PROGRAMME DE FINANCEMENT DE LA RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT EN AMÉNAGEMENT FORESTIER

Rapport final

SCÉNARIOS D'ÉVOLUTION DE LA COMPOSITION DES PEUPLEMENTS APRÈS FEU SUR UN HORIZON DE 15-20 ANS DANS LE DOMAINE BIOCLIMATIQUE DE LA SAPINIÈRE À BOULEAU BLANC

DEUXIÈME ANNÉE

Présenté à :

Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs
Jean-Marc Blais, ing.f.

Par :

CERFO
Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc.
Emmanuelle Boulfroy, M.Sc.
Mathieu Varin, géomaticien, M.Sc.
Philippe Bournival, ing.f., M.Sc.
Guy Lessard, ing.f., M.Sc.
Donald Blouin, ing.f., M.Sc.

Novembre 2014

© CERFO 2014-10

Mots-clés : régénération, feu, sapinière à bouleau blanc, classification semi-dirigée, analyses statistiques, analyses spectrales, RapidEye, évolution, dynamique

Référence à citer :
Boulfroy, E., M. Varin, P. Bournival, G. Lessard et D. Blouin. Scénarios d'évolution de la composition des peuplements après feu sur un horizon de 15-20 ans dans le domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau blanc - Deuxième année. Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. (CERFO). Rapport 2014-10. 99 pages + 3 annexes.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES iii

LISTE DES TABLEAUX iv

REMERCIEMENTS v

RÉSUMÉ vi

INTRODUCTION 1

OBJECTIFS 2

1. HYPOTHÈSES DE TRAVAIL 4

2. MÉTHODES 6

2.1. Localisation des secteurs à l'étude 6

2.2. Rappel des étapes réalisées durant la première année (2012-2013) 7

2.2.1. *Portrait de la régénération 5 ans après feu* *9*

2.3. Nouveau portrait de la végétation 17 ans après feu 13

2.3.1. *Nouvelle classification semi-dirigée de la végétation* *13*

2.3.2. *Évaluation partielle de la classification semi-dirigée* *16*

2.4. Développement des scénarios d'évolution 17 ans après feu 18

2.5. Application des scénarios d'évolution 17 ans après feu aux autres feux en Mauricie ayant brûlé en 2010 19

3. ÉLABORATION DES SCÉNARIOS D'ÉVOLUTION DU COUVERT 20

3.1. Nouveaux portraits du couvert forestier 17 ans après feu 20

3.1.1. *Nouvelles classes de végétation établies à partir des analyses statistiques et spectrales* *20*

3.1.2. *Nouvelle classification semi-dirigée de la végétation du feu de Parent* *32*

3.1.4. *Portrait de la composition forestière 17 ans après feu, à l'échelle des unités spatiales utilisées pour produire les scénarios d'évolution* *38*

3.2. Évolution du couvert forestier entre 5 et 17 ans après feu 44

4. APPLICATION DES SCÉNARIOS D'ÉVOLUTION 17 ANS APRÈS FEU AUX FEUX AYANT BRÛLÉ EN 2010 49

4.1. Feu 269 50

4.2. Feu 270 54

4.3. Feu 274 58

4.4. Feu 276 62

4.5. Feu 281 66
4.6. Feu 267 70
5. DISCUSSION 74
5.1. Portrait du couvert forestier 17 ans après feu issu d'une classification semi-dirigée 74
5.2. Évolution du couvert forestier entre 5 et 17 ans après feu 83
5.3. Application des scénarios produits sur le feu de Parent à d'autres territoires brûlés 88
6. RECOMMANDATIONS 92
CONCLUSION 95
RÉFÉRENCES 97
ANNEXES 100
ANNEXE 1. PORTRAIT DE LA COMPOSITION DES 18 CLASSES DE VÉGÉTATION PROPOSÉES DANS L'ANALYSE RÉALISÉE LORS DE L'ANNÉE 1 101
ANNEXE 2. ANALYSE DES CORRÉLATIONS ENTRE LES CLASSES DE VÉGÉTATION PAR TYPE DE COUVERT 102
ANNEXE 3. ANALYSE DES CORRÉLATIONS ENTRE LES CLASSES DE VÉGÉTATION PAR SIGNATURE SPECTRALE 104

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Localisation du feu de Parent et des autres feux de 2010 à l'étude 7
Figure 2. Principales étapes réalisées durant les années 1 et 2 du projet 8
Figure 3. Localisation des images Rapideye sur le territoire du feu de Parent 10
Figure 4. Exemple de placette utilisé lors de l'inventaire terrain de 2012 11
Figure 5. Valeurs spectrales moyennes des placettes pour chacune des classes par bande spectrale 24
Figure 6. Carte de la classification semi-dirigée du feu de Parent, portrait de la composition forestière 17 ans après feu 34
Figure 7. Densités de cime des essences résineuses (pin gris et épinette noire) prédites 17 ans après le feu 269 52
Figure 8. Densités de cime des essences feuillues (peuplier faux-tremble, bouleau blanc et feuillus non commerciaux) prédites 17 ans après le feu 269 53
Figure 9. Densités de cime des essences résineuses (pin gris et épinette noire) prédites 17 ans après le feu 270 56
Figure 10. Densités de cime des essences feuillues (peuplier faux-tremble, bouleau blanc et feuillus non commerciaux) prédites 17 ans après le feu 270 57
Figure 11. Densités de cime des essences résineuses (pin gris et épinette noire) prédites 17 ans après le feu 274 60
Figure 12. Densités de cime des essences feuillues (peuplier faux-tremble, bouleau blanc et feuillus non commerciaux) prédites 17 ans après le feu 274 61
Figure 13. Densités de cime des essences résineuses (pin gris et épinette noire) prédites 17 ans après le feu 276 64
Figure 14. Densités de cime des essences feuillues (peuplier faux-tremble, bouleau blanc et feuillus non commerciaux) prédites 17 ans après le feu 276 65
Figure 15. Densités de cime des essences résineuses (pin gris et épinette noire) prédites 17 ans après le feu 281 68
Figure 16. Densités de cime des essences feuillues (peuplier faux-tremble, bouleau blanc et feuillus non commerciaux) prédites 17 ans après le feu 281 69
Figure 17. Densités de cime des essences résineuses (pin gris et épinette noire) prédites 17 ans après le feu 267 72
Figure 18. Densités de cime des essences feuillues (peuplier faux-tremble, bouleau blanc et feuillus non commerciaux) prédites 17 ans après le feu 267 73
Figure 19. Pin gris de 17 ans dont la hauteur est estimée à environ 5 m sur le territoire brûlé du feu de Parent 86

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Nouvelles classes obtenues par les analyses statistiques et spectrales 21
Tableau 2. Matrice des distances spectrales interclasses de Bhattacharyya..... 25
Tableau 3. Estimés des moyennes de la densité de cime des essences dans chaque classe 28
Tableau 4. Estimé des moyennes du coefficient de distribution des essences par classe 31
Tableau 5. Zones d'entraînement par nouvelle classe 33
Tableau 6. Répartition de la superficie des classes sur le territoire brûlé 35
Tableau 7. Représentativité (%) des différents milieux dans chaque classe de végétation 35
Tableau 8. Zones de validation utilisées pour l'évaluation partielle de la classification semi-dirigée..... 36
Tableau 9. Précision de la classification semi-dirigée 36
Tableau 10. Matrice de confusion avec zones de validation comme référence 37
Tableau 11. Matrice de confusion avec zones d'entraînement comme référence..... 38
Tableau 12. Proportion (%) occupée par chaque classe de végétation issue de la classification semi-dirigée dans les 11 strates à l'étude..... 40
Tableau 13. Densité de cime (%) occupée par chaque essence dans les 11 strates à l'étude 41
Tableau 14. Coefficient de distribution (%) des essences dans les 11 strates à l'étude..... 43
Tableau 15. Scénarios d'évolution 5-17 ans après feu, coefficient de distribution et densité de la cime des essences par strate..... 45
Tableau 16. Proportions (%) occupées par les 11 strates à l'étude sur la superficie productive brûlée du feu 269 51
Tableau 17. Densités de cime (%) occupée par les principales essences sur le territoire brûlé productif du feu 269 ayant fait l'objet de prédictions..... 51
Tableau 18. Proportions (%) occupées par les 11 strates à l'étude sur la superficie productive brûlée du feu 270 55
Tableau 19. Densités de cime (%) des principales essences sur le territoire brûlé productif du feu 270 ayant fait l'objet de prédictions..... 55
Tableau 20. Proportions (%) occupées par les 11 strates à l'étude sur la superficie productive brûlée du feu 274 59
Tableau 21. Densités de cime (%) occupée par les principales essences sur le territoire brûlé productif du feu 274 ayant fait l'objet de prédictions..... 59
Tableau 22. Proportions (%) occupées par les 11 strates à l'étude sur la superficie productive brûlée du feu 276 63
Tableau 23. Densités de cime (%) occupée par les principales essences sur le territoire brûlé productif du feu 276 ayant fait l'objet de prédictions..... 63
Tableau 24. Proportions (%) occupées par les 11 strates à l'étude sur la superficie productive brûlée du feu 281 67
Tableau 25. Densités de cime (%) occupée par les principales essences sur le territoire brûlé productif du feu 281 ayant fait l'objet de prédictions..... 67
Tableau 26. Proportions (%) occupées par les 11 strates à l'étude sur la superficie productive brûlée du feu 267 71
Tableau 27. Densités de cime (%) occupées par les principales essences sur le territoire brûlé productif du feu 267 ayant fait l'objet de prédictions..... 71

REMERCIEMENTS

Ce projet a été rendu possible grâce à l'aide financière du programme de financement de la recherche et développement en aménagement forestier (PFRDAF) du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs.

Nous remercions M. Jean-Marc Blais du MFFP qui a appuyé ce projet.

RÉSUMÉ

Durant l'été 2010, la Mauricie a été frappée par des feux majeurs qui ont couvert 105 000 ha. Suite à ces événements, de nombreuses questions importantes, ayant des implications directes en aménagement et sylviculture, se posent. Cette étude porte sur deux d'entre elles, à savoir : (1) quels seront les retours de strates (composition et densité) immédiatement après feu et (2) comment évoluera la composition de la végétation quelques décennies après la perturbation. Un modèle de prédiction de la régénération forestière 5 ans après feu a été développé en 2012 par le CERFO, pour le sous-domaine de la sapinière à bouleau blanc de l'ouest, à partir d'une analyse réalisée sur le feu de Parent de 1995. Suite à ce projet, il a été proposé de documenter l'évolution de la composition des peuplements sur un horizon de 15-20 ans après feu, dans l'optique de prévenir les problèmes pouvant résulter de modifications importantes de la composition forestière, autant sur les plans de la biodiversité que de l'approvisionnement ligneux. Le présent projet, réalisé sur 2 ans, couvre deux principaux objectifs : (1) élaborer des scénarios d'évolution de la composition des peuplements sur un horizon de 15-20 ans après feu, applicables au sous-domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau blanc de l'ouest et (2) appliquer les scénarios produits aux feux ayant brûlé en 2010 en Mauricie, dans la sapinière à bouleau blanc de l'ouest.

Les scénarios d'évolution du couvert 15-20 ans après feu reposent sur le portrait de la végétation 17 ans après feu, produit à partir d'une classification semi-dirigée d'une mosaïque d'images RapidEye prises 17 ans après feu sur le territoire du feu de Parent. La classification finale proposée comprend huit classes de végétation. Les classes ont été déterminées suite à des analyses statistiques réalisées sur des données d'inventaire terrain et des analyses des signatures spectrales des zones d'entraînement. Pour chaque classe de végétation, une densité de cime couverte par chaque essence commerciale est proposée. L'évaluation de cette classification est satisfaisante, avec un indice de Kappa de 0,82 et une précision globale de 85 %. Le résultat de cette classification a ensuite été appliqué à l'échelle des 11 strates créées pour le portrait de la régénération 5 ans après feu (strates obtenues suite à la combinaison d'un type écologique et d'une classe d'intensité du feu). Ainsi, pour ces 11 strates, l'aménagiste dispose maintenant de prédictions du couvert forestier 15-20 ans après feu, exprimées en densité de cime pour les essences commerciales qui se régénèrent après feu. Les scénarios produits ont ensuite été appliqués à 5 feux de la Mauricie ayant brûlé en 2010 et permettent de prédire la composition en essences 17 ans après feu sur environ 80 % des superficies productives brûlées. Finalement, plusieurs recommandations ont été formulées, en vue d'améliorer éventuellement le modèle proposé et de poursuivre la documentation des recherches sur la dynamique de la végétation à plus long terme après feu.

INTRODUCTION

Durant l'été 2010, la Mauricie a été frappée par plusieurs feux majeurs, qui ont couvert 105 000 ha. Suite à ces événements, de nombreuses questions importantes se posent à court et plus long terme : quels seront les retours de strates immédiatement après feu et comment évoluera la composition de la végétation quelques décennies après la perturbation ? La régénération naturelle sera-t-elle suffisante ? Quelle sera l'ampleur de la compétition et comment influencera-t-elle la régénération en essences désirées et la composition du couvert à moyen terme ?

Un modèle de prédiction de la régénération forestière 5 ans après feu a été développé en 2012 par le CERFO, pour le sous-domaine de la sapinière à bouleau blanc de l'ouest (Côté *et al.,* 2012). Ce modèle, appliqué aux principaux feux ayant brûlé en 2010 en Mauricie, a permis d'estimer le succès de la régénération naturelle immédiatement après feu.

Les principales essences qui se régénèrent immédiatement après feu dans la sapinière à bouleau blanc, qu'elles soient commerciales (pin gris, épinette noire, peuplier faux-tremble et bouleau blanc) ou non commerciales, ont une croissance juvénile dont la vitesse varie beaucoup selon l'essence. Il en résulte un pouvoir compétitif très variable selon les essences. Dans ce contexte, il devient très intéressant de suivre l'évolution de la composition des peuplements sur quelques décennies après le passage du feu. En effet, on peut supposer que les effets de la compétition exercée par les essences feuillues à croissance rapide (ex : peuplier faux-tremble, cerisier de Pennsylvanie) sur certaines essences commerciales de croissance juvénile plus lente (en particulier l'épinette noire) influencent la composition en essences des peuplements dans le temps. De plus, des observations faites par M. Denis Thibault, à l'époque où il était à l'emploi de Kruger, suggèrent que la régénération feuillue prédite 5 ans après feu par le modèle de régénération n'a pas toujours survécu et que la régénération présente est plus résineuse que ce que le modèle de prédiction prévoyait (Denis Thibault, communication personnelle).

Dans ce contexte, le présent projet propose de documenter l'évolution de la composition des peuplements sur un horizon de 15 ans environ après feu, applicable au domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau blanc, dans l'optique de prévenir les problèmes pouvant résulter de modifications importantes de la composition forestière, autant sur les plans de la biodiversité que de l'approvisionnement ligneux.

OBJECTIFS

Le présent projet couvre deux principaux objectifs :

1) Élaborer des scénarios d'évolution de la composition des peuplements sur un horizon de 15-20 ans après un feu, applicables au sous-domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau blanc de l'ouest, en comparant le portrait réel de la végétation présente 17 ans après feu avec celui de la régénération prédite 5 ans après feu;
2) Appliquer les scénarios produits aux feux ayant brûlé en 2010 en Mauricie, dans la sapinière à bouleau blanc de l'ouest, de manière à produire, pour chaque feu, un portrait prédictif de la végétation sur un horizon de 15-20 ans après feu.

Le projet global a été réalisé sur deux années (2012-2013 et 2013-2014), en raison du financement partiel qui a été attribué en 2012-2013. Une première étape préalable à l'élaboration des scénarios d'évolution de la composition des peuplements 15 ans après feu a été réalisée en 2012-2013 (Boulfroy *et al.,* 2013). Cette première année a principalement consisté à produire les deux jeux de données nécessaires à l'élaboration des scénarios d'évolution :

- le portrait de la régénération 5 ans après feu, à partir du modèle de prédiction de la régénération forestière 5 ans après feu développé en 2012 par le CERFO, pour le sous-domaine de la sapinière à bouleau blanc de l'ouest (Côté *et al.,* 2012);
- le portrait de la végétation 17 ans après feu, à partir d'une classification semi-dirigée réalisée sur des images satellitaires.

Les objectifs couverts par la deuxième année du projet (2013-2014) consistent à :

1) Élaborer les scénarios d'évolution de la composition des peuplements sur un horizon de 15-20 ans après un feu;
2) Appliquer les scénarios d'évolution produits afin d'établir un portrait prédictif de la végétation sur un horizon de 15-20 ans après feu pour les différents feux ayant brûlé en Mauricie en 2010.

L'élaboration des scénarios d'évolution de la composition des peuplements a nécessité de réaliser de nouvelles analyses sur les images satellitaires utilisées pour produire le portrait de la végétation 17 ans après feu (nouvelle classification semi-dirigée). Une nouvelle version du portrait à 17 ans a donc été produite durant l'année 2 et est présentée dans ce rapport. Cette version devra être utilisée, au lieu de la version présentée dans le rapport de l'année 1.

1. HYPOTHÈSES DE TRAVAIL

Le présent projet vise à vérifier les hypothèses suivantes :

A) PORTRAIT DU COUVERT FORESTIER 17 ANS APRÈS FEU ISSU D'UNE CLASSIFICATION SEMI-DIRIGÉE

1- Il est possible de produire une classification du couvert forestier de qualité satisfaisante permettant de distinguer les essences forestières commerciales, à partir d'une classification semi-dirigée d'une image RapidEye.

2- L'utilisation d'analyses statistiques permet de bonifier la méthode conventionnelle utilisée pour l'établissement des zones d'entraînement d'une classification semi-dirigée.

3- Le portrait du couvert forestier 17 ans après feu, établi selon les mêmes variables qui ont été utilisées pour le modèle de prédiction de la régénération forestière 5 ans après feu, donne des résultats satisfaisants pour qualifier l'état du couvert.

4- La composition en essences 17 ans après feu associée à chaque strate du modèle de prédiction 5 ans après feu (combinaison du type écologique et de l'intensité du feu) est en accord avec la végétation potentielle que l'on s'attendrait à retrouver dans chaque type écologique concerné.

5- L'intensité du feu, variable explicative significative pour prédire la régénération forestière 5 ans après feu, entraîne aussi des différences dans la composition forestière 17 ans après feu.

B) ÉVOLUTION DU COUVERT FORESTIER ENTRE 5 ET 17 ANS APRÈS FEU

6- La présence des essences résineuses se maintient en général ou diminue légèrement entre 5 et 17 ans après feu, tandis que les essences feuillues voient leur présence diminuer pendant cet horizon de temps, en particulier dans les sites qui sont moins favorables à leur croissance.

C) APPLICATION DES SCÉNARIOS PRODUITS SUR LE FEU DE PARENT À D'AUTRES TERRITOIRES BRÛLÉS

7- Les scénarios d'évolution de la composition en essences 17 ans après feu développés à partir de données issues du feu de Parent sont applicables à d'autres feux ayant brûlé dans le sous-domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau blanc de l'ouest.

2. MÉTHODES

Cette section comprend :

- la localisation du secteur à l'étude;
- un rappel des étapes réalisées lors de la première année (2012-2013);
- la méthode utilisée pour produire la nouvelle version du portrait de la composition en essences 17 ans après feu;
- la méthode utilisée pour développer les scénarios d'évolution;
- l'application des scénarios d'évolution aux feux qui ont brûlé en Mauricie en 2010.

2.1. LOCALISATION DES SECTEURS À L'ÉTUDE

Cette étude est localisée dans la région de la Mauricie, plus précisément dans le sous-domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau blanc de l'ouest.

Le feu de Parent représente le territoire d'étude qui sert à l'élaboration des scénarios d'évolution de la composition en essences sur un horizon de 15-20 ans après feu. Ce territoire est situé dans l'UAF 043-51. Il a brûlé à la fin de l'été 1995 et couvre une superficie de 62 317 ha.

En 2010, plusieurs feux ont eu lieu en Mauricie. Parmi ceux-ci, on comptait 6 feux d'importance situés dans le domaine de la sapinière à bouleau blanc ou à sa limite. Ces six feux ont été retenus pour l'application du scénario d'évolution 17 ans après feu (figure 1). Il s'agit des feux :

- numéro 267, couvrant 6 628 ha et localisé dans l'UAF 042-51;
- numéro 269, couvrant 11 268 ha et localisé dans l'UAF 043-51;
- numéro 270, couvrant 4 237 ha et localisé dans l'UAF 043-51;
- numéro 274, couvrant 19 458 ha et localisé dans les UAF 042-51 et 043-52;
- numéro 276, couvrant 3 427 ha et localisé dans l'UAF 043-51;
- numéro 281, couvrant 121 404 ha et localisé dans les UAF 042-51, 025-51 et 022-51.

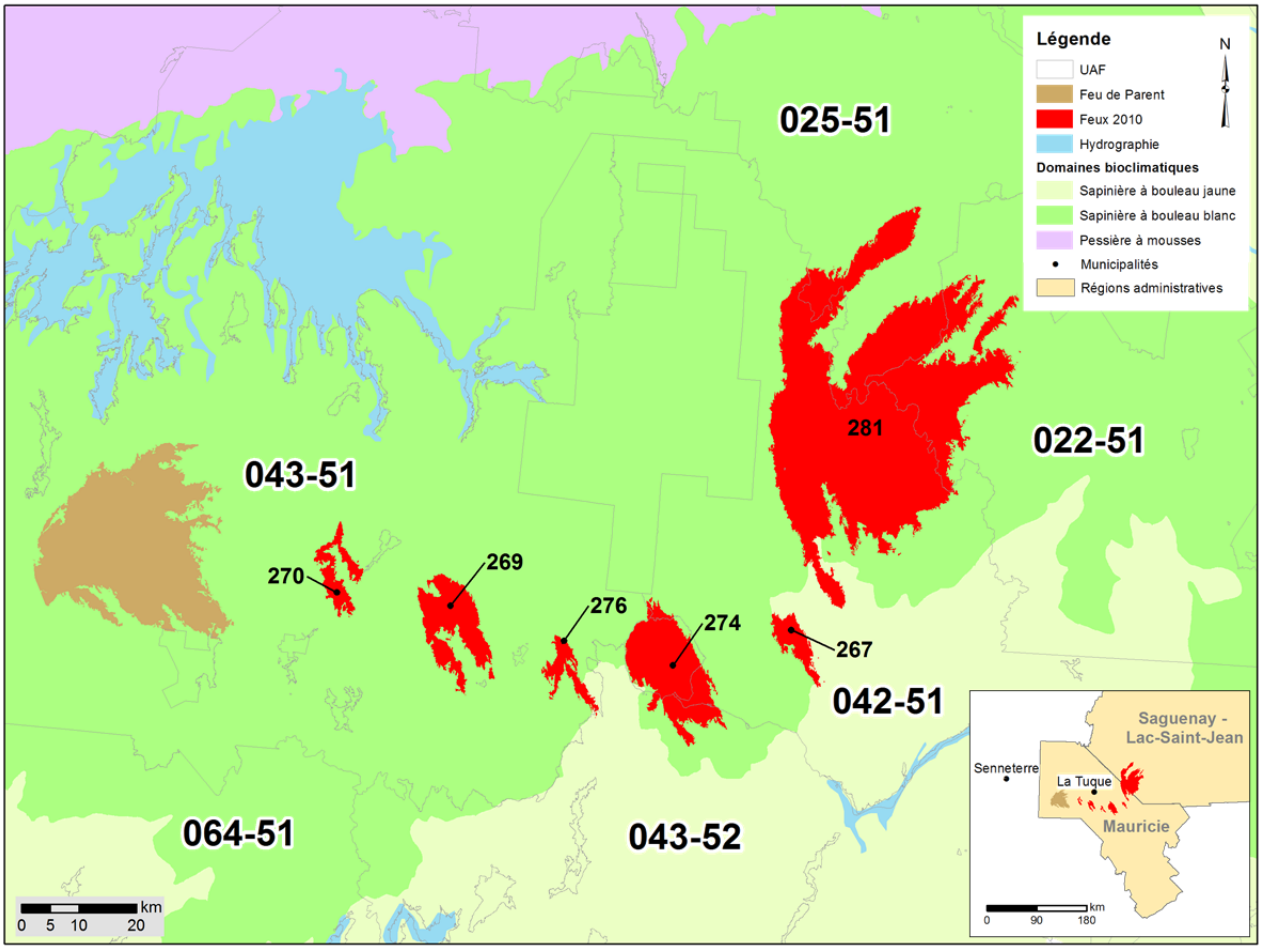


Figure 1. Localisation du feu de Parent et des autres feux de 2010 à l'étude

2.2. RAPPEL DES ÉTAPES RÉALISÉES DURANT LA PREMIÈRE ANNÉE (2012-2013)

Les principales étapes réalisées lors de la première année concernent :

- Le portrait de la régénération 5 ans après feu, pour les peuplements ayant brûlé dans le feu de Parent en 1995;
- Le portrait du même territoire 17 ans après feu, à partir de l'analyse d'une image satellitaire et de données recueillies sur le terrain.

La figure 2 résume les principales étapes réalisées lors des années 1 (2012-2013) et 2 (2013-2014) du présent projet[1].

[1] Pour davantage d'information sur les travaux réalisés durant l'année 1, se référer à Boulfroy *et al.* (2013).

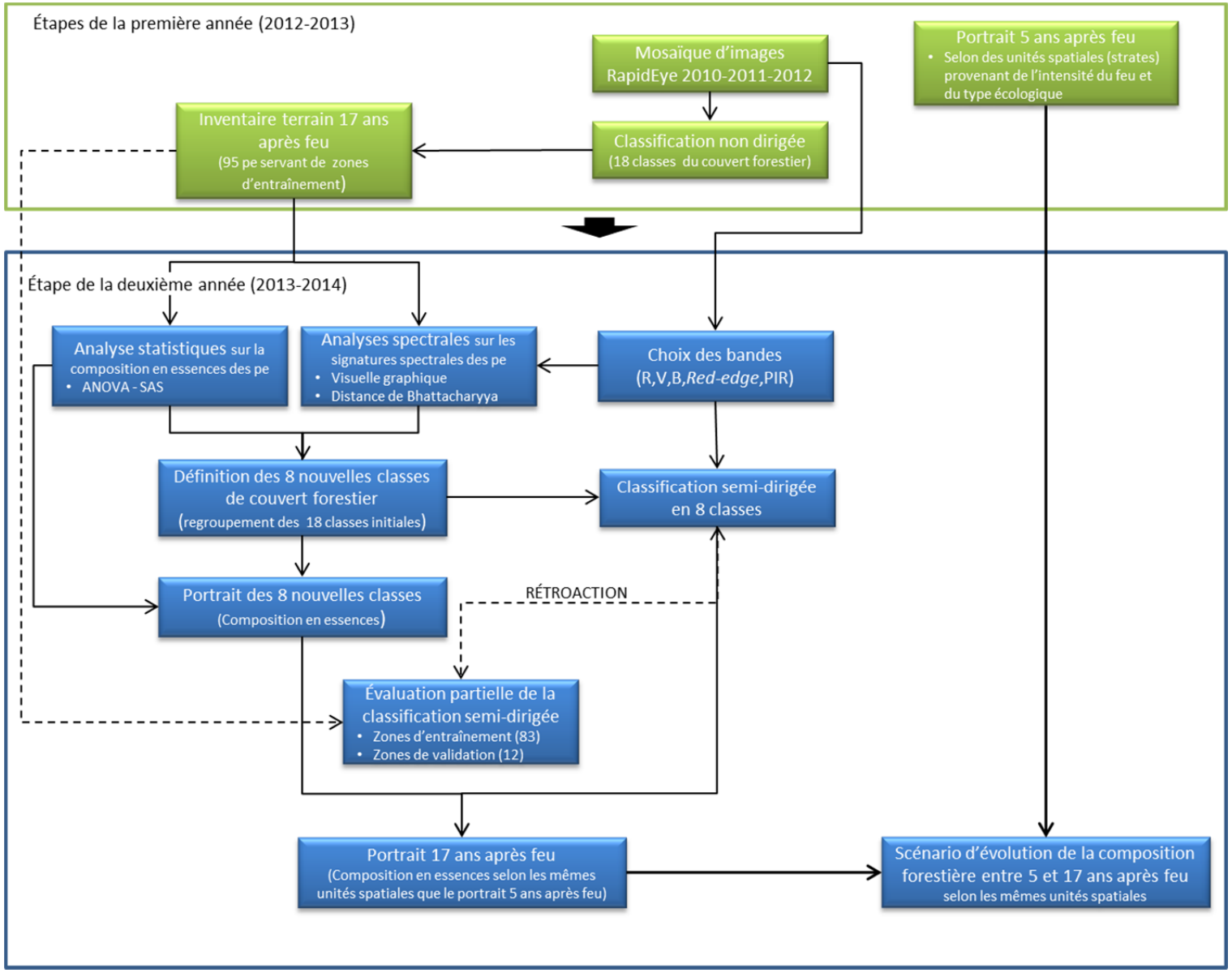


Figure 2. Principales étapes réalisées durant les années 1 et 2 du projet

2.2.1. Portrait de la régénération 5 ans après feu

Le modèle de prédiction de la régénération 5 ans après feu développé par Côté *et al.* (2012) a été appliqué aux peuplements forestiers du feu de Parent. Ce modèle permet de prédire le coefficient de distribution des essences forestières commerciales, en fonction du type écologique et des classes de dommages causés par le feu. Au total, 11 strates de prédiction ou combinaisons de type écologique et intensité de feu ont été considérées. Des cartes du coefficient de distribution occupé par les quatre principales essences forestières commerciales, soit l'épinette noire, le pin gris, le peuplier faux-tremble et le bouleau blanc, ont donc été produites.

2.2.2. Portrait du couvert 17 ans après feu

2.2.2.1. Préparation des données géospatiales

Une mosaïque d'images RapidEye prises sur un horizon de 3 années (juin 2010, juillet 2011 et juillet 2012), d'une résolution spatiale de 6,5 m, rééchantillonnée à 5 m, et dénombrant 5 bandes spectrales (bleue, rouge, verte, *red-edge* et proche infrarouge) a été utilisée pour classifier les différentes classes de végétation forestière (figure 3). L'image de 2011 comprend la plus grande partie du feu, soit plus de 80 % de sa superficie totale. L'ensemble des points de contrôle sur le terrain sont localisés sur l'image de 2011. L'étendue de la mosaïque a permis de couvrir la majeure partie du territoire du feu de Parent (62 317 ha) (Côté *et al*., 2012). Suite à l'acquisition des images, un prétraitement a été effectué par des corrections géométriques nécessaires à l'utilisation des images. Le territoire à l'étude se situant à cheval entre deux fuseaux cartographiques, la projection utilisée pour toutes les données provenant de diverses sources est NAD83 MTM zone 8.

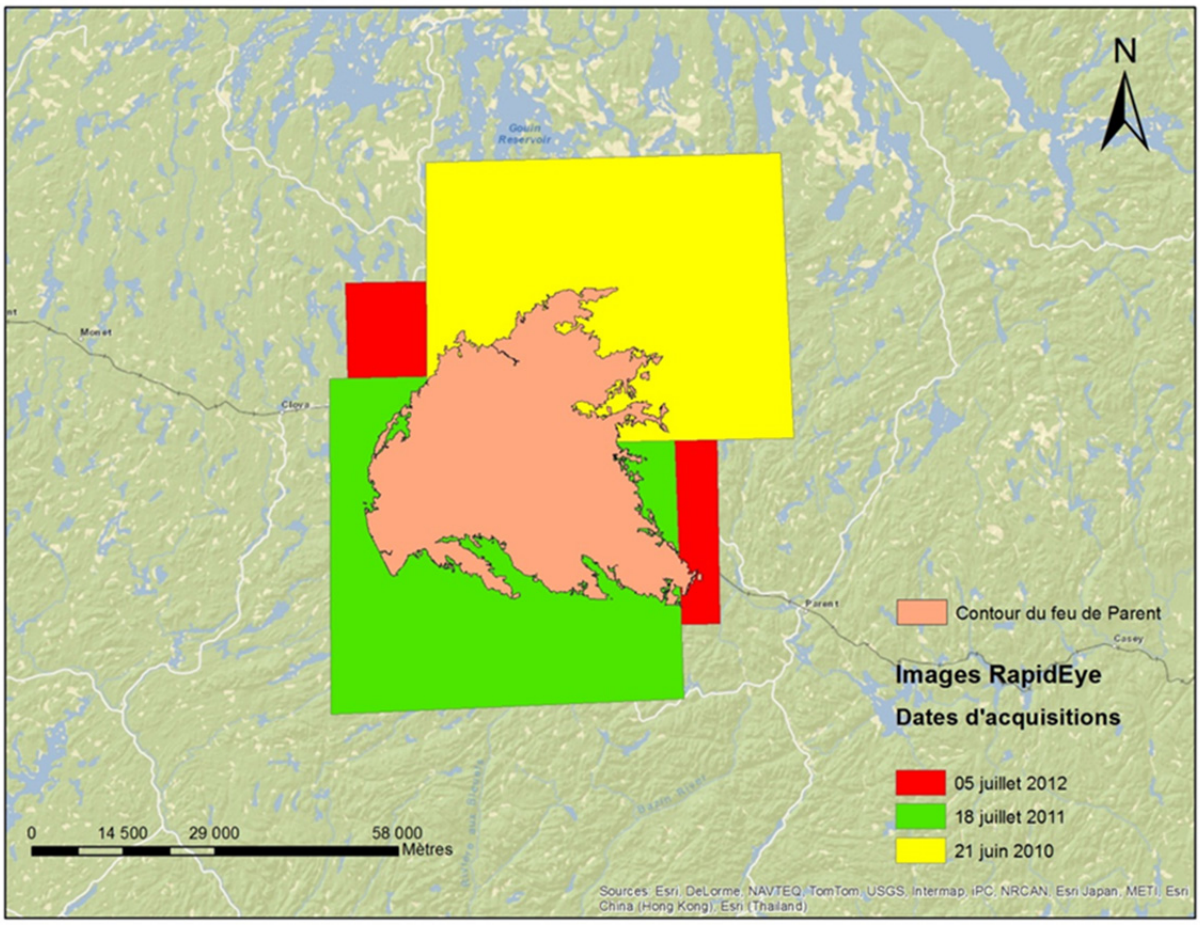


Figure 3. Localisation des images Rapideye sur le territoire du feu de Parent

2.2.2.2. Classification non dirigée de la végétation

La classification non dirigée a permis de diviser le territoire selon la valeur spectrale de la mosaïque de RapidEye (Boulfroy *et al*., 2013). Ce traitement des données a permis de mettre en lumière des classes de végétation forestières (18), les plans d'eau, les dénudés secs et les chemins forestiers. La réalisation de cette phase a permis de stratifier le territoire du feu de Parent et d'orienter la campagne d'inventaire sur les 18 classes exclusivement forestières.

2.2.2.3. Inventaire terrain de 2012

L'inventaire forestier a été réalisé sur le terrain entre le 15 et le 21 septembre 2012. Cet inventaire visait à documenter la végétation selon la segmentation spectrale exécutée. Plus spécifiquement, l'inventaire a été effectué de manière à relever l'occupation du sol qui était

visible du ciel dans des placettes d'une taille de 25 m x 20 m (figure 4). Cependant, il est arrivé à quelques reprises que les placettes soient de taille plus restreinte. Lorsque c'était le cas, ces placettes ont été découpées en 20 micro-placettes de 5 m x 5 m, où une observation de l'occupation du sol a été faite.

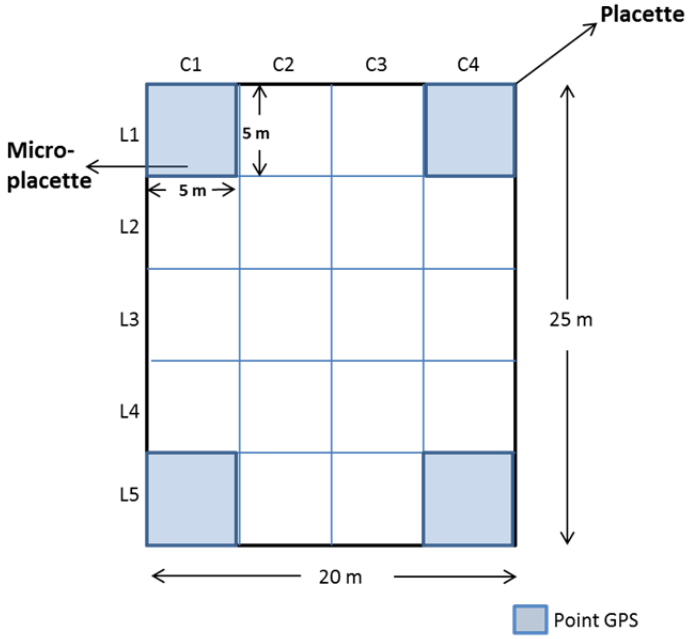


Figure 4. Exemple de placette utilisé lors de l'inventaire terrain de 2012

L'observateur devait en effet se placer au centre de la micro-placette et se figurer un cylindre de 2,5 m de rayon au-dessus de sa tête. Dans ce cylindre, il devait noter le pourcentage d'occupation au sol des différentes classes suivantes :

- les essences forestières commerciales présentes : peuplier faux-tremble, bouleau blanc, érable rouge, pin gris, épinette noire;
- les essences arbustives feuillues non commerciales;
- les éricacées;
- les mousses ou sphaignes;
- les cladonies;
- les plantes herbacées;
- les débris ligneux;
- les chablis;
- le sol forestier nu;

- le roc;
- les trous d'eau.

La somme des pourcentages de couverture évalués pour chaque classe d'occupation du sol présente devait arriver à 100 %. En effet, en cas de superposition de classes (ex : mousses sous couvert d'arbustes), seules les classes qui dominaient et qui étaient visibles du ciel étaient notées. Finalement, seules les différentes essences forestières commerciales et les feuillus non commerciaux regroupés ont été considérés dans le portrait de la végétation.

<u>Note importante</u> : À cette étape, le pourcentage d'occupation du sol par les classes d'essences forestières ne correspond pas à la densité de couvert telle qu'elle est évaluée dans les cartes écoforestières. En effet, l'évaluation qui a été réalisée sur le terrain prend en considération les espaces occupés par d'autres classes d'occupation du sol visibles du ciel à travers la canopée, alors que la densité de couvert estimée sur les cartes écoforestières correspond à une projection au sol du contour extérieur de la cime des arbres. En présence d'un couvert arborescent qui n'est pas totalement opaque, comme cela est le cas chez des jeunes tiges âgées de 15 ans, la densité de cime est donc systématiquement inférieure à une estimation de la densité du couvert. La terminologie « densité de la cime des arbres » sera utilisée dans le présent rapport, pour qualifier le pourcentage d'occupation du sol par les différentes classes d'essences forestières.

Au total, 116 placettes réparties dans 18 classes de végétation forestière provenant de la classification non dirigée de compositions semblables ont été inventoriées. Des points GPS pris lors de l'inventaire ont permis de délimiter sur l'image satellitaire ces placettes, qui ont ensuite pu être directement utilisées comme zones d'entraînement lors de la classification semi-dirigée.

2.2.2.4. Compilation des données d'inventaire et classification semi-dirigée

En premier lieu, la densité de la cime de chaque essence commerciale et des feuillus non commerciaux a été calculée par micro-placette, placette et classe de végétation forestière issues de la classification non dirigée. Plusieurs placettes présentant des caractéristiques très différentes des autres placettes d'une même classe ont été soit attribuées à une autre classe, soit retirées du

jeu de données. La répartition des placettes a ensuite été utilisée pour constituer les zones d'entraînement de la classification semi-dirigée.

2.3. NOUVEAU PORTRAIT DE LA VÉGÉTATION 17 ANS APRÈS FEU

L'année 2 devait débuter par l'élaboration des scénarios d'évolution de la composition forestière sur un horizon de 15-20 ans après feu. Au début de cet exercice, il s'est avéré que l'utilisation de deux unités différentes dans le temps (coefficient de distribution établi 5 ans après feu et densité de cime des essences établie 17 après feu) rendait difficile le suivi de l'évolution de la composition forestière. Suite à ce constat, il a été décidé d'établir un portrait de la composition en essences 17 ans après feu, à l'aide d'un coefficient de distribution. Cette avenue devait permettre de comparer, sur la base d'une même « évaluation », la présence des essences forestières 5 et 17 ans après feu.

L'équipe du CERFO étant amenée à retravailler dans les bases de données d'inventaire, de nouveaux regroupements de placettes ont été réalisés, en conjuguant deux approches distinctes : des analyses statistiques des données d'inventaire et des analyses spectrales de la mosaïque d'images RapidEye. Il a alors été décidé de produire **une nouvelle classification semi-dirigée**, reposant sur une nouvelle attribution de zones d'entraînement issue des nouveaux regroupements de placettes.

La figure 2 rappelle les différentes étapes réalisées durant l'année qui fait l'objet du présent rapport.

2.3.1. Nouvelle classification semi-dirigée de la végétation

Contrairement à une classification non dirigée où l'attribution des classes repose uniquement sur la variation spectrale des images, une classification semi-dirigée repose sur des zones de référence dont on connaît *a priori* la classe. L'utilisation de données d'inventaire qui représentent des zones d'entraînement a servi de référence pour appliquer l'information à l'ensemble des images (classification). Ainsi, la première étape d'une classification semi-dirigée consiste à

choisir, pour chaque classe, des placettes comme zones d'entraînement. Cette section passe en revue le regroupement des zones d'entraînement en nouvelles classes, à partir d'analyses statistiques des données d'inventaire et d'analyses spectrales réalisées sur la mosaïque d'images.

2.3.1.1. Regroupement des zones d'entraînement en nouvelles classes à partir d'analyses statistiques des données d'inventaire

Le regroupement des zones d'entraînement en nouvelles classes a tout d'abord été effectué à partir de l'analyse des données d'inventaire. Les placettes ont été dans un premier temps réparties selon les classes de couvert définies lors de la première année. Dix-huit classes ont ainsi été constituées. Il s'est avéré que certaines d'entre elles présentaient une composition forestière relativement similaire. Devant ce constat, des analyses statistiques (analyses de variance (ANOVA)) ont permis d'étudier la possibilité de regrouper certaines classes entre elles. D'ordre général, les classes ne présentant pas de différences significatives de composition au seuil $\alpha = 5\ \%$ ont été regroupées ensemble. Les analyses ont été effectuées avec la procédure « MIXED » et la différence des moindres carrés « LSD » a ensuite été utilisée pour déterminer s'il y avait des différences significatives entre les classes. Les compilations des données d'inventaire ont été réalisées à l'aide du logiciel SAS, version 9.3.

2.3.1.2. Regroupement des zones d'entraînement en nouvelles classes à partir d'analyses spectrales sur la mosaïque d'images RapidEye

La classification semi-dirigée procure de bonnes performances lorsque les classes choisies sont suffisamment distinctes dans l'espace spectral utilisé (nombre et largeur de bandes). L'analyse des signatures spectrales des différentes classes proposées lors de la première année est donc une étape primordiale pour s'assurer qu'elles sont suffisamment distinctes.

Une première étape consiste à sélectionner un seuil permettant de conserver uniquement les zones d'entraînement qui ont une taille respectable. Jensen (2005) suggère d'avoir au moins 40 pixels par classe et la règle générale est de conserver les zones ayant plus de 5 pixels. Deux des 116 placettes se sont avérées trop petites pour constituer des zones d'entraînement et ont donc été éliminées à cette étape.

Les classes ont ensuite été analysées afin de vérifier la séparabilité et la confusion spectrale puisque si certaines classes ne se distinguent pas spectralement, elles ne seront pas bien discriminées lors de la classification semi-dirigée. Cette analyse a été opérée en trois temps. D'abord, une analyse visuelle graphique réalisée à l'aide de l'outil *Semi-Automatic Classification* (Congedo *et al.*, 2013) a permis de comprendre les interactions inter et intraclasses. Puis, les bandes discriminatives (rouge, verte, *red-edge* et proche infrarouge) à conserver ont été choisies. Ensuite, la distance de Bhattacharryya a été utilisée comme indicateur avec *Focus* de *PCI Geomatics* pour déterminer le degré de similitude spectrale où l'analyse de cette distance relative permet d'identifier les classes semblables et différentes. La distance de Bhattacharyya varie entre 0 et 2. Plus la valeur se rapproche de 2, plus il y a de séparabilité spectrale, résultant en une bonne classification. Une valeur supérieure à 1,7 est généralement utilisée pour convenir que deux classes sont distinctes (Bindel *et al*., 2011). Cette étape mène souvent à des combinaisons de classes qui sont très corrélées dans l'espace spectral. Suite aux nouveaux regroupements effectués, la probabilité d'obtenir une valeur de signature spectrale distincte a également été étudiée avec les analyses de variance (ANOVA). Ces analyses statistiques réalisées à l'aide du logiciel SAS (version 9.3) ont permis de confirmer la pertinence de réaliser la majorité des regroupements effectués à partir du test de la distance de Bhattacharrya en mettant en évidence la moyenne et la variabilité spectrale des classes. Au total, 83 zones d'entraînement ont été utilisées pour générer la classification du territoire occupé par le feu de Parent.

2.3.1.3. Réglage des paramètres de classification

La dernière étape comprend le réglage des paramètres de classification. Deux algorithmes ont été testés (minimum de distance et maximum de vraisemblance), mais c'est finalement le maximum de vraisemblance qui a été retenu puisque l'on suppose que toutes les classes ont la même probabilité d'occurrence. En effet, cet algorithme, très utilisé dans les applications de la télédétection, suppose que la distribution des classes suit une loi normale. Par contre, pour avoir une bonne performance de l'algorithme, il est essentiel d'identifier les bonnes combinaisons de bandes pour discriminer les zones d'entraînement et les classes choisies (McIver et Friedl, 2002). De là l'importance des analyses statistiques et spectrales.

2.3.2. Évaluation partielle de la classification semi-dirigée

La nouvelle classification semi-dirigée a été validée de façon partielle. En effet, comme il y avait déjà peu de placettes par classe, seulement 10 % de ce nombre (12 placettes) a été retenu exclusivement pour la validation, ce qui a permis de ne pas trop affecter la classification tout en ayant une bonne idée de sa valeur. La sélection des zones de validation a été faite de façon aléatoire, pondérée par le nombre de placettes disponible par classe.

Une seconde évaluation a également été réalisée, en considérant cette fois-ci uniquement les zones d'entraînement utilisées pour réaliser la classification, ce qui n'est pas usuel, mais donne toutefois une information complémentaire.

Des matrices de confusion (matrice d'erreur utilisant des zones de validation provenant de la même source que l'entraînement) ont été dérivées de ces deux évaluations, ce qui a permis de mieux comprendre les interactions entre les classes et d'obtenir une **précision globale** et un **coefficient kappa** de concordance pour l'ensemble de la classification[2]. Ce dernier varie entre -1 et 1. Une valeur de 0 indique que le résultat de classification est aléatoire, une valeur de 1 que la classification est parfaite alors qu'une valeur de -1 équivaut à une classification dans laquelle l'effet aléatoire est plus important que le procédé de classification. En général, on vise une valeur de précision globale au moins supérieure à 75 % et une valeur de Kappa de 0,70 et plus, cette dernière signifiant que 70 % des bonnes classifications ne sont pas dues au hasard et que le classement est donc très bon (Montserud et Leamans, 1992). La matrice de confusion est composée d'erreurs d'omission et de commission permettant d'analyser chaque classe[3] (Congalton, 1991).

[2] La **précision globale** est une mesure qui tient compte de la précision de la classification en entier en calculant le nombre de pixels correctement classifiés selon les pixels de référence (la diagonale dans la matrice de confusion) alors que le **coefficient de kappa** est une mesure de concordance tenant compte à la fois des erreurs de commission et d'omission (les colonnes et les lignes dans la matrice de confusion) afin de mesurer la force de la classification par rapport à une classification totalement due au hasard (Hagen-Zanker, 2006).

[3] Dans le premier cas (erreurs d'omission), il s'agit d'évaluer si des objets appartenant à une classe de référence ont été correctement classifiés par la classification semi-dirigée. Dans le second cas (erreurs de commission), on y détermine si les objets classifiés par la classification semi-dirigée appartiennent vraiment à ces classes. Par exemple, l'utilisateur d'une telle carte qui voudra visiter les objets d'une classe en particulier sur le terrain ne s'attendra pas à ce qu'une partie de ces objets n'appartienne pas réellement à cette classe (Jensen, 2005).

2.3.3. Nouvelle compilation des données d'inventaire et portraits des nouvelles classes

Une fois que les regroupements de placettes ont été établis sur la base des ANOVA réalisées à la section 2.3.1.1, une deuxième ANOVA a été réalisée à partir des nouvelles classes de végétation. Cette deuxième analyse de variance a permis de valider les choix de regroupements et d'effectuer deux nouveaux portraits pour chaque classe de végétation :

- la densité de cime des essences;
- le coefficient de distribution des essences.

Ainsi, la densité de cime des essences a été calculée par micro-placette, placette et nouvelle classe de végétation forestière.

Le même exercice a également été effectué pour le coefficient de distribution des espèces, sur la base de micro-placettes de 25 m^2. Les données recueillies lors de l'inventaire consistaient à quantifier le pourcentage de recouvrement au sol du couvert végétal qui était visible du ciel. Par conséquent, il ne s'agit pas d'une méthode conventionnelle pour mesurer le coefficient de distribution, puisqu'elle est basée sur la présence du couvert des espèces au-dessus de la micro-placette et non de la présence du tronc, qui est nécessaire pour calculer un coefficient de distribution. Afin de calculer un coefficient de distribution à partir des données, en limitant les risques qu'une même tige soit présente sur plusieurs micro-placette (ce qui aurait pour effet de surestimer le coefficient de distribution), seules les micro-placettes non contiguës ont été retenues pour effectuer les calculs. Bien que cela ait réduit considérablement l'échantillonnage, cela a permis de limiter les risques de chevauchements d'une même tige sur plusieurs micro-placettes. Dans les cas les plus communs, seules les micro-placettes 1, 3, 5, 16, 18 et 20 ont été retenues pour effectuer le calcul du coefficient de distribution.

Il est à noter que les placettes localisées dans des secteurs où des traitements sylvicoles ont été appliqués (éclaircie précommerciale (EPC), dégagement, etc.) n'ont pas été considérées pour calculer les densités de cime et coefficients de distribution pour les nouvelles classes, puisque les scénarios d'évolution cherchent à documenter une dynamique naturelle de la végétation, sans intervention humaine.

2.4. DÉVELOPPEMENT DES SCÉNARIOS D'ÉVOLUTION 17 ANS APRÈS FEU

Le portrait de la composition forestière 17 ans après le feu de Parent a été mis en relation avec la cartographie du coefficient de distribution des essences 5 ans après feu (Boulfroy *et al.,* 2013). Le portrait 5 ans après feu a été cartographié sur la base d'unités spatiales représentant différentes combinaisons du type écologique et de l'intensité du feu (les différentes combinaisons de ces deux éléments sont appelées « strates ») (Côté *et al*., 2012). Ces unités spatiales ont ensuite été reportées sur la classification semi-dirigée présentant le portrait 17 ans après feu. Ont été retenues les unités spatiales qui n'avaient pas fait l'objet de traitements précommerciaux (dégagement, EPC) puisque les scénarios d'évolution doivent caractériser une dynamique naturelle sans perturbation anthropique. De plus, seules les unités spatiales supérieures à 1 ha ont été utilisées. La densité moyenne de cime des différentes essences présentes dans chaque classe étant connue, il a été possible d'inférer la densité de cime des essences présentes dans chaque unité spatiale.

Pour chaque unité spatiale, la proportion de chacune des essences et classes obtenues par la classification semi-dirigée a été calculée. Dans le même esprit que la densité de cime, un autre scénario d'évolution a été élaboré afin d'attribuer un coefficient de distribution 17 ans après feu aux unités spatiales. Le coefficient de distribution moyen obtenu par essence et classe a été pondéré par la proportion des classes présentes dans les unités spatiales.

Ainsi, ont été réunies dans une même base de données, pour chaque unité spatiale du feu de Parent correspondant à la combinaison du type écologique et de l'intensité du feu, 3 informations distinctes, soit :

- La valeur du coefficient de distribution 5 ans après feu pour les 4 principales essences forestières (épinette noire, pin gris, peuplier faux-tremble et bouleau blanc), les essences résineuses et les essences feuillues regroupées.
- La valeur de la densité de cime 17 ans après feu pour les 4 principales essences forestières (épinette noire, pin gris, peuplier faux-tremble et bouleau blanc), les essences résineuses et les essences feuillues regroupées.

- La valeur du coefficient de distribution 17 ans après feu pour les 4 principales essences forestières (épinette noire, pin gris, peuplier faux-tremble et bouleau blanc), les essences résineuses et les essences feuillues regroupées.

Toutes les unités spatiales d'une même strate présentes sur le feu de Parent ont ensuite été compilées, de manière à calculer une densité de cime et un coefficient de distribution moyens associés à chaque strate, et ce, pour chaque essence. Les moyennes ont été calculées à l'aide du logiciel SAS, version 9.3.

2.5. APPLICATION DES SCÉNARIOS D'ÉVOLUTION 17 ANS APRÈS FEU AUX AUTRES FEUX EN MAURICIE AYANT BRÛLÉ EN 2010

La densité de cime 17 ans après feu calculée pour chaque combinaison de type écologique et intensité de feu (strate) du feu de Parent a été appliquée aux mêmes strates présentes sur les feux ayant brûlé en 2010.

À des fins de représentation graphique, les intervalles utilisés pour illustrer la densité de cime de chaque essence ont été déterminés selon la méthode des seuils naturels (*Natural breaks*) de Jenks, disponible dans ArcGIS 10.1. Cette dernière consiste à choisir les seuils maximisant la variance interclasse et minimisant la variance intraclasse. Le nombre de classes proposées varie de 1 à 4, selon l'étendue des valeurs de la densité de cime observée chez les différentes essences. Ce nombre a été déterminé pour chaque essence, de manière à obtenir une représentation graphique relativement semblable pour des plages de données similaires. Le gradient du rouge au vert représente une occupation de l'essence couverte, variant de faible à élevée.

3. ÉLABORATION DES SCÉNARIOS D'ÉVOLUTION DU COUVERT

Cette section présente le nouveau portrait du couvert forestier 17 ans après feu obtenu à partir des analyses réalisées lors de la deuxième année. Suivent les scénarios d'évolution du couvert forestier, qui ont été élaborés à partir des portraits de la végétation 5 et 17 ans après feu.

3.1. NOUVEAUX PORTRAITS DU COUVERT FORESTIER 17 ANS APRÈS FEU

Le nouveau portrait repose sur une nouvelle classification semi-dirigée qui a été effectuée sur la base de nouveaux regroupements de placettes utilisés comme zones d'entraînement.

3.1.1. Nouvelles classes de végétation établies à partir des analyses statistiques et spectrales

3.1.1.1. Regroupement des anciennes classes

La première classification semi-dirigée produite lors de l'année 1 repose sur 18 classes de végétation. La composition de ces 18 classes est présentée dans l'annexe 1. Plusieurs d'entre elles montrent des similitudes en termes de densité de cime par essence et de signatures spectrales. Il a donc été décidé de vérifier lesquelles d'entre elles pouvaient être regroupées. Des analyses de variance réalisées sur les données d'inventaire ainsi que des analyses spectrales ont permis de proposer des nouveaux regroupements faisant passer de 18 à 8 le nombre de classes de végétation. Le tableau 1 présente les nouveaux regroupements et décrit sommairement la composition des nouvelles classes, basée sur la composition et la densité de la cime totale. On remarque un gradient des classes les plus résineuses (101) vers les plus feuillues (108).

Tableau 1. Nouvelles classes obtenues par les analyses statistiques et spectrales

Nouvelle classe	Ancienne classe	Description
101	C15	Composée principalement de résineux avec une densité élevée de PIG
102	C14	Composée principalement de résineux avec une densité moyenne de PIG
103	C13-C17	Composée principalement de résineux avec une densité faible de PIG
104	C27-C29-C32	Composée principalement de résineux avec une composante importante d'EPN
105	C18-C19	Composée principalement de forêt mélangée à dominance résineuse
106	C16-C20	Composée principalement de forêt mélangée partagée
107	C21-C26	Composée principalement de forêt mélangée à dominance feuillue
108	C23-C24-C25-C28-C33	Composée principalement de feuillus à densité élevée

Plusieurs étapes ont ainsi permis de conclure sur les regroupements présentés dans le tableau 1. Dans un premier temps, une série de regroupements préliminaires de classes a été proposée sur la base des **analyses de variance réalisées sur les données d'inventaire**. Les détails des résultats des analyses de variance sont présentés dans l'annexe 2. Les principales conclusions sont les suivantes :

- Pour les strates dominées par les essences résineuses, sur la base du couvert résineux, on obtient les classes indépendantes et regroupements de classes suivants :
  - C15
  - C14 et C17
  - C13
  - C32-C27
  - C27 et C29
- Pour les strates dominées par les essences feuillues, sur la base du couvert feuillu, on obtient les classes indépendantes et regroupements de classes suivants :
  - C23 et C34
  - C24, C25, C28 et C34

- Pour les strates de couvert mélangé, sur la base du couvert feuillu, on obtient les classes indépendantes et regroupements de classes suivants :
    - C18, C19 et C20
    - C18, C22 et C16
    - C20, C22 et C16
    - C16, C26
    - C21 et C26
- Pour les strates de couvert mélangé, sur la base du couvert résineux, on obtient les classes indépendantes et regroupements de classes suivants :
    - C18 et C19
    - C18 et C20
    - C16 et C20
    - C22
    - C21 et C26

Une analyse visuelle graphique des signatures spectrales des 18 anciennes classes a aussi permis dans un premier temps d'éliminer les classes C22 et C34. Les placettes associées à ces deux classes ont donc été supprimées de l'ensemble des données utilisées dans le cadre du projet. Ces deux classes présentaient en effet une confusion possible avec d'autres classes sur la base de leurs signatures spectrales. Ne pouvant expliquer cet écart, par mesure de précaution, il a été décidé de supprimer de l'analyse ces deux classes et les placettes qui leur étaient associées. De plus, les analyses statistiques de ces deux classes ont démontré des discordances au niveau de la composition forestière.

Les propositions de regroupements de classes établis sur la base des analyses statistiques des données d'inventaire ont ensuite été révisées et validées à leur tour par des analyses statistiques réalisées sur les signatures spectrales (annexe 3), une analyse visuelle graphique des signatures spectrales et une analyse sur la séparabilité spectrale.

La figure 5 montre un graphique représentant la valeur spectrale moyenne (signature spectrale) des nouvelles classes par bande spectrale de la mosaïque d'images RapidEye. Ce graphique permet de tirer les conclusions suivantes :

- Les classes sont généralement distinctes sur plusieurs bandes et particulièrement pour la bande 5 (proche infrarouge : PIR).
- Sur la base de la bande 5, les classes 108 et 107 sont nettement distinctes des 6 autres.
- On observe aussi deux groupes de classes : 101-102-103 et 104-105-106. Parmi ces 2 groupes :
    - La classe 101 se distingue de 102 et 103 par les bandes 3 et 4;
    - Les classes 102 et 103 semblent par contre présenter des similitudes sur l'ensemble des bandes;
    - La classe 104 se distingue aussi de 105 et 106 par les bandes 3 et 4;
    - Les classes 105 et 106 ont des profils qui se ressemblent beaucoup, avec un écartement entre les valeurs spectrales moyennes néanmoins supérieur à celui entre 102 et 103.

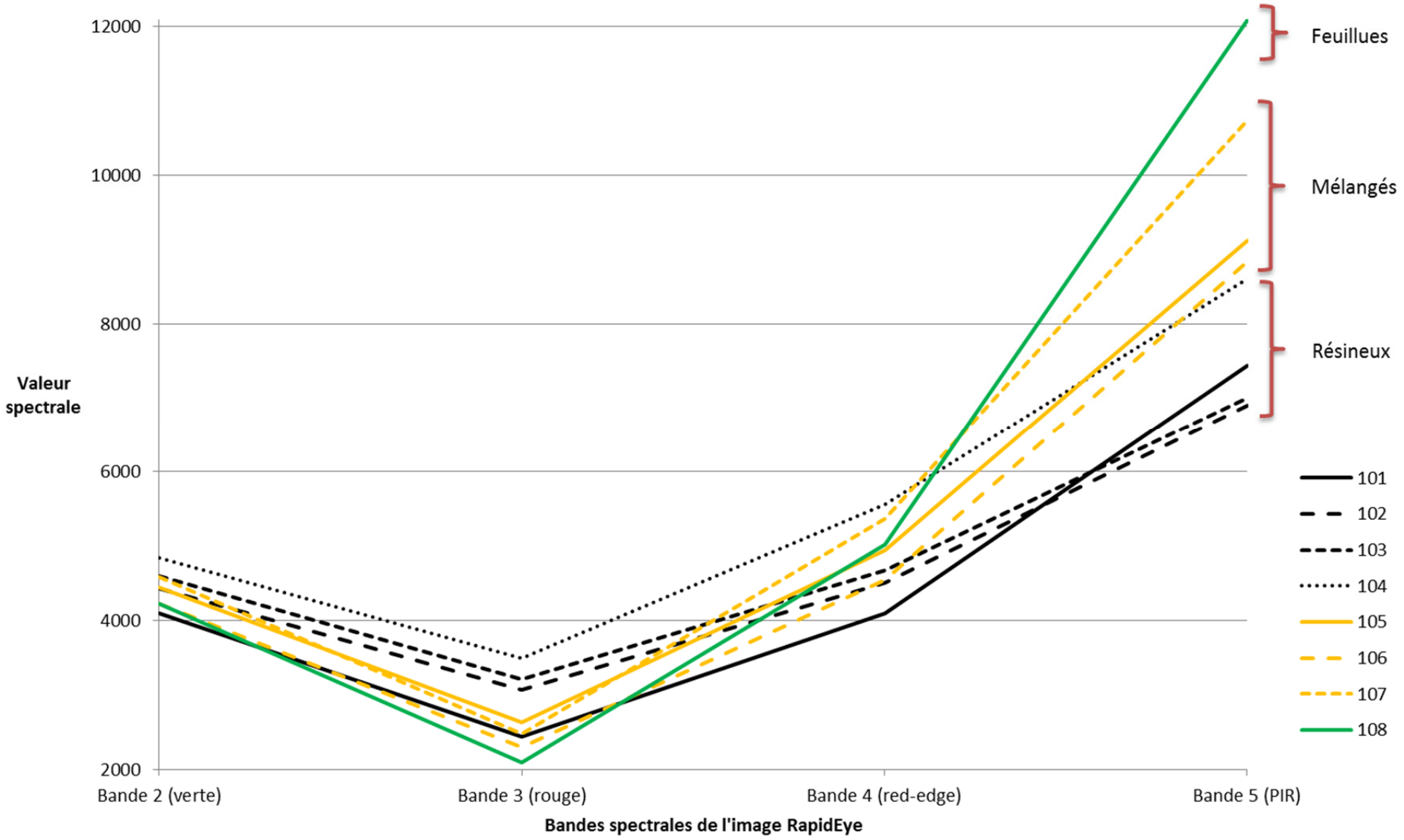


Figure 5. Valeurs spectrales moyennes des placettes pour chacune des classes par bande spectrale

Une autre analyse des signatures spectrales, portant sur la séparabilité spectrale (distance de Bhattacharyya), est présentée dans le tableau 2. Cette analyse met en évidence les points suivants :

- Seulement trois interactions présentent une valeur plus faible, inférieure au seuil de 1,7, valeur utilisée pour convenir que 2 classes sont distinctes.
- Une seule interaction, entre 102 et 103, semble être problématique, avec une valeur inférieure au seuil critique de 1. L'analyse de Bhattacharyya confirme donc le constat fait sur le graphique représentant la valeur spectrale moyenne, qui identifie lui aussi des profils très semblables entre 102 et 103. Il pourrait donc vraisemblablement se produire une confusion entre ces deux classes lors de la classification.
- La valeur de 1,2 pour les classes 105 et 106 dans la matrice des distances spectrales confirme elle aussi la ressemblance observée entre ces 2 classes à la figure 5.

Tableau 2. Matrice des distances spectrales interclasses de Bhattacharyya
Les valeurs rehaussées sont inférieures au seuil de 1,7.

Classes	101	102	103	104	105	106	107
102	1,9						
103	1,9	**0,9**					
104	2,0	1,7	**1,4**				
105	1,8	2,0	1,8	1,7			
106	1,7	1,9	1,9	2,0	**1,2**		
107	2,0	2,0	2,0	2,0	1,7	1,7	
108	2,0	2,0	2,0	2,0	1,9	1,8	1,7

3.1.1.2. Densité de cime des essences pour les nouvelles classes

Une fois ces 8 nouvelles classes établies, des analyses statistiques ont permis d'obtenir des moyennes estimées par essence pour chaque classe (tableau 3). Le nombre de placettes représente le nombre de points d'inventaire utilisé par le modèle pour calculer les estimés. Ces placettes ne comprennent pas celles où il y a eu des traitements sylvicoles (dégagement ou éclaircie), puisque le portrait 17 ans après feu doit être celui d'une forêt naturelle. Un total des essences résineuses et feuillues ainsi qu'un grand total qui correspond à la somme de toutes les essences étudiées ont aussi été calculés.

De façon générale, les intervalles de confiance sont très faibles pour les valeurs par essence et plus élevés pour les groupements d'essences.

Le coefficient de détermination estimé (R^2) indique que 48, 50 et 69 % de la variation observée a pu être expliquée par le modèle, respectivement pour les estimations des essences individuelles, des essences regroupées (résineux et feuillus intolérants) et de toutes les essences confondues, dans un contexte où l'on souhaiterait extrapoler ces prédictions à d'autres territoires (c'est-à-dire sans contrôle des effets aléatoires). À cette étape-ci, le modèle avec la meilleure précision est celui de la densité totale de cime.

Les 8 classes représentent donc un gradient de composition des 3 principales essences commerciales : le pin gris, l'épinette noire et le peuplier faux-tremble :

- **Les classes 101 et 102** sont des classes résineuses où le pin gris est l'unique essence résineuse. Ces deux dernières diffèrent par leur densité, la classe 101 étant plus dense (71 %) que la classe 102 (53 %).
- **Les classes 103 et 104** sont les deux classes les moins denses du territoire, avec des densités de cime totales respectives de 39 et 21 %. Elles sont de composition résineuse. La classe 103 est composée de pin gris et d'épinette, en proportions similaires. La classe 104 est exclusivement constituée d'épinette noire.
- **Les classes 105, 106 et 107** sont de composition mélangée et ont une densité de cime totale qui varie de 67 à 75 %. La classe 105 est dominée par les essences résineuses (pin gris et dans une moindre mesure l'épinette noire). La classe 106 est dominée par les essences feuillues (peuplier faux-tremble et dans une moindre mesure le bouleau blanc). L'épinette et le pin gris y sont représentés en quantité à peu près équivalente. Cette classe est par ailleurs celle où la densité de cime du bouleau blanc est la plus élevée. La classe 107 est à la limite d'être considérée de type feuillu, car les résineux n'occupent que 16 % de densité de cime, essentiellement de l'épinette noire. Dans cette classe, la présence des feuillus non commerciaux est non négligeable; elle est évaluée à 22 %.

- **Enfin, la classe 108** est exclusivement feuillue et la plus dense, avec une densité de cime totale de 89 %. L'essence dominante est le peuplier faux-tremble (47 %) suivie des feuillus non commerciaux (34 %).

Finalement, on peut noter que certaines valeurs de densité de cime pourraient sembler relativement faibles, notamment dans le cas du pin gris où le maximum atteint est de 59 %. Il est important dans ce cas de se rappeler que la densité de cime n'est pas équivalente à la densité de couvert estimée sur les cartes écoforestières. En effet, la densité de cime prend en considération les espaces occupés par la lumière à travers la canopée. Et en présence de jeunes tiges, la canopée n'est pas souvent opaque.

Tableau 3. Estimés des moyennes de la densité de cime des essences dans chaque classe

Classe	Type de couvert	Nombre de placettes	PIG		EPN		SAB		RES		PET		BOP		FNC		FI		Total	
			Moy.	IC	Moy.	IC	Moy.	IC	Moy.	IC	Moy.	IC	Moy.	IC	Moy.	IC	Moy.	IC	Moy.	IC
101	Résineux	6	**59**	9	1	9	0	9	61	13	8	9	0	9	2	13	9	13	71	11
102	Résineux	3	**47**	12	1	12	0	12	49	18	1	12	0	12	4	18	1	18	53	15
103	Résineux	3	**18**	12	**16**	12	0	12	34	18	3	12	1	12	0	18	3	18	39	15
104	Résineux	20	2	5	**14**	5	0	5	16	7	2	5	0	5	1	7	2	7	21	7
105	Mélangé(R)	4	**21**	10	**12**	10	3	10	35	16	**13**	10	9	10	9	16	22	16	67	13
106	Mélangé(F)	2	7	14	**11**	14	8	14	29	22	**24**	14	**15**	14	6	22	41	22	75	16
107	Mélangé(F)	7	5	8	**11**	8	0	8	16	12	**30**	8	5	8	**22**	12	36	12	74	10
108	Feuillus	17	3	5	2	5	0	5	5	8	**46**	5	4	5	**34**	8	51	8	89	7

PIG : Pin gris, EPN : Épinette noire, SAB : Sapin baumier, RES : Résineux, BOP : Bouleau blanc, FNC : Feuillus non commerciaux, FI : Feuillus intolérants,

Moy. : Moyenne estimée, IC : Intervalle de confiance.

Les valeurs les plus élevées pour chaque essence sont identifiées en gris

3.1.1.3. Coefficient de distribution en essences des nouvelles classes

Le tableau 4 montre la présence des essences, en termes de coefficient de distribution, dans chacune des 8 nouvelles classes. Ce calcul a été réalisé dans le but de tenter une comparaison temporelle (5-17 ans après feu) de la composition en essences. De façon générale, la comparaison de la densité de cime et du coefficient de distribution montre que les tendances se maintiennent entre ces deux mesures, c'est-à-dire que les classes avec les valeurs les plus élevées de densité de cime ont aussi un coefficient de distribution très élevé :

- **Les classes 101 et 102** sont fortement dominées par le pin gris (très peu d'épinette noire). La présence du peuplier dans la classe 101 est par contre beaucoup plus importante que dans l'analyse de densité de cime (CD_PET = 56 %), ce qui remet en question le statut de strate résineuse pure sur la base du coefficient de distribution.
- **La classe 103** est toujours une classe résineuse constituée en proportion équivalente de pin gris et d'épinette avec une présence marginale d'essences feuillues (CD_FI = 33 %).
- **La classe 104** est toujours une classe résineuse constituée presque exclusivement d'épinette avec une présence marginale d'essences feuillues (CD_FI = 16 %).
- **Les classes 105, 106 et 107** sont toujours des classes mélangées avec présence prédominante du pin gris comme essence résineuse dans 105 et de l'épinette noire dans 106 et 107. Ces trois classes ont un CD résineux et un CD feuillu supérieurs à 80 %.
- **Enfin la classe 108** est bien une classe feuillue constituée de peuplier faux-tremble et de feuillus non commerciaux. Cette classe est la seule où le coefficient de distribution des essences résineuses est faible (26 %).

De plus, on observe systématiquement, pour une même classe et une même essence, des valeurs de coefficient de distribution nettement plus élevées que celles de densité de cime. Ces différences sont très importantes pour l'épinette noire, dont le coefficient de distribution allait de 41 à 94 % dans les classes où la densité de cime variait de 11 à 16 %.

Finalement, selon les valeurs de coefficient de distribution, toutes les classes ont un CD résineux supérieur à 80 %, à l'exception de la classe 108, qui reste feuillue pure (CD_résineux = 26 %). Le

coefficient de distribution des feuillus intolérants est toujours supérieur à 60 %, à l'exception des classes 102, 103 et 104, où il varie de 16 à 33 %.

Il est important de noter que le coefficient de distribution a été calculé à partir de données d'inventaire qui ont été recueillies dans des placettes de 25 m^2, comparativement au coefficient de distribution établi 5 ans après feu, qui provient de placettes de 4 m^2. La taille des placettes a une incidence sur la valeur du CD et les résultats particulièrement élevés de CD 17 ans après feu sont certainement en partie dus à la taille importante des placettes d'inventaire.

Tableau 4. Estimé des moyennes du coefficient de distribution des essences par classe

Classe	Type de couvert	Nombre de placettes	PIG		EPN		SAB		RES		PET		BOP		FNC		FI	
			Moy.	IC	Moy.	IC	Moy.	IC	Moy.	IC	Moy.	IC	Moy.	IC	Moy.	IC	Moy.	IC
101	Résineux	6	**97**	13	15	13	0	13	100	16	**56**	13	0	13	21	13	61	16
102	Résineux	3	**100**	17	11	17	0	17	100	23	**22**	17	0	17	22	17	22	23
103	Résineux	3	**89**	17	**94**	17	0	17	100	23	**22**	17	11	17	0	17	33	23
104	Résineux	20	20	7	**93**	7	0	7	96	11	**14**	7	1	7	2	7	16	11
105	Mélangé	4	**73**	16	**41**	16	9	16	93	19	**68**	16	**32**	16	**36**	16	84	19
106	Mélangé	2	**50**	21	**58**	21	**25**	21	94	22	**67**	21	**58**	21	**50**	21	94	22
107	Mélangé	7	**37**	11	**60**	11	0	11	81	15	**77**	11	**42**	11	**79**	11	92	15
108	Feuillus	17	16	7	16	7	0	7	26	10	**75**	7	**27**	7	**67**	7	85	10

Les valeurs les plus élevées pour chaque essence sont identifiées en gris.

3.1.2. Nouvelle classification semi-dirigée de la végétation du feu de Parent

Les placettes d'inventaires réparties selon les nouvelles classes ont été utilisées comme zones d'entraînement pour la classification semi-dirigée. Ce sont donc 8 classes et 83 zones d'entraînement qui ont été utilisées pour faire la classification semi-dirigée (tableau 5). Toutes les classes possèdent au moins 5 zones d'entraînement et plus de 50 pixels. La classification semi-dirigée a permis de répartir ces classes sur l'ensemble du territoire du feu de Parent (figure 6). Le tableau 6 montre la proportion de chaque classe sur le territoire cartographié.

D'ordre général, les classes résineuses dominent, en occupant 46 % du territoire brûlé, suivies par les classes mélangées (32 %) et la classe feuillue (22 %). La valeur de 55 490 ha représente le masque spatial de végétation qui avait été utilisé pour la classification semi-dirigée (voir section 2.2.2.).

En se basant sur les densités de cime, on retrouve une plus grande proportion de résineux au centre et au nord du feu de Parent. La classe 101 (résineux à pin gris dense) est d'ailleurs l'une des deux classes dominantes sur le territoire, représentant 20 % de la composition forestière du territoire brûlé. De plus, les classes plus pures (101, 102, 103 et 108) semblent former de plus grandes zones homogènes. Enfin, la classe de feuillus purs 108, occupant 22 % du territoire, est bien répartie sur le feu. Les classes mélangées à dominance feuillue (106 et 107) se retrouvent souvent à proximité de la classe feuillue pure (108).

Si l'on s'intéresse à la répartition des différents milieux physiques dans les 8 classes de couvert forestier (tableau 7), on remarque tout d'abord la très forte représentativité du type écologique RS22 (11 600 ha contre moins de 3 000 ha pour tous les autres types écologiques). Cette disproportion entraîne une représentation très souvent majoritaire de ce type écologique chez toutes les classes de végétation. Elle peut par contre surprendre dans le cas de la classe 101, dominée par le pin gris de densité élevée, sachant que ce type écologique, dans des conditions typiques, n'est pas colonisé abondamment par cette espèce. Néanmoins, il est possible de remarquer des tendances intéressantes, notamment que les densités de cime les plus élevées observées pour les milieux sur sables (RE21 et RE24) se retrouvent chez les classes de couvert

résineux avec pin gris (classes 101, 102, 103). Ce résultat confirme donc que les platières de sable sont occupées en majorité par le pin gris. De la même manière, les sols organiques sont les plus présents chez la classe 104, correspondant à la végétation la moins dense, occupée uniquement par l'épinette noire (seule classe où le pin gris ainsi que les feuillus sont absents). Cette végétation est à nouveau tout à fait cohérente avec les tourbières que l'on s'attend à retrouver sur RE39. Enfin, dans les classes dominées par les feuillus (106, 107, 108), on observe une présence supérieure des types écologiques MS22 et RS22, dont les conditions sont particulièrement favorables aux essences feuillues.

Tableau 5. Zones d'entraînement par nouvelle classe

Classe	Nb de zones d'entraînement	Superficie (m^2)	Nombre de pixels
101	5	1 446	58
102	6	1 917	77
103	11	3 448	138
104	19	5 700	228
105	10	2 641	106
106	6	1 434	57
107	6	1 560	62
108	20	5 337	213
Total	83	23 483	939

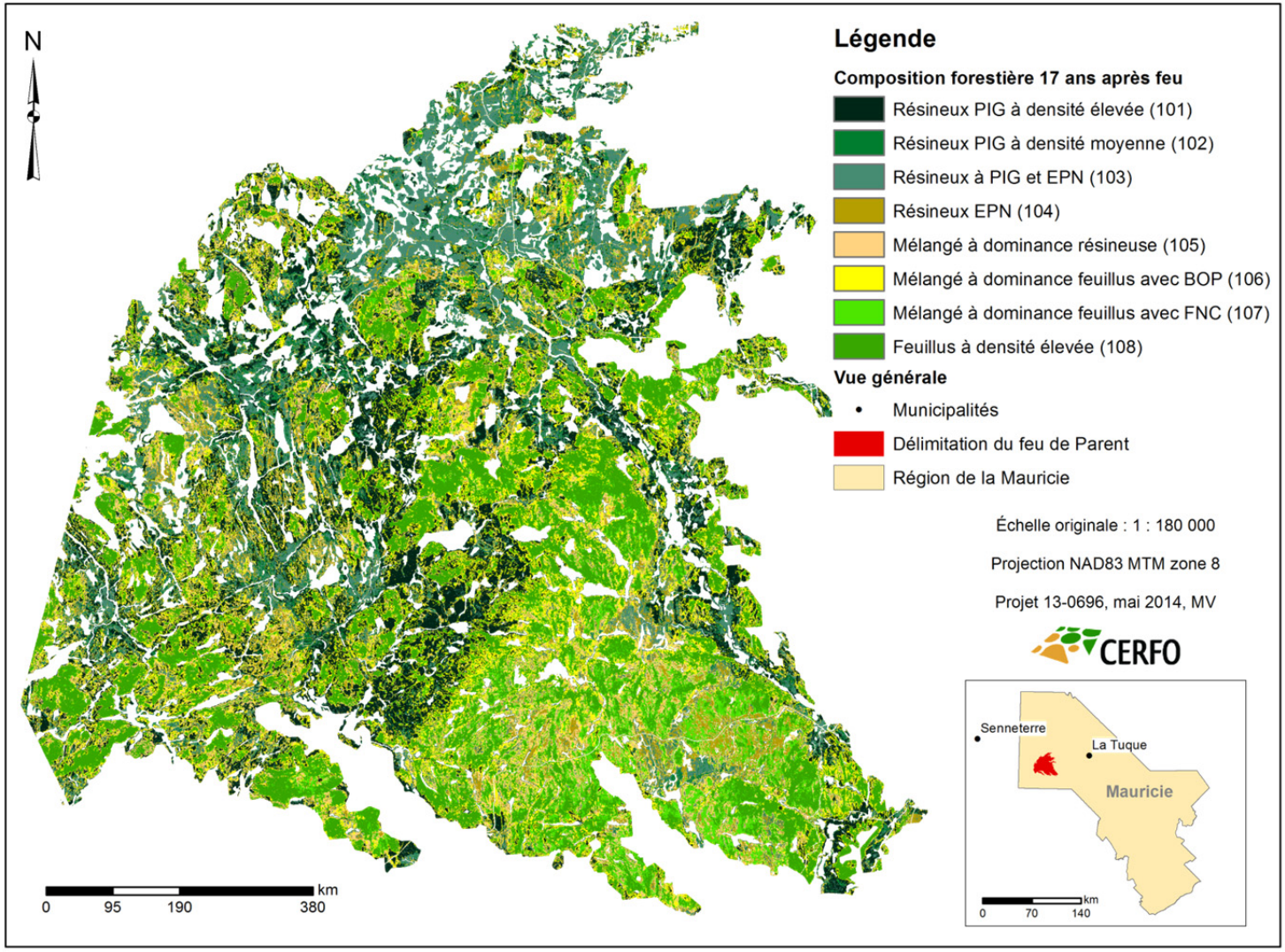


Figure 6. Carte de la classification semi-dirigée du feu de Parent, portrait de la composition forestière 17 ans après feu

Tableau 6. Répartition de la superficie des classes sur le territoire brûlé

Type	Classe	Superficie (ha)	Proportion (%)
Résineux	101	11 287	20
	102	2 595	5
	103	8 873	16
	104	3 038	5
Mélangés	105	6 067	11
	106	8 161	15
	107	3 259	6
Feuillu	108	12 210	22
	Total	55 490	100

Tableau 7. Représentativité (%) des différents milieux dans chaque classe de végétation

	Milieu phyisque								
	Tills épais mésiques			Tills épais subhydriques		Sables mésiques	Sables subhydriques	Sols organiques hydriques	
Classes de végétation	MS22	RS22	RE22	RE25	RS25	RE21	RE24	RE39	Superficie totale (ha)
101 Rés_PIG_dens. élevée	1,7	**49,1**	**23,0**	2,9	2,0	**19,7**	0,7	0,8	5287
102 Rés_PIG_dens. moyenne	0,7	**20,2**	**20,6**	15,5	2,5	**31,0**	4,3	5,3	1241
103 Rés_PIG_EPN_dens. faible	1,0	**21,0**	18,3	16,8	3,5	**28,9**	4,1	6,4	4072
104 Rés_EPN_dens. Tfaible	2,8	**26,4**	8,8	**25,3**	9,6	6,7	4,6	15,8	1213
105 Mél_R_dens. élevée	6,7	**56,1**	7,7	11,6	10,3	2,4	1,4	3,9	2508
106 Mél_F_BOP_dens. élevée	6,9	**68,7**	9,3	4,3	5,0	4,2	0,6	0,9	3650
107 Mél_F_FNC_dens. élevée	**29,7**	**57,5**	0,9	1,9	8,8	0,2	0,2	0,8	1497
108 Feuillus_dens. Télevée	**34,2**	**59,1**	0,7	0,5	5,2	0,2	0,1	0,1	4814
Superficie totale (ha)	2 683	11 638	2 898	1 841	1 220	2 912	380	710	

Note 1 : Seuls les types écologiques ayant été utilisés dans le modèle de prédiction de la régénération 5 ans après feu sont considérés dans cette compilation.
Note 2 : Sont présentées en gras les valeurs supérieures à 20 %.
Note 3 : Les éléments surlignés en jaune sont repris dans le texte.

3.1.3. Évaluation partielle de la classification semi-dirigée

L'évaluation partielle permet d'appliquer une valeur à la qualité de la classification produite. Elle a été faite en deux procédés, d'abord avec les zones de validation et ensuite avec les zones d'entraînement. Pour l'analyse des zones de validation, on dispose de 1 à 2 zones par classe (tableau 8). Pour l'analyse selon les zones d'entraînement, un total de 83 zones sont disponibles (tableau 5).

Le tableau 9 montre des précisions satisfaisantes dans les deux cas. En effet, malgré le faible nombre de zones de validation (12), on obtient un Kappa de 0,68 et une précision de 72 %. Avec

l'utilisation des zones d'entraînement, le Kappa est de 0,82 et la précision de 85 %. La précision démontre que 85 % des pixels sont correctement classifiés selon les pixels de référence (zones d'entraînement). Le coefficient de Kappa de 0,82 explique que la classification est 82 % meilleure qu'une classification totalement due au hasard. Ces résultats rassurent sur la qualité de la classification, qui est qualifiée de bonne. En effet, un Kappa de 0,68 est très proche du seuil de 0,70 et demeure tout de même dans une catégorie de « bonne » classification.

Tableau 8. Zones de validation utilisées pour l'évaluation partielle de la classification semi-dirigée

Classe	Nombre de zones de validation	Superficie (m^2)	Nombre de pixels
101	1	281	11
102	1	113	5
103	2	309	12
104	2	507	20
105	2	452	18
106	1	176	7
107	1	211	8
108	2	508	20
Total	12	2 557	101

Tableau 9. Précision de la classification semi-dirigée

Kappa	Précision (%)	Nb de bandes	Méthode utilisée
0,68	72	4	Zone de validation
0,82	85	4	Zone d'entraînement

Les matrices de confusion permettent d'analyser en détail les classes où des confusions ont été observées. La matrice de confusion basée sur les zones de validation est présentée au tableau 10. L'erreur globale est de 28 %, donc 72 % des pixels ont été correctement classifiés. En ce qui concerne les **erreurs d'omission**, il s'agit d'évaluer si des pixels appartenant à une classe de référence, dans ce cas-ci des zones de validation, ont été correctement classifiés par la classification semi-dirigée. Par exemple, les classes 102 et 105 ont les erreurs les plus fortes : deux pixels sont classifiés en 102 et deux pixels en 103 pour le premier cas, et 7 pixels sont classifiés en 105 et 10 pixels en 106 pour le second cas. Pour ce qui est des **erreurs de**

commission, on détermine si les pixels classifiés par la classification semi-dirigée appartiennent vraiment à ces classes, à partir de la référence (zones de validation). Par exemple, les classes 106 et 107 ont les erreurs les plus importantes, ce qui se traduit par des valeurs faibles du Kappa et réduit la forte tendance générale. En effet, la classe 106 contient beaucoup de pixels appartenant réellement à la classe de référence 105 et la classe 107 est fortement composée (11 pixels sur 19) de la classe de référence 108. À l'exception de la confusion observée entre les classes 106 et 107, ces résultats concordent avec les analyses de signatures spectrales (analyses visuelle et Bhattacharyya), qui ont mis en évidence des similitudes entre les classes 102 et 103 ainsi que 105 et 106.

Tableau 10. Matrice de confusion avec zones de validation comme référence

		Répartition des pixels selon les vraies catégories (référence)										
	Classe	101	102	103	104	105	106	107	108	**Nombre total de pixels**	**Erreurs de commission (%)**	**Kappa estimé**
Catégories produites (classification)	101	11	0	0	0	0	2	0	0	13	15	0,83
	102	0	2	0	0	0	0	0	0	2	0	1,00
	103	0	2	14	0	0	0	0	0	16	13	0,85
	104	0	0	0	18	0	0	0	0	18	0	1,00
	105	0	0	0	0	7	0	0	0	7	0	1,00
	106	0	0	0	0	10	4	0	0	14	**71**	0,24
	107	0	0	0	0	1	0	7	11	19	**63**	0,31
	108	0	0	0	0	0	0	2	10	12	17	0,79
	Nombre total de pixels	11	4	14	18	18	6	9	21	101		
	Erreurs d'omission (%)	0	**50**	0	0	**61**	33	22	52		Erreur globale : 28 %	

La matrice de confusion construite à partir des zones d'entraînement est présentée au tableau 11. Beaucoup plus de pixels de référence sont disponibles et les erreurs d'omission et de commission sont moindres. L'erreur globale est de 15 %, donc 85 % des pixels de référence ont été correctement classifiés. Seule la classe 105 a une erreur d'omission importante (55 %). Une grande partie de ces pixels de référence de classe 105 sont classifiés dans la classe 106 (43). Pour ce qui est de l'erreur de commission, la classe ayant l'erreur la plus importante est la 106. Cette dernière demeure la classe ayant la valeur la plus faible du Kappa. Effectivement, l'erreur de commission est importante (52 %). Environ la moitié des pixels de la classe 106 (55) a bien été

classifiée dans la classe de référence 106. Par contre, on y retrouve aussi beaucoup de pixels de référence de la classe 105 (43). Les deux classes 105 et 106, toutes les deux de composition mélangée, ont aussi présenté des confusions lors de l'analyse des zones de validation.

Tableau 11. Matrice de confusion avec zones d'entraînement comme référence

		Répartition des pixels selon les vraies catégories (référence)										
	Classe	101	102	103	104	105	106	107	108	**Nombre total de pixels**	**Erreurs de commission (%)**	**Kappa estimé**
Catégories produites (classification)	101	53	0	8	5	0	4	0	0	70	24	0,74
	102	0	75	4	1	0	0	0	0	80	6	0,93
	103	1	4	110	17	0	0	0	0	132	17	0,81
	104	0	0	11	199	12	0	0	0	222	10	0,86
	105	0	0	0	0	48	0	4	0	52	8	0,91
	106	3	0	0	1	43	55	2	10	114	**52**	0,45
	107	0	0	0	0	1	0	54	5	60	10	0,89
	108	0	0	0	0	3	0	4	194	201	3	0,96
	Nombre total de pixels	57	79	133	223	107	59	64	209	931		
	Erreurs d'omission (%)	7	5	17	11	**55**	7	16	7		Erreur globale : 15 %	

3.1.4. Portrait de la composition forestière 17 ans après feu, à l'échelle des unités spatiales utilisées pour produire les scénarios d'évolution

Les prédictions 5 ans après feu ont été produites à partir d'un découpage d'unités spatiales combinant le type écologique et l'intensité du feu. Onze combinaisons de types écologiques et intensités de feu (ou regroupement d'intensités), appelées « strates », ont ainsi fait l'objet de prédiction de la régénération 5 ans après feu.

Le découpage des mêmes unités spatiales a ensuite été appliqué sur la classification semi-dirigée, de manière à produire, pour chacune des 11 strates, la proportion moyenne occupée par les 8 classes de végétation 17 ans après feu (tableau 12). Ainsi, le tableau 11 permet d'apprécier la dominance des classes de végétation en fonction des strates. Par exemple, 46 % de la strate RE22_I_II est représentée par la classe 101. Le tableau 13 présente, quant à lui, la densité de cime moyenne des essences dans chaque strate. Pour ces 2 tableaux, l'intervalle de confiance est

plutôt faible pour toutes les valeurs, ce qui implique qu'il y a peu de variation au sein des mêmes strates. L'effectif élevé des échantillons ayant servi au calcul des proportions moyennes explique en partie les faibles valeurs de l'intervalle de confiance.

Tableau 12. Proportion (%) occupée par chaque classe de végétation issue de la classification semi-dirigée dans les 11 strates à l'étude

Strate	Fréquence des unités spatiales	101 Rés_PIG D. élevée		102 Rés_PIG D. moy.		103 Rés_PIG_EPN D. faible		104 Rés_EPN D. Tfaible		105 Mél_R D. élevée		106 Mél_F_BOP D. élevée		107 Mél_F_FNC D. élevée		108 Feuillus D. Télevée		Superficie (ha)
		Moy.	IC	Moy.	IC	Moy.	IC	Moy.	IC	Moy.	IC	Moy.	IC	Moy.	IC	Moy.	IC	
MS22_I	146	7	2	0	0	2	1	1	1	8	2	16	2	11	3	**54**	6	310
MS22_II	803	3	1	0	0	1	0	1	0	5	1	8	1	17	2	**65**	2	2145
RS22_I	844	**20**	1	2	0	9	1	2	0	15	1	**25**	1	4	1	**21**	2	2022
RS22_II	3138	**25**	1	1	0	5	0	2	0	12	1	**22**	1	8	0	**26**	1	8692
RS25_I_II	512	9	1	2	0	10	1	9	1	**21**	1	16	1	11	1	**22**	2	1172
RE21_I_II	889	**43**	2	13	1	**31**	2	2	0	2	0	6	1	0	0	0	0	2313
RE22_I_II	964	**46**	2	9	1	**23**	1	3	0	6	1	12	1	0	0	1	0	2582
RE24_I_II	139	12	3	15	2	**41**	3	13	3	9	2	7	1	1	0	1	0	336
RE25_I	295	11	2	8	1	**34**	2	16	2	18	2	9	1	2	0	1	1	904
RE25_II	386	8	1	12	1	**37**	2	15	2	14	2	9	1	1	0	2	1	880
RE39_I_II	311	7	1	9	1	**37**	2	**25**	3	14	2	5	1	2	0	1	0	678

Les valeurs en gras correspondent aux valeurs supérieures à 20 %.

Tableau 13. Densité de cime (%) occupée par chaque essence dans les 11 strates à l'étude

Strate	PIG		EPN		SAB		RES		PET		BOP		FNC		FI		Total	
	Moy.	IC	Moy.	IC	Moy.	IC	Moy.	IC	Moy.	IC	Moy.	IC	Moy.	IC	Moy.	IC	Moy.	IC
MS22_I	10	2	5	1	2	0	17	2	**35**	2	6	0	**22**	1	**40**	2	**82**	2
MS22_II	7	1	5	0	1	0	12	1	**39**	1	6	0	**26**	1	**44**	1	**83**	1
RS22_I	**21**	1	8	0	3	0	**30**	1	**22**	1	6	0	11	0	**27**	1	**72**	1
RS22_II	**22**	0	7	0	2	0	**29**	0	**24**	0	6	0	13	0	**29**	0	**74**	1
RS25_I_II	15	1	9	0	2	0	**26**	1	**22**	1	6	0	13	1	**27**	1	**68**	1
RE21_I_II	**39**	1	7	0	1	0	**46**	1	7	1	1	0	2	0	7	1	**60**	1
RE22_I_II	**38**	1	7	0	1	0	**45**	1	9	1	3	0	3	0	10	1	**62**	2
RE24_I_II	**25**	2	11	1	1	0	**37**	2	6	2	2	0	3	1	8	2	**49**	3
RE25_I	**22**	2	12	0	1	0	**35**	1	8	1	3	0	4	1	11	1	**52**	2
RE25_II	**22**	1	12	0	1	0	**35**	1	8	1	3	0	4	1	10	1	**53**	2
RE39_I_II	19	1	13	0	1	0	**33**	1	6	1	2	0	3	1	8	1	**46**	2

Les valeurs en gras correspondent aux valeurs supérieures à 20 %.

Les tableaux 12 et 13 mettent en évidence le fait que **le type écologique MS22** (sapinière à bouleau blanc sur texture moyenne et drainage mésique) représente la strate où la classe 108 de feuillus purs est la plus représentée et détient alors la densité de cime en feuillus la plus importante (FI = 40-44 % et FNC=22-26 %). La présence des essences résineuses y est marginale (12-17 %). Ces résultats varient peu selon l'intensité du feu (I contre II).

Le type écologique RS22 (sapinière à épinette noire sur texture moyenne et drainage mésique) est constitué en proportions relativement semblables des classes 101, 106 et 108. Il en ressort une présence à peu près équivalente des essences résineuses (principalement PIG avec 21-22 %; EPN plus marginale avec 7-8 %) et feuillues (principalement PET avec 22-24 % et FNC avec 11-13 %). Peu de différences apparaissent selon l'intensité du feu.

Le type écologique RS25 (sapinière à épinette noire sur texture moyenne et drainage subhydrique) diffère légèrement de RS22, par la présence dominante des classes 105 et 108. Il en découle une présence moindre des résineux (PIG = 15 %; EPN = 9 %) que sur RS22. Le portrait des feuillus est par contre semblable (PET = 22 %; FNC = 13 %). Globalement, les densités de cime des résineux et des feuillus commerciaux s'équivalent, avec une densité de cime totale légèrement plus faible que sur RS22. Notons que si le sapin baumier est identifié comme l'une

des essences dominantes des végétations potentielles MS2 et RS2, il est complètement absent de ces végétations potentielles 17 ans après feu.

Les types écologiques RE21 (pessière noire à mousses sur texture grossière et drainage mésique) **et RE22** (pessière noire à mousses sur texture moyenne et drainage mésique) ont un portrait relativement similaire : dominance de la classe 101 (43-46 %), suivie de la classe 103 qui est plus présente chez RE21 (31 %) que RE22 (23 %). La composition en essences est presque identique, avec 38-39 % de PIG et 7 % d'EPN et très peu de feuillus. Ces types écologiques sont donc largement dominés par les essences résineuses, et plus particulièrement le pin gris.

Les types écologiques RE24 (pessière noire à mousses sur texture grossière et drainage subhydrique) **et RE25** (pessière noire à mousses sur texture moyenne et drainage subhydrique) se distinguent de RE22 et RE21 par une présence supérieure des classes 103, 104 et 105 et une nette diminution de la classe 101. Il en résulte une diminution de la présence du pin gris (PIG = 22-25 %) et une légère augmentation de l'épinette noire (EPN = 11-12 %). Ces types écologiques restent fortement dominés par les résineux, avec une présence des feuillus de l'ordre de 10 % seulement. Les différences de texture du sol (milieu 5 ou 4) ou d'intensité du feu (I contre II) ne semblent pas générer d'écarts dans les proportions d'essences présentes. Ces types écologiques sont parmi ceux qui ont les densités de cime totales les plus faibles, de l'ordre de 50 %.

Le type écologique RE39 (pessière noire à sphaignes sur milieu hydrique) est le type où la classe 104 est la plus présente (25 %). La classe 103 domine (37 %). Ce type est principalement constitué de pin gris (19 %) et d'épinette noire (13 %). Il s'agit d'ailleurs du type écologique où la présence en épinette noire est la plus élevée. La présence des feuillus est très marginale. La densité de cime totale y est la plus faible, soit de 46 %.

Le portrait des onze strates est également présenté sous la forme du coefficient de distribution occupé par chaque essence (tableau 14). On y retrouve les mêmes tendances que celles observées sur la base de la densité de cime, en termes de présence d'espèces dominantes dans chaque strate. Il est par contre noté que les valeurs de coefficient de distribution sont de loin supérieures aux valeurs de densité de cime.

Globalement, l'intensité du feu ne semble pas générer de différence importante en ce qui concerne le portrait de la végétation 17 ans après feu, dans les différents types écologiques à l'étude. Pour RS22 et RS25, des différences de densité de cime maximales de 2 % sont observées entre les intensités I et II. Pour MS22, les différences peuvent atteindre au maximum 5 %. Comme les valeurs de coefficient de distribution sont plus élevées, les différences entre les intensités I et II sont légèrement supérieures, mais ne dépassent jamais 9 %.

Tableau 14. Coefficient de distribution (%) des essences dans les 11 strates à l'étude

	PIG		EPN		SAB		RES		PET		BOP		FNC		FI	
Strate	**Moy.**	**IC**	**Moy.**	**IC**	**Moy.**	**IC**	**Moy.**	**IC**	**Moy.**	**IC**	**Moy.**	**IC**	**Moy.**	**IC**	**Moy.**	**IC**
MS22_I	36	2	32	2	5	2	**56**	2	**70**	2	32	2	**57**	2	**83**	2
MS22_II	28	1	29	1	3	1	48	1	**73**	1	31	1	**63**	1	**85**	1
RS22_I	**59**	1	41	1	8	1	**81**	1	**61**	1	28	1	41	1	**75**	1
RS22_II	**56**	0	36	0	6	0	**77**	1	**64**	0	27	0	44	0	**77**	1
RS25_I_II	**52**	1	48	1	6	1	**79**	1	**59**	1	28	1	42	1	**72**	1
RE21_I_II	**89**	1	45	1	2	1	**99**	1	41	1	8	1	17	1	49	1
RE22_I_II	**85**	1	42	1	4	1	**98**	1	46	1	12	1	21	1	**56**	1
RE24_I_II	**77**	2	**64**	2	3	2	**98**	2	33	2	12	2	14	2	42	2
RE25_I	**71**	1	**64**	1	4	1	**96**	2	39	1	17	1	18	1	49	2
RE25_II	**72**	1	**65**	1	4	1	**96**	1	36	1	15	1	17	1	46	1
RE39_I_II	**67**	1	**70**	1	3	1	**97**	2	33	1	13	1	13	1	41	2

Les valeurs en gras correspondent aux valeurs supérieures à 50 %.

Le coefficient de détermination estimé (R^2) indique que 65, 51 et 54 % de la variation observée a pu être expliquée par le modèle, respectivement pour les estimations des essences individuelles, des essences regroupées (résineux et feuillus intolérants) et de toutes les essences confondues, dans un contexte où l'on souhaiterait extrapoler ces prédictions à d'autres territoires (c'est-à-dire sans contrôle des effets aléatoires).

Quant au coefficient de distribution, le coefficient de détermination estimé (R^2) indique que 77 et 55 % de la variation observée sont expliqués par le modèle, respectivement pour les essences individuelles et regroupées (résineux et feuillus intolérants).

3.2. ÉVOLUTION DU COUVERT FORESTIER ENTRE 5 ET 17 ANS APRÈS FEU

L'évolution de la représentativité des essences entre 5 et 17 ans est plus facile à suivre en comparant deux types de mesures identiques. C'est pour cela qu'il a été décidé de calculer un coefficient de distribution (CD) 17 ans après feu, même si cette mesure n'est pas vraiment utilisée à des fins opérationnelles, dans le cas de peuplements dont la hauteur s'approche de 7 m.

Une comparaison des coefficients de distribution (CD) 5 ans et 17 ans après feu est présentée dans un tableau synthèse (tableau 15). Par contre, il est important de noter que les deux CD n'ont pas été calculés à la même échelle :

- Le CD 5 ans après feu a été calculé à l'échelle de micro-placettes circulaires de 4 m^2 ;
- Le CD 17 ans après feu a été calculé à l'échelle de micro-placettes carrées de 25 m^2.

Une comparaison directe de ces deux calculs est donc difficile à établir, sachant que pour une même situation, les valeurs de CD calculées sur la base de placettes de 25 m^2 sont toujours supérieures à celles calculées sur la base de placettes de 4 m^2.

Tableau 15. Scénarios d'évolution 5-17 ans après feu, coefficient de distribution et densité de la cime des essences par strate

Strate	Années après feu	Coefficient	PIG		EPN		SAB		RES		PET		BOP		FNC		FI		Total	
			Moy.	IC	Moy.	IC	Moy.	IC	Moy.	IC	Moy.	IC	Moy.	IC	Moy.	IC	Moy.	IC	Moy.	IC
MS22_I	**5**	CD	21	17	30	17	6	17	45	19	71	17	54	17			84	19		
	17	CD	36	2	32	2	5	2	56	2	70	2	32	2	57	2	83	2		
		Dens. cime	10	2	5	1	2	0	17	2	35	2	6	0	22	1	40	2	82	2
MS22_II	**5**	CD	29	9	32	9	6	9	44	9	78	9	37	9			80	9		
	17	CD	28	1	29	1	3	1	48	1	73	1	31	1	63	1	85	1		
		Dens. cime	7	1	5	0	1	0	12	1	39	1	6	0	26	1	44	1	83	1
RS22_I	**5**	CD	30	9	51	9	0	9	64	10	53	9	34	9			68	10		
	17	CD	59	1	41	1	8	1	81	1	61	1	28	1	41	1	75	1		
		Dens. cime	21	1	8	0	3	0	30	1	22	1	6	0	11	0	27	1	72	1
RS22_II	**5**	CD	72	8	51	8	0	8	88	9	75	8	26	8			77	9		
	17	CD	56	0	36	0	6	0	77	1	64	0	27	0	44	0	77	1		
		Dens. cime	22	0	7	0	2	0	29	0	24	0	6	0	13	0	29	0	74	1
RS25_I_II	**5**	CD	15	15	39	15	6	15	45	17	57	15	50	15			67	17		
	17	CD	52	1	48	1	6	1	79	1	59	1	28	1	42	1	72	1		
		Dens. cime	15	1	9	0	2	0	26	1	22	1	6	0	13	1	27	1	68	1
RE21_I_II	**5**	CD	41	13	65	13	1	13	79	15	63	13	2	13			63	15		
	17	CD	89	1	45	1	2	1	99	1	41	1	8	1	17	1	49	1		
		Dens. cime	39	1	7	0	1	0	46	1	7	1	1	0	2	0	7	1	60	1
RE22_I_II	**5**	CD	22	18	79	18	2	18	78	20	70	18	4	18			68	20		
	17	CD	85	1	42	1	4	1	98	1	46	1	12	1	21	1	56	1		
		Dens. cime	38	1	7	0	1	0	45	1	9	1	3	0	3	0	10	1	62	2

Strate	Années après feu	Coefficient	PIG		EPN		SAB		RES		PET		BOP		FNC		FI		Total	
			Moy.	IC	Moy.	IC	Moy.	IC	Moy.	IC	Moy.	IC	Moy.	IC	Moy.	IC	Moy.	IC	Moy.	IC
RE24_I_II	**5**	CD	9	14	68	14	3	14	66	16	58	14	5	14			51	16		
	17	CD	77	2	64	2	3	2	98	2	33	2	12	2	14	2	42	2		
		Dens. cime	25	2	11	1	1	0	37	2	6	2	2	0	3	1	8	2	49	3
RE25_I	**5**	CD	17	11	53	11	0	11	58	11	40	11	12	11			45	12		
	17	CD	71	1	64	1	4	1	96	2	39	1	17	1	18	1	49	2		
		Dens. cime	22	2	12	0	1	0	35	1	8	1	3	0	4	1	11	1	52	2
RE25_II	**5**	CD	11	16	93	16	4	16	90	17	72	16	22	16			77	17		
	17	CD	72	1	65	1	4	1	96	1	36	1	15	1	17	1	46	1		
		Dens. cime	22	1	12	0	1	0	35	1	8	1	3	0	4	1	10	1	53	2
RE39_I_II	**5**	CD	28	14	40	14	2	14	49	16	20	14	11	14			26	16		
	17	CD	67	1	70	1	3	1	97	2	33	1	13	1	13	1	41	2		
		Dens. cime	19	1	13	0	1	0	33	1	6	1	2	0	3	1	8	1	46	2

CD : coefficient de distribution (*stocking*)

Dens. cime : densité de la cime

3.2.1. Présence du pin gris

La comparaison du CD 5 ans et 17 ans après feu met en évidence **un écart positif important entre les deux estimations : le portrait 17 ans après feu est nettement supérieur à celui établi 5 ans après feu dans les 11 strates à l'étude**. Cet écart est presque systématiquement très important, en particulier pour les strates de végétation potentielle RE2 (pessière noire à mousses) et RE3 (pessière noire à sphaignes) où le CD à 17 ans prend des valeurs très élevées, comprises entre 67 et 89 %, alors que le CD_5 ans était généralement très faible (de 10-30 %), à l'exception de RE21_I_II où le CD_5 ans = 41 %.

Seule une strate voit le CD se maintenir (MS22_I), autour de 30 %.

Une autre strate voit la présence du pin gris légèrement diminuer (RS22_II) entre les 2 estimations. Il s'agit de la strate où la valeur de CD_5 ans était la plus élevée, égale à 72 %. Elle diminue à 56 % après 17 ans et se retrouve à 17 ans dans une situation comparable aux deux autres strates sur végétation potentielle RS2, avec des valeurs de l'ordre de 50-60 %. L'intensité du feu semble donc avoir un effet sur l'évolution du coefficient de distribution.

3.2.2. Présence de l'épinette noire

La comparaison du CD 5 ans et 17 ans après feu met en évidence **le maintien d'un CD en épinette noire dans les mêmes ordres de grandeur, et ce, dans la plupart des strates.**

Dans quatre strates, le CD en épinette noire 17 ans après feu est plus faible que celui estimé 5 ans après feu : RS22_II (passage de 51 à 36 %), RE21_I_II (de 65 à 45 %), RE22_I_II (de 79 à 42 %) et RE25_II (de 93 à 65 %). RE22_I_II et RE25_II représentent les strates où la présence de l'épinette noie à 5 ans est la plus élevée.

Dans un cas seulement, RE39_I_II, le CD 17 ans après feu est supérieur au CD estimé à 5 ans, passant de 40 à 70 %. Avec un CD de 70 %, RE39_I_II devient la strate avec la plus grande présence d'épinette noire à 17 ans.

3.2.3. Présence du sapin baumier

La quasi-absence du sapin baumier 5 ans après feu se maintient 17 ans après feu, puisque son coefficient de distribution ne dépasse jamais 8 %.

3.2.4. Présence du peuplier faux-tremble

Les valeurs du CD de peuplier faux-tremble 5 et 17 ans après feu sont relativement semblables dans les strates de végétation potentielle mélangée de sapinière à bouleau blanc (MS22_I et MS22_II), avec une présence de l'ordre de 70-80 %, ainsi que dans les strates de végétation potentielle résineuse à sapinière à épinette noire (RS22_I, RS22_II et RS25_I_II), avec une présence de l'ordre de 55-75 %.

Dans les strates sur végétation potentielle résineuse à pessières noires (RE21_I_II, RE22_I_II, RE24_I_II, RE25_I, RE25_II et RE39P_I_II), on observe généralement des valeurs de CD 17 ans après feu inférieures au portrait établi 5 ans après feu, de l'ordre de 25 %.

3.2.5. Présence du bouleau blanc

Le bouleau blanc, beaucoup moins présent que le peuplier faux-tremble 5 ans après feu, a des valeurs de CD 17 ans après feu semblables aux valeurs établies 5 ans après feu, autour de 10-20 % dans les strates de végétation potentielle RE2 et RE3, et autour de 30 % pour les strates de végétation potentielle MS2 et RS2.

Deux strates font exception, soit celles où le CD à 5 ans est le plus élevé, de l'ordre de 50 % : MS22_I et RS25_I_II.

4. APPLICATION DES SCÉNARIOS D'ÉVOLUTION 17 ANS APRÈS FEU AUX FEUX AYANT BRÛLÉ EN 2010

Les scénarios d'évolution naturelle 17 ans après feu ont été appliqués aux six feux de la Mauricie ayant brûlé en 2010 (# 267, 269, 270, 274, 276 et 281). Le tableau 13 a servi de référence pour associer une densité de cime par essence à chacune des 11 strates pour lesquelles les scénarios sont disponibles et que l'on retrouve dans les feux de 2010. Rappelons que les scénarios concernent une évolution naturelle de la végétation, sans intervention anthropique. Ces résultats permettent d'estimer la densité de cime des essences principales (pin gris, épinette noire, sapin baumier, résineux, peuplier faux-tremble, bouleau blanc, feuillus non commerciaux, feuillus intolérants, total des essences) sur un horizon de 15-20 ans.

Sont présentées dans cette section, pour chaque feu de 2010, une cartographie de la densité de cime des essences tel qu'estimée 17 ans après feu. Le nombre de classes représentées varie de 1 à 5, selon l'étendue des valeurs de la densité. Les essences représentées sont le pin gris, l'épinette noire, le peuplier faux-tremble, le bouleau blanc et les feuillus non commerciaux. Le sapin baumier n'a pas été représenté sous forme de carte puisque sa densité de cime est très faible et varie peu. Il est à noter que les cartes représentent seulement les unités spatiales correspondant aux 11 strates pour lesquelles des prédictions sont disponibles. Les autres portions des feux ne font l'objet d'aucune estimation sur un horizon de 15-20 ans.

De plus, il est important de rappeler que la variable utilisée pour décrire le couvert est la densité de cime, qui diffère de la densité de couvert telle qu'elle est évaluée dans les cartes écoforestières. En effet, l'évaluation de la densité des cimes réalisée sur le terrain prend en considération les espaces occupés par d'autres classes d'occupation du sol visibles du ciel à travers la canopée, alors que la densité de couvert estimée sur les cartes écoforestières correspond à une projection au sol du contour extérieur de la cime des arbres. En présence d'un couvert arborescent qui n'est pas totalement opaque, comme cela est le cas chez des jeunes tiges âgées de 15 ans, la densité de cime est donc systématiquement inférieure à une estimation de la densité du couvert. Cette remarque est importante à considérer lors de la lecture des résultats présentés pour chaque feu et explique que les valeurs de densité totale de cime ne dépassent jamais 60 %.

4.1. FEU 269

La superficie productive brûlée (peuplements dont l'intensité du feu est de classe I ou II) du feu 269 couvre 10 120 ha. Les principales strates de ce territoire pour lesquelles des prédictions sont disponibles sont RE22_I_II (20 % de la superficie productive brûlée), RS22_I (16 %), MS22_I (12 %) et RS22_II (11 %) (tableau 16).

Les modèles élaborés permettent de prédire la densité de cime 17 ans après feu pour chaque essence sur près de 81 % de la superficie productive brûlée (tableau 16) :

- **Le pin gris** (19,4 %) et le **peuplier faux-tremble** (16,2 %) **sont les deux essences qui sont majoritaires dans le couvert,** en termes de densité de cime. Le pin gris occupe surtout la strate RE22_I_II, strate qui domine ce feu. Le peuplier faux-tremble, quant à lui, est majoritaire sur MS22_I et RS22_II.
- **Suivent les feuillus non commerciaux** avec 9 % de densité.
- **L'épinette noire et le bouleau sont marginaux**, avec respectivement 5,8 et 3,8 %.
- La densité de cime totale en essences commerciales est de 56,2 %.

Les figures 7 et 8 montrent les cartes du pin gris et de l'épinette noire, puis celles du peuplier faux-tremble, du bouleau blanc, et des feuillus non commerciaux, respectivement.

Tableau 16. Proportions (%) occupées par les 11 strates à l'étude sur la superficie productive brûlée du feu 269

Strate	Nb unités spatiales	Superficie (ha)	Proportion du feu (%)
MS22_I	930	1219	12
MS22_II	320	700	7
RE21_I_II	406	689	7
RE22_I_II	1193	2053	20
RE24_I_II	43	44	0
RE25_I	253	393	4
RE25_II	109	113	1
RE39_I_II	36	57	1
RS22_I	1393	1648	16
RS22_II	598	1092	11
RS25_I_II	148	170	2
Autres	1273	1941	19
Total	6702	10120	100

Tableau 17. Densités de cime (%) occupée par les principales essences sur le territoire brûlé productif du feu 269 ayant fait l'objet de prédictions

Superficie totale brûlée productive (ha)	Proportion du feu avec prédictions (%)	PIG	EPN	SAB	RES	PET	BOP	FNC	FI	Total
10 120	81	**19,4**	5,8	1,3	25,7	**16,2**	3,8	9,0	19,1	56,2

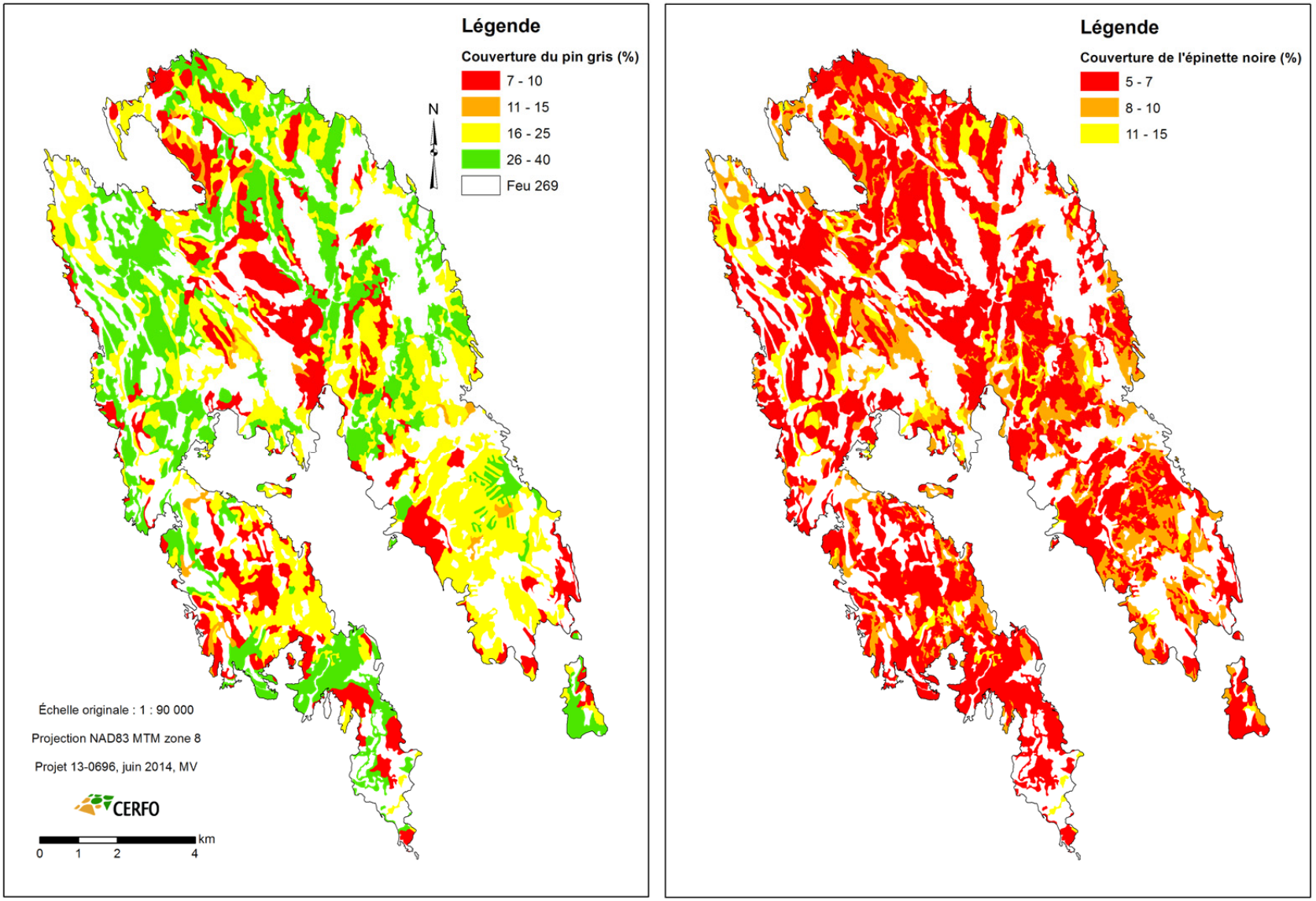


Figure 7. Densités de cime des essences résineuses (pin gris et épinette noire) prédites 17 ans après le feu 269

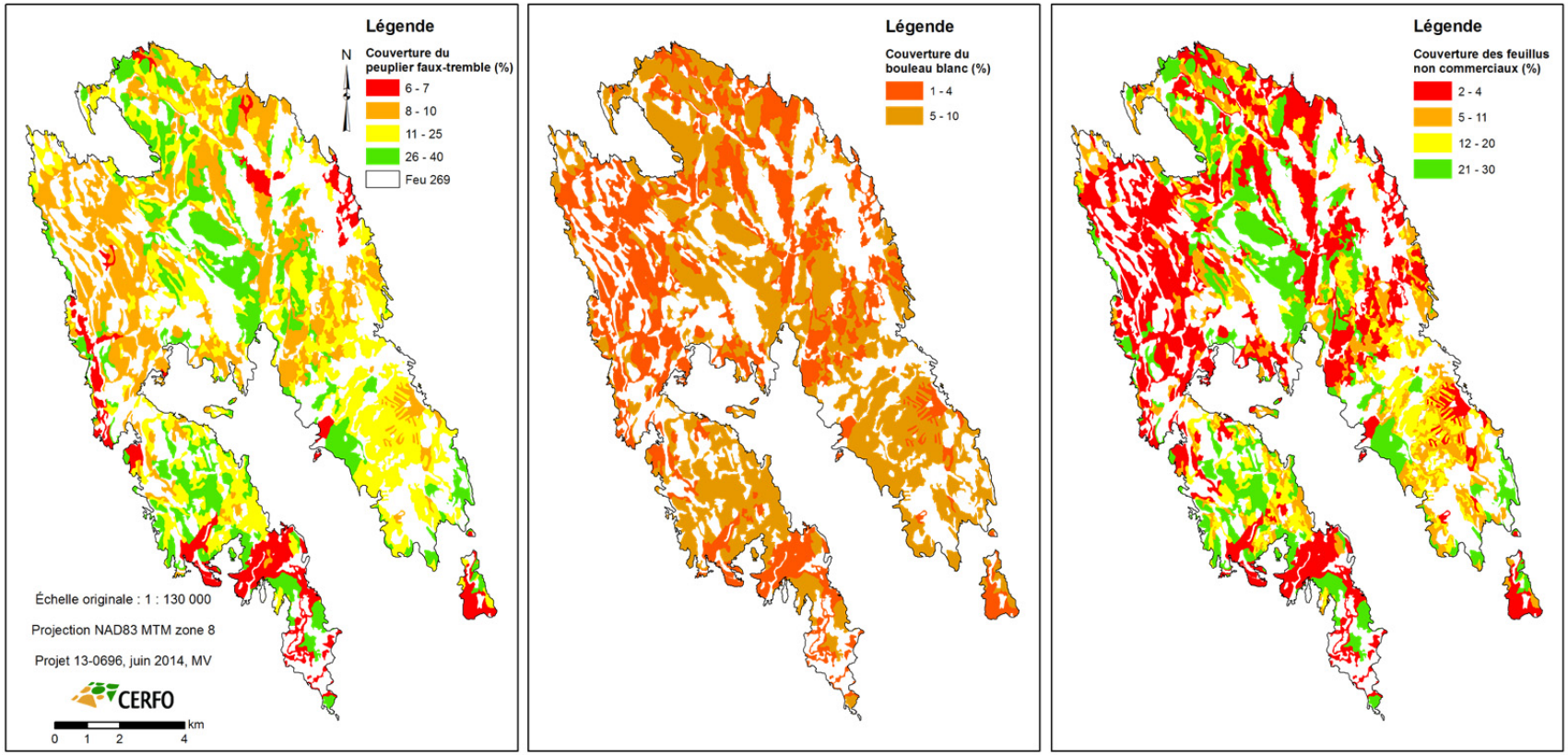


Figure 8. Densités de cime des essences feuillues (peuplier faux-tremble, bouleau blanc et feuillus non commerciaux) prédites 17 ans après le feu 269

4.2. FEU 270

La superficie productive brûlée (peuplements dont l'intensité du feu est de classe I ou II) du feu 270 couvre 3 769 ha. Les principales strates de ce territoire pour lesquelles des prédictions sont disponibles sont RE22_I_II (27 % de la superficie productive brûlée), RS22_I (15 %), MS22_I (14 %) et RE21_I_II (14 %) (tableau 18).

Les modèles élaborés permettent de prédire la densité de cime 17 ans après feu pour chaque essence, sur près de 91 % de la superficie productive brûlée (tableau 19) :

- **Le pin gris** (24,1 %) et le **peuplier faux-tremble** (14,7 %) **sont les deux essences qui sont majoritaires dans le couvert,** en termes de densité de cime. Le pin gris occupe surtout la strate RE22_I_II, strate qui domine ce feu et RE21_I_II. Le peuplier faux-tremble quant à lui, est majoritaire sur MS22_I et RS22_I.
- **Suivent les feuillus non commerciaux** avec 7,8 % de densité.
- **L'épinette noire et le bouleau sont marginaux**, avec respectivement 6,9 et 3,6 %.
- La densité de cime totale en essences commerciales est de 59,6 %.

Les figures 9 et 10 montrent les cartes du pin gris et de l'épinette noire puis celles du peuplier faux-tremble, du bouleau blanc, et des feuillus non commerciaux, respectivement.

Tableau 18. Proportions (%) occupées par les 11 strates à l'étude sur la superficie productive brûlée du feu 270

Strate	Nb unités spatiales	Superficie (ha)	Proportion du feu (%)
MS22_I	367	534	14
MS22_II	91	119	3
RE21_I_II	284	515	14
RE22_I_II	612	1003	27
RE24_I_II	106	127	3
RE25_I	144	194	5
RE25_II	44	62	2
RE39_I_II	95	137	4
RS22_I	369	558	15
RS22_II	85	110	3
RS25_I_II	51	50	1
Autres	204	358	9
Total	2452	3769	100

Tableau 19. Densités de cime (%) des principales essences sur le territoire brûlé productif du feu 270 ayant fait l'objet de prédictions

Superficie totale brûlée productive (ha)	Proportion du feu avec prédictions (%)	PIG	EPN	SAB	RES	PET	BOP	FNC	FI	Total
3 769	91	**24,1**	6,9	1,3	31,5	**14,7**	3,6	7,8	17,4	59,6

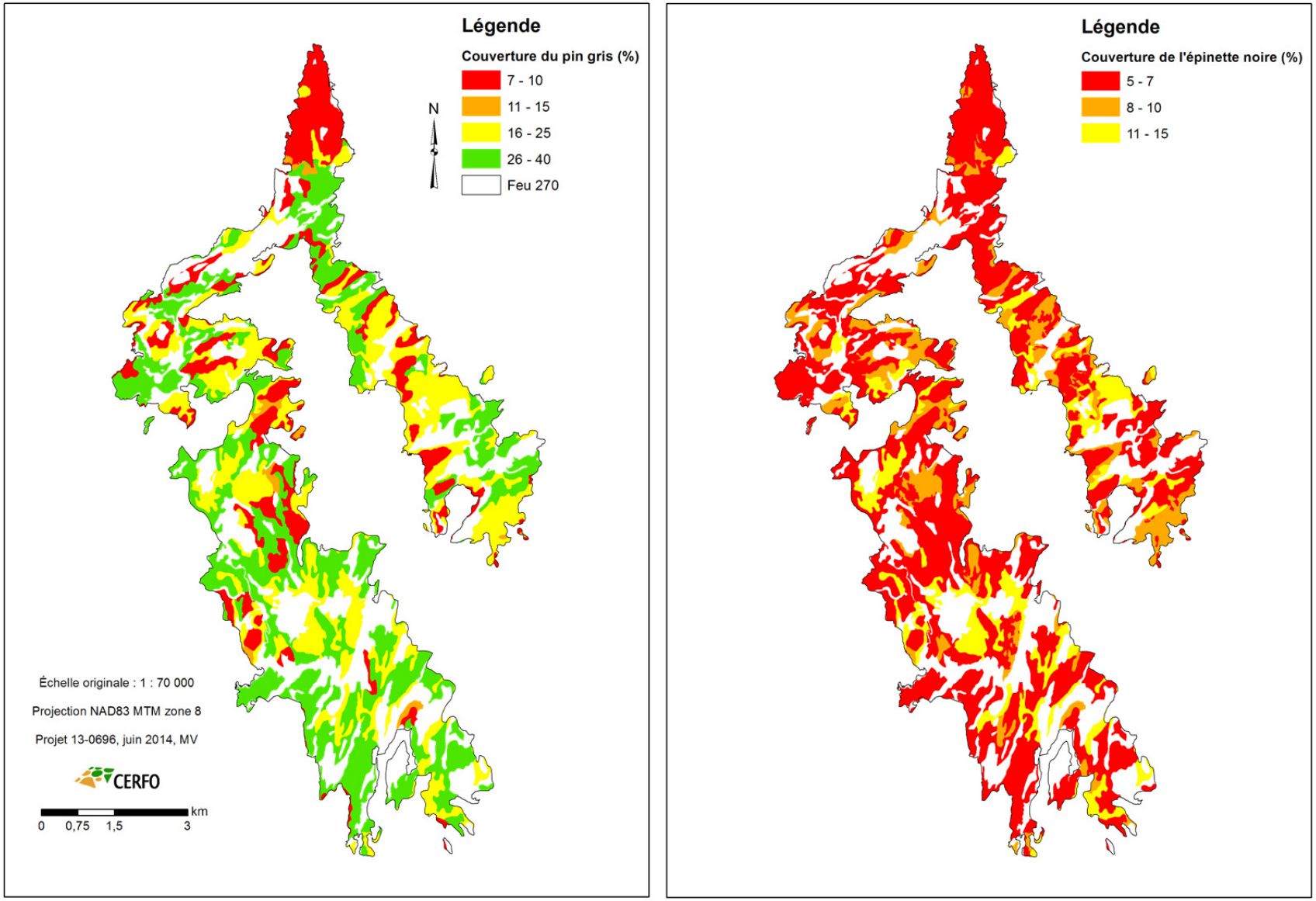


Figure 9. Densités de cime des essences résineuses (pin gris et épinette noire) prédites 17 ans après le feu 270

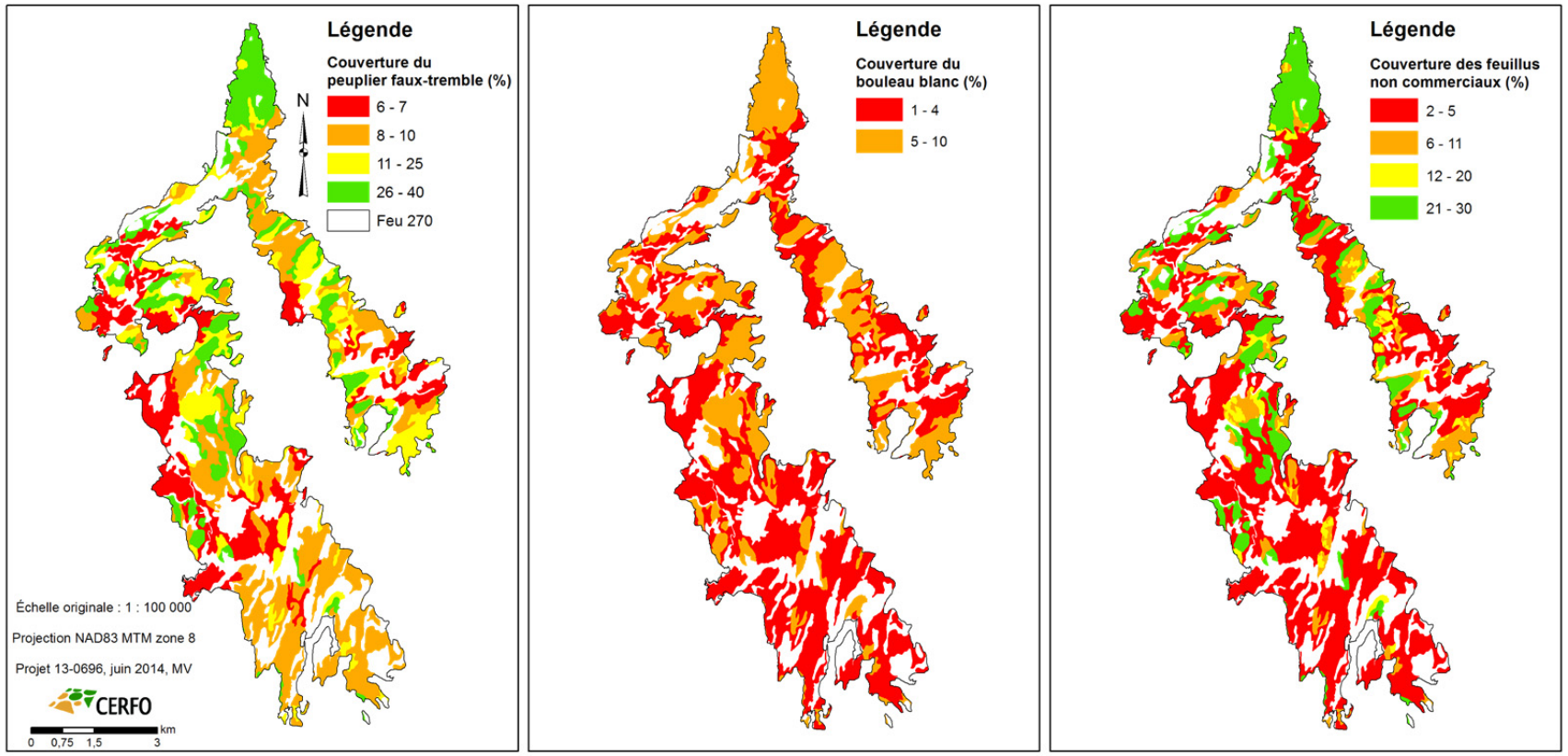


Figure 10. Densités de cime des essences feuillues (peuplier faux-tremble, bouleau blanc et feuillus non commerciaux) prédites 17 ans après le feu 270

4.3. FEU 274

La superficie productive brûlée (peuplements dont l'intensité du feu est de classe I ou II) du feu 274 couvre 17 695 ha. Les principales strates de ce territoire pour lesquelles des prédictions sont disponibles sont MS22_II (20 % de la superficie productive brûlée), MS22_I (16 %) et RE21_I_II (10 %) (tableau 20).

Les modèles élaborés permettent de prédire la densité de cime 17 ans après feu pour chaque essence, sur près de 78 % de la superficie productive brûlée (tableau 21) :

- **Le peuplier faux-tremble** (19,3 %) et le **pin gris** (14,8 %) **sont les deux essences qui sont majoritaires dans le couvert**.
- Le peuplier faux-tremble occupe surtout les strates MS22_I et MS22_II, strates qui dominent ce feu. Le pin gris, quant à lui, est majoritaire sur RE21_I_II.
- **Suivent les feuillus non commerciaux** avec 11,8 % de densité.
- **L'épinette noire et le bouleau sont marginaux**, avec respectivement 5,1 et 3,8 %.
- La densité de cime totale en essences commerciales est de 56,5 %.

Les figures 11 et 12 montrent les cartes du pin gris et de l'épinette noire puis celles du peuplier faux-tremble, du bouleau blanc, et des feuillus non commerciaux, respectivement.

Tableau 20. Proportions (%) occupées par les 11 strates à l'étude sur la superficie productive brûlée du feu 274

Strate	Nb unités spatiales	Superficie (ha)	Proportion du feu (%)
MS22_I	2186	2748	16
MS22_II	1119	3615	20
RE21_I_II	1078	1836	10
RE22_I_II	705	1227	7
RE24_I_II	169	288	2
RE25_I	268	323	2
RE25_II	150	274	2
RE39_I_II	76	98	1
RS22_I	1172	1439	8
RS22_II	656	1434	8
RS25_I_II	297	457	3
Autres	2722	3956	22
Total	10598	17695	100

Tableau 21. Densités de cime (%) occupée par les principales essences sur le territoire brûlé productif du feu 274 ayant fait l'objet de prédictions

Superficie totale brûlée productive (ha)	Proportion du feu avec prédictions (%)	PIG	EPN	SAB	RES	PET	BOP	FNC	FI	Total
17 695	78	**14,8**	5,1	1,1	20,4	**19,3**	3,8	**11,8**	22,5	56,5

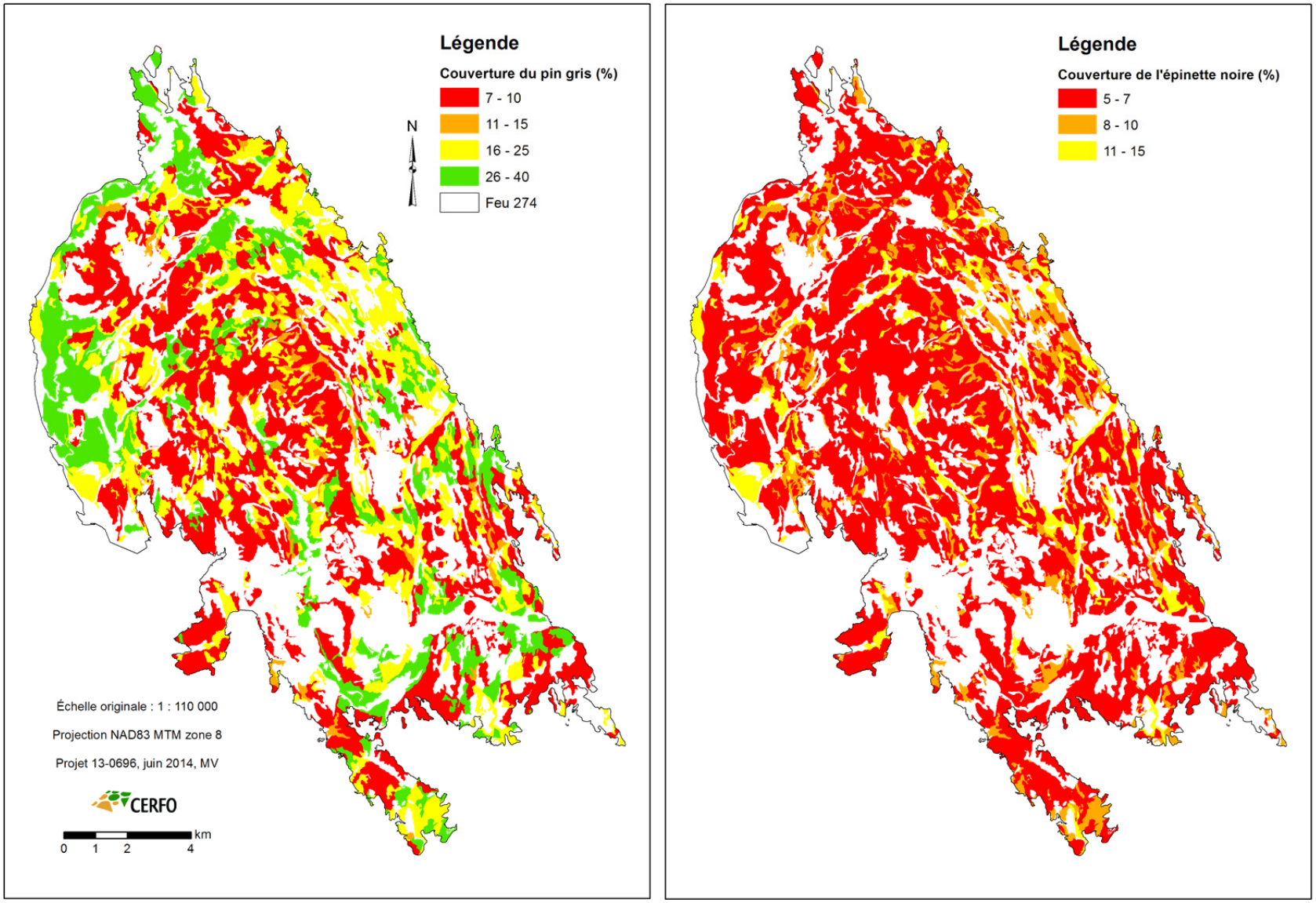


Figure 11. Densités de cime des essences résineuses (pin gris et épinette noire) prédites 17 ans après le feu 274

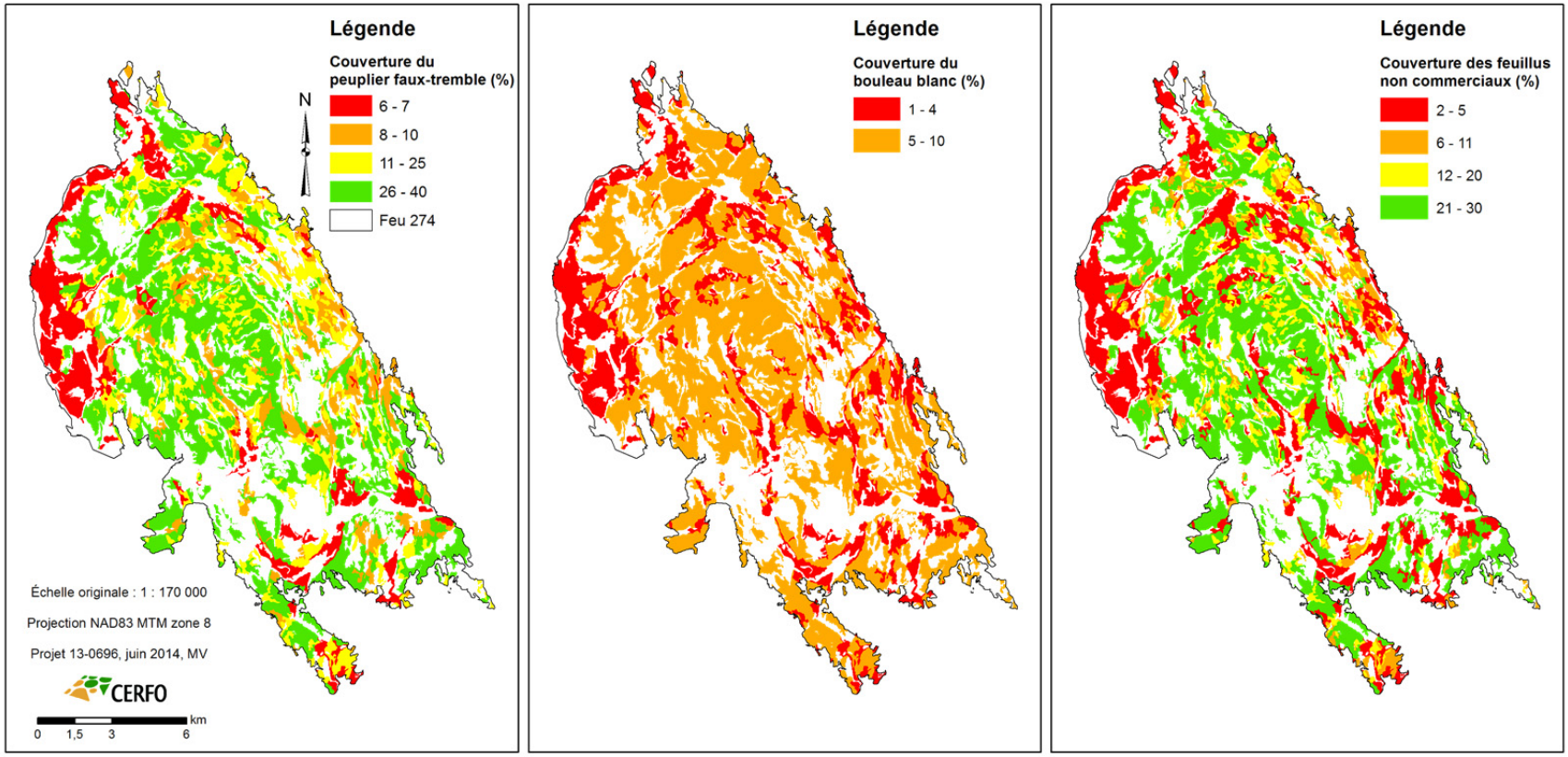


Figure 12. Densités de cime des essences feuillues (peuplier faux-tremble, bouleau blanc et feuillus non commerciaux) prédites 17 ans après le feu 274

4.4. FEU 276

La superficie productive brûlée (peuplements dont l'intensité du feu est de classe I ou II) du feu 276 couvre 3 380 ha. Les principales strates de ce territoire pour lesquelles des prédictions sont disponibles sont RS22_I (22 % de la superficie productive brûlée), RS22_II (14 %), RE21_I_II (13 %) et MS22_I (10 %) (tableau 22).

Les modèles élaborés permettent de prédire la densité de cime 17 ans après feu pour chaque essence, sur près de 79 % de la superficie productive brûlée (tableau 23) :

- **Le pin gris** (18,4 %) et le **peuplier faux-tremble** (16,2 %) **sont les deux essences qui sont majoritaires dans le couvert**.
- Le pin gris occupe surtout la strate RE21_I_II. Le peuplier faux-tremble, quant à lui, est majoritaire sur RS22_II et MS22_I.
- **Suivent les feuillus non commerciaux** avec 9 % de densité.
- **L'épinette noire et le bouleau sont marginaux**, avec respectivement 5,6 et 3,9 %.
- La densité de cime totale en essences commerciales est de 55,2 %.

Les figures 13 et 14 montrent les cartes du pin gris et de l'épinette noire puis celles du peuplier faux-tremble, du bouleau blanc, et des feuillus non commerciaux, respectivement.

Tableau 22. Proportions (%) occupées par les 11 strates à l'étude sur la superficie productive brûlée du feu 276

Strate	Nb unités spatiales	Superficie (ha)	Proportion du feu (%)
MS22_I	318	345	10
MS22_II	99	182	5
RE21_I_II	259	429	13
RE22_I_II	135	260	8
RE24_I_II	48	59	2
RE25_I	35	64	2
RE25_II	5	8	0
RE39_I_II	17	25	1
RS22_I	707	740	22
RS22_II	280	487	14
RS25_I_II	48	65	2
Autres	508	717	21
Total	2459	3380	100

Tableau 23. Densités de cime (%) occupée par les principales essences sur le territoire brûlé productif du feu 276 ayant fait l'objet de prédictions

Superficie totale brûlée productive (ha)	Proportion du feu avec prédictions (%)	PIG	EPN	SAB	RES	PET	BOP	FNC	FI	Total
3 380	79	**18,4**	5,6	1,3	24,6	**16,2**	3,9	9,0	19,2	55,2

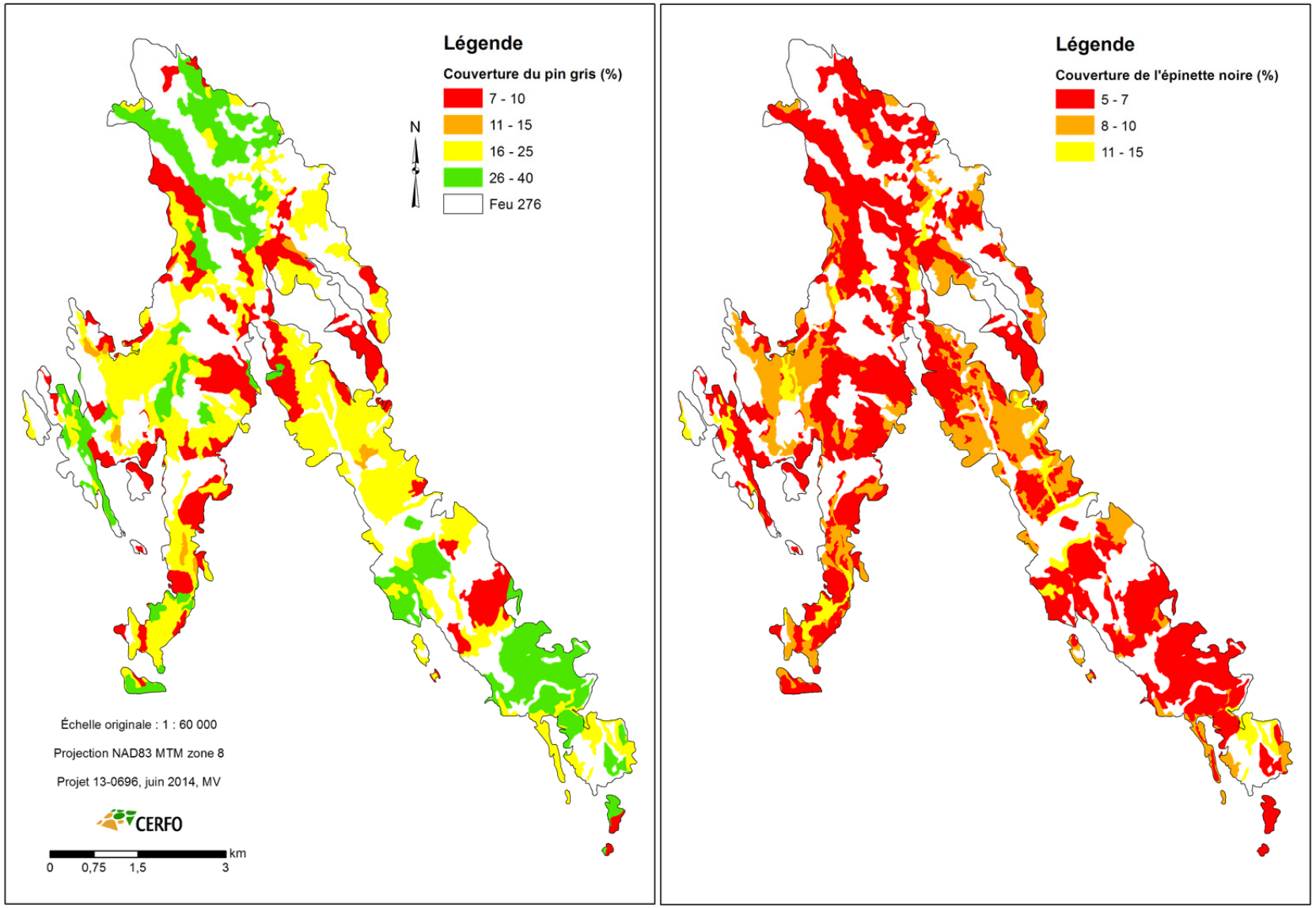


Figure 13. Densités de cime des essences résineuses (pin gris et épinette noire) prédites 17 ans après le feu 276

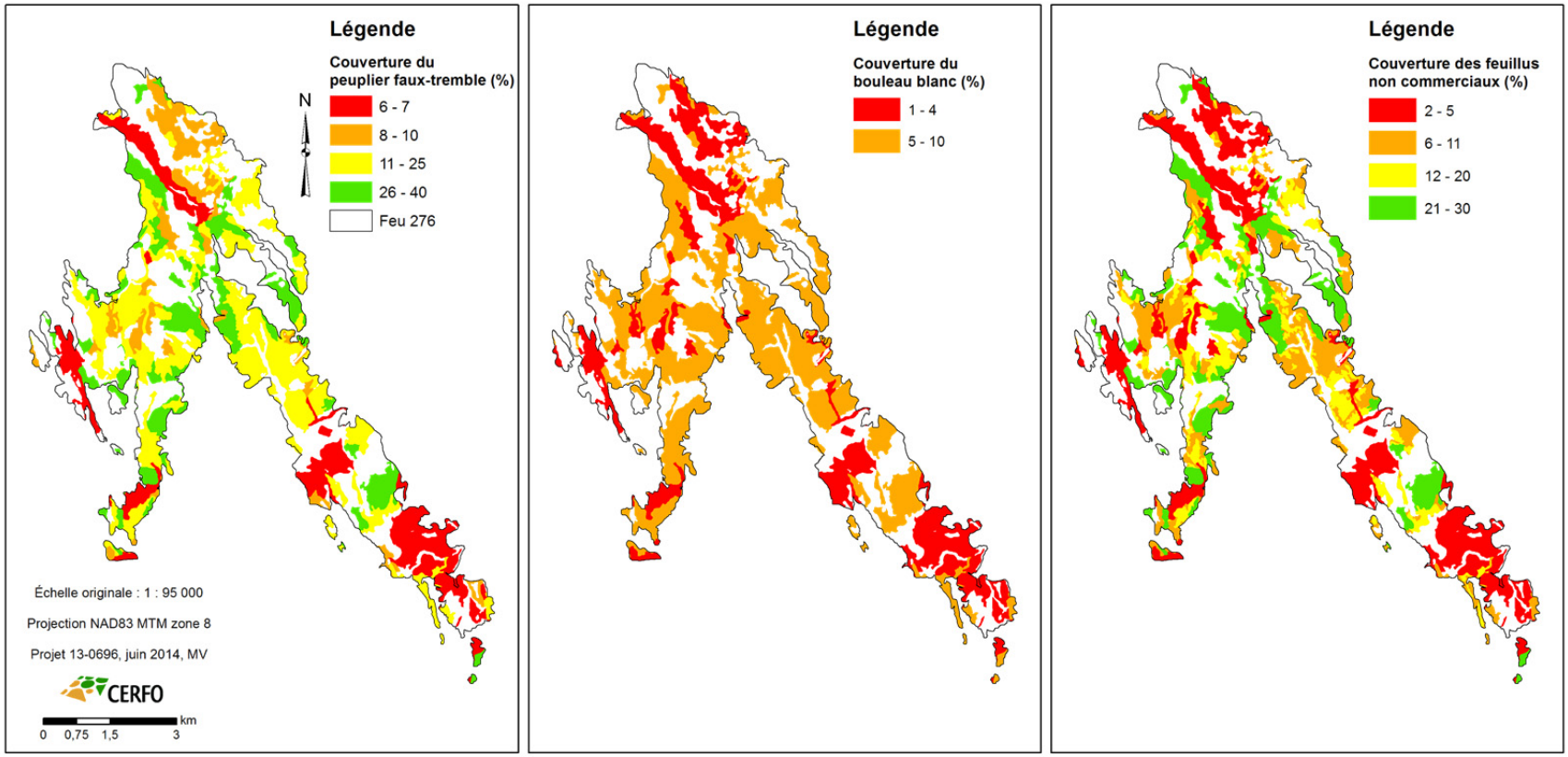


Figure 14. Densités de cime des essences feuillues (peuplier faux-tremble, bouleau blanc et feuillus non commerciaux) prédites 17 ans après le feu 276

4.5. FEU 281

La superficie productive brûlée (peuplements dont l'intensité du feu est de classe I ou II) du feu 281 couvre 100 823 ha. Les principales strates de ce territoire pour lesquelles des prédictions sont disponibles sont RS22_I (24 % de la superficie productive brûlée), RS22_II (15 %) et RE22_I_II (14 %) (tableau 24).

Les modèles élaborés permettent de prédire la densité de cime 17 ans après feu pour chaque essence, sur près de 80 % de la superficie productive brûlée (tableau 25) :

- **Le pin gris** (19,4 %) et le **peuplier faux-tremble** (15,5 %) **sont les deux essences qui sont majoritaires dans le couvert**.
- Le pin gris occupe surtout la strate RE22_I_II. Le peuplier faux-tremble, quant à lui, est majoritaire sur RS22_I et RS22_II.
- **Suivent les feuillus non commerciaux** avec 8,3 %.
- **L'épinette noire et le bouleau sont marginaux**, avec respectivement 5,9 et 3,9 %.
- La densité de cime totale en essences commerciales est de 55,3 %.

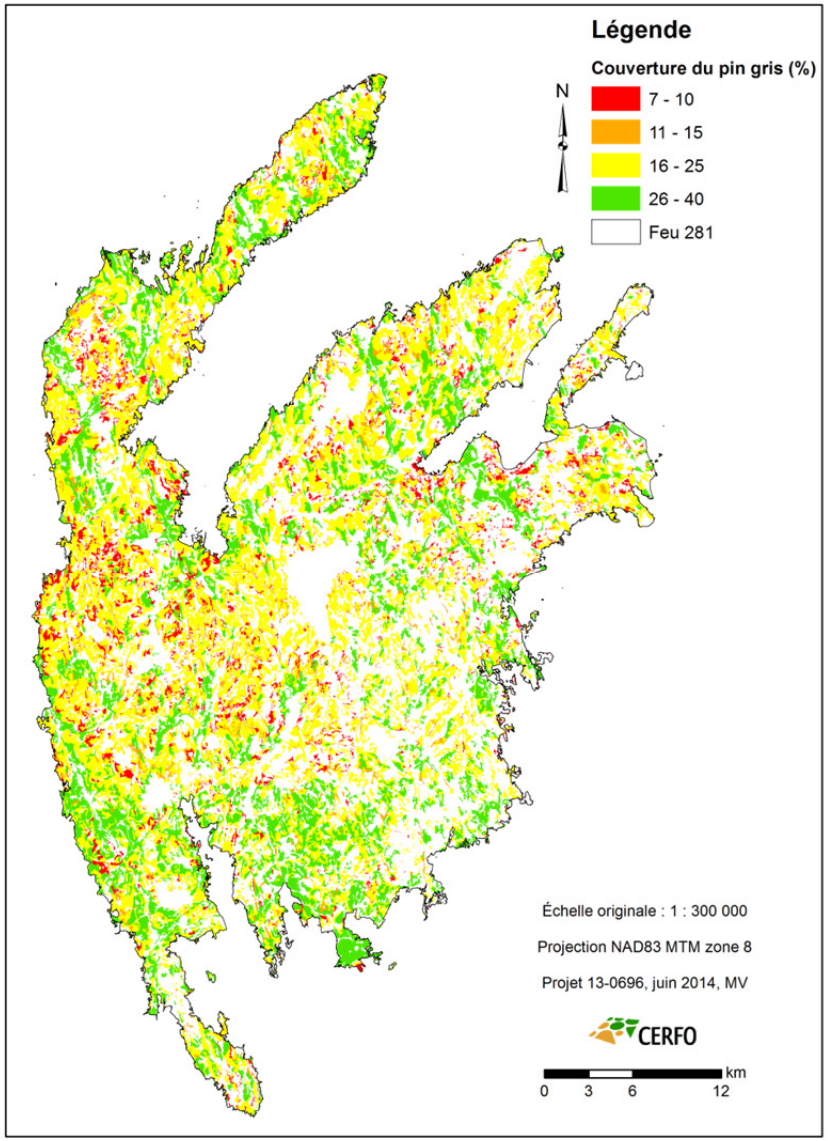
Les figures 15 et 16 montrent les cartes du pin gris et de l'épinette noire puis celles du peuplier faux-tremble, du bouleau blanc, et des feuillus non commerciaux, respectivement.

Tableau 24. Proportions (%) occupées par les 11 strates à l'étude sur la superficie productive brûlée du feu 281

Strate	Nb unités spatiales	Superficie (ha)	Proportion du feu (%)
MS22_I	5249	5851	6
MS22_II	3055	4367	4
RE21_I_II	4625	8366	8
RE22_I_II	8975	13873	14
RE24_I_II	739	938	1
RE25_I	1974	2627	3
RE25_II	1210	1193	1
RE39_I_II	1209	1212	1
RS22_I	16924	24109	24
RS22_II	9807	14636	15
RS25_I_II	3251	3603	4
Autres	14480	20048	20
Total	71498	100823	100

Tableau 25. Densités de cime (%) occupée par les principales essences sur le territoire brûlé productif du feu 281 ayant fait l'objet de prédictions

Superficie totale brûlée productive (ha)	Proportion du feu avec prédictions (%)	PIG	EPN	SAB	RES	PET	BOP	FNC	FI	Total
100 823	80	**19,4**	5,9	1,4	25,9	**15,5**	3,9	8,3	18,5	55,3



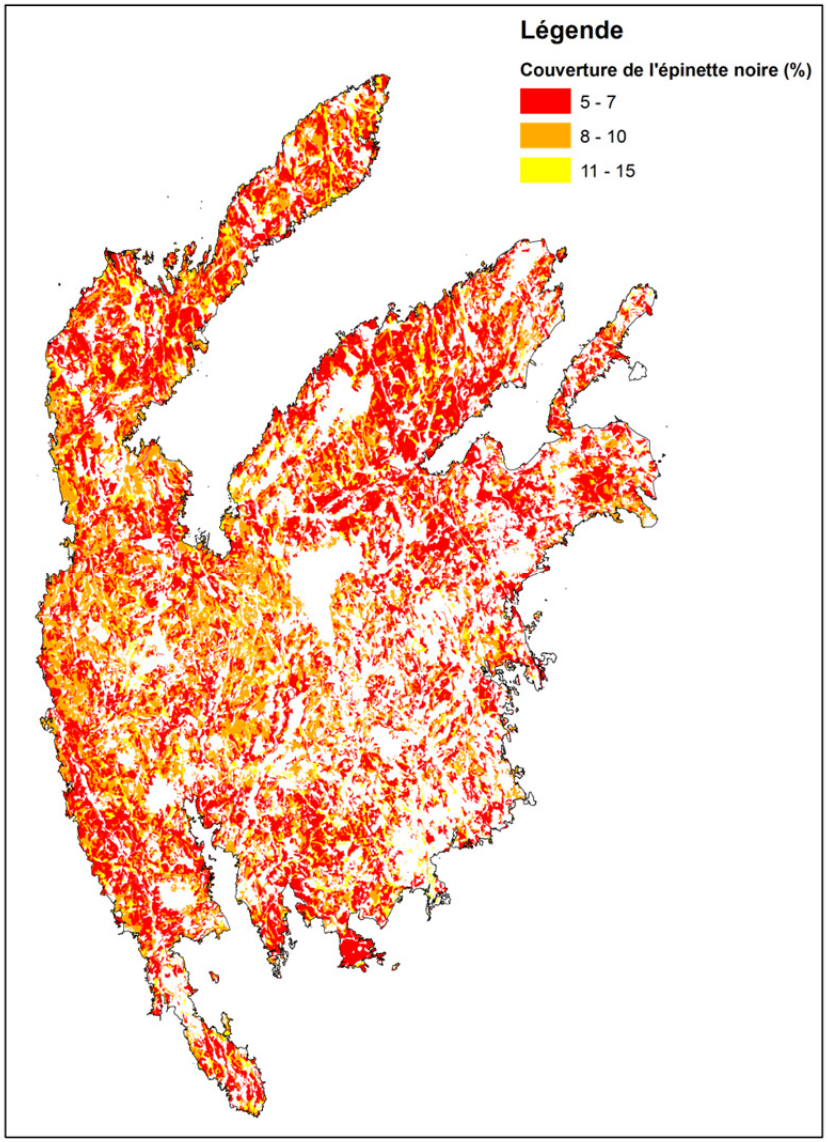


Figure 15. Densités de cime des essences résineuses (pin gris et épinette noire) prédites 17 ans après le feu 281

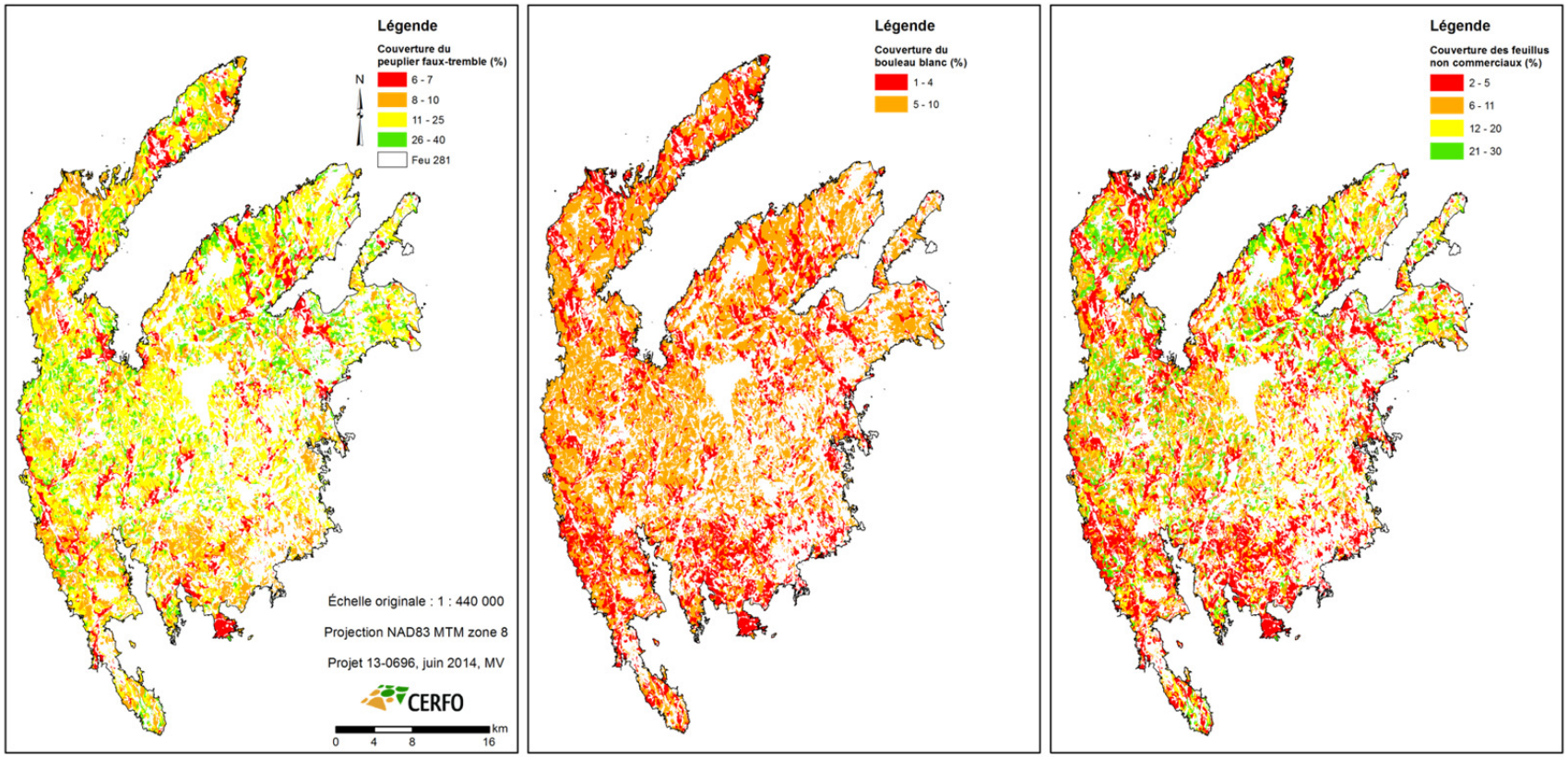


Figure 16. Densités de cime des essences feuillues (peuplier faux-tremble, bouleau blanc et feuillus non commerciaux) prédites 17 ans après le feu 281

4.6. FEU 267

Notons pour commencer que le feu 267 est situé à l'extrémité nord du domaine de la sapinière à bouleau jaune. Il sort donc du cadre strict d'application des modèles de prédiction, développés pour être appliqués exclusivement dans le domaine de la sapinière à bouleau blanc. En l'absence de modèles de prédiction construits pour le domaine de la sapinière à bouleau jaune, on pourra utiliser les résultats ici présents car ce feu se retrouve très près de la limite septentrionale du domaine de la sapinière à bouleau blanc. Par contre, il faut être conscient que cette extrapolation peut entraîner certaines erreurs ou approximations supplémentaires.

La superficie productive brûlée du feu 267 (peuplements dont l'intensité du feu est de classe I ou II) couvre 3 593 ha. Les principales strates de ce territoire pour lesquelles des prédictions sont disponibles sont MS22_I (25 % des superficies productives brûlées), RE21_I_II (10 %), RE22_I_II (9 %) et RS22_I (9 %) (tableau 26) :

Les modèles élaborés permettent de prédire la densité de cime 17 ans après feu pour chaque essence sur près de 74 % de la superficie productive brûlée (tableau 27) :

- **Le peuplier faux-tremble** (16,9 %) **et le pin gris** (15,4 %) **sont les deux essences qui sont majoritaires dans le couvert**. Le peuplier faux-tremble occupe surtout la strate MS22_I, strate qui domine ce feu. Le pin gris, quant à lui, est majoritaire sur RE21_I_II et RE22_I_II.
- **Suivent les feuillus non commerciaux** avec 10 % de densité.
- **L'épinette noire et le bouleau sont marginaux**, avec respectivement 5,2 et 3,6 %.
- La densité de cime totale en essences commerciales est de 52,9 %.

Les figures 17 et 18 montrent les cartes densité de cime pour le pin gris, l'épinette noire, le peuplier faux-tremble, le bouleau blanc et les feuillus non commerciaux.

Tableau 26. Proportions (%) occupées par les 11 strates à l'étude sur la superficie productive brûlée du feu 267

Strate	Nb unités spatiales	Superficie (ha)	Proportion du feu (%)
MS22_I	472	913	25
MS22_II	108	186	5
RE21_I_II	136	364	10
RE22_I_II	147	331	9
RE24_I_II	41	79	2
RE25_I	62	100	3
RE25_II	19	13	0
RE39_I_II	21	23	1
RS22_I	239	329	9
RS22_II	84	153	4
RS25_I_II	127	175	5
Autres	460	927	26
Total	1916	3593	100

Tableau 27. Densités de cime (%) occupées par les principales essences sur le territoire brûlé productif du feu 267 ayant fait l'objet de prédictions

Superficie totale brûlée productive (ha)	Proportion du feu avec prédictions (%)	PIG	EPN	SAB	RES	PET	BOP	FNC	FI	Total
3593	74	**15,4**	5,2	1,1	21,0	**16,9**	3,6	**10,0**	19,8	52,9

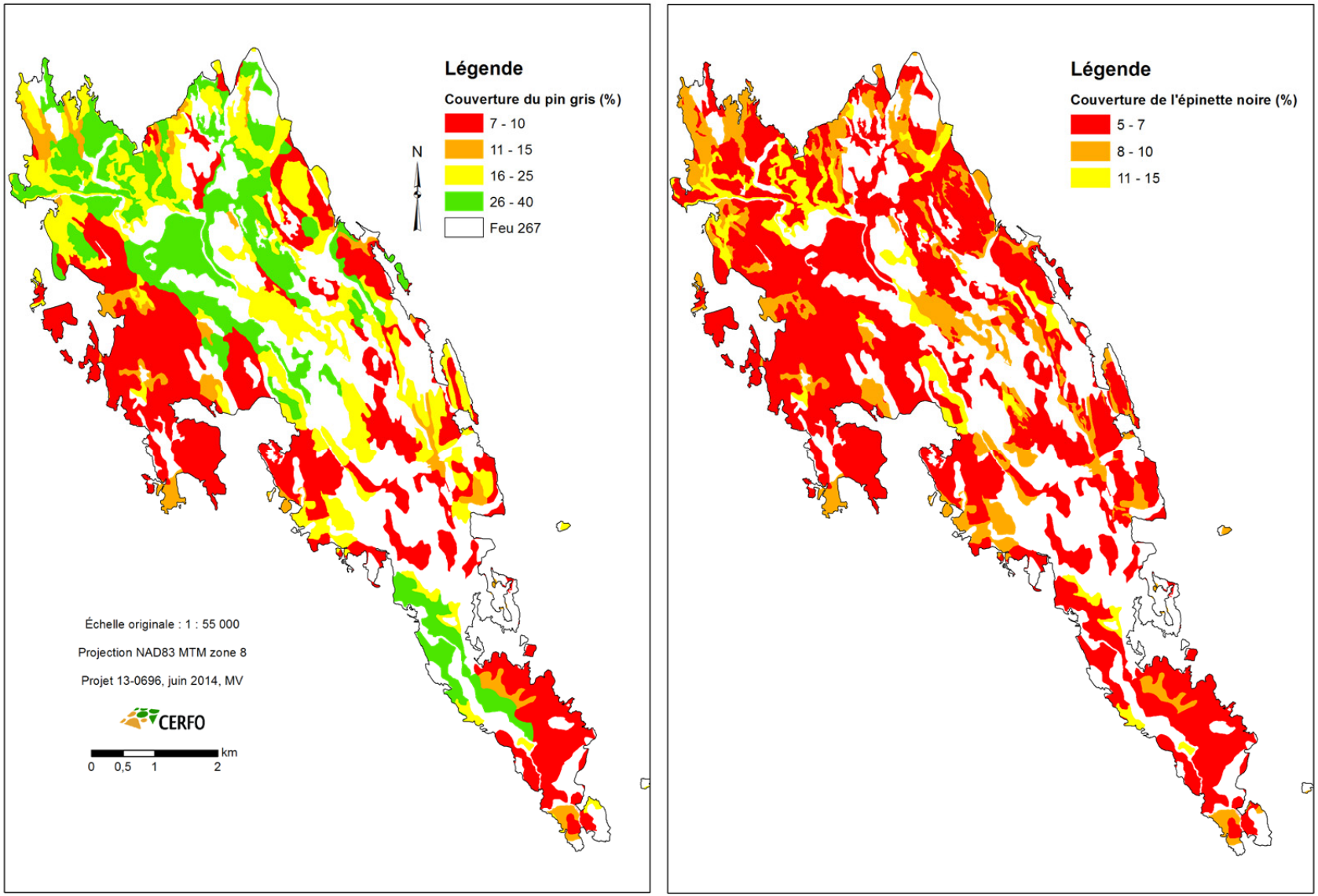


Figure 17. Densités de cime des essences résineuses (pin gris et épinette noire) prédites 17 ans après le feu 267

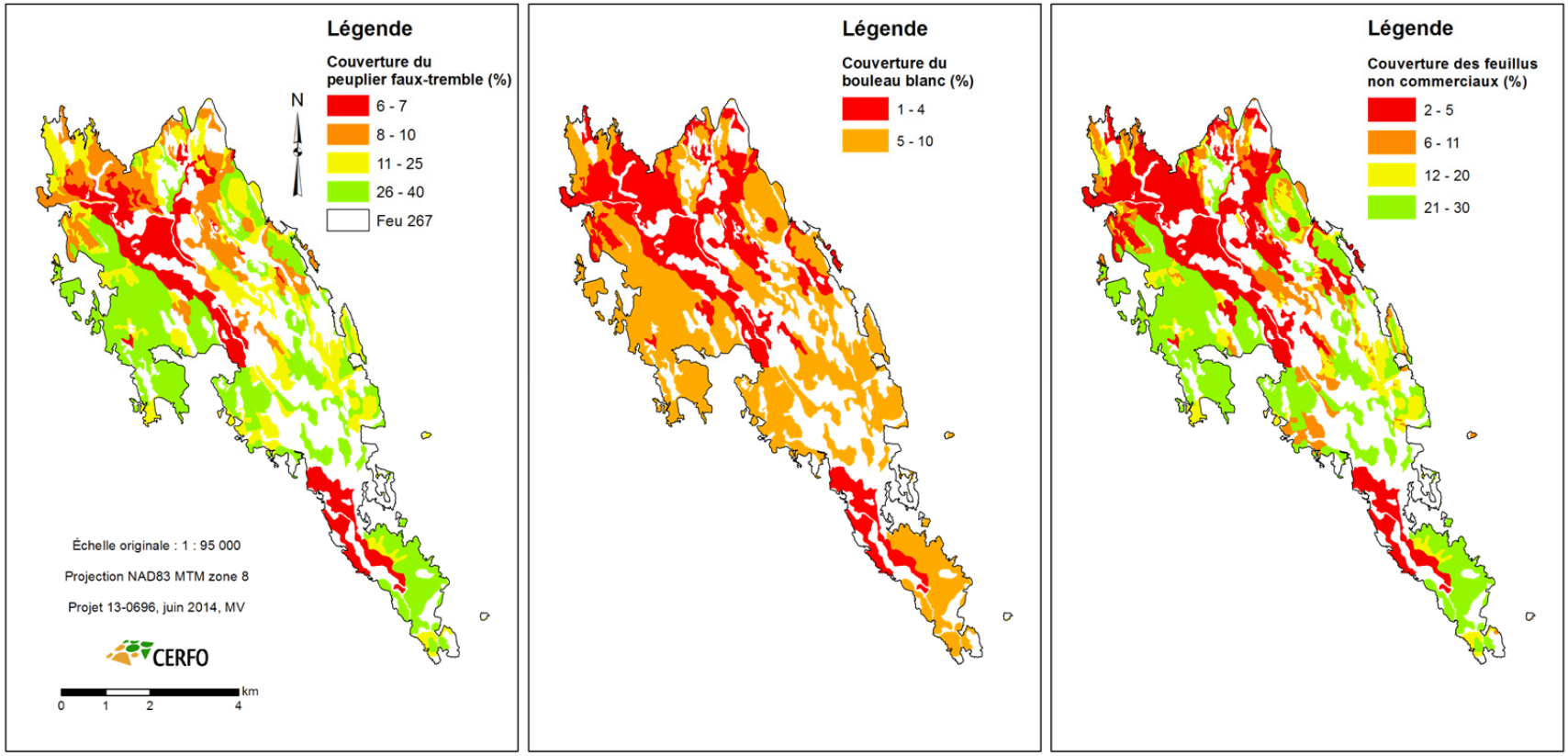


Figure 18. Densités de cime des essences feuillues (peuplier faux-tremble, bouleau blanc et feuillus non commerciaux) prédites 17 ans après le feu 267

5. DISCUSSION

La discussion est orientée de manière à répondre aux hypothèses de travail.

Plusieurs mentions sur les mécanismes de régénération des essences présentes après feu sont présentées succinctement pour alimenter la discussion. Il est recommandé de se référer à la revue de littérature sur l'autécologie des principales espèces commerciales présentes sur le territoire d'étude, qui est présentée dans Côté *et al.* (2012) pour davantage d'information.

5.1. PORTRAIT DU COUVERT FORESTIER 17 ANS APRÈS FEU ISSU D'UNE CLASSIFICATION SEMI-DIRIGÉE

<u>Hypothèse 1</u> : Il est possible de produire une classification du couvert forestier de qualité satisfaisante permettant de distinguer les essences forestières commerciales, à partir d'une classification semi-dirigée d'une image RapidEye.

<u>Réponse</u> : OUI, partiellement.

L'hypothèse 1 est corroborée au moins partiellement, dans la mesure où la classification semi-dirigée a permis d'identifier des regroupements d'essences (8 classes de végétation) avec une précision satisfaisante. Par contre, il n'a pas été possible de classifier la végétation à l'essence près, à partir d'une image RapidEye. Distinguer avec précision différentes essences forestières seulement à partir d'analyses d'images satellitaires est un exercice généralement difficile et les résultats ne sont pas toujours probants. La confusion pourrait s'expliquer par l'utilisation de bandes assez larges qui peuvent inclure alors les signatures spectrales de plusieurs essences. Ainsi, les études récentes proposent très souvent une combinaison de plusieurs technologies, telles que les images multispectrales et le lidar (Holmgren *et al*., 2008; Dalponte *et al*., 2008).

Comme il est très difficile de distinguer la densité de cime d'essences individuelles seulement à partir des images satellitaires (Holmgren *et al.,* 2008), une méthode indirecte a été privilégiée. Ainsi, les classes étant composées de plusieurs essences, leur proportion a été inférée à partir de compilations de relevés d'inventaire sur le terrain. Cet exercice présente néanmoins des limites,

car il s'agit d'une estimation globale, appliquée à l'échelle d'un grand territoire, mais qui est basée sur une faible quantité d'échantillons par classe.

La méthode classique pour évaluer la qualité d'une classification consiste à bâtir cette évaluation à partir de zones de validation qui n'ont pas été utilisées lors de l'exercice de classification semi-dirigée. Selon cette méthode, le nombre d'échantillons de zones de validation utilisé est faible (12 zones de validation correspondant à 101 pixels). Toutefois, l'évaluation obtenue présente une précision globale de 72 % (tableau 9), ce qui est assez élevé, malgré le faible nombre de zones utilisé et leur superficie réduite. Ce constat rassure sur la qualité élevée de la classification semi-dirigée. Une seconde évaluation est proposée car elle permet d'augmenter le nombre de points d'échantillonnage de contrôle, en utilisant cette fois-ci les zones d'entraînement (83 zones couvrant 931 pixels) (tableau 9). L'évaluation partielle de la classification en utilisant les zones de validation montre des résultats supérieurs (85 % de précision), ce qui s'explique par l'emploi de davantage de points de contrôle et surtout de zones d'entraînement, qui ont-elles-mêmes été utilisées pour construire la classification. L'obtention d'une classification semi-dirigée de bonne qualité confirme qu'il est possible de réaliser, à partir d'images satellitaires, une cartographie de classes du couvert forestier, établie selon des relevés d'inventaire.

Certaines imprécisions peuvent toutefois survenir lors de la classification semi-dirigée. Les matrices de confusion et les analyses spectrales démontrent en effet des confusions entre certaines classes (tableaux 10 et 11) :

- Classes 102 (composition résineuse de PIG de densité moyenne) et 103 (composition résineuse de PIG et EPN de densité faible) : erreur d'omission élevée selon la méthode d'évaluation par les zones de validation et confusion des signatures spectrales.
- Classes 105 (composition mélangée dominée par les résineux de densité élevée) et 106 (composition mélangée dominée par les feuillus avec présence de BOP de densité élevée) : erreurs d'omission élevées selon les deux méthodes d'évaluation, erreur de commission élevée selon la méthode d'évaluation par les zones de validation et confusion des signatures spectrales.
- Classes 106 (composition mélangée dominée par les feuillus avec présence de BOP de densité élevée) et 107 (composition mélangée dominée par les feuillus avec présence

de FNC de densité élevée) : erreur de commission élevée selon la méthode d'évaluation par les zones de validation.

Les confusions observées entre certaines classes pourraient s'expliquer de trois manières, soit : (1) des situations relativement similaires en termes de composition en essences, entre les classes présentant des confusions, (2) la présence occasionnelle de milieux différents dans une même classe et (3) des erreurs liées à l'utilisation d'une autre image RapidEye au nord du territoire, pour laquelle aucun point de contrôle n'a été fait.

Situations relativement similaires entre les classes concernées

- Les classes 102 et 103 sont deux classes constituées presque exclusivement d'essences résineuses (densités de cime des feuillus intolérants et feuillus non commerciaux inférieures à 5 %). La composition résineuse varie entre les deux classes, mais la différence provient de la proportion relative occupée par 2 essences principales, le pin gris et l'épinette noire (présence exclusive du pin gris (47 %) dans 102 et présence équivalente en pin gris (19 %) et en épinette noire (16 %) dans 103). La densité de cime des essences résineuses regroupées présente, entre ces deux classes, un écart de 14 % seulement, ce qui est inférieur à la valeur de l'intervalle de confiance (19 %). De plus, le nombre de pixels disponibles pour l'évaluation des erreurs d'omission de la classe 102 selon la méthode d'évaluation par les zones de validation est très faible (4 pixels), ce qui explique aussi la valeur élevée des erreurs.
- Les classes 105 et 106 constituent, quant à elles, un continuum parmi les classes de composition mélangée. Les classes constituées de plusieurs essences sont parmi les plus difficiles à distinguer. La classe 105 est composée principalement de pin gris (22 %), de peuplier faux-tremble (13 %) et d'épinette noire (11 %). Dans la classe 106, on retrouve surtout du peuplier (26 %), du bouleau à papier (15 %) et de l'épinette noire (12 %). Les essences présentes dans ces deux classes varient légèrement, mais leurs proportions sont toujours relativement faibles, presque toujours inférieures à 20 %, ce qui peut également expliquer la difficulté à les distinguer.
- Enfin, les classes 107 et 108 sont les deux classes les plus feuillues. La classe 108 a une densité de cime en essences résineuses évaluée à 5 % et la 107 à 15 %. Un faible

écart de seulement 10 % distingue donc ces deux classes en ce qui concerne la présence des essences résineuses. La densité de cime des essences feuillues varie également entre ces deux classes, la 107 ayant une présence moindre de peuplier faux-tremble et de feuillus commerciaux et une densité de cime totale un peu plus faible (74 % contre 89 % pour la classe 108). Mais globalement, ces deux classes ont des compositions qui se ressemblent beaucoup, ce qui explique les confusions observées.

La présence occasionnelle de milieux physiques différents

En présence d'une faible densité de cime, la signature spectrale peut être influencée non seulement par la végétation en place mais aussi par le milieu physique qui la supporte (ex : milieu humide, platière de sable ou tills glaciaires) (Jenson, 2005). Ainsi, la nature du milieu pourrait interférer avec l'interprétation de la végétation présente lors de classification semi-dirigée.

L'utilisation d'une autre image au nord

Enfin, il est aussi possible qu'il y ait de plus grandes erreurs de classification au nord du feu, car cette partie était couverte par une image RapidEye prise en 2010 (figure 3), qui n'a pas servi lors de l'échantillonnage des zones d'entraînement. Tous les points d'inventaire sur le terrain sont en effet concentrés de part et d'autre de la seule route praticable qui traverse l'ancien territoire brûlé, qui se retrouve sur l'image prise en 2011 (image qui occupe par ailleurs la plus grande partie du territoire).

<u>Hypothèse 2</u> : L'utilisation d'analyses statistiques permet de bonifier la méthode conventionnelle utilisée pour l'établissement des zones d'entraînement d'une classification semi-dirigée.

<u>Réponse</u> : OUI

Le nombre de classes établies dans le projet-année 1 (Boulfroy *et al*., 2013) était de 18. Parmi ces 18 classes, plusieurs montraient des similitudes importantes en termes de composition en essences (annexe 1). Des choix méthodologiques ont donc été faits pour tenter de réduire ce

nombre, en regroupant plusieurs classes relativement semblables. Ces regroupements ont été guidés par deux types d'analyses (statistiques et spectrales). Ces deux analyses ont permis dans un premier temps de supprimer quelques classes qui ne présentaient pas un comportement cohérent lorsque l'on comparait les signatures spectrales et les données d'inventaire. Dans plusieurs cas, l'utilisation d'analyses statistiques sur les données d'inventaire des zones d'entraînement a permis de confirmer des regroupements qui étaient proposés suite à des analyses spectrales.

<u>Hypothèse 3</u> : Le portrait du couvert forestier 17 ans après feu, établi selon les mêmes variables qui ont été utilisées pour le modèle de prédiction de la régénération forestière 5 ans après feu, donne des résultats satisfaisants pour qualifier l'état du couvert.

<u>Réponse</u> : OUI

De nombreux facteurs influencent le succès de la régénération après feu et l'évolution de la composition végétale à court et moyen termes après un feu. Lors de l'élaboration du modèle de prédiction de la régénération 5 ans après feu, le type écologique et l'intensité du feu ont été identifiés comme les deux variables ayant le plus d'influence sur le coefficient de distribution de la régénération. La combinaison de ces deux variables a permis de générer des unités spatiales regroupées en 11 strates, qui ont à leur tour fait l'objet de prédiction de la régénération 5 ans après feu.

Ces deux variables ont été considérées par défaut pour produire le portrait de la végétation 17 ans après feu, car il était essentiel d'utiliser les mêmes références spatiales pour suivre l'évolution de la composition entre 5 et 17 ans après feu.

Les intervalles de confiance (IC) associés aux densités de cime des 11 classes sont très faibles, presque tout le temps inférieurs ou équivalents à 3 % (tableau 12). On peut donc en conclure qu'il y a peu de variations de la densité de cime des classes au sein de chaque strate. Ainsi, la

classification du couvert semble correspondre avec ces divisions écologiques du terrain (type écologique), même si elle a été produite sans en tenir compte.

Il est important de mentionner que le type écologique, qui est l'une des deux variables utilisées pour déterminer le portrait 17 ans après feu, est une variable synthèse qui intègre à la fois des notions de milieu physique (épaisseur des dépôts de surface, texture et drainage) et de composition végétale (par l'intermédiaire de la végétation potentielle). Ainsi, même si d'autres variables qui pourraient être plus précises, comme la nature du dépôt de surface, la classe de drainage ou la composition à 10 % près des essences forestières présentes, n'ont pas été considérées, l'intégration du type écologique pour établir le portrait de la composition forestière 17 ans après feu prend en considération une diversité de paramètres, qui qualifient autant le milieu que la composition végétale.

Néanmoins, il est possible que d'autres variables qui n'ont pas été considérées dans la production des scénarios aient une influence sur l'état de la composition en essences 17 ans après feu, comme :

- le peuplement d'origine qui a brûlé. Si le peuplement d'origine contient une plus grande présence d'essences à cônes sérotineux ou semi-sérotineux, les peuplements de succession pourraient se retrouver avec une plus grande quantité de pin gris ou d'épinette noire.
- les peuplements environnants survivants, producteurs potentiels de semences, particulièrement ceux qui ont des essences avec des semences très légères comme les bouleaux blancs et les peupliers qui peuvent ainsi disséminer leurs semences pour recoloniser les superficies environnantes avec plus de feuillus intolérants.

De plus, le type écologique ne permet pas de capter la présence d'espèces pionnières ou de transition dans certains peuplements, comme le bouleau à papier.

Enfin, le type écologique, tel qu'identifié sur la cartographie du 4e décennal du territoire du feu de Parent, présente une certaine hétérogénéité naturelle due à la méthode de cartographie utilisée (4e décennal, première manière), comme le regroupement dans un même polygone de portions

bien drainées et de portions modérément bien drainées, qui peuvent engendrer des différences de composition végétale. Une discrimination de ces différences de milieux par un exercice de photo-interprétation fine permettrait peut-être de distinguer les peuplements qui ont une proportion plus grande de pin gris et d'améliorer alors la précision du portrait.

Hypothèse 4 : La composition en essences 17 ans après feu associée à chaque strate du modèle de prédiction 5 ans après feu (combinaison du type écologique et de l'intensité du feu) est en accord avec la végétation potentielle que l'on s'attendrait à retrouver dans chaque type écologique concerné.

Réponse : OUI

Les onze strates correspondant à la combinaison d'un type écologique et d'une intensité de feu qui ont fait l'objet de prédiction de la régénération forestière 5 ans après feu se sont vues attribuer une composition du couvert forestier 17 ans après feu, issue de la classification semi-dirigée.

La composition des 11 strates, sur la base de la densité de cime, est globalement en accord avec la végétation que l'on s'attendrait de retrouver théoriquement dans les végétations potentielles concernées.

Les principales différences observées s'expliquent par la présence importante, immédiatement après feu, d'essences pionnières comme le pin gris et le peuplier faux-tremble. Ces essences sont en effet très bien adaptées au passage d'un feu et leur présence est favorisée après une telle perturbation. En contrepartie, le sapin baumier, essence typique du stade de fin de succession, qui est présent dans l'appellation de la végétation potentielle, voit sa présence nettement diminuer à court terme après un feu, car il se régénère difficilement dans cette situation. Dans le détail :

- **Les deux strates associées au type écologique MS22** sont les seules de type feuillu ou mélangé (toutes les autres strates sont de type résineux). Or, leurs compositions sont les plus feuillues des 11 strates, dominées par le peuplier faux-tremble et les feuillus non commerciaux et avec une présence marginale de pin gris et d'épinette

noire (≤ 10 %). Cette composition est en accord avec les essences que l'on retrouve dans ce type écologique[4], généralement constitué de sapin baumier, de peuplier faux-tremble et de bouleau à papier et rarement d'épinette noire et de pin gris. L'absence du sapin baumier dans les portraits obtenus 17 ans après feu s'explique par l'absence de mécanismes de régénération de cette espèce à court terme après feu (peu ou pas de semences viables et de mousses hypnacées importantes pour la germination des semences). La plus faible représentativité du bouleau blanc par rapport au peuplier faux-tremble dans les 2 strates à MS22 peut s'expliquer par ses mécanismes de régénération après feu, qui sont un peu moins agressifs (notamment, il a une distance de dissémination plus restreinte que le peuplier faux-tremble).

- **Les strates associées à RS22 et RS25** ont une composition mixte en peuplier faux-tremble et feuillus non commerciaux d'une part, et pin gris et épinette d'autre part, ce qui est aussi relativement en accord avec les essences qui colonisent habituellement ces types écologiques (SAB-EPN-BOP). L'abondance de pin gris, en particulier dans le type écologique RS25 de drainage subhydrique sur ces deux types écologiques, peut s'expliquer par une colonisation de cette espèce sur les portions plus xériques (sol plus mince, plus pauvre, où le passage du feu aurait en plus accentué la diminution de la fertilité du site). La présence importante du pin gris pourrait également être reliée aux travaux de récupération et de plantations effectués à la suite du feu. La même remarque concernant l'absence du sapin baumier après feu s'applique. Le pin gris est moins présent sur RS25 que sur RS22, ce qui est cohérant avec l'autécologie de cette espèce, qui n'affectionne pas les milieux humides.
- **Les strates associées à la végétation potentielle RE2** sont dominées par les essences résineuses, avec une présence des feuillus inférieure ou égale à 10 %. Parmi les 3 types écologiques à l'étude, le pin gris est plus présent sur les milieux mésiques (RE22) que subhydriques (RE24 et RE25). À nouveau, cette composition concorde parfaitement avec la composition théorique de la végétation potentielle RE2, qui est constituée de pin gris et d'épinette noire (Grondin *et al.,* 1999).

[4] Information tirée de la sère physiographique de la sous-région écologique 5b du rapport de classification écologique de la sapinière à bouleau blanc de l'ouest (Grondin *et al.,* 1999)

- **La strate associée à RE39** a une composition qui s'apparente beaucoup à RE25. La présence du pin gris avec 19 % de couvert est surprenante, car cette espèce ne colonise généralement pas les tourbières hydriques. Habituellement, ce type écologique est constitué exclusivement d'épinette noire. La faible présence de l'épinette noire (13 %) peut s'expliquer par la fertilité du site, qui est parmi les plus pauvres, entraînant une croissance des semis très lente et donc une densité de cime réduite.

L'adéquation entre la composition en essences par strate, qui est issue de la répartition des classes de végétation sur le territoire à partir de la classification semi-dirigée, avec la végétation potentielle qui décrit chaque strate indique qu'il est possible de produire une classification semi-dirigée du couvert permettant de distinguer correctement les essences forestières commerciales.

<u>Hypothèse 5</u> : L'intensité du feu, variable explicative significative pour prédire la régénération forestière 5 ans après feu, entraîne aussi des différences dans la composition forestière 17 ans après feu.

<u>Réponse</u> : NON

La composition en essences des strates 17 ans après feu ne montre pas de différences importantes entre deux strates de même type écologique mais d'intensités distinctes. Aucune analyse statistique n'a été réalisée pour vérifier si l'intensité est une variable significative pour le calcul de la densité de la cime 17 ans après feu. Mais les faibles écarts des moyennes estimées, jamais supérieurs à 3 %, laissent à penser que le portrait diffère peu selon l'intensité du feu (tableaux 13 et 14). Pourtant, lors de l'établissement des modèles prédictifs 5 ans après feu, l'intensité avait été identifiée comme une variable significative, expliquant des différences de composition en essences dans certains cas, notamment l'épinette noire sur RE25 et le pin gris sur RS22. Il semble donc que l'influence de l'intensité du feu sur la composition du couvert se soit estompée avec le temps.

5.2. ÉVOLUTION DU COUVERT FORESTIER ENTRE 5 ET 17 ANS APRÈS FEU

<u>Hypothèse 6</u> : La présence des essences résineuses se maintient en général ou diminue légèrement entre 5 et 17 ans après feu, tandis que les essences feuillues voient leur présence diminuer pendant cet horizon de temps, en particulier dans les sites qui sont moins favorables à leur croissance.

<u>Réponse</u> : Hypothèse non vérifiée

L'analyse de l'évolution du coefficient de distribution entre 5 et 17 ans après feu prend en considération les hypothèses suivantes (voir revue de littérature présentée dans Côté *et al.,* 2012) :

- **La régénération résineuse (pin gris et épinette noire)** est en grande partie installée 5 ans après feu, en particulier à cause de la qualité des lits de germination, qui diminue en quelques années et devient beaucoup moins favorable après 5 années, suite à la chute des feuilles d'arbres et à l'installation de semis d'arbustes et de plantes herbacées (Greene *et al.,* 2004) Pour l'épinette noire, l'essentiel du recrutement s'effectue donc dans un délai de 3 à 6 ans à la suite d'un feu (Johnstone *et al.,* 2010). Pour le pin gris, une germination massive des graines a lieu au cours des deux premières années suivant le feu et décline ensuite (Burns et Honkala, 1990). Ainsi, théoriquement, peu de nouvelles tiges résineuses se sont installées après le portrait réalisé 5 ans après feu.
- **La régénération feuillue (bouleau blanc et peuplier faux-tremble)** s'installe avec succès immédiatement après feu. Le recrutement de la germination du bouleau blanc a lieu durant les 3 premières années qui suivent le passage du feu (Ahlgren, 1959; Archibold, 1980). Les conditions d'installation de la régénération du peuplier faux-tremble ressemblent beaucoup à celles du bouleau blanc. La régénération végétative du peuplier est généralement très agressive après un feu, dans la mesure où l'espèce est présente sur le territoire brûlé. L'installation des drageons est complétée dans les deux années suivant le feu (Mercier, 1992; Peterson et Peterson, 1992). La densité des drageons décline par la suite, puisqu'il n'y a plus de nouvelle installation et que le

nombre de drageons produits est surabondant (Brown et Debyle, 1989). Ainsi, théoriquement, comme pour les essences résineuses, peu de nouvelles tiges feuillues se sont installées après le portrait réalisé à 5 ans.

- Une mortalité peut entraîner la disparition de certaines tiges entre 5 et 17 ans après feu. Cette mortalité peut être due à une pression de compétition élevée exercée par des essences à croissance rapide (ex : compétition exercée par le peuplier faux-tremble ou le pin gris sur l'épinette noire). Elle peut aussi être due à des conditions de sites peu favorables à la survie des semis. Ce peut être le cas pour les semis de pin gris qui se sont installés sur des sites humides ou encore les semis de peuplier faux-tremble installés sur des végétations potentielles à épinette noire, représentant des sites particulièrement pauvres pour le peuplier.

Il est difficile de comparer les portraits établis 5 et 17 ans après feu, car les deux CD n'ont pas été calculés sur la base de la même taille de micro-placettes. L'estimation du CD 17 ans après feu repose sur des placettes plus de 6 fois plus grandes (25 m^2 contre 4 m^2), ce qui a tendance à augmenter les valeurs de CD comparativement à une mesure qui serait réalisée dans des placettes plus petites. Néanmoins, on peut tirer les conclusions suivantes :

Cas du pin gris

Ainsi, les valeurs généralement très élevées pour le CD de pin gris à 17 ans après feu et l'augmentation importante du CD entre 5 et 17 ans ne signifient pas nécessairement que la présence du pin gris a augmenté. D'ailleurs, la littérature confirme que cette situation est peu probable, car la période d'installation de la régénération du pin gris est théoriquement terminée ou presque, 5 ans après feu. Il semble donc peu probable que les différences observées du coefficient de distribution entre 5 et 17 ans s'expliquent par une installation massive du pin gris après 5 ans.

Pour tenter d'expliquer l'augmentation très importante du CD de pin gris 17 ans après feu, la méthode utilisée pour calculer le coefficient de distribution (CD) 17 ans après feu a été explorée. En effet, l'inventaire n'avait pas recensé la présence des tiges des semis, mais seulement la densité des cimes par essence dans chaque micro-placette. Une extrapolation de la densité de

cime a été faite afin d'évaluer la présence des tiges, en ne conservant que 6 micro-placettes par placette et en s'assurant qu'une distance d'au moins 5 m se retrouve entre chaque micro-placette utilisée pour le calcul du CD. Par cette action, il était supposé qu'une même tige ne serait pas considérée plusieurs fois dans le calcul du coefficient de distribution. Malgré cette précaution, on peut poser l'hypothèse que l'étendue des cimes de semis de pin gris âgés de 17 ans est telle qu'il a pu y avoir chevauchement d'une même tige sur 2 micro-placettes distancées de 5 m, utilisées pour le calcul du coefficient de distribution. Dans une telle situation, la même tige de pin gris aurait été comptabilisée 2 fois pour le calcul du coefficient de distribution et aurait donc généré une surestimation de la valeur du CD de pin gris. Une observation des photos prises pendant l'inventaire en 2012 (exemple donné à la figure 19) jumelée à l'évaluation de la taille des cimes de pin gris âgés d'environ 15-20 ans (dhp ≈ 4-6 cm; hauteur ≈ 6-7 m) à partir de diagrammes de densité confirme que la taille des cimes de pin gris ne dépassait pas 5 m. Elle serait plutôt de l'ordre de 1 m maximum. L'hypothèse selon laquelle la méthode utilisée pour calculer le coefficient de distribution surestimerait la valeur réelle du CD est donc **à rejeter.**

Face à ces constats, on ne peut que maintenir comme hypothèse qu'étant donné les valeurs très élevées de CD de pin gris 17 ans après feu, il est fort probable que le pin gris n'ait pas beaucoup régressé ou se serait maintenu sur le territoire entre 5 et 17 ans après feu.

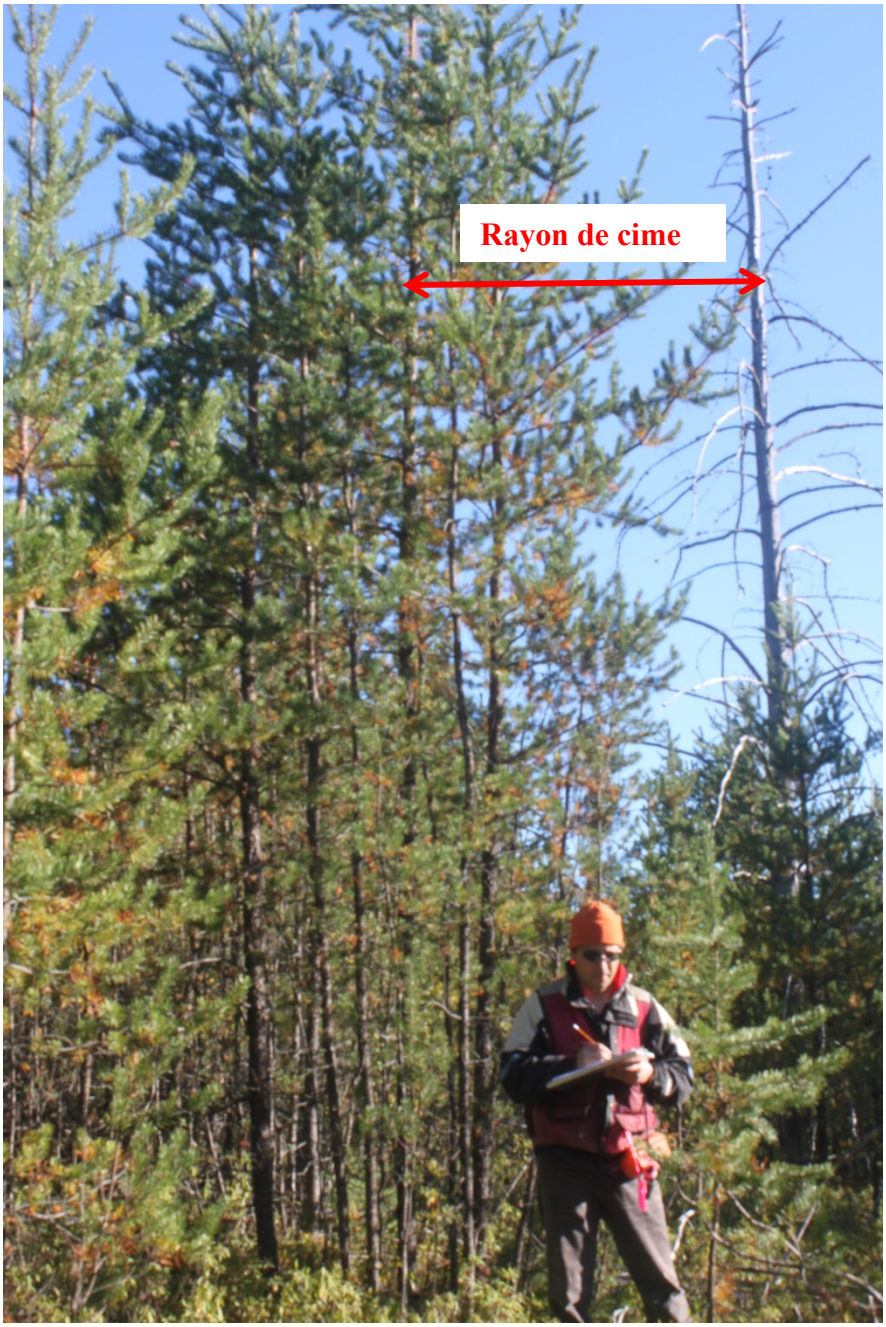


Figure 19. Pin gris de 17 ans dont la hauteur est estimée à environ 5 m sur le territoire brûlé du feu de Parent

Cas de l'épinette noire

Comme le CD d'épinette noire a en général des valeurs équivalentes 5 et 17 ans après feu, et que la méthode de calcul du CD de 17 ans augmente les valeurs de CD, comparativement à une mesure réalisée dans des placettes de la taille de celles utilisées pour le CD 5 ans, on peut poser l'hypothèse que l'épinette noire a vu sa présence diminuer sur le territoire. Il n'est par contre pas possible de quantifier cette diminution.

La diminution possible de la présence de l'épinette noire dans 4 strates pourrait s'expliquer par la présence importante du pin gris dans plusieurs d'entre elles (strates RE21_I_II, RE22_I_II et RE25_II), qui exercerait alors une compétition sur l'épinette noire. Les strates RE21_I et RE22_I_II correspondent en effet à celles où le milieu est le plus favorable à la croissance du pin gris (sites mésiques). Dans le cas de RE25_II, on a déjà émis l'hypothèse que ce type écologique sur milieu subhydrique pourrait contenir une proportion de milieux plus secs qui seraient alors propices à la présence du pin gris.

Dans une strate seulement, RE39_I_II, la valeur du CD 17 ans après feu augmente, passant de 40 à 70 %. Cette augmentation ne peut s'expliquer par un nouveau recrutement de semis, car tout comme le pin gris, la période d'installation des semis devrait être terminée 5 ans après feu. Étant donné l'écart important de 30 %, on peut émettre l'hypothèse que cette augmentation de CD, due à la différence de taille de placettes utilisée pour calculer les CD 5 et 17 ans après feu, devrait se traduire plutôt par un maintien ou une très légère diminution de la présence de l'épinette noire sur l'horizon 5-17 ans après feu. Dans tous les cas de figures, il serait surprenant que l'épinette noire ait subi une diminution importante entre 5 et 17 ans après feu. Ce relatif *statu quo* de l'épinette noire peut s'expliquer par la présence limitée des essences compétitrices à croissance rapide comme le pin gris ou le peuplier faux-tremble.

Cas du peuplier faux-tremble

Les valeurs de CD 17 ans après feu sont soit du même ordre de grandeur (strates de végétation potentielle MS2 et RS2), soit inférieures, avec un écart de 25 à 35 % (strates à végétation potentielle de pessières (RE2 et RE3)) à celles obtenues 5 ans après feu.

Comme la valeur du CD 17 ans après feu est surestimée par rapport à l'évaluation 5 ans après feu à cause des différences de taille de placettes, la diminution observée entre les 2 périodes dans les strates à végétation potentielle de pessières (RE2 et RE3) signifie que la présence du peuplier faux-tremble est nettement inférieure 17 ans après feu. Dans ces strates où le peuplier s'était installé massivement immédiatement après feu (CD_5 ans = 60-70 %), la régression du peuplier peut s'expliquer par des conditions de survie et de croissance de la nouvelle régénération peu favorables à cette espèce feuillue. En effet, les végétations potentielles à épinette noire et en

particulier les milieux humides (milieux 5 et 9) sont caractérisés par un potentiel forestier relatif pauvre pour une espèce feuillue à croissance rapide comme le peuplier faux-tremble.

Dans les strates à sapin (MS et RS), les valeurs 5 ans et 17 ans après feu sont relativement semblables. On peut donc conclure que le peuplier s'est soit relativement bien maintenu ou a légèrement diminué entre les 2 périodes. Cette situation s'explique par le fait que ces strates correspondent aux milieux qui sont relativement favorables aux essences feuillues intolérantes de début de succession.

Cas du bouleau blanc

Les valeurs de CD du bouleau blanc 5 et 17 ans après feu se sont maintenues ou ont légèrement diminué dans la grande majorité des strates. Ceci signifie que cette espèce a vraisemblablement régressé pendant cette période, puisque les valeurs de CD 17 ans après feu surestiment la présence de l'espèce. Cette situation peut s'expliquer par la présence importante du peuplier faux-tremble, dont la croissance juvénile est supérieure à celle du bouleau blanc. Le bouleau a donc pu subir une compétition importante exercée par le peuplier.

5.3. APPLICATION DES SCÉNARIOS PRODUITS SUR LE FEU DE PARENT À D'AUTRES TERRITOIRES BRÛLÉS

Hypothèse 7 : Les scénarios d'évolution de la composition en essences 17 ans après feu développés à partir de données issues du feu de Parent sont applicables à d'autres feux ayant brûlé dans le sous-domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau blanc de l'ouest.

Réponse : Hypothèse ne pouvant être validée pour le moment.

Les estimations du couvert forestier 17 ans après feu ont été produites en vue d'être appliquées à d'autres feux ayant brûlé en Mauricie en 2010. Les modèles empiriques développés dans le cadre de cette étude sont spécifiques à la mosaïque d'images RapidEye et au suivi réalisé sur le feu de Parent en 2012. Ils ont été développés à partir de la base de données propre à ce territoire brûlé. Les données du feu de Parent ont été utilisées comme données sources pour produire ces

estimations, car ce feu ayant brûlé en 1995, il permettait d'avoir un portrait de la végétation 17 ans après feu, issu à la fois de relevés d'inventaire terrain et de l'analyse d'une image satellitaire.

La capacité d'extrapolation d'un modèle à un autre territoire que celui utilisé lors de l'élaboration dudit modèle s'évalue à partir du coefficient de détermination (R^2). Ce dernier indique les pourcentages de la variation observée qui ont pu être expliqués par les modèles produits, dans un contexte où l'on souhaiterait appliquer ces prédictions à d'autres territoires (c'est-à-dire en excluant les effets aléatoires).

Dans le cadre du présent projet, l'analyse permettant d'estimer la composition en essences 17 ans après feu des 11 strates à l'étude obtient des coefficients de détermination estimés (R^2) respectivement à 65, 51 et 54 % pour les estimations des essences individuelles, des essences regroupées (résineux et feuillus intolérants) et de toutes les essences confondues. Ces résultats sont globalement intéressants, plus particulièrement la prédiction des essences individuelles, qui obtient la valeur la plus élevée de R^2. Il est d'ailleurs recommandé de privilégier l'utilisation des estimations produites par essence individuelle que regroupées, car ces modèles sont statistiquement plus solides.

Ces résultats doivent par contre être en partie nuancés, car ils ne reflètent pas totalement la capacité d'extrapolation du modèle à d'autres territoires. En effet, il est important de comprendre qu'afin de produire le portrait du couvert 17 ans après feu, plusieurs analyses consécutives ont été réalisées. Une première analyse de variance a été réalisée pour détecter la présence, parmi les 18 classes de végétation initiales, de celles qui étaient non significativement différentes (annexe 2). Cet exercice a permis de regrouper entre elles les classes de végétation semblables et de recalculer des valeurs moyennes de densité de cime et de coefficient de distribution pour chacune des 8 nouvelles classes (tableaux 3 et 4). Une deuxième analyse de variance a ensuite été effectuée sur les données des 8 nouvelles classes pour calculer la densité de cime et le coefficient de distribution moyen des 11 strates utilisées dans le modèle de prédiction 5 ans après feu (tableaux 12 et 13). Ceci signifie que les erreurs des estimés du premier modèle sont aussi présentes dans les estimés du deuxième modèle. Il y a donc multiplication des erreurs, ce qui constitue une faiblesse de la méthode statistique, puisque l'inférence à d'autres feux est tributaire

des erreurs des 2 modèles utilisés. Ainsi, le pouvoir d'inférence du modèle 17 ans après feu diminue, mais reste tout de même bon dans l'ensemble vu la qualité d'ajustement initial des modèles.

Pour contrôler en partie les erreurs dues à des extrapolations abusives, qui pourraient entraîner des résultats fortement erronés, il est proposé de limiter l'extrapolation des scénarios produits aux feux localisés dans le même sous-domaine bioclimatique que le feu de Parent, c'est-à-dire la sapinière à bouleau blanc de l'ouest. Le sous-domaine bioclimatique est en effet une unité du système de classification écologique du MFFP qui présente « des caractéristiques distinctes de végétation, révélant des différences du régime des précipitations ou des perturbations naturelles » (Grondin *et al.,* 1999). Cette unité d'une échelle relativement macro, intègre donc des notions climatiques influençant la végétation en place, qui la distingue du reste du Québec forestier. Le changement de régime de perturbation entre la sapinière à bouleau blanc de l'ouest et de l'est entraîne des précipitations plus faibles que dans le sous-domaine de l'est. Le cycle de feu y est plus court que dans l'est, ce qui se traduit par l'abondance de peuplements feuillus et mélangés composés d'essences de lumière (peuplier faux-tremble, bouleau blanc ou pin gris). Le sous-domaine de la sapinière à bouleau blanc de l'ouest présente donc des caractéristiques propres en termes de composition végétale qui font en sorte que la dynamique végétale observée sur le feu de Parent ne devrait pas différer beaucoup de celle des autres feux qui ont brûlé ou brûleront dans ce même sous-domaine. Ainsi, l'extrapolation des scénarios à un feu localisé dans un autre sous-domaine, où les essences forestières dominantes ne sont pas celles de la sapinière à bouleau blanc de l'ouest (pin gris, épinette noire, sapin baumier, peuplier faux-tremble et bouleau blanc) et qui serait régi par d'autres conditions climatiques et régimes de perturbation naturelle, pourrait certainement entraîner des prédictions erronées.

L'hypothèse 7 ne peut être validée pour le moment. Il est possible d'extrapoler les scénarios produits dans le cadre de cette étude à d'autres feux localisés dans le sous-domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau blanc de l'ouest, sur la base des mêmes paramètres que ceux utilisés dans le cadre des scénarios proposés, mais leur validation nécessiterait de réaliser un portrait de la végétation dans de nouveaux feux situés dans le même sous-domaine, 5 et 17 ans après le passage de la perturbation, et d'évaluer ensuite si les portraits ainsi produits seraient semblables à

ceux issus des modèles développés sur le feu de Parent. Cet exercice pourrait éventuellement être réalisé sur les feux qui ont brûlé en Mauricie en 2010, en 2015 pour l'obtention du portrait 5 ans après feu et en 2027 pour le portrait 17 ans après feu.

6. RECOMMANDATIONS

Plusieurs recommandations peuvent être formulées suite à la réalisation du présent projet :

1) **Dans le cadre de la classification semi-dirigée, vérifier si la prise en considération du milieu physique lors de la détermination des classes de végétation et l'inventaire des zones d'entraînement permettraient d'améliorer la qualité de la classification :** la classification semi-dirigée réalisée repose sur des classes de couvert sans que le milieu physique ait été considéré. Les zones d'entraînement ont donc été déterminées uniquement sur la base du couvert végétal. Il est possible que des confusions observées entre certaines classes puissent s'expliquer par le milieu physique. Ainsi, il pourrait être possible, en considérant en amont cette variable, de diminuer une partie des confusions observées.

2) **Vérifier la conformité des modèles de prédiction 5 et 17 ans après feu sur d'autres feux ayant brûlé dans le sous-domaine de la sapinière à bouleau blanc de l'ouest :** les modèles présentés ont été développés sur le feu de Parent. De nouveaux feux d'importance ont eu lieu en Mauricie en 2010. En 2015, il serait fort intéressant d'aller faire un inventaire de la régénération 5 ans après feu dans un ou plusieurs feux de 2010, de manière à documenter la concordance des prédictions issues du feu de Parent avec le portrait issu de d'autres feux. De plus, une évaluation du CD 17 ans après feu à l'échelle de micro-placettes de 4 m^2 permettrait de comparer avec plus de précision les portraits établis 5 et 17 ans après feu.

3) **Étendre les prédictions des modèles 5 et 17 ans après feu aux strates qui n'ont pas encore été étudiées :** les superficies des unités spatiales correspondant aux 11 strates pour lesquelles les scénarios d'évolution sont disponibles couvrent environ 80 % de la superficie productive des territoires brûlés. Par conséquent, il serait intéressant d'obtenir des prédictions de la composition du couvert forestier 5 et 17 ans après feu pour les autres strates qui n'ont pas été traitées dans les modèles, mais qui sont pourtant présentes sur les

territoires brûlés, en particulier les végétations potentielles résineuses sur sols minces (RS20, RE20), qui sont les plus présentes parmi les strates non traitées.

4) **Suivre l'évolution de la composition et de la densité de la régénération au-delà des 20 premières années :** un modèle permettant d'extrapoler le couvert forestier après une perturbation majeure demeure un outil fort utile pour les aménagistes forestiers. Un premier pas a été franchi avec l'élaboration d'un modèle de prédiction de la régénération forestière 5 ans après feu (Côté *et al.,* 2012). Ce modèle permet, entre autres, de pouvoir anticiper les besoins en travaux sylvicoles à court terme après un feu. Une deuxième étape vient d'être accomplie, puisque l'on peut maintenant extrapoler les prédictions 5 ans après feu, sur un horizon de 17 ans après feu. Dix-sept ans après feu, la composition végétale commence à se stabiliser et l'on est en mesure d'estimer un peu mieux quel sera l'état du peuplement à son stade jeune. Poursuivre l'extrapolation de la composition du couvert forestier sur un horizon plus long demeure un objectif pertinent, puisqu'elle permettrait, entre autres, de documenter avec une plus grande précision les retours de strates à envisager dans le cadre des calculs de possibilité forestière.

5) **Utiliser les prédictions produites pour mieux planifier la récupération après feu dans un contexte d'aménagement écosystémique :** le MFFP doit produire, après le passage d'un feu, un plan de récupération écosystémique permettant de s'assurer qu'une diversité représentative des différents milieux présents suite au passage du feu soit maintenue sur le territoire brûlé après la récupération du bois brûlé.

   La connaissance du degré de régénération anticipé (densité et composition en essences) 5 ans après feu grâce à l'application des modèles de prédiction pourrait être fort intéressante pour localiser les secteurs où l'on entrevoit des échecs de régénération en essences désirées. Ainsi, dans ces secteurs, la récupération pourrait être priorisée puisque l'utilisation d'une régénération artificielle semble nécessaire.

   Le portrait de la composition du couvert forestier sur un horizon de 15-20 ans pourrait également orienter la planification de la récupération. Il permettrait en effet de s'assurer

qu'une représentativité des grandes catégories de couvert forestier, qui sont projetées sur le territoire brûlé, soit considérée dans le plan de récupération et soit maintenue sur pied après les opérations de récolte.

6) **Développer de nouveaux modèles de prédiction de la régénération après feu adaptés au domaine de la pessière à mousses :** les nouveaux modèles développés dans le cadre du présent projet sont applicables uniquement au sous-domaine de la sapinière à bouleau jaune de l'ouest. Un tel exercice serait tout aussi pertinent pour le domaine de la pessière à mousses de l'ouest, qui fait, lui aussi, l'objet de feux récurrents.

CONCLUSION

La première année du projet a permis de préparer les deux bases de données (5 et 17 ans après feu) nécessaires à l'élaboration des scénarios d'évolution de la composition de la végétation après feu, sur un horizon de 17 ans. Les unités de référence utilisées pour la construction des scénarios proviennent de 11 strates, correspondant à la combinaison d'un type écologique et d'une intensité de feu.

La seconde année, qui fait l'objet du présent rapport, présente tout d'abord une nouvelle classification semi-dirigée, élaborée selon une méthode améliorée. Cette dernière a permis de réduire le nombre de classes de végétation de 18 à 8, afin de simplifier l'interprétation des résultats issus de la classification semi-dirigée. La méthode utilisée a été bonifiée à l'aide d'analyses statistiques et spectrales et la qualité de la classification semi-dirigée s'est avérée très satisfaisante, avec un indice de Kappa de 0,82 et une précision globale de 85 %. La classification semi-dirigée ainsi produite jumelée à des analyses des données d'inventaire a permis de produire un portrait bonifié du couvert forestier 17 ans après feu pour les 11 strates à l'étude, sur la base d'une densité de cime et d'un coefficient de distribution par essence. L'objectif qui consistait à élaborer des scénarios d'évolution de la composition des peuplements sur un horizon de 15-20 ans après un feu a donc été réalisé.

Le second objectif de cette deuxième année consistait à appliquer les scénarios d'évolution produits à différents feux ayant brûlé en Mauricie en 2010, afin d'établir un portrait prédictif de la végétation de ces territoires récemment brûlés sur un horizon de 15-20 ans après feu. La densité de cime des essences 17 ans après feu estimée pour les 11 strates à l'étude peut être transposée à d'autres feux, dans la mesure où ces derniers sont localisés dans le même sous-domaine bioclimatique que celui où les scénarios ont été construits, soit le sous-domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau blanc de l'ouest. Les scénarios produits ont donc été appliqués à 5 feux de la Mauricie ayant brûlé en 2010 et permettent de prédire la composition en essences 17 ans après feu sur environ 80 % des superficies productives brûlées.

Un suivi de la régénération dans ces nouveaux feux serait fort intéressant pour vérifier la conformité des modèles de prédiction 5 et 17 ans après feu développés dans le cadre du présent projet et éventuellement en améliorer la précision.

RÉFÉRENCES

Ahlgren, C. E. 1959. *Some effects of fire on forest reproduction in northeastern Minnesota.* J. For. 57:194-202.

Archibold, O. W. 1980. *Seed input into a post-fire forest site in northern Saskatchewan*. Can. J. For. Res. 10:129-134.

Bindel, M., Hese, S., Berger, C. and Schmullius, C. 2011. *Evaluation of red-edge spectral information for biotope mapping using RapidEye.* Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology, vol. 8174, p. 81740X-1-81740X-9.

Boulfroy, E., Khaldoune, J., Grenon, F., Blouin, D. et Bournival, P. 2013. *Scénarios d'évolution de la composition des peuplements après feu sur un horizon de 15-20 ans, applicables au domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau blanc – Première année.* Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. (CERFO). Rapport 2013-22. 55 p. + 2 annexes.

Brown, J. K. et N. V. Debyle. 1989. *Effects of perscribed fire on biomass and plant succession in western aspen.* USDA For. Serv., Int. Res. Center, Res. Paper INT-412, Odgen, UT. 16 p.

Burns, R. M. et B. H. Honkala. 1990. *Sylvics of North America.* U.S.D.A., For. Serv., Handb. No. 654, Washigton, D. C. 1552 p.

Congalton, R.G. A. 1991. *Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data.* Remote Sensing of Environment, vol. 37, n^{o}, p. 35-46.

Congedo, L., Munafò, M. and Macchi, S. 2013. *Investigating the Relationship between Land Cover and Vulnerability to Climate Change in Dar es Salaam.* Working Paper, Rome: Sapienza University, 48 p.

Côté, S., Bournival, P., Boulfroy, E., Blouin, D. et Vachon, L. 2012. *Mise à jour d'un modèle de prédiction de la régénération forestière 5 ans après feu et application aux territoires récemment brûlés en Mauricie dans la sapinière à bouleau blanc.* Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. (CERFO). Rapport 2012-12. 119 p. + 3 annexes.

Dalponte, M., Bruzzone, L. and Gianelle, D. 2008. *Fusion of Hyperspectral and LIDAR Remote* Sensing Data for Classification of Complex Forest Areas. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 46, n° 5, p. 1416-1427.

Greene, D. F., J. Noël, Y. Bergeron, M. Rousseau et S. Gauthier. 2004. *Recruitment of* Picea mariana, Pinus banksiana, *and* Populus tremuloides *across a burn severity gradient following wildfire in the southern boreal forest of Quebec.* Can. J. For. Res. 34: 1845-1857.

Grondin, P., J. Blouin et P. Racine. 1999. *Rapport de classification écologique du sous-domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau blanc de l'ouest.* Ministère des ressources naturelles du Québec, Dir. des inventaires forestiers. 220 p.

Jensen, J.R. 2005. *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective.* Prentice Hall Series in Geographic Information Science, Third Edition, University of South Carolina, 526 p.

Johnstone, J. F., T. N. Hollingsworth, S. Chapin et M. C. Mack. 2010. *Changes in fire regime break the legacy lock on successional trajectories in Alaskan boreal forest.* Global Change biology (2010) 16: 1281-1295.

Hagen-Zanker, A. 2006. *Map comparison methods that simultaneously address overlap and structure.* Journal of Geographical Systems, vol. 8, n° 2, p. 165-185.

Holmgren, J., Persson, Å. and Söderman, U. 2008. *Species identification of individual trees by combining high resolution LiDAR data with multi-spectral images.* International Journal of Remote Sensing, vol. 29, n° 5, p. 1537-1552.

McIver, D.K. and Friedl, M.A. 2002. *Using prior probabilities in decision-tree classification of remotely sensed data.* Remote Sensing of Environment, vol. 81, p. 253-261.

Mercier, R. 1992. *Développement et application d'une méthode dendrométrique permettant de caractériser l'origine (graine ou drageon) du peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides *MICHX.).* Mémoire M. Sc., Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec.

Monserud, R.A. and Leemans, R. 1992. *Comparing global vegetation maps with the Kappa statistic.* Ecological Modelling, vol. 62, p. 275-293.

Peterson, E. B. et N. M. Peterson. 1992. *Ecology, management, and use of aspen and balsam poplar in the prairie provinces*. Canada. For. Can., Northwest Reg., North. For. Cent., Edmonton, Alberta. Spec. Rep. 1, 252 p.

ANNEXES

ANNEXE 1. PORTRAIT DE LA COMPOSITION DES 18 CLASSES DE VÉGÉTATION PROPOSÉES DANS L'ANALYSE RÉALISÉE LORS DE L'ANNÉE 1

Portrait de la composition des différentes classes de végétation en essences arborescentes et arbustives (classification semi-dirigée finale)

					Pourcentages de recouvrement de la cime au sol par essence (%)																									
Classe de végétation	Nb points de contrôle	Type de couvert	Appellation	Rang des essences [1]	PIG [2]			EPN (couv. dominant) [2]			SAB [2]			PET [2]			BOP [2]			FNC [2]			Résineux (couv. dominant) [2]			Feuillus commerciaux [2]			Tous feuillus [2]			Classe de végétation
					Moy	Li	Ls[3]	Moy	Li	Ls[3]	Moy	Li	Ls[3]	Moy	Li	Ls[3]	Moy	Li	Ls[3]	Moy	Li	Ls[3]	Moy	Li	Ls[3]	Moy	Li	Ls[3]	Moy	Li	Ls[3]	
C15	6	R	**PIG**60-**PET**10	PIG>eri	**59**	49	70	**1**	0	3	**0**	0	0	**9**	3	15	**0**	0	1	**2**	1	3	**61**	51	71	**9**	3	15	**11**	4	18	C15
C14	7		**PIG**40	PIG≈ERI	**38**	30	47	**1**	0	2	**0**	0	0	**3**	0	6	**0**	0	0	**2**	0	5	**39**	31	48	**3**	1	6	**6**	4	8	C14
C13	9		**PIG**30-**PET**10	PIG≈DEB>ERI	**28**	24	33	**2**	0	3	**0**	0	0	**6**	3	9	**0**	0	0	**0**	0	0	**30**	25	35	**6**	3	9	**6**	3	9	C13
C17	6		**PIG**20-**EPN**10	ERI>PIG>epn	**23**	12	34	**10**	3	17	**0**	0	0	**3**	0	6	**1**	0	1	**0**	0	1	**33**	22	44	**3**	0	7	**4**	0	7	C17
C19	6		**EPN**20-**PIG**20-**FNC**20-**PET**10	EPN≈pig≈fnc>mou	**16**	7	25	**20**	8	31	**0**	0	0	**5**	0	10	**3**	0	8	**16**	8	23	**36**	29	43	**8**	0	18	**24**	19	29	C19
C27	8		**EPN**20	ERI>MOU>epn	**1**	0	2	**16**	8	24	**0**	0	0	**3**	0	7	**0**	0	1	**4**	0	13	**17**	9	26	**3**	0	7	**7**	0	17	C27
C32	8		**EPN**20	ERI>MOU>epn	**2**	1	4	**16**	9	24	**0**	0	0	**1**	0	2	**0**	0	0	**2**	0	4	**19**	11	27	**1**	0	2	**3**	0	6	C32
C29	5		**EPN**10	ERI>MOU>epn	**1**	0	3	**8**	2	13	**0**	0	0	**1**	0	1	**0**	0	0	**0**	0	0	**9**	4	14	**1**	0	1	**1**	0	1	C29
C22	**3**	M	**FNC**30-**PIG**20-**PET**10-**BOP**10	FNC>PIG>pet>heb	**22**	0	48	**4**	0	11	**0**	0	0	**13**	6	20	**5**	0	13	**31**	5	58	**26**	8	45	**18**	15	20	**49**	25	73	C22
C18	7		**PIG**20-**PET**20-**EPN**10-**FNC**10	ERI>pig≈epn≈pet>deb	**17**	1	32	**14**	2	26	**2**	0	6	**15**	6	24	**4**	0	12	**6**	0	17	**32**	21	43	**19**	10	29	**25**	8	43	C18
C20	**3**		**EPN**20-**PET**20-**FNC**10-**BOP**10-**PIG**10-**SAB**10	EPN>pet≈deb≈mou	**6**	0	18	**22**	0	55	**6**	0	33	**16**	0	46	**7**	0	31	**8**	0	17	**34**	14	53	**23**	0	62	**31**	0	63	C20
C16	**3**		**PET**30-**EPN**20-**PIG**10-**BOP**10	PET>epn≈mou≈deb	**8**	0	22	**16**	5	27	**0**	0	0	**30**	20	41	**5**	0	24	**2**	0	5	**24**	15	33	**35**	5	65	**37**	3	70	C16
C26	7		**FNC**30-**PET**20-**EPN**10-**BOP**10	FNC>PET>epn≈heb	**4**	1	7	**10**	3	16	**0**	0	0	**20**	10	30	**9**	5	13	**33**	20	46	**14**	5	23	**29**	17	42	**62**	54	70	C26
C21	4		**PET**40-**FNC**10-**EPN**10-**PIG**10-**BOP**10	PET>epn≈fnc≈heb	**7**	0	15	**11**	0	23	**0**	0	0	**39**	20	59	**6**	1	10	**12**	10	14	**18**	3	33	**45**	25	65	**57**	37	78	C21
C23	9	F	**PET**80-**FNC**10	PET	**3**	1	5	**3**	0	6	**0**	0	0	**79**	74	84	**1**	0	2	**6**	2	11	**6**	2	11	**80**	75	85	**86**	80	93	C23
C28	5		**PET**60-**FNC**20-**PIG**10	PET>FNC>pig	**10**	1	19	**2**	0	5	**0**	0	0	**57**	43	70	**3**	0	10	**19**	7	31	**11**	0	23	**60**	45	76	**79**	61	98	C28
C24	6		**FNC**40-**PET**30-**BOP**10	FNC>PET>heb	**4**	0	8	**1**	0	4	**0**	0	0	**27**	19	36	**9**	1	16	**43**	36	50	**5**	0	11	**36**	24	48	**79**	62	96	C24
C25	4		**FNC**50-**PET**10-**BOP**10-**SAB**10	FNC>pet≈bop≈heb	**1**	0	3	**2**	0	7	**7**	0	20	**14**	2	26	**14**	0	27	**45**	34	55	**9**	0	21	**28**	19	38	**72**	56	90	C25
C34	**3**		**BOP**40-**FNC**40-**SAB**10-**EPN**10	BOP≈FNC	**1**	0	2	**6**	0	15	**9**	0	49	**1**	0	3	**38**	18	59	**35**	0	88	**16**	0	58	**39**	20	57	**74**	31	100	C34
C33	5		**FNC**80-**BOP**10	FNC	**0**	0	1	**1**	0	5	**1**	0	4	**2**	0	5	**5**	0	12	**83**	63	100	**3**	0	9	**7**	0	16	**90**	76	100	C33

[1] Figurent en majuscule les essences qui ont une moyenne supérieure à 20%.

[2] Figurent en jaune les essences dont la moyenne est supérieure à 10%.

[3] Figurent en rouge les cas où Ls-Li>25 (hétérogénéité des données).

(Extrait du rapport 2013-22 du CERFO)

ANNEXE 2. ANALYSE DES CORRÉLATIONS ENTRE LES CLASSES DE VÉGÉTATION PAR TYPE DE COUVERT

Les classes initiales provenant de la classification non dirigée ont été analysées en 3 groupes, selon la dominance du couvert total (types résineux, mélangé et feuillu).

Pour un type de couvert résineux (R)

Classe de végétation	Groupe d'essences	Densité de cime	IC	Différence significative
c15	R	61%	4%	A
c14	R	39%	4%	B
c17	R	34%	4%	B
c13	R	27%	4%	C
c32	R	21%	4%	D
c27	R	20%	4%	DE
c29	R	14%	5%	EF
c15	F	11%	4%	FG
c27	F	7%	4%	GH
c13	F	6%	4%	GH
c14	F	6%	4%	GH
c17	F	3%	4%	H
c32	F	3%	4%	H
c29	F	1%	5%	H

Pour un type de couvert mélangé (M)

Classe de végétation	Essence	Densité de cime	IC	Différence significative
c21	F	63%	7%	A
c26	F	61%	5%	A
c22	F	49%	7%	B
c16	F	37%	7%	C
c20	F	33%	8%	CD
c18	F	26%	5%	DF
c19	F	24%	5%	F
c19	R	36%	5%	C
c18	R	32%	5%	CE
c20	R	32%	8%	CDF
c22	R	26%	7%	DEF
c16	R	24%	7%	DEFG
c26	R	16%	5%	GH
c21	R	13%	7%	H

Pour un type de couvert feuillu (F)

Classe de végétation	Essence	Densité de cime	IC	Différence significative
c23	F	86%	4%	A
c24	F	78%	5%	B
c25	F	72%	6%	B
c28	F	79%	5%	B
c33	F	90%	5%	A
c34	F	73%	7%	B
c23	R	6%	4%	DE
c24	R	5%	5%	DE
c25	R	9%	6%	CDE
c28	R	12%	5%	CD
c33	R	3%	5%	E
c34	R	16%	7%	C

ANNEXE 3. ANALYSE DES CORRÉLATIONS ENTRE LES CLASSES DE VÉGÉTATION PAR SIGNATURE SPECTRALE

Signature spectrale de B1

Classe de végétation	Signature spectrale	IC	Différence significative
c27	4893	111	A
c29	4822	140	A
c26	4813	181	AB
c32	4805	111	A
c25	4784	221	ABC
c19	4631	128	BCD
c17	4608	128	BCD
c13	4569	128	CD
c14	4471	118	DE
c21	4357	156	EF
c18	4301	118	F
c16	4251	140	FG
c34	4231	181	FG
c33	4211	156	FG
c23	4210	111	FG
c24	4203	128	FG
c28	4183	156	FG
c20	4173	181	FG
c22	4160	181	FG
c15	4076	128	G

Signature spectrale de B2

Classe de végétation	Signature spectrale	IC	Différence significative
c29	3629	194	A
c13	3542	177	A
c32	3509	154	A
c27	3402	154	A
c14	3106	164	B
c17	2977	177	BC
c19	2808	177	CD
c26	2612	251	DE
c18	2476	164	EF
c16	2411	194	EFG
c15	2399	177	EFG
c25	2365	307	EFGHI
c21	2335	217	EFGH
c23	2225	154	GHIJ
c20	2198	251	FGHIJ
c34	2159	251	GHIJ
c22	2091	251	HIJ
c28	2049	217	HIJ
c33	2028	217	IJ
c24	2008	177	J

Signature spectrale de B3

Classe de végétation	Signature spectrale	IC	Différence significative
c25	6021	362	A
c27	5738	181	A
c26	5717	296	A
c32	5626	181	A
c19	5274	209	B
c29	5229	229	BC
c24	5116	209	BCD
c33	5072	256	BCDE
c21	5023	256	BCDE
c28	4876	256	DEF
c34	4873	296	CDEFG
c17	4865	209	DEF
c23	4808	181	EF
c22	4729	296	EFGH
c20	4632	296	FGH
c18	4632	193	FGH
c14	4524	193	GH
c16	4458	229	H
c13	4422	209	H
c15	4071	209	I

Signature spectrale de B4

Classe de végétation	Signature spectrale	IC	Différence significative
c24	12900	517	A
c33	12481	633	AB
c25	12437	894	AB
c28	11869	633	BC
c26	11185	730	CD
c34	11128	730	CD
c22	10969	730	CD
c23	10887	447	D
c21	10339	633	DE
c20	9619	730	EF
c19	9603	517	EF
c27	9333	447	FG
c18	8714	478	GH
c32	8689	447	H
c16	8054	566	HI
c17	7684	517	I
c29	7543	566	IJ
c15	7398	516	IJ
c14	6897	478	J
c13	6066	517	K