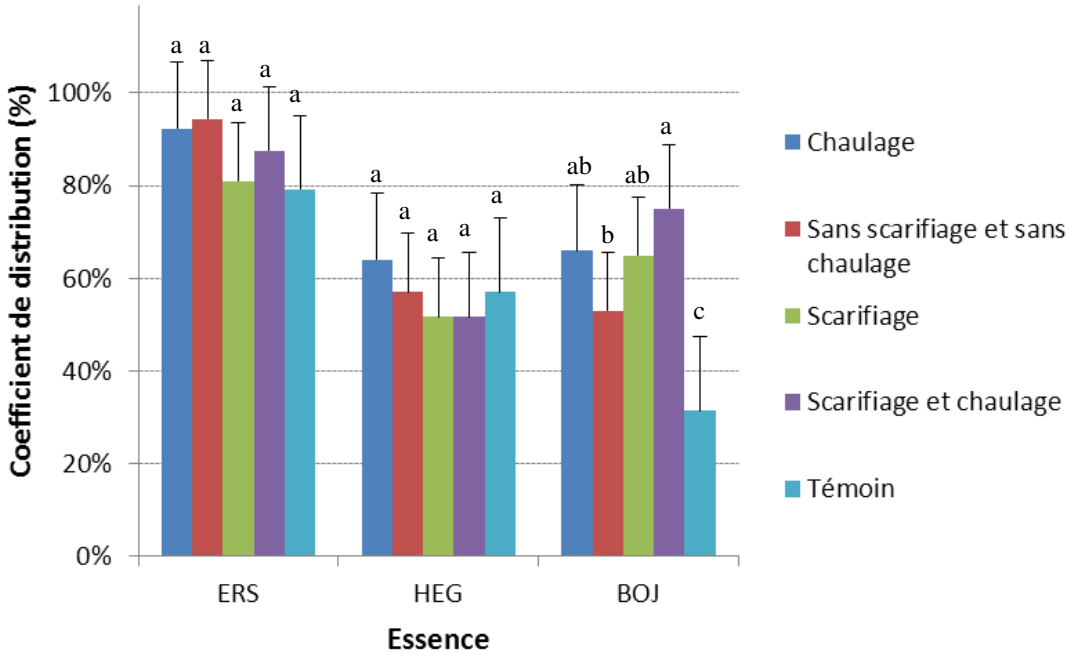

Figure 11. Coefficient de distribution par essence et traitement[7]

[6] Les lettres a, b et c indiquent des différences significatives entre les essences pour chacun des traitements au seuil α = 5 %.

[7] Les lettres a, b et c indiquent des différences significatives entre les traitements pour chacune des essences au seuil α = 5 %.

3.2.4. Portrait des microsites suite au scarifiage

Dans l'ensemble, les résultats indiquent qu'une présence de scarifiage a été observée dans 71 % des cas pour le traitement de scarifiage et dans 66 % des cas pour le traitement de scarifiage et chaulage (tableau 8).

Tableau 8. Présence de scarifiage dans les traitements scarifiés

	Traitement			
Scarifié	**N**	**Scarifiage**	**N**	**Scarifiage et chaulage**
Non	43	29 %	41	34 %
Oui	107	71 %	79	66 %
Total	150	100 %	120	100 %

La classe de perturbation du sol a été évaluée en indiquant le pourcentage de recouvrement de la matière minérale dans chacune des micro-placettes (tableau 9). Cette classe de perturbation nous donne une appréciation de la superficie scarifiée ou pas.

Le tableau 9 présente la classe de perturbation du sol par traitement. Il décrit que les traitements n'ayant pas bénéficié de scarifiage présentent entre 83 et 100 % de leurs observations dans la classe de perturbation de 0 %. À l'opposé, les traitements ayant bénéficié de scarifiage présentent seulement entre 21 et 25 % de leurs observations dans la classe de 0 %. Les traitements de scarifiage et de scarifiage et chaulage présentent entre 20 et 31 % de leurs observations dans les classes de perturbation de 1-25 %, 25-50 % et 50 % et plus. Dans l'ensemble, la répartition des classes de perturbation dans les traitements ayant bénéficié du scarifiage est équivalente. Par ailleurs, les résultats des analyses de variance indiquent que le degré de perturbation n'a pas influencé la régénération de l'érable à sucre, du hêtre ou du bouleau jaune. Cependant, il est encore beaucoup trop tôt pour conclure que la situation demeurera la même à plus long terme

Tableau 9. Classe de perturbation du sol par traitement

	Traitement									
Classe de perturbation du sol	N	Chaulage	N	Sans scarifiage et sans chaulage	N	Scarifiage	N	Scarifiage et chaulage	N	Témoin
50 % et +	4	4 %	12	8 %	31	21 %	24	20 %	0	0 %
25-50 %	3	3 %	10	7 %	40	27 %	29	24 %	0	0 %
1-25%	12	11 %	4	3 %	47	31 %	37	31 %	0	0 %
0%	91	83 %	124	83 %	32	21 %	30	25 %	90	100 %
Total	110	100 %	150	100 %	150	100 %	120	100 %	90	100 %

3.3. DENSITÉ D'OCCUPATION DU COUVERT FORESTIER APRÈS LA RÉCOLTE

Cette section présente les résultats obtenus à partir de la classification d'image et du densiomètre.

3.3.1. Classification d'image supervisée

La figure 12 présente le résultat de la classification d'image supervisée avec la méthode du « maximum de vraisemblance ». Les résultats sont présentés pour l'ensemble du territoire et pour une station témoin (2T) et deux stations traitées par coupe progressive irrégulière (2SC et 3C). Ils indiquent que les stations témoin comprennent autant de couverture de canopée que les autres traitements et que la couverture de l'ombre et/ou du sol change selon le traitement. Les stations traitées par CPI comprennent davantage de couverture de sol et moins de couverture d'ombre que les stations témoins.

Le tableau 10 présente le résultat intégral de la classification en termes de pourcentage de superficie. Il indique que les traitements présentent une couverture de canopée variant entre 68 et 74 %. Il montre également que la couverture d'ombre la plus élevée a été observée dans le témoin, avec 27 % et que la couverture de sol la plus basse a également été observée dans le témoin, avec moins de 1 %. Cette classification considère les tiges non marchandes comme faisant aussi partie de la canopée puisqu'aucune différenciation ne peut être effectuée sur la base de la hauteur du peuplement, ce qui peut entraîner une certaine variabilité dans l'estimation des paramètres.

Tableau 10. Couverture de la canopée, de l'ombre et du sol en fonction des traitements

	Couverture (%)		
Traitement	**Canopée**	**Ombre**	**Sol**
Chaulage	74 %	17 %	9 %
Sans scarifiage et sans chaulage	73 %	20 %	6 %
Scarifiage	73 %	21 %	6 %
Scarifiage et chaulage	68 %	19 %	13 %
Témoin	72 %	27 %	1 %

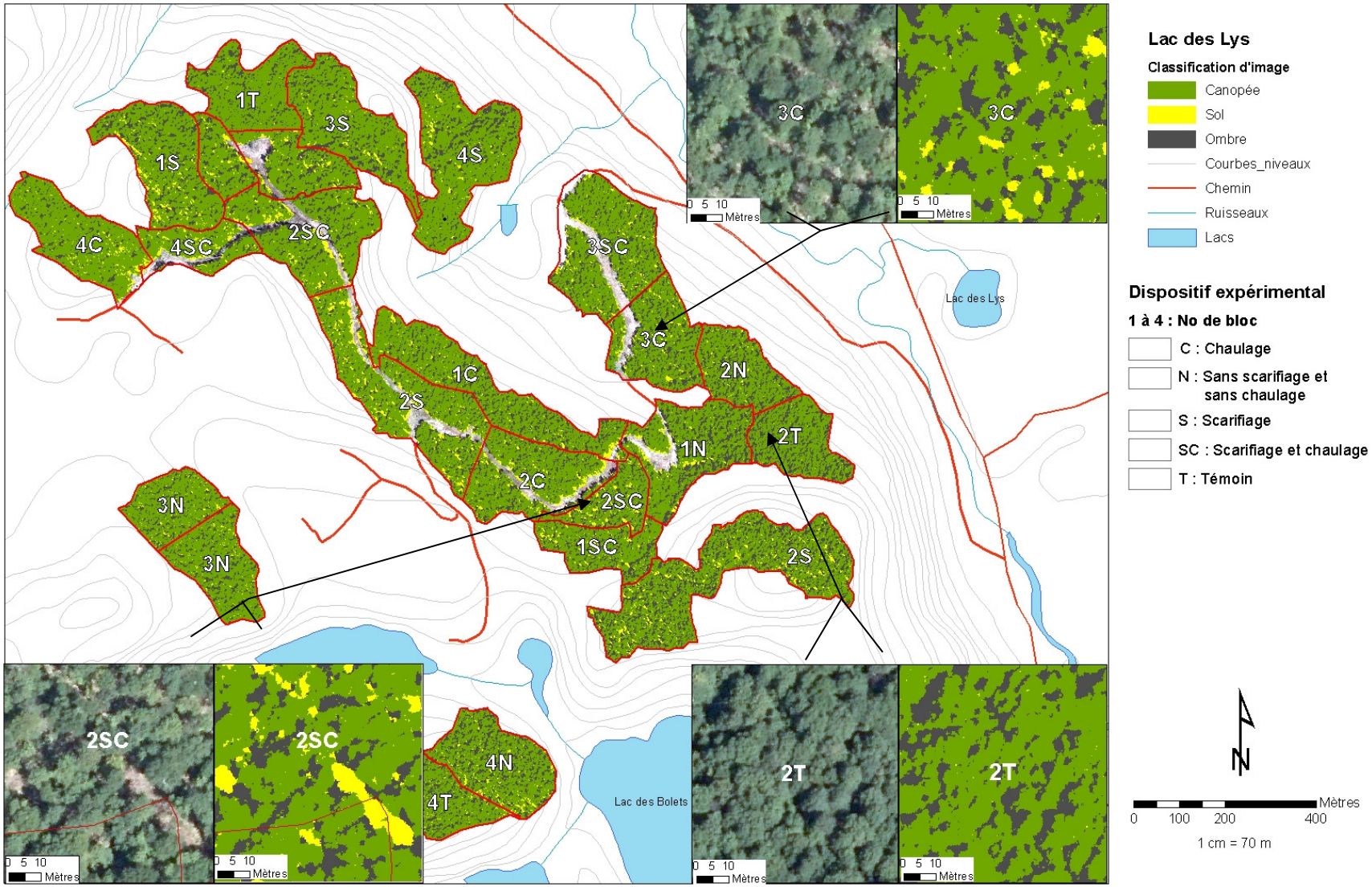

Figure 12. Couverture de la canopée à partir de la classification d'image supervisée

3.3.2. Densiomètre

Le tableau 11 présente la couverture de la canopée à partir des résultats obtenus avec le densiomètre. La couverture de la canopée inclut toutes les tiges (marchandes et non marchandes). Globalement, les résultats indiquent que le témoin présente une couverture de canopée de 94 % alors que les traitements présentent des couvertures de canopée qui varient entre 78 et 85 %. La couverture du témoin est donc significativement plus élevée que celle observée chez les autres traitements.

Tableau 11. Couverture de la canopée à partir du densiomètre

Traitement	Couverture de la canopée
Chaulage	85% **a**
Sans scarifiage et sans chaulage	78% **a**
Scarifiage	80% **a**
Scarifiage et chaulage	79% **a**
Témoin	94% **b**

Note : Les lettres a et b indiquent des différences significatives entre les traitements au seuil α = 5 %.

3.4. CHAULAGE AÉRIEN

Cette section traite du suivi de la qualité des travaux d'épandage et dresse un bilan des activités de chaulage aérien.

3.4.1. Suivi de la qualité des travaux de chaulage aérien

Suite à l'épandage, la cueillette des collecteurs de chaux permet de confirmer que de la chaux a été épandue sur toute la superficie planifiée. Cependant, les différentes stations n'ont reçu qu'entre 50 et 60 % de la chaux qui leur avait été attribuée lors de la prescription.

La figure 13 indique la quantité de chaux reçue par traitement et type de contenant. Elle indique que le traitement de chaulage a reçu en moyenne 1,45 tonne/ha tandis que le traitement de scarifiage et de chaulage a reçu en moyenne 1,76 tonne/ha. Aucune différence significative n'a été observée entre les types de contenants et/ou les traitements.

La figure 14 présente l'épandage aérien qui est effectué à raison de 7 à 10 tonnes/heure. Les figures 15 à 17 présentent la navigation effectuée par l'hélicoptère lors de l'épandage aérien. Les 3 secteurs amendés et les lignes de vol y sont représentés. Ces cartes nous indiquent que la chaux a été épandue sur toute la superficie et que les contours GPS ont été bien respectés par le pilote de l'hélicoptère malgré certains petits débordements. Ces débordements représentent environ 15 % de la superficie amendée. Une vérification géomatique a été effectuée et nous a confirmé que ces débordements n'avaient pas affecté de placettes permanentes qui ne devaient pas faire l'objet de chaulage.

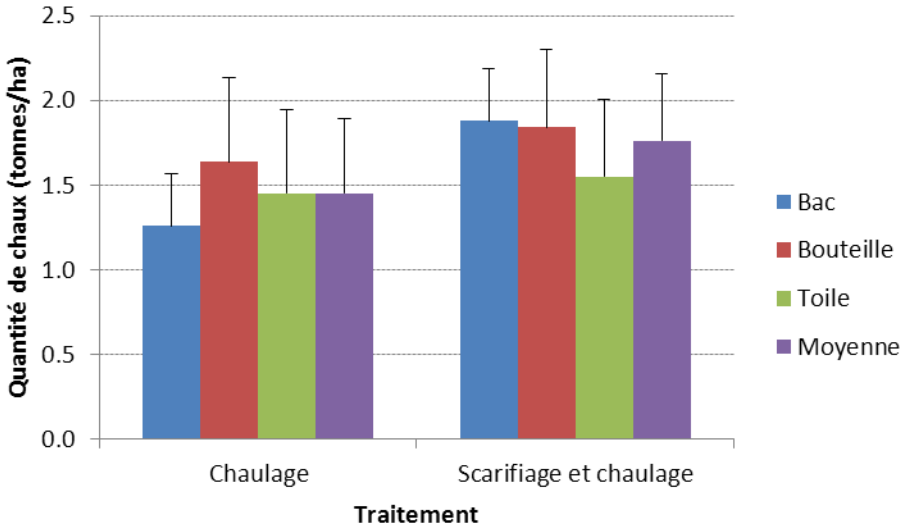

Figure 13. Quantité de chaux reçue par traitement et type de contenant

Figure 14. Réalisation de l'épandage aérien

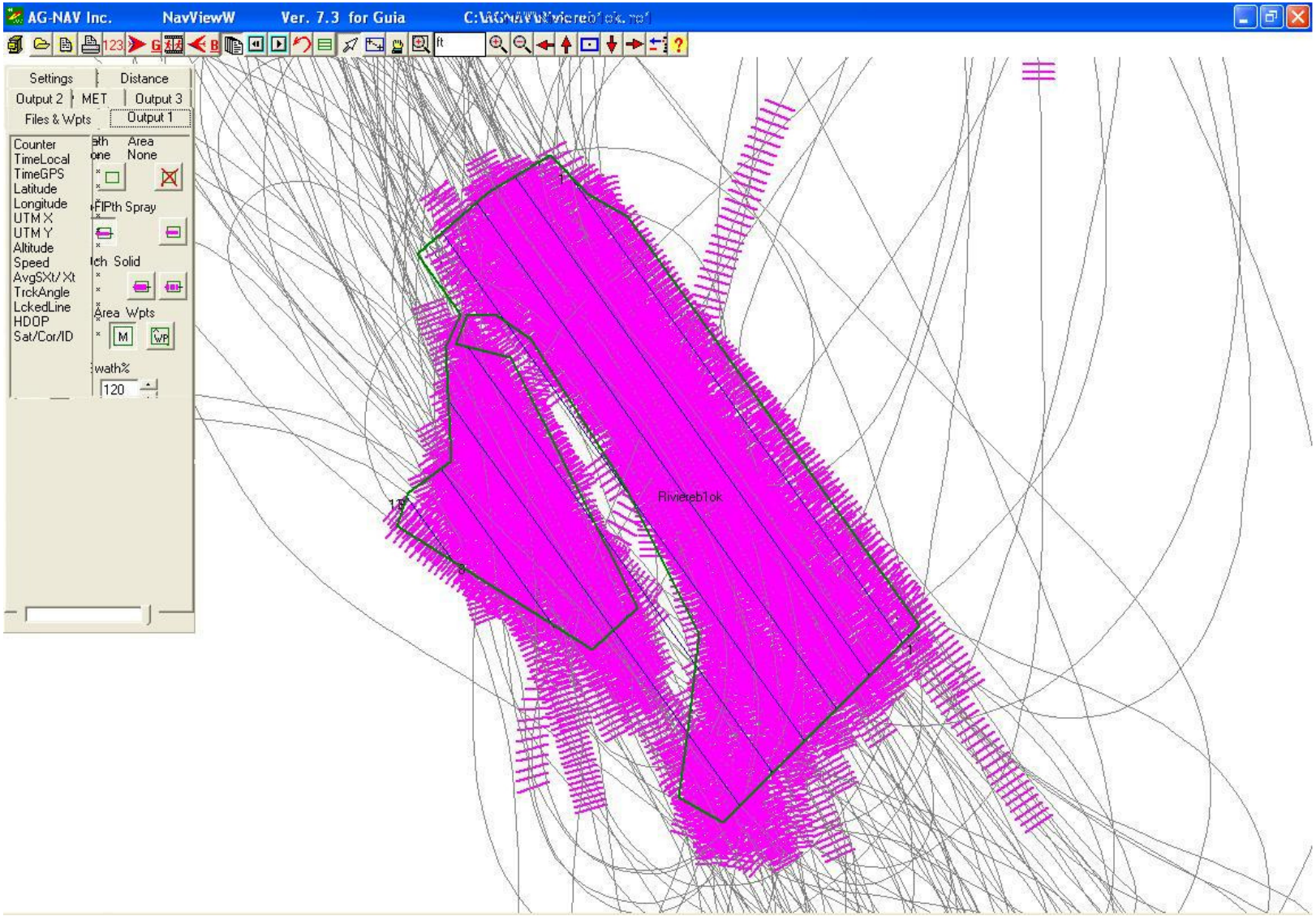

Figure 15. Navigation effectuée par l'hélicoptère lors du chaulage aérien des traitements 3C et 3SC

Note : Les zones en rose indiquent où la chaux a été épandue. Les passages de l'hélicoptère sont représentés par les lignes circulaires. La zone d'étude est délimitée par le tracé foncé autour des zones roses. Les lignes droites sur la zone d'étude sont les tracés suivis par l'hélicoptère lors de l'épandage.

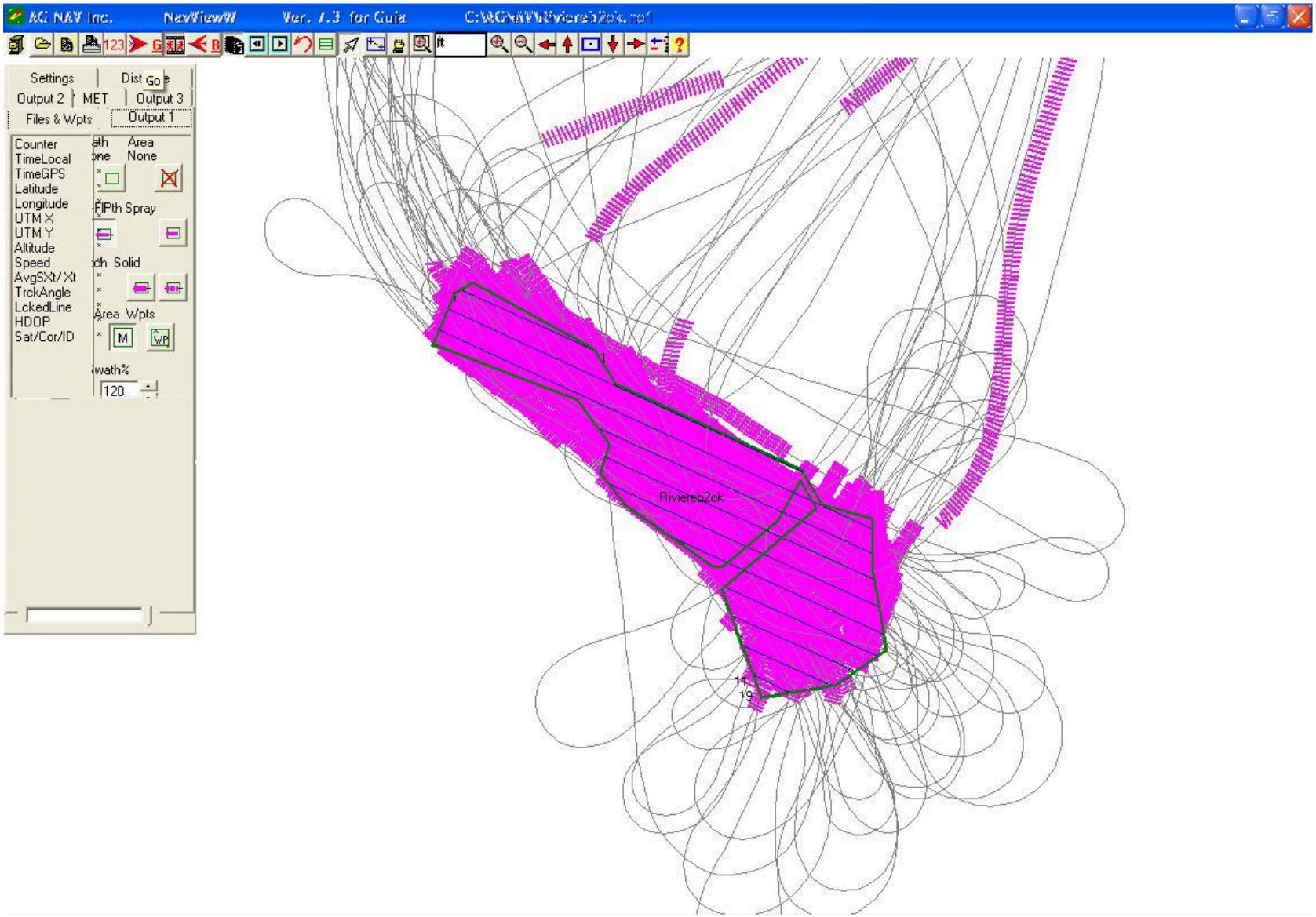

Figure 16. Navigation effectuée par l'hélicoptère lors du chaulage aérien des traitements 1C, 2C et 2SC

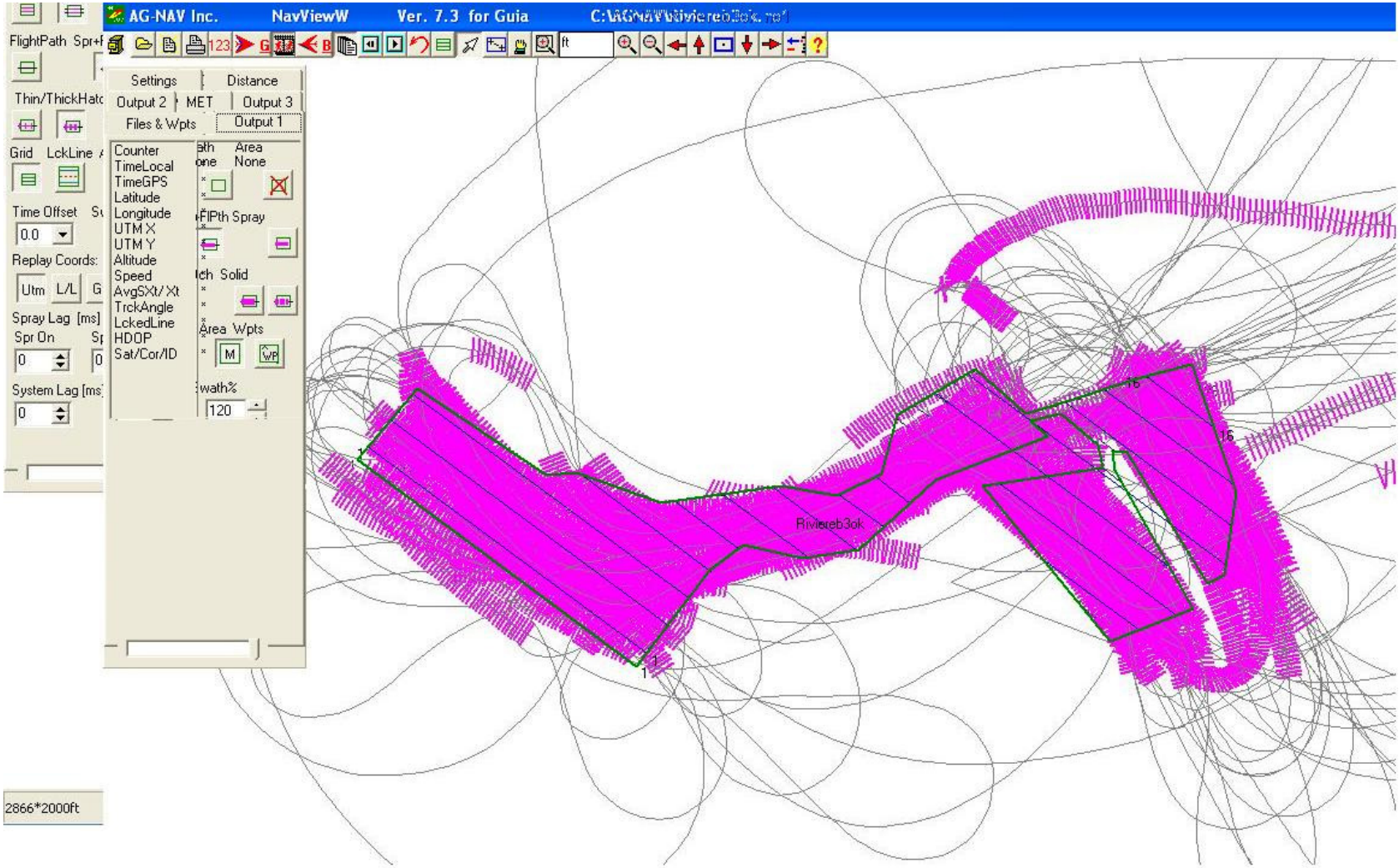

Figure 17. Navigation effectuée par l'hélicoptère lors du chaulage aérien des traitements 2SC, 4C et 4SC

3.4.2. Bilan des travaux de chaulage aérien

Le tableau 12 présente le bilan financier des coûts reliés à l'opération de chaulage aérien. Ces coûts ont été calculés en excluant les temps techniques et professionnels reliés à la planification, à la supervision et au suivi de la qualité des travaux. En somme, l'opération de chaulage telle que pratiquée au lac des Lys a coûté 1 185 $/ha.

Tableau 12. Bilan financier des coûts reliés à l'opération de chaulage aérien

Items	Prix ($)	Caractéristiques
Location de tracteur	2 550.00 $	Prix pour 28 jours
Transport du tracteur	574.19 $	Transport au site de chargement + gaz
Achat de chaux	10 944 $	72 tonnes à 152 $/tonne
Transport de la chaux	1 100 $	550 $ du voyage de 36 tonnes
Hélicoptère	13 320.00 $	72 tonnes à 185 $/tonne
Total	**28 488.19 $**	
Superficie amendée (ha)	24.05	
Taux ($/hectare)	**1 184.54 $**	

Pour la mise en œuvre de l'épandage aérien, la planification des activités a été faite en sachant qu'il fallait procéder aux étapes suivantes :

- l'identification des besoins nutritifs de l'érablière;
- la vérification de la disponibilité du produit recherché;
- l'identification d'un site de chargement;
- la vérification de la disponibilité de l'équipement de chargement et de déchargement;
- la vérification de la disponibilité de l'hélicoptère et de la cuve;
- l'achat et la livraison de la chaux;
- le suivi de la qualité des travaux sur le terrain;
- l'épandage lorsque les conditions météorologiques le permettent.

4. DISCUSSION

La discussion présente les réponses aux hypothèses de recherche.

1) La densité de la régénération de l'érable à sucre 2 ans après les travaux de CPI et 1 an après les travaux de scarifiage et de chaulage aérien est supérieure à celle du hêtre.

Oui.

Les résultats indiquent une densité en érable à sucre supérieure à celle du hêtre, à l'exception du traitement de scarifiage et chaulage qui présente une densité équivalente entre ces deux essences (figure 8) alors que 3 traitements sur 5 présentaient des équivalences en 2011 (Bournival *et al.,* 2012). Les traitements de chaulage, de scarifiage et de chaulage et de scarifiage avaient alors présenté des équivalences entre eux. Entre 2011 et 2012, la densité de l'érable à sucre s'est accrue plus rapidement que les autres essences dans tous les traitements et plus spécifiquement dans les traitements ayant bénéficié de chaulage (tableau 4). Une hypothèse avancée pour expliquer ce phénomène est que le passage des semis d'érable à sucre de la classe de 0 à 15 cm à la classe de 15 à 60 cm a été accéléré dans les stations chaulées.

Par ailleurs, le bouleau jaune a fait son apparition sur le site du lac des Lys et les résultats confirment qu'il a maintenant la même densité que le hêtre et l'érable à sucre dans les traitements ayant bénéficié de scarifiage. Par ailleurs, le hêtre et l'érable à sucre n'ont pas présenté de différence significative entre les traitements alors que le bouleau jaune a présenté de plus faibles densités dans le témoin (figure 9).

Les densités importantes de hêtre observées sur presque tout le territoire, même s'il n'est que très peu présent dans la strate commerciale, confirment que, sans intervention particulière, la position hiérarchique du hêtre dans le peuplement aurait eu tendance à s'élever à l'avenir.

2) Le coefficient de distribution de la régénération de l'érable à sucre 2 ans après les travaux de CPI et 1 an après les travaux de scarifiage et de chaulage aérien est supérieur à celui du hêtre.

Oui.

Le coefficient de distribution de l'érable à sucre est significativement supérieur à celui du hêtre dans tous les traitements (figure 10). Tout comme pour la densité, 3 traitements sur 5 présentaient des équivalences en 2011; les traitements de chaulage, de scarifiage et de chaulage et de scarifiage avaient alors présenté des équivalences entre eux. Ces résultats, combinés avec ceux de la densité, indiquent un renforcement de la position hiérarchique de l'érable à sucre dans les traitements ayant bénéficié de chaulage. Malgré tout, le hêtre reste très présent sur le secteur à l'étude même s'il n'est que très peu présent dans la strate commerciale. Ces résultats confirment la problématique d'augmentation potentielle du hêtre dans le peuplement.

Les traitements de scarifiage et de scarifiage et chaulage présentent des coefficients de distribution équivalents entre l'érable à sucre et le bouleau jaune. Ces résultats confirment l'augmentation de la régénération en bouleau jaune dans le dispositif. Le bouleau jaune a rejoint le hêtre dans tous les traitements à l'exception du témoin. Il a même surpassé le hêtre dans le traitement de scarifiage et chaulage. La régénération dominante dans le dispotif à l'étude est donc caractérisée par une une matrice d'érable à sucre, de bouleau jaune et de hêtre.

3) La CPI a permis de maintenir une densité du couvert supérieure à 60 %.

Oui.

Les résultats de la classification d'image et du densiomètre nous indiquent que la CPI a permis de maintenir une densité du couvert supérieure à 60 % dans tous les cas (tableaux 10 et 11). Pour la classification d'image, les résultats ont indiqué que la densité du couvert (canopée) se situait entre 68 et 74 % selon les traitements. Pour le densiomètre, les résultats ont indiqué que la densité du couvert (canopée) se situait entre 78 et 85 %. Somme toute, la densité du couvert varie entre 68 et 85 % selon les traitements.

La classification d'image a donné les résultats attendus pour les traitements ayant bénéficié d'une CPI, mais laisse place à l'amélioration quant à la classification de la canopée dans le témoin puisque la couverture d'ombre a parfois été confondue avec de la végétation. L'algorithme de classification n'ayant pas toujours distingué correctement l'ombre sur la végétation de l'ombre sur le sol. Ce qui donne à penser que le témoin présente une couverture de la canopée aussi élevée que les traitements alors que ce n'est pas le cas puisque les résultats du densiomètre ont démontré que le témoin présentait une couverture de la canopée plus élevée. Une piste d'amélioration consisterait à utiliser 2 classes d'ombre et à évaluer le poids de chacune pour en définir l'importance. La qualité des images n'est pas remise en cause puisque des images (Ortho photo) aux 30 cm ont été utilisées. Une autre piste de solution consisterait à géoréférencer les images du proche infrarouge (.NIR) et à les utiliser pour effectuer une classification de la canopée seulement, sans tenir compte des ombres et du sol Ceci nous permettrait de calculer un indice de végétation normalisé (NDVI). Des analyses en cours dans d'autres dossiers tendent à montrer des résultats probants quant à la qualité de la classification de la canopée.

Les conditions de lumière créées par la CPI ont stimulé la régénération de l'érable à sucre puisque les coefficients de distribution et les densités ont augmenté considérablement entre 2011 et 2012. Ces résultats appuient l'hypothèse selon laquelle la CPI peut offrir les conditions de lumière idéales à l'implantation des semis d'érable à sucre et qu'elle peut représenter une alternative intéressante aux autres traitements dédiés principalement à l'érable à sucre. Les prochains suivis permettront de documenter la survie des semis, notamment ceux du bouleau jaune, qui ont tendance à avoir besoin de plus de lumière que l'érable à sucre et le hêtre. Des analyses multi-variées pourront être utilisé pour corroborer ces hypothèses.

4) Le chaulage aérien a été réalisé à un coût acceptable.

Oui.

Bien que le coût supplémentaire de 1 185 $/ha semble élevé, son envergure est tout à fait comparable à celui d'une éclaircie précommerciale. Des pistes de solution pour diminuer les coûts reliés à l'épandage sont présentement à l'étude, comme la possibilité de réduire le coût d'achat de la chaux en la faisant livrer en vrac au lieu de l'ensacher. Pour que cette option

devienne réaliste, il faudrait prévoir un lieu d'entreposage à sec et avoir un tracteur muni d'un godet d'une capacité d'une tonne capable de charger la cuve de l'hélicoptère tous les 5 à 8 minutes.

L'application de chaux améliore les conditions de sol et de nutrition et favorise une meilleure croissance et la régénération de l'érable à sucre (Moore et Ouimet, 2006; Moore *et al.,* 2008). Des résultats récents ont démontré que l'application de chaux favorisait grandement la régénération et la croissance de l'érable à sucre et que l'effet était encore présent après 15 ans. En effet, Moore *et al.* (2012) ont démontré que la croissance et la régénération de l'érable à sucre avaient presque doublé sur les stations ayant bénéficié de chaulage.

L'étude de Nolet *et al.* (2007) a démontré que les sites avec de plus fortes concentrations en cations disponibles dans le sol étaient moins susceptibles d'être envahis par le hêtre. L'application de chaux rendant disponible une plus grande quantité de cations a pour effet de favoriser la compétitivité de la régénération de l'érable à sucre, ce qui limite celle du hêtre. Ces résultats encourageants au niveau de la régénération d'érable à sucre laissent présager que la survie de l'érable à sucre dans le secteur du lac des Lys sera assurée jusqu'à la prochaine intervention.

5) Le chaulage aérien a été réalisé en respectant les cibles fixées par la prescription (3 tonnes/ha).

Non.

Les résultats ne nous permettent pas de conclure que l'objectif de 3 tonnes/ha a été atteint (figure 13). Cependant, l'amendement de 3 tonnes/ha avait été prescrit afin de s'assurer d'en avoir au moins 2 tonnes/ha, ce qui nous rapproche de l'objectif sans toutefois l'atteindre puisque nous avons obtenu respectivement 1,45 tonne/ha dans les stations chaulées (C) et 1,76 tonne/ha dans les stations scarifiées et chaulées (SC). Dans un contexte de mise en œuvre opérationnelle de l'épandage aérien, on peut toutefois conclure qu'un épandage uniforme a été effectué sur toute la superficie prescrite puisque nous avons retrouvé de la chaux dans tous les collecteurs.

Les principales causes identifiées pour expliquer cette situation sont reliées au taux d'humidité de la chaux lors de l'épandage. En effet, les sacs de chaux, ayant passé près de 15 jours sur le terrain avant la tenue de l'épandage, ont inévitablement pris l'humidité, malgré les précautions prises pour en limiter son effet. Les sacs avaient été emballés hermétiquement à la carrière et ils ont été recouverts d'une toile sur le terrain suite à la livraison pour limiter l'effet des intempéries. Malgré les précautions prises, près du ⅓ des sacs contenait entre ¼ et ⅓ de chaux humide. L'humidité contenue dans la chaux a eu pour effet d'augmenter le poids des sacs de 1 000 kilos. À 1 000 kilos, ces sacs étaient déjà à la limite de ce que l'hélicoptère pouvait soulever comme charge. Les sacs humides empêchaient donc l'hélicoptère de décoller et il devait inévitablement larguer de la chaux pour son décollage. De plus, dans certains cas, la chaux humide a figé en bloc de glace, ce qui a rendu impossible l'épandage de cette chaux, qui était retirée de la cuve par les gens au sol lors du chargement.. L'annexe 2 présente quelques photos des précautions prises pour limiter l'effet de l'humidité sur la chaux.

Il est plausible que le test d'épandage réalisé avec de la chaux sèche ait surestimé la largeur du panache de chaux. Cette surestimation pourrait entraîner une diminution des tracés nécessaires pour effectuer l'épandage d'un bloc alors que ce n'est pas le cas avec de la chaux humide.

Une superficie légèrement supérieure à 24,05 ha a été chaulée car il y a eu quelques débordements au pourtour des blocs (figures 15, 16 et 17), ce qui peut expliquer une partie des pertes. Les débordements représentant environ 15 % de la superficie amendée. Cependant, la quantité de chaux épandue dans ces débordements est inconnue, ce qui ne permet d'évaluer la quantité de chaux épandue à l'extérieur du dispositif.

Une autre cause possible pouvant expliquer une partie des pertes est attribuée à l'interception de la chaux par les arbres, qui l'a empêchée de tomber directement au sol pendant l'épandage.

6) Le suivi de la qualité des travaux de chaulage peut être effectué avec une bouteille en plastique munie d'un entonnoir au lieu d'une toile de 1 m².

Oui.

Les résultats ont démontré que la méthode de vérification utilisée n'avait pas influencé le calcul de la quantité de chaux reçue au sol. Aucune différence significative n'a été observée entre les 3 méthodes testées (figure 13). Il est donc recommandé de travailler avec les contenants les plus faciles à manipuler et à nettoyer. Dans notre cas, les bouteilles de plastique munies d'un entonnoir ont semblé constituer la meilleure solution.

5. RECOMMANDATIONS

À la lumière des résultats discutés dans cette étude, les recommandations suivantes sont formulées.

5.1. CONDUITE DE PEUPLEMENT

Pour la conduite de peuplement, il est recommandé :

1) D'exercer une surveillance sur le niveau d'évolution de la régénération en essences désirées et de la documenter selon les modalités de préparation de terrain étudiées. Il sera alors possible de prévoir, le cas échéant, la possibilité de devancer la deuxième récolte et/ou d'intervenir pour effectuer un nettoiement afin d'éradiquer la cohorte de gaules et de perches d'essences non désirées comme le hêtre.

5.2. CHAULAGE

Dans le cas où le chaulage est retenu comme alternative, plusieurs recommandations peuvent être formulées quant à la manipulation de la chaux. Il est recommandé de :

1) Effectuer une commande de chaux granulaire en sacs de 900 kilos afin de limiter les pertes reliées à l'humidité et au surpoids des sacs. Vérifier la possibilité d'utiliser des sacs de 1 000 kilos avec le responsable des opérations aériennes.
2) Lors de la livraison de la chaux, prévoir un moyen de conserver la chaux à l'abri des intempéries afin qu'elle reste au sec.
3) Prévoir le temps nécessaire à l'installation des collecteurs de chaux juste avant la tenue de l'épandage.

Après la tenue du chaulage :

4) Prévoir du temps de laboratoire pour évaluer la quantité anhydre de chaux épandue sur le terrain.

5.3. SUIVI DE L'EFFET DES DIFFÉRENTES MODALITÉS

Pour les suivis des différentes modalités, il est recommandé de :

1) Effectuer un suivi régulier des grappes de régénération (5 et 10 ans) pour comparer l'effet de la CPI et des différentes modalités de préparation de terrain en ce qui trait :
   a. À la distribution des essences désirées et à la régression du hêtre (ERS, EPR, BOJ et EPB);
   b. À la densité des essences désirées et à la régression du hêtre (ERS, EPR, BOJ et EPB).
   c. À l'évolution de la compétition arbustive.
2) Effectuer des analyses foliaires pour en connaître davantage sur le statut nutritionnel de l'érablière du lac des Lys. Celles-ci pourraient fournir des informations sur l'état nutritif en azote et en phosphore des stations à l'étude.
3) Préserver le secteur témoin pour la recherche et les suivis subséquents.
4) Suivre, pendant la période critique de hauteur de régénération (de 0 à 3 mètres), le broutage éventuel par les orignaux et les lièvres et trouver des solutions si celui-ci devient problématique.

5.4. SUIVIS DE L'EFFET DE CPI

Pour les suivis de la CPI, il est recommandé de :

5) Effectuer un suivi régulier des placettes échantillon après 5, 10 et 20 ans pour comparer l'effet de la CPI à celui du témoin en ce qui a trait :
   a. À la croissance du peuplement;
   b. À l'évolution de la composition du peuplement;
   c. À la présence d'arbres fauniques;
   d. Au chablis et à l'évolution de la mortalité naturelle;
   e. À la structure des peuplements;
   f. À l'impact sur la faune, soit sa fréquentation et la qualité des habitats.

5.5. VALIDATION DES CHOIX DES MODALITÉS POUR LA COUPE PROGRESSIVE IRRÉGULIÈRE

Le projet a permis la mise en œuvre de la coupe progressive irrégulière. Des modalités ont été développées pour la gestion du couvert afin de permettre d'optimiser la croissance et l'installation de la régénération et de limiter l'envahissement des espèces de lumière dans les portions à régénérer. Ainsi, il est recommandé, dans les phases ultérieures, de :

1) Vérifier la rentabilité des traitements et des diverses modalités à l'échelle du peuplement (long terme).
2) Effectuer une comparaison sommaire du prélèvement, de la régénération en érable à sucre et du peuplement résiduel de la CPI avec les traitements de jardinage effectués aux alentours du secteur du lac des Lys.
3) Vérifier l'adéquation entre l'optimisation de la densité et l'équilibre de croissance.
4) Effectuer les analyses multi-variées mettant en relation les différentes modalités, la quantité de lumière et la présence d'une bonne année semencière.

CONCLUSION

Cette 4e année du projet a permis de consolider les efforts reliés à l'implantation de ce dispositif expérimental. Les diverses modalités de traitements mises en place, au niveau du peuplement, permettront d'étudier les outils à notre disposition pour favoriser la montée de la position hiérarchique de l'érable à sucre tout en contrôlant la présence du hêtre. La problématique de l'envahissement du hêtre n'est pas aussi urgente à régler dans le secteur à l'étude que dans d'autres régions du Québec. Par contre, malgré la faible quantité de hêtres sur pied dans la strate de bois mature, sa présence dans le sous-couvert, souvent aussi bien implantée que celle de l'érable à sucre, confirme la présence de la problématique et de son augmentation possible dans le temps.

Déjà, 2 ans après CPI et 1 an après le chaulage, les résultats laissent présager une progression bonifiée de la régénération d'érable à sucre dans les stations ayant bénéficié d'un chaulage. De plus, les conditions de lumière générées par la CPI semblent favoriser la régénération d'érable à sucre tout en limitant celle des espèces de lumière. L'épandage aérien de chaux a été effectué sur toute la superficie et de façon uniforme. Cependant, la quantité prescrite est moindre que celle épandue réellement. Le taux d'humidité, les débordements de la zone prescrite et la chaux restée collée dans les arbres sont identifiés comme étant les principaux facteurs influençant la qualité de l'épandage. Enfin, un bilan financier des coûts reliés à l'épandage aérien nous indique que ce traitement est comparable à celui d'une EPC. Ce traitement peut représenter une alternative pour favoriser l'érable à sucre dans nos peuplements, notamment au niveau de la croissance et de la régénération.

Le réseau de placettes permanentes du dispositif pourra être utilisé pour effectuer des suivis de différents paramètres sur plusieurs années. Les analyses physico-chimiques de sol effectuées avant le chaulage serviront de point de référence pour suivre l'évolution des propriétés du sol dans le temps. Enfin, une récapitulation des efforts reliés à l'implantation des diverses modalités pourra être réalisée afin de documenter la faisabilité technique et économique de chacune des interventions pour guider le choix de scénarios sylvicoles.

RÉFÉRENCES

Beaudet, M. et C. Messier. 2008. Beech regeneration of seed and root sucker origin: A comparison of morphology, growth, survival, and response to defoliation. Forest Ecology and Management, **255 :** 3659-3666.

Bigelow, S.W. et C.D. Canham. 2010. Evidence that soil aluminum enforces site fidelity of southern New England forest trees. Rhodora: the Journal of the New England Botanical Club, 949 **112** : 1-21.

Blouin, D., G. Lessard, P. Bournival et M. Ruel. 2009. Dispositif de coupe progressive d'ensemencement favorisant le bouleau jaune à la station forestière de Duchesnay - Suivi après 5 ans de la régénération. Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. (CERFO). Rapport 2009-16. 56 p. + 1 annexe.

Bournival, P., D. Blouin, G. Joanisse, G. Lessard, M. Ruel, R. Ouimet, J.-D. Moore et L. Duchesne. 2010. Implantation d'un dispositif de comparaison de traitements pour optimiser la fonction de régénération dans les érablières envahies par le hêtre. Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. (CERFO) et ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF). Rapport 2010-30. 39 p. + 4 annexes.

Bournival, P., D. Blouin, G. Lessard, M. Ruel et G. Joanisse. 2012a. Implantation d'un dispositif de comparaison de traitements pour optimiser la fonction de régénération dans les érablières envahies par le hêtre - 2e année. Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. (CERFO). Rapport 2012-02. 73 pages + 5 annexes.

Bournival, P., D. Blouin, G. Lessard, M. Ruel et G. Joanisse. 2012b. Implantation d'un dispositif de comparaison de traitements pour optimiser la fonction de régénération dans les érablières envahies par le hêtre - 3e année. Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. (CERFO). Rapport 2012-05. 54 pages.

Delagrange, S., P. Nolet et D. Bouffard. 2008. Impact du dégagement et du chaulage sur la régénération en érable à sucre et en hêtre dans des érablières en voie d'hêtrisation soumises à différentes intensités de prélèvement du couvert. Rapport de phase II. IQAFF. 17 p.

Duchesne, L. et R. Ouimet. 2008. Population dynamics of tree species in southern Quebec, Canada : 1970-2005. Forest Ecology and Management, **255** : 3001-3012.

Duchesne, L. et R. Ouimet. 2009. Present-day expansion of American beech in northeastern hardwood forests : Does soil base matter ? Can. J. For. Res., **39 :** 2273-2282.

Duchesne, L., R. Ouimet, J.-D. Moore et R. Paquin. 2005. Changes in structure and composition of maple-beech stands following sugar maple decline in Quebec, Canada. Forest Ecology and Management, **208 :** 223-236.

Gravel, D. 2003. Autoécologie du hêtre à grandes feuilles, revue de littérature.

Hane, E.N. 2003. Indirect effects of beech bark disease on sugar maple seedling survival. Can. J. For. Res., **33 :** 807-813.

Long, R.P., S.B. Horsley et P.R. Lilja. 1997. Impact of forest liming on growth and crown vigor of sugar maple and associated hardwoods. Can. J. For. Res., **27 :** 1560-1573.

Moore, J.-D., L. Duchesne et R. Ouimet. 2008. Soil properties and maple-beech regeneration a decade after liming in a northern hardwood stand. Forest Ecology and Management **255 :** 3460-3468.

Moore, J.-D., L. Duchesne et R. Ouimet. 2009. Améliorer la fertilité du sol et la régénération de l'érable à sucre par le chaulage. Le Naturaliste canadien, **133** : 53-55.

Moore, J.-D. et R. Ouimet. 2006. Ten-year effect of dolomitic lime on the nutrition, crown vigor, and growth of sugar maple. Can. J. For. Res., **36** : 1834-1841.

Moore, J.-D., R. Ouimet et L. Duchesne. 2012. Soil and sugar maple response 15 years after dolomitic lime application. Forest Ecology and Management, **281** : 130-139.

Nyland, R.D., A.L. Bashant, K.K. Bohn et J.M. Verostek. 2006a. Interference to hardwood regeneration in northeastern North America: Controlling effects of American beech, striped maple, and hobblebush. North. J. Appl. For., **23** : 122-132.

Nyland, R.D., A.L. Bashant, K.K. Bohn et J.M. Verostek. 2006b. Interference to hardwood regeneration in northeastern North America: Ecological characteristics of American beech, striped maple, and hobblebush. North. J. Appl. For., **23** : 53-61.

Nolet, P., D. Bouffard, F. Doyon et S. Delagrange. 2007. Relationship between canopy disturbance history and current sapling density of *Fagus grandifolia* and *Acer saccharum* in northern hardwood landscape. Can. J. For. Res., **38 :** 216–225.

Nyland, R.D., D.G. Ray et R.D. Yanai. 2004. Height development of upper-canopy trees within even-aged Adirondack northern hardwood stands. North. J. Appl. For., **21**: 117-122.

Park, B.B. et R.D. Yanai. 2009. Nutrient concentrations in roots, leaves and wood of seedling and mature sugar maple and American beech at two contrasting sites. Forest Ecology and Management, **258** : 1153–1160.

Robitaille, A. et J.-P. Saucier. 1998. Paysages régionaux du Québec méridional. Gouvernement du Québec. 215 p.

Takahashi, K. et M.J. Lechowicz. 2008. Do interspecific differences in sapling growth traits contribute to the co-dominance of *Acer saccharum* and *Fagus grandifolia*? Annals of Botany, **101** : 103-109.

ANNEXE 1. PORTRAIT DE LA RÉGÉNÉRATION EN 2011

Tableau 1. Densité (ti/ha) des essences en régénération par traitement après récolte et scarifiage

			Érable à sucre		Hêtre à grandes feuilles		Bouleau jaune		Épinette rouge		Épinette blanche		Érable rouge		Sapin baumier	
Traitement	**N grappes**	**Type**	**Densité (ti/ha)**	*IC*	**Densité (ti/ha)**	*IC*	**Densité (ti/ha)**	*IC*	**Densité (ti/ha)**	*IC*	**Densité (ti/ha)**	*IC*	**Densité (ti/ha)**	*IC*	**Densité (ti/ha)**	*IC*
Chaulage	11	Semis	4 623	*4 923*	3 513	*3 219*	272	*264*	159	*181*	-	-	748	*829*	249	*315*
		Gaules	317	*166*	159	*139*	68	*70*	159	*271*	-	-	45	*61*	68	*97*
		Total	**4 940**	***4 862***	**3 671**	***3 301***	**340**	***263***	**317**	***409***	**-**	**-**	**793**	***826***	**317**	***330***
Sans scarifiage et sans chaulage	15	Semis	4 487	*3 117*	1 313	*989*	415	*336*	66	*76*	-	-	1 330	*1 235*	349	*193*
		Gaules	316	*191*	199	*163*	33	*45*	100	*95*	-	-	33	*66*	150	*107*
		Total	**4 803**	***3 129***	**1 512**	***1 078***	**449**	***338***	**166**	***143***	**-**	**-**	**1 363**	***1 231***	**499**	***223***
Scarifiage	14	Semis	1 389	*620*	2 172	*2 055*	356	*238*	196	*223*	-	-	1 478	*1 326*	285	*208*
		Gaules	374	*220*	89	*112*	107	*86*	53	*77*	-	-	142	*186*	107	*68*
		Total	**1 763**	***753***	**2 261**	***2 050***	**463**	***266***	**249**	***286***	**-**	**-**	**1 620**	***1 406***	**392**	***207***
Scarifiage et chaulage	11	Semis	2 606	*1 464*	1 246	*793*	385	*288*	317	*538*	23	*45*	1 745	*2 563*	340	*345*
		Gaules	227	*184*	-	-	227	*264*	295	*299*	-	-	113	*227*	249	*213*
		Total	**2 833**	***1 490***	**1 246**	***793***	**612**	***427***	**612**	***811***	**23**	***45***	**1 858**	***2 560***	**589**	***500***
Témoin	9	Semis	6 454	*5 454*	914	*757*	277	*495*	471	*572*	-	-	1 883	*1 654*	831	*1 077*
		Gaules	305	*285*	83	*83*	28	*55*	194	*182*	-	-	28	*55*	55	*73*
		Total	**6 758**	***5 678***	**997**	***752***	**305**	***490***	**665**	***670***	**-**	**-**	**1 911**	***1 666***	**886**	***1 071***
Total	60	Semis	3 739	*1 489*	1 845	*826*	349	*140*	220	*144*	4	*8*	1417	*687*	386	*193*
		Gaules	312	*92*	112	*57*	91	*57*	150	*84*	-	-	75	*63*	129	*55*
		Total	**4 051**	***1 505***	**1 957**	***844***	**440**	***154***	**370**	***207***	**4**	***8***	**1492**	***695***	**515**	***205***

Tableau 1. Densité (ti/ha) des essences en régénération par traitement après récolte et scarifiage (suite)

			Pruche du Canada		Bouleau à papier		Peupliers		Érable à épis		Érable de Pennsylvanie		Viorne sp.		Autres feuillus non commerciaux	
Traitement	**N grappes**	**Type**	**Densité (ti/ha)**	*IC*	**Densité (ti/ha)**	*IC*	**Densité (ti/ha)**	*IC*	**Densité (ti/ha)**	*IC*	**Densité (ti/ha)**	*IC*	**Densité (ti/ha)**	*IC*	**Densité (ti/ha)**	*IC*
Chaulage	11	Semis	-	-	-	-	431	*586*	1 360	*1 290*	3 286	*2 893*	16 725	*7 158*	974	599
		Gaules	-	-	-	-	-	-	-	-	68	*136*	23	*45*	-	-
		Total	**-**	**-**	**-**	**-**	**431**	***586***	**1 360**	***1 290***	**3 354**	***2 889***	**16 747**	***7 164***	**974**	**599**
Sans scarifiage et sans chaulage	15	Semis	33	*45*	-	-	-	-	2 377	*1 113*	4 470	*2 740*	12 896	*4 925*	1 529	1 496
		Gaules	-	-	-	-	-	-	50	*100*	33	*45*	17	*33*	-	-
		Total	**33**	***45***	**-**	**-**	**-**	**-**	**2 426**	***1 183***	**4 504**	***2 739***	**12 913**	***4 922***	**1 529**	**1 496**
Scarifiage	14	Semis	33	*71*	-	-	125	*249*	1 300	*700*	1 905	*1 255*	9 704	*3 252*	712	627
		Gaules	-	-	-	-	-	-	107	*113*	71	*81*	18	*36*	-	-
		Total	**33**	***71***	**-**	**-**	**125**	***249***	**1 407**	***695***	**1 976**	***1 261***	**9 722**	***3 267***	**712**	**627**
Scarifiage et chaulage	11	Semis	68	*136*	-	-	317	*471*	2 855	*2 634*	1 428	*1 582*	8 657	*3 586*	680	821
		Gaules	-	-	-	-	-	-	113	*227*	-	-	-	-	23	45
		Total	**68**	***136***	**-**	**-**	**317**	***471***	**2 969**	***2 836***	**1 428**	***1 582***	**8 657**	***3 586***	**703**	**815**
Témoin	9	Semis	-	-	28	*55*	138	*277*	2 382	*2 130*	2 604	*1 735*	19 693	*9 146*	443	476
		Gaules	-	-	28	*55*	-	-	83	*118*	138	*168*	28	*55*	-	-
		Total	**-**	**-**	**55**	***111***	**138**	***277***	**2 465**	***2 238***	**2 742**	***1 807***	**19 721**	***9 160***	**443**	**476**
Total	60	Semis	29	*32*	4	*8*	187	*155*	2 028	*696*	2 817	*1 006*	13 096	*2 590*	918	447
		Gaules	-	-	4	*8*	-	-	71	*57*	58	*42*	17	*16*	4	8
		Total	**29**	***32***	**8**	***17***	**187**	***155***	**2 098**	***734***	**2 875**	***1 009***	**13 112**	***2 593***	**922**	**446**

Tableau 2. Coefficient de distribution (%) des essences en régénération après récolte et scarifiage

			Érable à sucre		Hêtre à grandes feuilles		Bouleau jaune		Épinette rouge		Épinette blanche		Érable rouge		Sapin baumier	
Traitement	**N grappes**	**Type**	**CD (%)**	*IC*	**CD (%)**	*IC*	**CD (%)**	*IC*	**CD (%)**	*IC*	**CD (%)**	*IC*	**CD (%)**	*IC*	**CD (%)**	*IC*
Chaulage	11	Semis	43%	21%	56%	18%	25%	16%	3%	3%	0%	*0%*	22%	13%	7%	8%
		Gaules	39%	12%	15%	8%	9%	5%	5%	7%	0%	*0%*	4%	4%	3%	4%
		Total	**64%**	**17%**	**61%**	**16%**	**31%**	**16%**	**7%**	**9%**	**0%**	***0%***	**23%**	**14%**	**10%**	**9%**
Sans scarifiage et sans chaulage	15	Semis	55%	12%	44%	15%	21%	9%	3%	3%	0%	*0%*	23%	10%	10%	5%
		Gaules	38%	13%	15%	9%	8%	6%	4%	4%	0%	*0%*	2%	4%	5%	4%
		Total	**72%**	**11%**	**48%**	**16%**	**27%**	**10%**	**6%**	**5%**	**0%**	***0%***	**23%**	**10%**	**15%**	**6%**
Scarifiage	14	Semis	38%	12%	40%	14%	15%	6%	7%	9%	0%	*0%*	22%	12%	8%	6%
		Gaules	44%	12%	10%	6%	12%	5%	2%	3%	0%	*0%*	5%	6%	4%	3%
		Total	**61%**	**15%**	**45%**	**14%**	**22%**	**8%**	**9%**	**10%**	**0%**	***0%***	**24%**	**15%**	**11%**	**6%**
Scarifiage et chaulage	11	Semis	40%	15%	44%	14%	19%	11%	5%	7%	1%	2%	23%	10%	6%	6%
		Gaules	33%	13%	8%	6%	21%	11%	8%	8%	0%	0%	5%	6%	7%	6%
		Total	**56%**	**15%**	**45%**	**13%**	**32%**	**12%**	**10%**	**10%**	**1%**	**2%**	**25%**	**11%**	**13%**	**9%**
Témoin	9	Semis	59%	24%	33%	17%	12%	8%	10%	11%	0%	*0%*	21%	17%	10%	9%
		Gaules	42%	17%	11%	9%	7%	6%	7%	6%	0%	*0%*	2%	3%	2%	3%
		Total	**68%**	**24%**	**36%**	**18%**	**19%**	**6%**	**16%**	**13%**	**0%**	***0%***	**22%**	**18%**	**12%**	**10%**
Total	60	Semis	47%	7%	44%	7%	19%	5%	5%	3%	0%	0%	22%	5%	8%	3%
		Gaules	39%	6%	12%	*3%*	11%	3%	5%	2%	0%	0%	4%	2%	5%	2%
		Total	**65%**	**7%**	**47%**	***7%***	**26%**	**5%**	**9%**	**4%**	**0%**	**0%**	**24%**	**6%**	**12%**	**3%**

Tableau 2. Coefficient de distribution (%) des essences en régénération après récolte et scarifiage (suite)

			Pruche du Canada		Bouleau à papier		Peupliers		Érable à épis		Érable de Pennsylvanie		Viorne sp.		If du Canada		Autres feuillus non commerciaux	
Traitement	**N grappes**	**Type**	**CD (%)**	*IC*	**CD (%)**	*IC*	**CD (%)**	*IC*	**CD (%)**	*IC*	**CD (%)**	*IC*	**CD (%)**	*IC*	**CD (%)**	*IC*	**CD (%)**	*IC*
Chaulage	11	Semis	0%	*0%*	0%	0%	7%	10%	17%	12%	28%	19%	58%	11%	33%	15%	12%	7%
		Gaules	0%	*0%*	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%	4%	1%	2%	0%	0%	0%	0%
		Total	**0%**	***0%***	**0%**	**0%**	**7%**	**10%**	**17%**	**12%**	**29%**	**19%**	**58%**	**11%**	**33%**	**15%**	**12%**	**7%**
Sans scarifiage et sans chaulage	15	Semis	1%	2%	0%	*0%*	0%	*0%*	27%	7%	43%	16%	53%	9%	38%	13%	10%	6%
		Gaules	0%	0%	0%	*0%*	0%	*0%*	1%	3%	1%	2%	1%	1%	0%	0%	0%	0%
		Total	**1%**	**2%**	**0%**	***0%***	**0%**	***0%***	**27%**	**7%**	**43%**	**16%**	**53%**	**9%**	**38%**	**13%**	**10%**	**6%**
Scarifiage	14	Semis	1%	1%	0%	*0%*	2%	4%	18%	8%	19%	8%	47%	8%	33%	14%	12%	10%
		Gaules	0%	0%	0%	*0%*	0%	0%	3%	3%	2%	2%	1%	1%	0%	0%	0%	0%
		Total	**1%**	**1%**	**0%**	***0%***	**2%**	**4%**	**19%**	**7%**	**19%**	**8%**	**47%**	**8%**	**33%**	**14%**	**12%**	**10%**
Scarifiage et chaulage	11	Semis	1%	2%	0%	*0%*	9%	12%	23%	13%	15%	14%	42%	13%	42%	11%	8%	6%
		Gaules	0%	0%	0%	*0%*	0%	0%	3%	5%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	2%
		Total	**1%**	**2%**	**0%**	***0%***	**9%**	**12%**	**23%**	**13%**	**15%**	**14%**	**42%**	**13%**	**42%**	**11%**	**9%**	**6%**
Témoin	9	Semis	0%	*0%*	2%	4%	2%	4%	19%	8%	30%	18%	62%	17%	38%	23%	4%	5%
		Gaules	0%	*0%*	2%	4%	0%	0%	3%	5%	4%	5%	1%	2%	0%	0%	0%	0%
		Total	**0%**	***0%***	**2%**	**4%**	**2%**	**4%**	**19%**	**8%**	**30%**	**18%**	**62%**	**17%**	**38%**	**23%**	**4%**	**5%**
Total	60	Semis	1%	1%	0%	1%	4%	3%	21%	4%	28%	7%	52%	5%	37%	7%	10%	3%
		Gaules	0%	0%	0%	1%	0%	0%	2%	1%	2%	1%	1%	1%	0%	0%	0%	0%
		Total	**1%**	**1%**	**0%**	**1%**	**4%**	**3%**	**21%**	**4%**	**28%**	**7%**	**52%**	**5%**	**37%**	**7%**	**10%**	**3%**

ANNEXE 2. PHOTOS DES PRÉCAUTIONS PRISES POUR PREVENIR L'INFILTRATION DE L'HUMIDITÉ DANS LA CHAUX

Figure 1. Sacs de chaux emballés et scellés directement à la carrière avant la livraison

Figure 2. Recouvrement des sacs avec des toiles de plastique sur le site de chargement

Figure 3. Chargement de la cuve avec de la chaux humide

Figure 4. Équipe au sol travaillant à enlever les surplus de chaux humide avant le décollage

Figure 5. Hélicoptère devant larguer de la chaux au décollage à cause du surpoids causé par l'humidité de la chaux