UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ÉTUDE DE LA STRUCTURE SPATIALE

ET DES FACTEURS AYANT AFFECTÉ LA SÉVÉRITÉ D'UN FEU

DANS LA RÉGION DE LA PESSIÈRE NOIRE À MOUSSES

DE L'OUEST DU QUÉBEC

RAPPORT DE RECHERCHE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR

VICTOR KAFKA

OCTOBRE 1997

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier la Dre Sylvie Gauthier, chercheure au Service canadien des forêts, pour son aide et sa gentillesse tout au long de la réalisation de cette étude. J'apprécie beaucoup son amitié et son dévouement. Des remerciements doivent aussi être adressés à France Conciatori qui s'est chargée de l'échantillonnage effectué dans le cadre du projet. Je dois également remercier le Dr Yves Bergeron pour son appui et le Dr Alain Leduc pour ses conseils. De façon particulière, je désire exprimer toute mon amitié envers les personnes que j'ai côtoyées au cours de ma maîtrise.

Je voudrais également signifier ma gratitude envers le Groupe de recherche en écologie forestière (GREF) de l'Université du Québec à Montréal (UQAM) pour le soutien financier de cette étude. La compagnie Produits forestiers Donohue inc., le ministère des Ressources Naturelles du Québec (MRN), et la Société de protection des forêts contre le feu (SOPFEU) méritent aussi ma reconnaissance pour avoir facilité l'accès aux données utilisées dans cette recherche. Finalement, j'aimerais souligner l'apport du Centre de foresterie des Laurentides du Service canadien des forêts.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS ii

LISTE DES FIGURES v

LISTE DES TABLEAUX vi

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES vii

RÉSUMÉ viii

INTRODUCTION ET PROBLÉMATIQUE..... 1

CHAPITRE I
CONTEXTE DE L'ÉTUDE..... 7

1.1. Région à l'étude..... 7

1.1.1. Climat..... 7

1.1.2. Histoire géologique et végétation 7

1.2. Chronologie du feu du lac Crochet..... 9

CHAPITRE II
DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE..... 12

2.1. Données cartographiques 12

2.1.1. Sévérité du feu du lac Crochet..... 12

2.1.2. Polygones forestiers et dépôts de surface..... 14

2.1.3. Temps depuis le dernier feu..... 14

2.1.3.1. Analyse de photographies aériennes..... 14

2.1.3.2. Échantillonnage sur le terrain..... 16

2.1.3.3. Tracé des feux récents..... 18

2.1.3.4. Cartographie des feux et sites d'échantillonnage..... 18

2.2. Analyses statistiques 18

2.2.1. Paramètres de la distribution des îlots de végétation résiduelle et du patron du feu..... 18

2.2.2.. Facteurs locaux et sévérité du feu..... 21

2.2.2.1 Classification des variables..... 21

2.2.2.2. Modèles log-linéaires..... 25

2.2.2.3. Évaluation de la relation entre les modalités des modèles..... 26

CHAPITRE III
RÉSULTATS 28

3.1. Distribution des îlots de végétation résiduelle et patron du feu..... 28

3.2. Relations entre les facteurs locaux et la sévérité du feu..... 32

3.2.1. Sélection de modèles log-linéaires parcimonieux..... 32

3.2.2. Description du modèle #2..... 33

3.2.3. Description du modèle #1..... 38

CHAPITRE IV
DISCUSSION 40

4.1. Végétation résiduelle et patron du feu..... 40

4.2. Facteurs locaux et sévérité du feu..... 43

CONCLUSION 47

BIBLIOGRAPHIE 49

ANNEXE A 53

LISTE DES FIGURES

Figure		Page
1.	Localisation de la région à l'étude au Québec	8
2.	Carte de la sévérité du feu du lac Crochet	13
3.	Carte des feux: Région Lebel-sur-Quévillon	19
4.	Ratio du paramètre log-linéaire estimé à l'écart type de l'interaction entre le type de couvert du peuplement et la sévérité	36
5.	Ratio du paramètre log-linéaire estimé à l'écart type de l'interaction entre le dépôt de surface et la sévérité	37
6.	Ratio du paramètre log-linéaire estimé à l'écart type de l'interaction entre le dépôt de surface, le temps depuis le dernier feu et la sévérité	39

LISTE DES TABLEAUX

Tableau		Page
1.	Conditions météorologiques prévalant lors du feu du Lac Crochet	11
2.	Description des dépôts de surface	15
3.	Résultats de la lecture des échantillons pris sur les arbres	17
4.	Fréquences des modalités des variables	22
5.	Superficies occupées par les diverses classes de sévérité du feu du lac Crochet	29
6.	Paramètres structuraux du feu du lac Crochet	30
7.	Pourcentages de zones brûlées à différentes distances de la végétation résiduelle	31
8.	Importance des effets dans les modèles log-linéaires	34

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ASCII	American standard code for information interchange
CAAF	Contrat d'approvisionnement et d'aménagement forestier
DXF	Autocad ASCII drawing interchange file
GREF	Groupe de recherche en écologie forestière
MTM	Modified Transverse Mercator
MRN	Ministère des Ressources naturelles du Québec
NAD	North american datum
SIG	Système d'information géographique
SOPFEU	Société de protection des forêts contre les incendies forestiers
UQAM	Université du Québec à Montréal
UTM	Universal Transverse Mercator

RÉSUMÉ

On connaît peu la dynamique des feux de forêt dans le façonnement de la mosaïque forestière de la pessière noire à mousses. Dans le cadre de cette problématique, on a étudié le feu de forêt du lac Crochet, qui a couvert près de 50,000 hectares dans le nord-ouest de la forêt boréale au Québec entre le 16 août et le 20 octobre 1995. L'effet de certains facteurs biotiques et abiotiques locaux sur la sévérité du feu de forêt, la distribution des îlots de végétation résiduelle et le patron du feu ont été analysés. Les analyses ont été réalisées à l'aide des systèmes d'information géographique. Malgré l'ampleur et la forte intensité du feu, l'étude révèle que la sévérité du feu sur les peuplements forestiers semble définitivement reliée à certaines composantes locales du territoire. En effet, des modèles log-linéaires indiquent que certaines modalités du couvert forestier, du temps depuis le dernier feu et du type de dépôts de surface ont eu un effet déterminant sur la sévérité du feu. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, la densité, l'âge et la hauteur du peuplement n'ont pas influencé la sévérité du feu du lac Crochet. Par ailleurs, les îlots de végétation résiduelle ont totalisé une superficie de 1292 hectares à l'intérieur du périmètre du feu, ce qui équivaut à 2.6% de l'étendue totale du feu. On retrouve seulement 0.06 îlot pour chaque 100 hectares que le feu a couvert mais l'étendue moyenne et médiane de ces îlots est grande, révélant des superficies de 43.1 et 19.8 hectares, respectivement. L'indice de configuration de l'incendie indique une valeur de 4.21 alors que l'indice de lisière s'établit à 5.33. On note que 84% de la région perturbée est à moins de 500 mètres d'une végétation résiduelle. Considérant uniquement les îlots de végétation résiduelle qui ont survécu au feu, plus que 30.8% de la zone brûlée se retrouve à moins de 500 mètres. Ce rapport met en évidence l'importance de ces découvertes pour l'étude de la mosaïque forestière boréale.

MOTS CLÉS:

Écologie du paysage, feu, forêt boréale, hétérogénéité spatiale, incendie, lac Crochet, modèle log-linéaire, mosaïque, patron, perturbation, pessière, Québec, sévérité, SIG, systèmes d'information géographique

INTRODUCTION ET PROBLÉMATIQUE

Dans le cadre d'un aménagement forestier qui visera de plus en plus un développement durable, il est essentiel de comprendre la dynamique forestière afin de conserver l'intégrité et la biodiversité des écosystèmes forestiers. L'écosystème de la forêt boréale est composé de peuplements divers qui varient selon leur âge, composition, structure et répartition dans l'espace. Cet assemblage plus ou moins complexe de types forestiers se nomme mosaïque forestière. Il semble bien que la meilleure façon de préserver la biodiversité des écosystèmes forestiers est de se doter de stratégies d'aménagement qui favorisent la conservation de la diversité de la mosaïque forestière qu'on retrouverait sous des conditions naturelles (Franklin, 1993; Attiwill, 1994). D'ailleurs, malgré le fait qu'on reconnaît depuis quelques années le rôle important que jouent les perturbations naturelles (feux, épidémies d'insectes, chablis, maladies)(Pickett et White, 1985) et d'autres facteurs abiotiques tels les dépôts de surface (Gauthier *et al.*, 1996) dans le façonnement d'une mosaïque forestière naturelle, la dynamique qui explique une variation spatiale des peuplements dans le paysage de la forêt boréale reste largement inconnue.

Les incendies forestiers font partie intégrante de la dynamique de l'écosystème de la forêt boréale. Ces perturbations de grande envergure jouent un rôle prédominant sur la création et le développement de la mosaïque forestière. Des observations confirment que la structure des paysages forestiers de la forêt boréale de la région du Labrador, du nord-est ontarien et du nord-ouest québécois semble être largement déterminée par l'histoire des feux (Cogbill, 1985; Stocks et Flannigan, 1987). Cogbill (1985) mentionne que la topographie joue également un rôle important. En effet, le paysage forestier global de la forêt boréale est en grande partie le résultat de ces grands feux de forêt, rares et intenses (Johnson, 1992). Il y a donc des années de feu très importantes où d'énormes superficies de la forêt boréale sont affectées, un seul feu pouvant couvrir plusieurs centaines de milliers d'hectares (Viereck,

1983). Ces années où les feux couvrent de grandes surfaces sont déterminantes pour les processus écologiques et l'évolution de la forêt boréale.

Malgré leur étendue, les grands feux brûlent les peuplements à divers degrés de sévérité, dépendants d'un ensemble de facteurs, incluant d'abord l'intensité des incendies. L'intensité, étant habituellement mesurée en tant qu'intensité frontale (kW/m), représente l'énergie qui est dégagée par le feu. Cette variable est fréquemment utilisée dans la littérature se rapportant au comportement des incendies. Par contre, la sévérité est bien plus significative d'un point de vue écologique puisqu'elle représente en quelque sorte l'effet global d'un feu sur l'environnement. La sévérité d'un feu se définit par la mortalité des arbres, des plantes et des organismes du sol. En outre, elle inclut également la matière organique consumée (Brown and Debyle, 1987). On se rend compte que la sévérité du feu est très variable dans l'espace, de là la nécessité d'étudier l'importance de cette variable sur la mosaïque forestière.

L'hétérogénéité spatiale du patron de la sévérité d'un feu influence l'établissement de la végétation et plusieurs autres composantes écologiques (Turner et Romme, 1994). Lors d'un incendie majeur en forêt boréale, plusieurs îlots de végétation résiduelle échappent totalement au feu. Ces îlots définissent la mosaïque forestière à l'intérieur du périmètre des feux. Les arbres survivants au feu peuvent aussi diversifier la mosaïque forestière en créant des peuplements qui auront des structures inéquiennes. La végétation résiduelle joue un rôle écologique important puisqu'elle permet la survie de certains organismes, la régénération et la recolonisation des territoires avoisinants, en plus de servir d'habitat à plusieurs espèces. Par exemple, Gasaway et Dubois (1985) ont démontré que les orignaux se retrouvaient en majorité dans les îlots de végétation résiduelle lorsqu'ils fréquentent un brûlis récent.

Depuis longtemps, on reconnaît l'influence du climat sur la fréquence, l'intensité et l'étendue des feux de forêt. Les conditions météorologiques déterminent la progression du feu à une échelle régionale alors qu'il semble que le comportement local d'un incendie soit contrôlé principalement par des facteurs biotiques et abiotiques du paysage (Foster, 1982; Rowe, 1983). Ces facteurs tels la topographie, les éléments physiographiques du paysage et l'arrangement spatial des types de combustibles, jouent un rôle méconnu (Turner et Romme, 1994) mais ils pourraient tous s'avérer importants pour déterminer le patron de sévérité d'un

feu. Notons par exemple, Van Wagner (1983) qui mentionne le type de végétation, la topographie, la variation du vent, de même que la période de la journée où le feu sévit comme facteurs influençant la sévérité d'un feu.

Il a été également démontré que la topographie et l'orientation de la pente pouvaient jouer un rôle sur la sévérité d'un feu. Engelmark (1987) a observé que la plupart des feux dans un territoire de la forêt boréale, au nord de la Suède, semblait s'être propagé sur les pentes abruptes, les plateaux continus et les basses altitudes. Par contre, l'orientation des pentes n'était pas correlée à la fréquence des feux (Engelmark, 1987) alors que Zackrisson (1977) a observé l'importance de cette orientation et de la concavité de certains éléments du paysage pour une fréquence de feu moindre. Ces phénomènes s'expliquent par le fait que les vallées ont tendance à brûler vers le haut des pentes plutôt que vers le bas, là où les conditions sont généralement plus humides (Romme and Knight, 1981). Les épidémies d'insectes, comme celle de la tordeuse des bourgeons de l'épinette, représentent un autre facteur qui peut influencer la sévérité du feu et ce, de par l'accumulation de combustibles morts (Rowe et Scotter, 1973).

L'influence de ces facteurs locaux reste ambiguè puisque Johnson et Gutsell (1994) rapportent au contraire que les patrons observés sur les cartes de l'historique des feux ne correspondent pas à des patrons d'âge des peuplements avant feu, de type du combustible et d'élévation, surtout lorsque les feux se produisent lors de périodes d'extrême sécheresse. En effet, on a démontré que c'est lors de conditions atmosphériques modérées que le combustible peut affecter le comportement d'un feu de cime dans les forêts subalpines (Bessie et Johnson, 1995).

Les barrières naturelles au passage des feux en forêt boréale sont également des facteurs importants qui influencent sa progression. Ainsi, Heinselman (1973) mentionne que les portions de territoire qui brûlent le moins fréquemment et le moins intensément sont les tourbières, les vallées, les ravins, les îles et les endroits où la proportion des cours d'eau est élevée. De plus, Heinselman (1981) observe de la végétation résiduelle dans des secteurs adjacents aux barrières naturelles tels les lacs, les rivières, et où la topographie change brusquement. Par exemple, à l'intérieur du périmètre d'un feu de forêt, un peuplement feuillu

s'est présenté comme une barrière au feu, protégeant un îlot de végétation résiduelle important (Foster, 1982). Le contour du feu est également affecté par les cours d'eau, les tourbières et les enclaves de feuillus (Foster, 1982). En effet, lors de l'analyse du régime de feu sur le périmètre du lac Duparquet (~50 km^2) en forêt boréale, Bergeron (1991) a observé que tous les sites où certains arbres étaient épargnés par les feux se trouvaient sur des péninsules. Les îlots de végétation ainsi protégés pourraient donc résister à plusieurs feux subséquents selon leurs caractéristiques et leur emplacement. Les îlots de végétation résiduelle contribuent sans aucun doute à la présence de vieux peuplements dans la mosaïque forestière. Plusieurs personnes pensent que la forêt boréale comporte peu, voire pas, de peuplements forestiers très âgés. Au contraire, il semble que certains des peuplements de la forêt boréale n'aient pas brûlés depuis plusieurs centaines d'années et peut-être même davantage (Kafka, 1996).

Le problème est qu'on en sait relativement peu sur la végétation résiduelle et sur la dynamique de la mosaïque forestière. Deux études récentes dans le domaine de l'écologie du paysage soulignent les besoins de recherche dans ce domaine. Turner et Romme (1994) suggèrent d'acquérir de meilleures connaissances sur les conséquences des feux de cime sur les processus écologiques à une échelle régionale et d'étudier les effets du patron du paysage sur la dynamique des feux. Gauthier *et al.* (1996) mentionnent l'importance de se doter d'outils pour évaluer et maintenir la diversité de la mosaïque pour bien gérer les paysages forestiers.

Quelques feux importants ont eu lieu dans la forêt boréale au Québec durant l'été 1995. Ces événements nous ont donné l'opportunité d'étudier divers aspects de la dynamique de la forêt boréale dont certains seront abordés dans ce travail. Le feu du lac Crochet, situé au sud-est de Lebel-sur-Quévillon, a été choisi afin d'effectuer certaines analyses spatiales.

Ce rapport de recherche aborde deux sujets qui touchent à l'écologie des paysages forestiers de la pessière noire à mousses de l'ouest du Québec. La première section de ce rapport porte sur l'étude du tracé et du patron de sévérité du feu du lac Crochet, ainsi que sur la distribution et la répartition des îlots de végétation résiduelle. Plusieurs études ont porté sur la propagation du feu dans le but de prévoir son comportement à des fins d'extinction (Forestry Canada, 1992) mais très peu de ces travaux ont été consacrés au comportement spécifique

d'un feu qui produit des effets différents comme des cicatrices de feu ou la survie de certains arbres (Johnson et Gutsell, 1994). En effet, on en connaît peu sur la densité, la grandeur et la dispersion des arbres ou des îlots d'arbres qui ont survécu aux grands feux de la forêt boréale (Eberhart et Woodard, 1987; Johnson, 1992; Turner *et al.*, 1994).

L'objectif de cette première section est d'estimer plusieurs paramètres qui définissent l'hétérogénéité des peuplements suite au feu. Ainsi, le pourcentage de la superficie perturbée, le nombre d'îlots de végétation résiduelle par 100 hectares, les superficies médiane et moyenne de ces îlots et les pourcentages de superficie perturbée à diverses distances des îlots seront calculés. Les indices de configuration et de lisière des incendies et les pourcentages de superficies perturbées à diverses distances d'une végétation résiduelle dispersée (arbres survivants) constituent d'autres paramètres qui seront estimés afin de décrire la structure spatiale de la sévérité du feu du lac Crochet.

Les valeurs des paramètres obtenus seront comparées, entre autres, à deux études qui ont abordé cette problématique. Il s'agit d'une étude sur l'hétérogénéité des peuplements au parc national de Yellowstone au Wyoming suite à une année de feu (1988) d'ampleur possiblement inégalée depuis près de 300 ans (Turner *et al.*, 1994), ainsi que d'une autre étude qui a cherché à analyser la distribution des îlots de végétation résiduelle de plusieurs feux en Alberta (Eberhart et Woodard, 1987). L'interprétation des résultats contribuera aux recherches sur la dynamique des mosaïques forestières naturelles.

En deuxième partie, on aborde la question de l'effet de facteurs biotiques majeurs (composition, âge, densité et hauteur des peuplements) et de facteurs abiotiques (dépôt de surface et période depuis le dernier feu) sur les divers degrés de sévérité du feu du lac Crochet. L'objectif de cette section est de mesurer l'influence respective et combinée de ces caractéristiques sur la sévérité du feu (analyse multidimensionnelle). En comparaison à une autre étude similaire, les analyses de cette étude ont l'avantage de combiner simultanément l'effet de toutes les variables disponibles. L'analyse bidimensionnelle de Nordin et Grigal (1976), suite à un feu au nord-est du Minnesota, a indiqué un lien entre la sévérité du feu et la topographie, cette dernière variable étant aussi reliée à la végétation et au type de sol. Bien que cette étude semble indiquer que les dépressions ont brûlé avec moins de sévérité en

comparaison aux pentes abruptes et aux crêtes, les interactions peuvent dissimuler d'autres relations. Notre étude pourra déterminer quelles sont les modalités de chacune des variables qui déterminent vraisemblablement une certaine classe de sévérité dans le but de mieux comprendre les interactions présentes. Ce type d'analyse permettra d'approfondir nos connaissances sur l'écosystème de la forêt boréale et sur les mosaïques forestières et ce, à une échelle locale, un domaine où le manque de connaissances est évident.

Le présent rapport de recherche débute donc par une description du contexte de l'étude. On y abordera la description des caractéristiques de la région à l'étude et la chronologie du feu du lac Crochet. Ensuite, on définira la démarche méthodologique et les résultats obtenus pour chacun des deux principaux sujets. Finalement, les résultats de l'étude seront discutés en les comparant à d'autres travaux similaires.

CHAPITRE I

CONTEXTE DE L'ÉTUDE

1.1. Région à l'étude

Le territoire à l'étude se trouve au nord-ouest du Québec dans la région de l'Abitibi, près de Lebel-sur-Quévillon (Fig.1). Il est délimité approximativement par les latitudes 48°50'N et 49°10'N et les longitudes 75°58'O et 76°10'O.

1.1.1. Climat

Cette zone fait partie de la région écologique 12a (pessière noire à mousses) et reçoit entre 1110 et 1170°C-jours (> 5.6°C), représentant une mesure cumulative de la quantité d'énergie disponible durant la saison de croissance (Thibault et Hotte, 1985). Les moyennes climatiques de la station de La Morandière, localisée à quelque 75 kilomètres au sud-ouest de la région à l'étude, indiquent des températures moyennes variant entre 8.4°C et 16.1°C pour les mois de mai à septembre. Les extrêmes minimum et maximum de température atteignent -49.0°C et 36.1°C, respectivement. On note une moyenne annuelle de 913 millimètres de précipitations par année, celles-ci se produisant davantage durant les mois d'été (Environnement Canada, 1993).

1.1.2. Histoire géologique et végétation

Le territoire à l'étude fait partie d'un plateau où le relief est faible, caractérisé par des formations de gneiss et de granite datant du Précambrien. Le dernier événement géomorphologique responsable de la mise en place du type de paysage actuel est le lac pro-glaciaire Ojibway (lors du retrait des glaciers), d'où l'omniprésence de dépôts argileux,

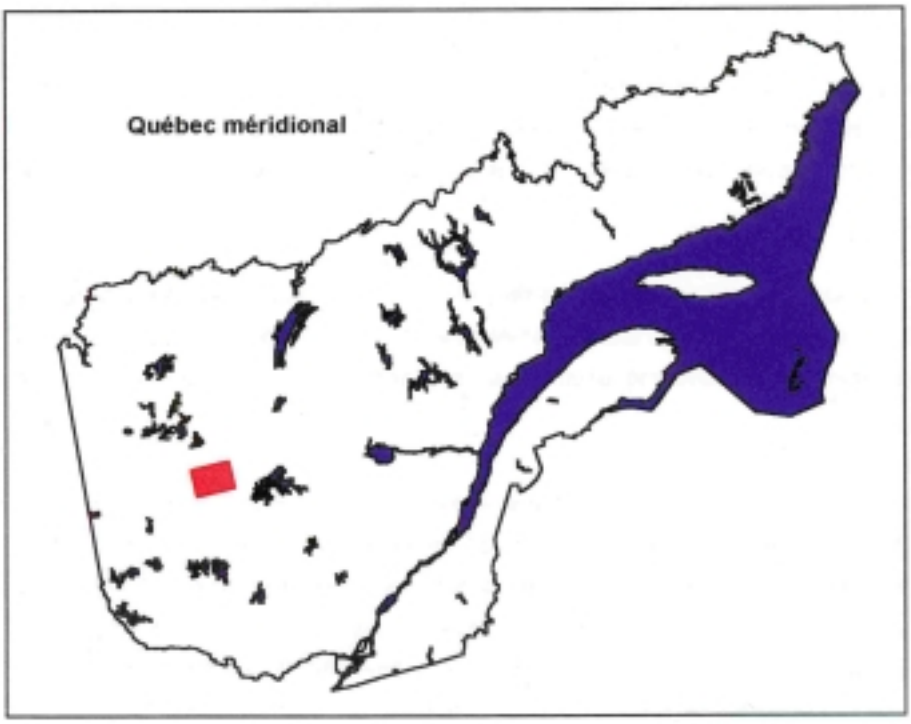


Fig.1. Localisation de la région à l'étude au Québec

limoneux ou sableux. Ceux-ci recouvrent divers dépôts glaciaires (till et dépôts associés), mais laissent souvent affleurer d'importantes accumulations fluvio-glaciaires, tels les eskers, orientés du nord au sud (Tremblay, 1974). Il y a environ 7900 ans, lorsque les glaciers d'Hudson et du Nouveau-Québec se sont séparés, le lac Ojibway s'est drainé rapidement vers le nord (Vincent et Hardy, 1977). Les dépôts de till, les sols organiques ainsi que les terrasses fluviatiles et les plaines pro-glaciaires sont donc présents dans ce territoire (Rowe, 1972).

Les analyses de profiles polliniques, qui ont été effectuées par Potzger et Courtemanche (1956) à proximité du territoire à l'étude, semblent démontrer que l'épinette noire et le pin gris ont toujours joué un rôle prédominant dans ce territoire, possiblement depuis le retrait du glacier.

La zone d'étude fait partie de la région écologique de la pessière noire à mousses (Thibault et Hotte, 1985). Cette zone fait également partie de la région de la forêt boréale telle que décrite par Rowe (1972). Plus précisément, elle se trouve à l'intérieur de la section B.3 (Gouin) qui est caractérisée par un plateau relativement plat d'où l'eau s'écoule dans plusieurs bassins versants différents. On y retrouve le pin gris, surtout sur des dépôts de sables, alors que l'épinette noire est présente sur tous les types de dépôts. Bien que la productivité forestière y soit rarement élevée, ces espèces sont abondantes et forment généralement des peuplements au couvert fermé. Également, on note certains peuplements mélangés sur les sites élevés de till ou sur les alluvions le long des cours d'eau. Ces peuplements peuvent être composés de peupliers faux-trembles, peupliers baumiers, bouleaux blancs, épinettes blanches et sapins baumiers (Rowe, 1972).

1.2. Chronologie du feu du lac Crochet

Le feu du lac Crochet, détecté le 16 août 1995, a couvert plus de 49,000 hectares au sud-est de Lebel-sur-Quévillon. Ce feu est d'origine humaine, la source d'ignition étant une étincelle provenant d'une tronçonneuse (Laveault, 1995). L'opérateur a tenté de contrôler les flammes mais sans succès.

Sous les conditions météorologiques qui prévalaient à ce moment, il a été impossible d'arrêter la propagation de l'incendie (Paré *et al.*,1996). De plus, l'extinction d'autres feux en province a limité l'équipement disponible au cours des premiers jours de l'incendie. Malgré tout, les quelques interventions alors réalisées ont consisté en la protection d'équipements et d'empilements de bois sur le territoire, la construction de quelques coupe-feux pour tenter de limiter la progression du feu, l'application de brûlage dirigé et l'arrosage aérien et terrestre. Les actions pour limiter l'étendue du feu ont été vaines au cours des premiers jours, l'incendie progressant librement (Paré *et al.*, 1996). Finalement, le feu pris une ampleur considérable les 19 et 20 août sous des conditions météorologiques idéales (Tableau 1).

Les interventions, plus importantes à partir du 21 août, combinées à des conditions météorologiques moins favorables au feu, ont permis d'arrêter la progression le lendemain (Lemay, 1996). Les actions ont consisté en la construction de lignes d'arrêt à des endroits stratégiques, la surveillance et l'intervention pour protéger les chalets du Lac Cuvilier et les empilements de bois, et l'extinction des points chauds et des fumées (Paré *et al.*,1996). Le feu sera finalement contenu le 27 août et éteint le 20 octobre sans plus de dommages (Laveault, 1995). L'évaluation des dommages en termes de bois brûlé a été déterminée le 6 septembre.

Tableau 1. Conditions météorologiques prévalant lors du feu du lac Crochet

DATE	TEMPÉRATURE	HUMIDITÉ RELATIVE	VENT direction	VENT vitesse	VENT rafale	PLUIE (mm)
950813	14.5	73	nord-ouest	5 km		
950814	22.5	51	sud-est	3 km		
950815	27.0	41	sud-ouest	22 km	33 km	0.4
950816	27.0	35	nord-ouest	20 km	36 km	
950817	26.0	46	variable	4 km		
950818	24.0	46	est	5 km		
950819	29.5	33	sud-ouest	16 km	31 km	
950820	26.0	30	ouest	22 km	34 km	
950821	17.0	61	nord-ouest	19 km	29 km	0.4
950822	14.0	78	nord-ouest	17 km	29 km	2.4
950823	13.5	94	sud-ouest	21 km	38 km	5.6
950824	9.0	73	nord-ouest	26 km	48 km	8.4
950825	13.5	67	est	8 km		
950826	13.0	94	sud-ouest	10 km		0.8
950827	16.5	38	nord-ouest	12 km		0.6
950828	20.0	36	sud-ouest	18 km	28 km	
950829	13.5	67	nord-ouest	21 km	35 km	4.8
950830	19.5	39	sud-ouest	9 km		
950831	19.0	81	sud-ouest	12 km		2.2

Source: Lemay, 1996.

CHAPITRE II

DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE

2.1. Données cartographiques

2.1.1. Sévérité du feu du lac Crochet

Bien que la sévérité soit l'effet global du feu sur l'écosystème, incluant la mortalité des arbres, des plantes et des organismes du sol ainsi que la matière organique consumée (Brown et Debyle, 1987), c'est de la sévérité du feu sur les arbres dont il sera question dans cette étude. Des cartes d'évaluation des dommages au bois (sévérité du feu sur les arbres) sont conçues par le MRN afin d'évaluer les possibilités de récupération des arbres suite à des feux de forêt majeurs, tel que celui du lac Crochet (Fig.2, *voir* carte jointe au travail). Ces cartes sont produites sur le terrain par voie aérienne, en délimitant sur des levés topographiques (1:50,000), les polygones des peuplements ayant été affectés par le feu. Le plus petit polygone de la carte de la sévérité du feu du lac Crochet couvre une superficie de 0.4 hectare. Par contre, il s'agit du seul polygone ayant une superficie en deça de 1 hectare. On peut donc considérer une unité cartographique minimum d'environ 1 hectare. La résolution se situe à environ 30 mètres.

Des fichiers contenant ces informations ont été obtenus du MRN dans le format du système d'information géographique (SIG) Arc/Info UNGENERATE, avec des coordonnées en latitude et longitude. Ces fichiers ont été importés dans Arc/Info pour former une couche de la sévérité. Après certaines corrections, la couche a ensuite été convertie à la projection du Transect Universel de Mercator (UTM, NAD83) dans la zone 18, cette projection étant choisie pour assurer l'uniformité de toutes les couches d'information utilisées.

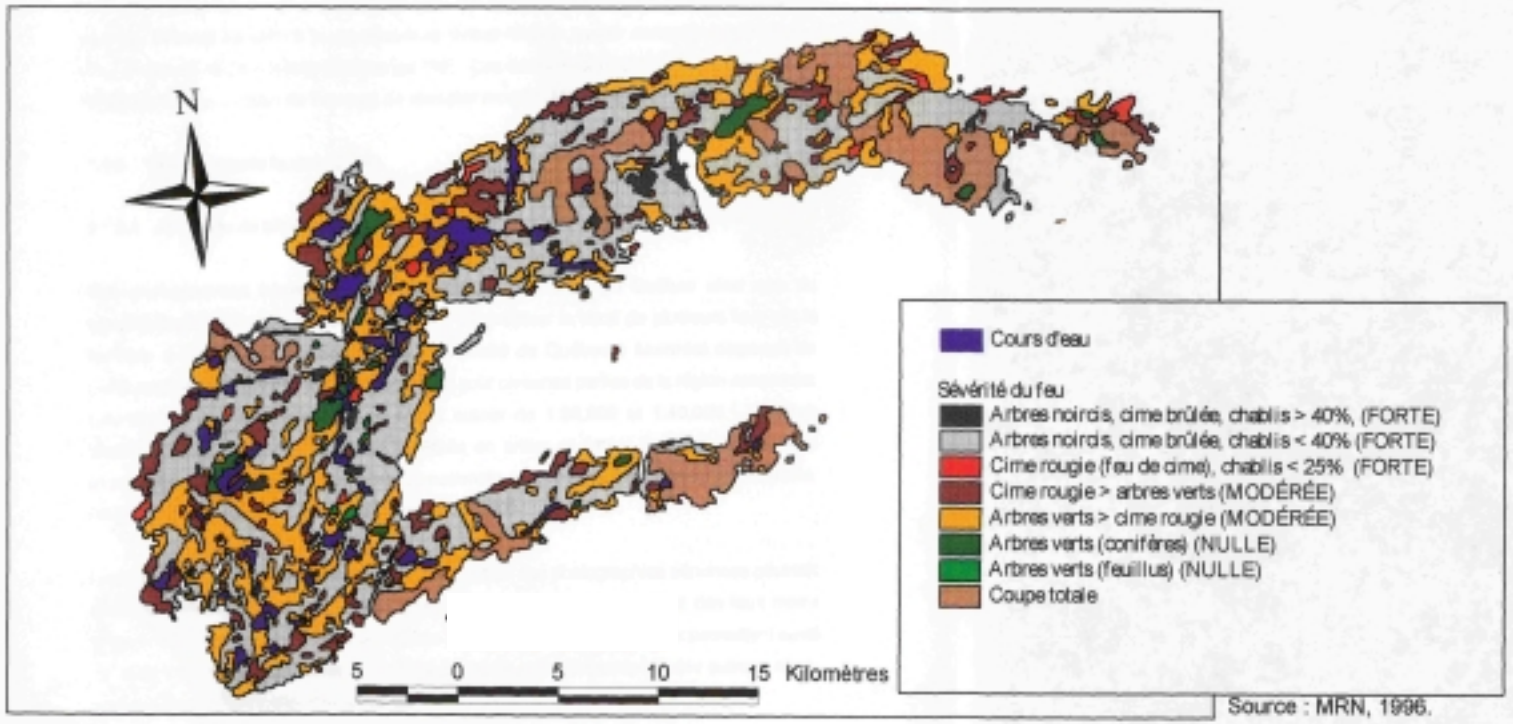


FIG.2 Carte de la sévérité du feu du lac Crochet

2.1.2. Polygones forestiers et dépôts de surface

Les données numériques des polygones forestiers (stratification du territoire selon diverses appellations cartographiques, annexes A.1 et A.2) ainsi que des dépôts de surface ont été fournies par la compagnie Produits forestiers Donohue Inc.. Le tableau 2 donne la description des divers dépôts de surface du territoire étudié. L'aire minimale cartographiée est de 2 hectares pour les terrains improductifs et de 8 hectares pour les terrains forestiers productifs (Bard *et al.*, 1984). L'intégration de ces données s'est révélée ardue de par le fait que les données devaient être transférées au format Arc/Info à partir du format intermédiaire DXF (Autocad ASCII Drawing Interchange File). Ces données ont également été converties, cette fois de la projection du Transect de Mercator modifié (MTM) à UTM.

2.1.3. Temps depuis le dernier feu

2.1.3.1. Analyses de photographies aériennes

Des photographies aériennes du gouvernement provincial du Québec ainsi que du gouvernement fédéral du Canada ont servi à reconstituer le tracé de plusieurs feux sur le territoire à l'étude. La cartothèque de l'Université du Québec à Montréal disposait de photographies qui remontent aux années 1950 pour certaines parties de la région concernée. L'échelle de ces photographies se situait autour de 1:30,000 et 1:40,000. D'autres photographies, couvrant le territoire à l'étude en entier et datant de 1936, ont pu être consultées et analysées à la bibliothèque nationale de photographies aériennes à Ottawa. Ces dernières avaient une échelle de près de 1:18,000.

Les superficies de feux qui précèdent de peu l'année des photographies aériennes peuvent être aisément représentées sur des cartes, le brûlis étant dénudé. Pour des feux moins récents, l'identification d'une forêt clairsemée ou de certains patrons de feux permettent aussi de déterminer le passage du feu. La présence de pin gris est également utile puisque ceux-ci se régénèrent habituellement après feu.

Tableau 2. Description des dépôts de surface

Type de dépôt	Description générale
Dépôts glaciaires sans morphologie particulière Till indifférencié	Dépôts lâches ou compacts sans triage constitués d'une farine de roches et d'éléments de toutes tailles généralement anguleux à sub-anguleux. La granulométrie des matériaux peut varier de l'argile au bloc selon les régions. L'épaisseur moyenne est supérieure à 1 mètre.
Dépôts glaciaires sans morphologie particulière Till indifférencié mince	Même que (1A) sauf que l'épaisseur moyenne se situe entre 25 centimètres et 1 mètre.
Dépôts fluvio-glaciaires (juxta-glaciaires)	Dépôts constitués de sable, de gravier, de cailloux, de pierres, et parfois de blocs arrondis à sub-arrondis. Ils ont souvent une stratification déformée et faillée et contiennent fréquemment des poches de till.
Dépôts fluvio-glaciaires (pro-glaciaires, épandage)	Les dépôts pro-glaciaires sont surtout composés de sable, de gravier, et de cailloux émoussés. Ils sont triés et disposés en couches bien distinctes. Le long d'un complexe, on note généralement un grano-classement des particules de l'amont vers l'aval.
Dépôts lacustres (glacio-lacustres, faciès d'eau peu profonde)	Dépôts constitués de sable et parfois de gravier.
Dépôts organiques	Dépôts constitués d'une accumulation de matière organique plus ou moins décomposée et dérivée de sphaignes, mousses, litière forestière, etc.
Substratum rocheux	Affleurement rocheux pouvant être recouvert de matériel meuble d'une épaisseur moyenne inférieure à 25 centimètres.

En général, les photographies aériennes qui datent de moins de 30 ans après le passage d'un feu semblent efficaces pour retracer adéquatement les limites de cet incendie en forêt boréale (Kafka, 1996). Dans les zones où l'on retrouve des forêts surannées et équiennes, l'identification de limites de feux sur les photographies est facilitée par l'homogénéité de la texture de ces forêts.

2.1.3.2. Échantillonnage sur le terrain

L'interprétation de photographies aériennes ne peut à elle seule reconstituer l'historique des feux et, par conséquent, l'échantillonnage du territoire est nécessaire. Il permet de déterminer en un site précis, l'âge d'une forêt et l'année à laquelle un feu aurait eu lieu, ainsi que dans certains cas, l'âge des arbres qui ont brûlé. Surtout, l'échantillonnage permet d'associer une date avec les feux qui ont été délimités. En combinant les deux méthodes, il est donc possible de créer une carte du temps depuis le dernier feu.

Un échantillonnage a donc eu lieu à l'été 1996. Cet échantillonnage avait pour but de déterminer la date précise du passage du dernier feu ou l'âge de la forêt. La localisation des sites d'échantillonnage a été basée sur l'interprétation des photographies aériennes et elle se caractérise par un choix guidé susceptible d'apporter le plus d'informations utiles. Des cartes forestières ont aussi supporté l'échantillonnage de par leur information concernant le type et l'âge du peuplement. Par contre, leur utilité première consistait à vérifier l'accessibilité des points d'échantillonnage. La priorité d'échantillonnage, en termes d'espèces présentes en un site, est le pin gris puisqu'il indique le mieux la présence et la date d'un feu.

On a prélevé trois échantillons dans chacun des quatorze sites d'échantillonnage. Le travail de terrain consiste à prélever des coupes transversales et des carottes d'arbres, préférablement à la base des arbres choisis (Johnson et Gutsell, 1994). L'échantillonnage du site comprend également une vérification du sol dans le but de découvrir des débris carbonisés, confirmant alors le passage d'un feu.

Par la suite, les échantillons sont analysés pour préciser une date (Tableau 3). On note dans ce tableau que les cicatrices indiquent 2 dates dans les années 1980 bien qu'il ne semble pas

Tableau 3. Résultats de la lecture des échantillons pris sur les arbres

Description
pba: *pinus banksiana*
pma: *picea mariana*
cic: cicatrice

Site #1

1910	pma	1773	pma	<1785	pma		

Site #2

1913	pba	1916	pba	1917	pba		

Site #4

1908	pba	1920	pba	1920	pba		

Site #5

1843	pma	1849	pma	1827	pma		

Site #7

1830	pba	1833	pba	1865	pma		

Site #8

1921	pba	1922	pba	1920	pba		

Site #9

1883	pma	1884	pma	1883	pma		

Site #10

1910	pba	1946	pba	<1936	pba	1987	cic

Site #11

1846	pma	1859	pma	1851	pma		

Site #12

1853	pma	1839	pma	1843	pma		

Site #15

1896	pba	1908	pma	1889	pba	1906	cic

Site #16

1886	pba	1887	pba	1885	pba		

Site #17

1916	pma	1915	pba	1893	pba		

Site #18

1880	pba	1880	pba	1880	pba	1985	cic

y avoir eu de feux dans ces années. Dans ces cas-ci, on peut croire que les cicatrices aient pu être causées par une maladie plutôt que par le feu puisqu'aucun autre échantillon ne confirme ces dates sur les sites. En effet, la présence de cicatrices de feux sur les échantillons ou la concordance d'âge de la plupart des échantillons prélevés en un site prouve habituellement la date d'un incendie. Dans certains cas, c'est l'âge du plus vieil arbre en un site qui sert de référence pour des zones où les incendies ne peuvent être datés et retracés précisément, définissant ainsi un âge minimum pour la forêt.

2.1.3.3. Tracé des feux récents

Le Ministère des Ressources naturelles du Québec (MRN) et la Société de protection des forêts contre le feu (SOPFEU) détiennent de l'information cartographique sur les feux qui ont sévi après 1940. Ces données complètent l'inventaire des feux sur le territoire.

2.1.3.4. Cartographie des feux et sites d'échantillonnage

Les données sur les feux ont été reproduites sur 9 cartes topographiques à l'échelle de 1:50,000. Les cartes qui représentent le temps depuis le dernier feu, ainsi que tous les sites d'échantillonnage, ont été numérisées à l'aide du SIG Arc/Info. Une couche numérique de l'hydrologie, couvrant la majeure partie de la région à l'étude excepté l'extrême est, a servi de carte de base. Les couches de feux ont ensuite été combinées pour créer une seule couche des feux de la région. Le logiciel Arc/View a été utilisé pour la présentation de la carte à laquelle le tracé du feu du lac Crochet a été ajouté (Fig.3, *voir* carte jointe au travail).

2.2. Analyses statistiques

2.2.1. Paramètres de la distribution des îlots de végétation résiduelle et du patron du feu

Les analyses visant la définition du patron du feu et la distribution des îlots de végétation résiduelle sont effectuées sur l'ensemble du feu (~50,000 hectares). Comme il a été

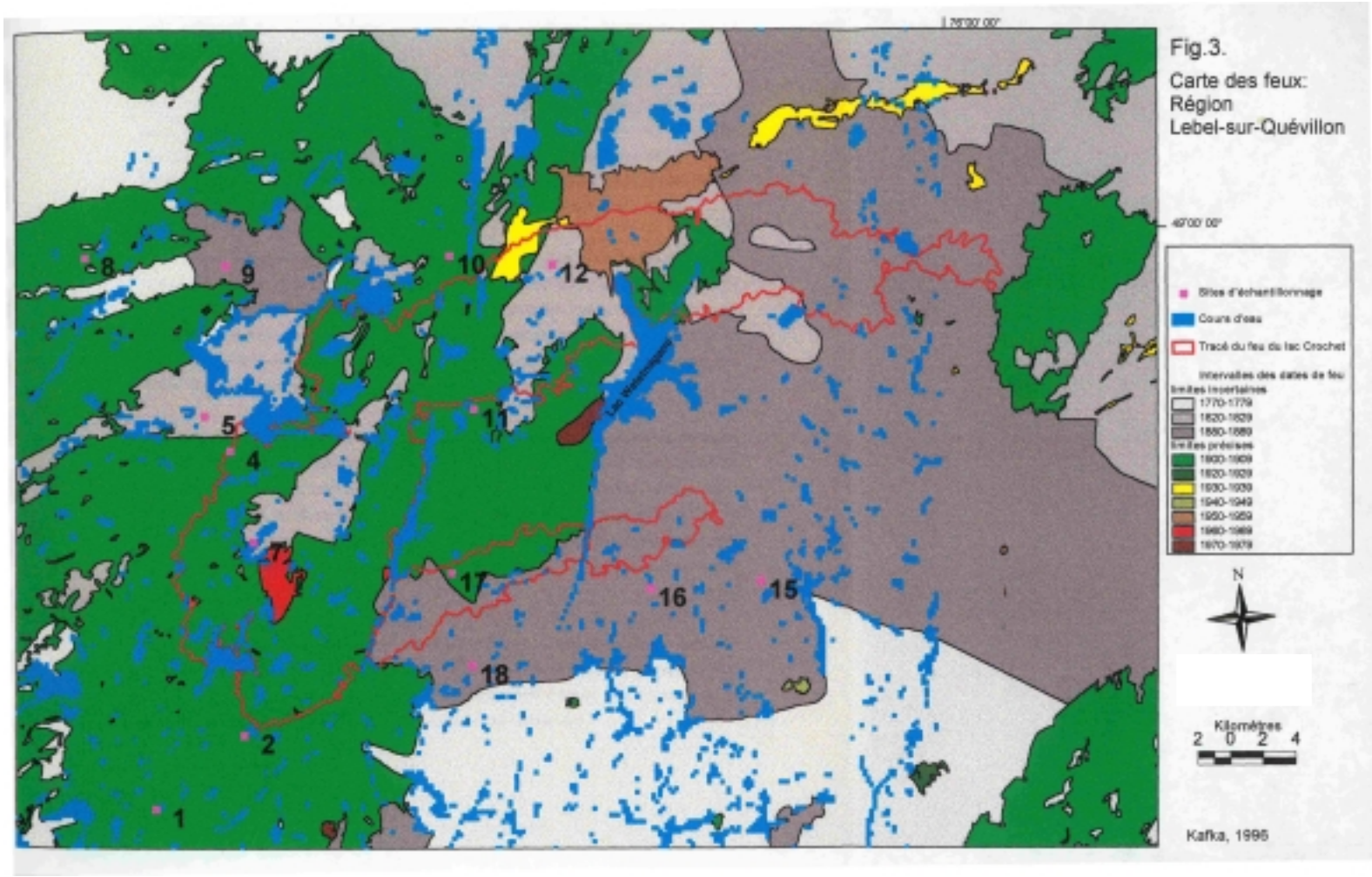


Fig.3.
Carte des feux:
Région
Lebel-sur-Quévillon
49°00' 00"
Sites d'échantillonnage
Cours d'eau
Tracé du feu du lac Crochet
Intervalles des dates de feu
1770-1779
1820-1829
1880-1889
1900-1909
1920-1929
1930-1939
1940-1949
1950-1959
1960-1969
1970-1979
N
Kilomètres
2 0 2 4
Kafka, 1995
1
2
4
5
7
8
9
10
11
12
15
16
17
18

mentionné plus haut, la couche hydrologique de base couvre presque l'ensemble du feu. En effet, une très petite section à l'extrême ouest du feu est manquante mais son effet sur les analyses est négligeable.

Des statistiques telles le nombre et la grandeur moyenne des parcelles ont été obtenues pour toutes les classes de sévérité. Pour ce qui est des autres paramètres, quelques descriptions s'imposent pour s'assurer de la précision de certains termes utilisés. Ainsi, le *feu principal* représente la plus grande étendue continue que le feu a couvert. L'*étendue totale du feu* se définit par la superficie du feu principal avec en plus toutes les autres superficies de feu qui font partie du même événement et qui sont en dehors du périmètre principal du feu.

D'autre part, la *superficie totale perturbée* est égale à l'étendue totale du feu (incluant la classe des coupes à blanc antérieures au passage du feu) moins la superficie combinée de tous les îlots de végétation résiduelle. Un *îlot de végétation résiduelle* représente un peuplement où tous les arbres sont "verts" alors que la *végétation résiduelle dispersée* se compose des îlots de végétation résiduelle et des peuplements où certains des arbres sont "verts" (Fig.2). Les cours d'eau ne font pas partie de ces superficies.

À la manière de Eberhart et Woodard (1987), les superficies perturbées à diverses distances des îlots de végétation résiduelle ou du pourtour du feu ont été calculées. L'estimation de ces valeurs pourra nous aider à comprendre davantage les mécanismes de recolonisation des brûlis par les espèces d'arbres. Ces superficies sont présentées sous forme de pourcentage de la superficie totale perturbée. De la même façon, les superficies perturbées à diverses distances d'une végétation résiduelle dispersée ou du pourtour du feu ont été obtenues.

De plus, on mesure la distance moyenne et l'écart type entre les îlots de végétation résiduelle ou le pourtour du feu, ainsi qu'entre la végétation résiduelle dispersée ou le pourtour du feu. La densité des îlots de végétation résiduelle est également calculée afin de comparer la création de ces habitats avec d'autres feux de superficies différentes.

L'indice de configuration du feu permet de mesurer la complexité de son patron général. Il est obtenu par l'équation suivante:

$$IC = P / 2 (\pi A)^{0.5}$$

P: la longueur du périmètre principal du feu (m)
A: la superficie du feu principal (m^2)

L'indice de lisière du feu, une mesure permettant d'estimer la création de ce type d'habitat, est calculé de la même façon sauf que la variable P représente la longueur totale des lisières alors que A est l'étendue totale du feu (Eberhart et Woodard, 1987).

2.2.2. Facteurs locaux et sévérité du feu

Puisque la carte des polygones forestiers qui a été rendue disponible couvre environ la moitié du feu du lac Crochet, les analyses de la sévérité sont effectuées uniquement sur la partie ouest du feu. Cette partie couvre néanmoins plus de 20,000 hectares et elle a brûlé intensément au cours des premiers jours du feu. De plus, on pense que les interventions ont eu des effets minimes sinon nuls sur la sévérité dans le territoire étudié. Finalement, une portion très restreinte de ce territoire a été affectée par des coupes antérieures à 1995.

Les diverses couches disponibles (polygones forestiers, dépôts de surface, sévérité du feu) ont été superposées pour ne former qu'une couche où chaque polygone est défini par ses nombreuses variables. Pour s'assurer de l'indépendance de l'échantillon et pour éviter l'influence de limites non-concordantes entre les couches, seulement les polygones ayant une superficie supérieure à 4 hectares ont été choisis pour l'analyse. La fréquence de chaque type de polygones a été obtenue (Tableau 4).

2.2.2.1. Classification des variables

Suite à des analyses préliminaires, un regroupement de classes des variables a été réalisé. On note que la carte de la sévérité du feu comporte 8 classes distinctes de l'effet du feu sur

Tableau 4. Fréquences des modalités des variables

Variables et modalités	Fréquences	Variables et modalités	Fréquences
Densité		Sévérité	
60% et plus	1040	Forte	1032
40-60%	647	Modérée	832
25-40%	163	Nulle	51
Hauteur		âge	
0-7 mètres	87	0-40 ans	102
7-12 mètres	303	41-60 ans	291
12-17 mètres	1160	61-80 ans	996
17-22 mètres	328	81-100 ans	152
Dépôts de surface		101 ans et plus	337
Substratum rocheux	174	Temps depuis feu	
Till mince	718	115 ans et plus	482
Till	618	87 ans	1386
Fluvio-glaciaires	87	35 ans et moins	47
Lacustres	239	Type de couvert	
Organiques	79	Feuillu ou mélangé	379
		Conifère	1513

les arbres (Fig.2). Puisque certaines classes n'étaient pas représentées avec assez d'effectifs pour réaliser les analyses log-linéaires, elles ont dû être regroupées. On a procédé de cette façon pour les trois premières classes de sévérité qui sont regroupées pour former une catégorie où la mortalité des arbres au sein des peuplements est totale (sévérité forte). Cette classe est représentée en grande majorité par des arbres noircis avec la cime brûlée et où il y a généralement moins de 40% de chablis. Les endroits où il y a plus de 40% de chablis et les arbres qui ont la cime rougie par le feu font également partie de cette catégorie. Des arbres avec des aiguilles brunes (ou rouge dans la description de cette classe) indiquent des endroits où l'intensité du feu n'a pu produire une combustion complète (Knight and Wallace, 1989) mais où les arbres ne survivront pas.

La deuxième classe de sévérité (sévérité modérée) regroupe des peuplements où la mortalité des arbres n'est pas complète, on y retrouve des arbres avec la cime rougie et des arbres verts (végétation résiduelle dispersée). Cette catégorie inclut deux classes de la description initiale de la sévérité, les arbres avec la cime rougie et les arbres verts étant chacun plus nombreux dans une des deux classes initiales respectivement. Finalement, la dernière classe représente les peuplements qui forment des îlots de végétation résiduelle (sévérité nulle) qu'ils soient résineux ou feuillus. Il est à noter que la dernière modalité de la carte de la sévérité (coupe totale) n'est pas incluse dans ces classes, ni dans les analyses.

La classification de la sévérité telle qu'établit dans cette étude permet un rapprochement de l'effet du feu avec la variable de l'intensité. L'intensité frontale d'un feu, qui est en relation directe avec la longueur des flammes, est une mesure utilisée fréquemment dans la lutte aux feux de forêt. Il apparaît évident que cette variable est reliée à la sévérité du feu sur les arbres (Alexander, 1980). L'intensité frontale d'un feu (kW/m) est définie par l'équation suivante (Byram, 1959):

$$I = H\ w\ r$$

H: chaleur minimum de combustion du combustible (Kj/Kg)

w: poids du combustible consumé par unité de superficie du front actif du feu (Kg /m^2)

r: vitesse de propagation du front de l'intensité (m/s)

Van Wagner (1983) a associé la sévérité à trois classes d'intensité. Les feux si faibles que les arbres ne portent pas de cicatrices (<300 kW/m). Les feux d'intensité modérée où la mortalité des arbres dans une petite superficie est variable (<1500 kW/h). Finalement, les feux très intenses où tous les arbres sont morts sur de grandes superficies (>1500 kW/m). On peut ainsi déterminer l'intensité probable du feu à partir de la classification de la sévérité.

Les polygones forestiers représentent des peuplements distincts selon diverses caractéristiques. À des fins d'analyses, le type de couvert, la densité, la hauteur et l'âge estimé ont été retenus comme variables explicatives. Par contre, le type de perturbation récente et la pente n'ont pas été retenus puisque leur fréquence d'apparition ou leur variabilité sur le territoire étudié était trop faible.

Afin que chaque classe ait une fréquence suffisamment élevée, les modalités des variables du couvert, de la densité, de la hauteur, et de l'âge estimé, ont été regroupées. Ainsi, puisque le territoire est constitué en grande majorité de peuplements d'épinettes noires, la classification du type de couvert s'est effectuée selon deux classes seulement. Les groupements d'arbres résineux (plus de 75% des tiges sont résineuses) forment la première classe alors que les autres peuplements qu'ils soient à tendances feuillues ou résineuses (moins de 75% des tiges sont résineuses), forment la seconde classe du type de couvert (Bard *et al*., 1984). La classification de la densité des peuplements est modifiée par un regroupement des classes A (80-100% de fermeture du couvert) et B (60-80%). Les deux autres classes représentent les catégories C (40-60%) et D (25-40%). Le nombre de classes de hauteur des peuplements a été réduit à 4. C'est-à-dire que les classes de 0-4 mètres et 4-7 mètres ont été regroupées. Les autres classes de hauteur sont 7-12 mètres, 12-17 mètres et 17-22 mètres. Six classes caractérisent l'âge estimé des peuplements équiennes dans l'appellation cartographique. Les classes de 0-20 et 21-40 ans ont été combinées alors que tous les peuplements qui avaient une forêt étagée (deux âges), fait rare sur le territoire à l'étude, ont été classés avec la classe d'âge la plus élevée. Finalement, trois modalités ont été regroupées pour décrire les dépôts de surface, cette variable comptant maintenant 5 classes pour passer à l'étape de la sélection d'un modèle log-linéaire. Ce sont les dépôts juxta-glaciaires, les dépôts pro-glaciaires (épandage) et les dépôts glacio-lacustres qui ont été regroupés sous la catégorie plus large de dépôts fluvio-glaciaires et lacustres.

À l'intérieur du périmètre du feu où les analyses sont réalisées, 5 périodes depuis le dernier feu ont été recensées (31 ans, 35 ans, 87 ans, 115 ans et 167 ans). Puisque leur fréquence était trop faible pour réaliser des analyses adéquates, les deux périodes les plus récentes ont été écartées. De plus, pour s'assurer de la précision de cette variable dû à un échantillonnage restreint, les deux dernières catégories ont été regroupées sous une période de plus de 115 ans. Un échantillonnage plus intensif aurait été nécessaire pour séparer ces deux classes avec plus d'assurance. Donc, seulement deux modalités (87 ans et 115 ans et plus) définissent cette variable pour les analyses log-linéaires. Ce regroupement correspond à une catégorisation des forêts en stade mature ou suranné.

2.2.2.2. Modèles log-linéaires

Les majorité des variables utilisées pour réaliser les analyses sont sous forme discrètes et ordonnées. Bien que les modèles log-linéaires et le test du χ^2 soient habituellement plus appropriés pour les variables discrètes, ils sont suffisamment sensibles pour qu'on n'hésite pas à les utiliser entre variables ordonnées, à l'occasion de l'analyse par ordinateur des relations entre un grand nombre de descripteurs (Legendre et Legendre, 1984). La sévérité du feu représente la variable dépendante tandis que les autres variables sont explicatives. Il est à noter qu'en théorie, lorsque l'on fait cette distinction, les modèles log-linéaires ajustés doivent obligatoirement contenir le terme d'interaction entre toutes les variables explicatives (Legendre et Legendre, 1984).

L'analyse log-linéaire comporte plusieurs avantages. En effet, lorsque l'on est en présence de tableaux de contingence multidimensionnels, les relations entre les variables peuvent être analysées à l'aide d'un modèle log-linéaire (Dixon, 1990) qui exploite tout le potentiel de la structure des données (Legendre et Legendre, 1984). Cette technique permet d'inclure tous les effets d'interactions de l'ensemble des variables sur la sévérité. Par exemple, une analyse conjointe de deux variables à la fois ne rend pas compte de toutes les interactions possibles. Une association positive entre une modalité d'une certaine variable avec une sévérité du feu quelconque pourrait être le résultat d'une autre interaction avec une autre variable, celle-ci étant plus déterminante de la sévérité. L'utilisation d'un modèle log-linéaire se révèle par conséquent indispensable à l'analyse des données.

Le modèle log-linéaire est formé par les logarithmes naturels des fréquences théoriques des cases du tableau d'une façon linéaire, où les effets principaux et les interactions sont combinés (Dixon, 1990). Par exemple, pour un tableau de fréquence à trois dimensions, le modèle log-linéaire (fréquence théorique de la case ijk) saturé est représenté par:

$$\ln F_{ijk} = \theta + \lambda_{Ai} + \lambda_{Bj} + \lambda_{Ck} + \lambda_{ABij} + \lambda_{ACik} + \lambda_{BCjk} + \lambda_{ABCijk}$$

où les paramètres λ sont les effets, θ est l'effet de la moyenne (la moyenne du logarithme des fréquences de toutes les cellules du tableau) et A, B, C indiquent les descripteurs auxquels les effets font référence. L'effet λ_{ABij} (interaction de $2^{ième}$ ordre) représente l'interaction entre A et B pour les modalités de A (i) et les modalités de B (j). L'effet λ_{ABCijk} (interaction de $3^{ième}$ ordre) représente l'interaction triple entre toutes les variables présentes pour chacune de leurs modalités. La statistique de Pearson (χ^2) et la statistique G^2 vérifient que $\lambda_{ABCijk} = 0$ pour toutes les cases simultanément. Le test indique s'il y a au moins certains des autres effets qui ne sont pas nuls (Legendre et Legendre, 1984).

Le logiciel de statistique BMDP avec le programme 4F a été utilisé pour déterminer un modèle qui s'applique bien aux variables en présence. Ce programme teste des modèles log-linéaires hiérarchiques qui, devant l'inclusion de certains effets d'ordre supérieur, obligent l'inclusion de tous les effets d'ordre inférieur (Dixon, 1990). En effet, en ce qui concerne les modèles log-linéaires, on ne considère normalement que des modèles hiérarchiques (Legendre et Legendre, 1984). La technique du tamisage des effets est utilisée afin de déterminer les variables qui ont une relation avec la sévérité (Legendre et Legendre, 1984). Le programme 4F ajuste automatiquement le nombre de degrés de liberté en fonction des espérances nulles d'échantillonnage.

2.2.2.3. Évaluation de la relation entre les modalités des modèles

Afin de détecter les relations entre les modalités de chaque variable, on portera un regard sur les paramètres des modèles ou l'écart standard normalisé des fréquences observées de chaque modalité avec leur fréquence prédite par les modèles (fréquences théoriques) et ce, pour chaque effet présent dans chacun des modèles. En réalité, pour certains paramètres, le

programme de BMDP 4F calcule le ratio de la valeur observée à celui de l'erreur standard asymptotique obtenue par inversion de la matrice d'informations (méthode du poids des moindres carrés). Ce ratio est équivalent à l'écart standard normalisé si l'échantillon est grand, comme c'est le cas pour les données qui sont analysées ici. Cette valeur peut servir à interpréter le degré de signification de chaque paramètre (Dixon, 1990). En effet, toute valeur absolue supérieure à 1.96 sera considérée significative à $\alpha = 0.05$ (Norusis, 1985). Les résidus standardisés peuvent également servir à identifier des données extrêmes qui se démarquent du modèle choisi. Par contre, des résidus standardisés de plus de |1.96 | ne surviennent habituellement pas lorsque le modèle est adéquat (Norusis, 1985).

CHAPITRE III

RÉSULTATS

3.1. Distribution des îlots de végétation résiduelle et du patron du feu

La répartition spatiale des classes de sévérité est présentée dans le tableau 5. Notamment, on remarque que la grandeur moyenne des 443 polygones est de 111 hectares. Plus de la moitié des parcelles ont des arbres verts qui occupent encore le territoire. Autre fait marquant, la moyenne de superficie des parcelles avec arbres noircis ayant la cime brûlée atteint 193 hectares en comparaison à une valeur de 333 hectares pour la catégorie coupe totale suivie du feu, tandis que les îlots préservés ont de plus faibles tailles. Les îlots de végétation résiduelle ont totalisé une superficie de 1292 hectares à l'intérieur du périmètre du feu, ce qui équivaut à 2.6% de l'étendue totale du feu (97.4% de la superficie a été perturbée). Ce pourcentage augmente à 3.1% si on exclut le territoire couvert par le feu mais qui avait déjà été coupé.

À l'intérieur des limites du feu du lac Crochet, on retrouve 0.06 îlot pour chaque 100 hectares que le feu a couvert (Tableau 6). Les étendues médiane et moyenne sont égales à 19.8 et 43.1 hectares respectivement. L'indice de configuration de l'incendie indique une valeur de 4.21, alors que pour l'indice de lisière, on obtient 5.33. Si on considère uniquement les îlots qui ont survécu au feu, on observe, par exemple, que 30.8% de la région perturbée se retrouve en deça d'une distance de 500 mètres d'une lisière où les arbres n'ont pas été affectés par l'incendie (Tableau 7). En comparaison, on note également que 84.0% de la région perturbée est à moins de 500 mètres d'une végétation résiduelle dispersée. La distance moyenne entre les lisières de végétation résiduelle s'élève à 230 mètres (écart de ± 560 mètres) alors que cette distance est réduite à 36 mètres (écart de ± 123 mètres) pour la végétation résiduelle dispersée.

Tableau 5. Superficies occupées par les diverses classes de sévérité du feu du lac Crochet

SÉVÉRITÉ	Superficies (hectares)	% de la superficie totale	Nombre de parcelles	Moyenne de superficie (hectares)
Arbres noircis avec la cime brulée et généralement plus de 40% de chablis	525	1.1	12	44
Arbres noircis avec la cime brulée et généralement moins de 40% de chablis	20935	42.7	108	194
Arbres avec la cime rougie et généralement moins de 25% de chablis	929	1.9	41	23
Mélange d'arbres avec la cime rougie (plus nombreux) et d'arbres verts	4865	9.9	112	43
Mélange d'arbres avec la cime rougie et d'arbres verts (plus nombreux)	13526	27.6	119	114
Arbres verts (conifères)	1185	2.4	23	52
Arbres verts (feuillus)	107	0.2	7	15
Coupe totale	6998	14.3	21	333
Superficie totale du feu	49070	100.0	443	111

Tableau 6. Paramètres structuraux du feu du lac Crochet

COMPARAISON / VARIABLES	Ébertart Woodard (1987) Classe de feu: 2001-20000 hectares	Feu du Lac Crochet (49069.87 ha)
% de la superficie perturbée	94.6 (4.0)	97.4
# d'îlots / 100 ha	0.39 (0.20)	0.06
Superficie médiane des îlots (ha)	9.39 (8.84)	19.8
Indice de configuration des incendies	3.76 (0.99)	4.21
Indice de lisière des incendies	7.47 (3.16)	5.33
Pourcentage de la superficie perturbée à une distance de 500 m des îlots de végétation résiduelle et du contour du feu	86.1 (11.2)	30.8

(Écarts types entre parenthèses)

Tableau 7. Pourcentages de zones brûlées à différentes distances de la végétation résiduelle

	Îlots de végétation résiduelle et pourtour du feu	Îlots de végétation résiduelle et dispersée et pourtour du feu
Pourcentage de la superficie perturbée à une distance de 100 m	6.2	24.5
Pourcentage de la superficie perturbée à une distance de 200 m	12.5	46.9
Pourcentage de la superficie perturbée à une distance de 300 m	18.8	64.0
Pourcentage de la superficie perturbée à une distance de 400 m	24.6	75.2
Pourcentage de la superficie perturbée à une distance de 500 m	30.8	84.0
Pourcentage de la superficie perturbée à une distance de 1000 m	56.7	99.3

3.2. Relations entre les facteurs locaux et la sévérité du feu

Pour bien comprendre les relations entre les facteurs locaux et la sévérité du feu, on a tenté de déterminer deux modèles log-linéaires. Un premier modèle devait expliquer l'ensemble des relations des variables significatives alors qu'un deuxième modèle serait utilisé pour rapprocher la sévérité du feu en fonction de la cartographie forestière.

3.2.1. Sélection de modèles log-linéaires parcimonieux

Suite à une première évaluation d'un modèle log-linéaire saturé à six dimensions, les résultats ont révélé que les interactions de $4^{ième}$ ordre n'étaient pas nécessaires. Lors de l'analyse d'autres modèles hiérarchiques incluant des interactions triples, 3 variables explicatives (dépôts de surface, couvert, temps depuis le dernier feu) sur 5 ont révélé une relation avec la sévérité. Ces valeurs ont été obtenues en calculant la différence entre le modèle en entier et le modèle sans l'effet que l'on désire évaluer. Une nouvelle analyse a été effectuée (sans les variables de la densité et de la hauteur) et des interactions significatives entre les variables ont pu être déterminées. Suite à l'évaluation de divers modèles contenant les associations significatives, le modèle qui représentait le mieux les données a été choisi. Legendre et Legendre (1984) et Norusis (1985) soutiennent que le choix d'un modèle est généralement un compromis entre le degré d'ajustement et la simplicité. L'hypothèse H_0 testée est que tous les effets exclus du modèle sont considérés nuls. Plus la probabilité du χ^2 est élevée, plus le modèle s'ajuste adéquatement aux données (Norusis, 1985).

Le modèle #1 qui a été retenu contient deux interactions triples et tous les effets d'ordres inférieurs. Il montre un degré d'ajustement du χ^2 et une statistique G^2 de $\alpha = 0.424$ et 0.395 ($\alpha > 0.01$) respectivement avec 18 degrés de liberté. Le modèle hiérarchique est le suivant:

$$\ln F_{ijkl} = \theta + \lambda_{Ci} + \lambda_{Dj} + \lambda_{Sk} + \lambda_{Tl} + \lambda_{CDij} + \lambda_{CSik} + \lambda_{CTil} + \lambda_{DSjk} + \lambda_{DTjl} + \lambda_{STkl} + \lambda_{CDTijl} + \lambda_{DSTjkl}$$

C: couvert D: dépôt de surface S: sévérité T: temps depuis le dernier feu

i: modalités du couvert j: modalités du dépôt de surface

k: modalités de la sévérité l: modalités du temps depuis le dernier feu

Un autre modèle a été conçu pour vérifier si l'âge estimé ou la hauteur des peuplements pouvait remplacer la variable du temps depuis le dernier feu et ainsi être plus approprié pour prédire la sévérité d'un feu à l'aide uniquement de cartes forestières. L'âge estimé et la hauteur des peuplements ont donc été testés mais leur relation avec la sévérité ne s'est pas avérée significative. Un modèle avec la hauteur a tout de même été retenu à titre indicatif. Avec un degré d'ajustement du χ^2 et une statistique G^2 de $\alpha = 0.711$ et 0.590 ($\alpha > 0.01$, 74 degrés de liberté), respectivement, le modèle qui inclut cette fois la hauteur est représenté par les six interactions doubles mais sans interactions triples. Donc, le modèle #2 est le suivant:

$$\ln F_{ijkl} = \theta + \lambda_{Ci} + \lambda_{Dj} + \lambda_{Sk} + \lambda_{Hl} + \lambda_{CDij} + \lambda_{CSik} + \lambda_{CHil} + \lambda_{DSjk} + \lambda_{DHjl} + \lambda_{SHkl}$$

C: couvert D: dépôt S: sévérité H: hauteur

i: modalités du couvert j: modalités du dépôt de surface

k: modalités de la sévérité l: modalités de la hauteur

Le tableau 8 rapporte l'importance de chaque effet dans les deux modèles. Le modèle #1 sera utilisé pour décrire l'interaction triple entre les dépôts de surface, la sévérité et le temps depuis le dernier feu. On débutera, par contre, par la description du deuxième modèle qui servira à déterminer l'influence des variables de la hauteur, du type de couvert et des dépôts de surface puisqu'il est plus simple et plus parcimonieux.

3.2.2. Description du modèle #2

Ce modèle révèle plusieurs tendances de par les nombreux ratios calculés avec les paramètres et leurs écarts types. L'effet simple de la sévérité confirme que les trois classes sont réparties inéquitablement, la sévérité nulle étant significativement moins fréquente que les deux autres classes. Certaines différences se produisent également dans les effets simples des autres variables mais dans notre cas, l'inclusion de ces effets dans le modèle vise principalement à obtenir une meilleure estimation des paramètres d'interactions (Legendre et Legendre, 1984). L'inclusion d'interactions doubles qui n'incluent pas la sévérité sont de

Tableau 8. Importance des effets dans les modèles log-linéaires

Modèle #1	**d.l.**	**G^2**	**P**
λ_C	1	63.76	0.0000
λ_D	4	91.53	0.0000
λ_S	2	138.49	0.0000
λ_T	1	32.28	0.0000
λ_{CD}	4	127.42	0.0000
λ_{CS}	2	14.07	0.0009
λ_{CT}	1	0.01	0.9172
λ_{DS}	8	45.76	0.0000
λ_{DT}	4	15.05	0.0046
λ_{ST}	2	5.81	0.0547
λ_{CDT}	4	5.01	0.2867
λ_{DST}	8	22.76	0.0037
Modèle #2			
λ_C	1	98.49	0.0000
λ_H	3	171.47	0.0000
λ_D	4	81.71	0.0000
λ_S	2	97.27	0.0000
λ_{CH}	3	163.53	0.0000
λ_{CD}	4	183.35	0.0000
λ_{CS}	2	9.33	0.0094
λ_{HD}	12	36.61	0.0003
λ_{HS}	6	4.29	0.6380
λ_{DS}	8	52.28	0.0000

d.l.: degrés de liberté P: probabilité de la statistique G^2

C: type de couvert H: hauteur du peuplement

D: dépôt de surface S: sévérité T: temps depuis le dernier feu

moindre intérêt mais elles contribuent également à mieux quantifier les interactions doubles plus importantes à l'interprétation des données (Legendre et Legendre, 1984).

Les interactions doubles qui incluent la sévérité montrent premièrement l'effet du type de couvert sur la sévérité d'un feu (Fig.4). En effet, on retrouve significativement plus de peuplements mélangés et feuillus qui n'ont pas brûlés (sévérité nulle) que de peuplements de conifères. D'ailleurs, les peuplements de conifères ont des associations hautement significatives avec une sévérité forte et significatives avec une sévérité modérée comparativement aux peuplements mélangés et feuillus.

L'interaction double de la sévérité avec les dépôts de surface dans le modèle semble également indiquer des résultats très concluants (Fig.5). Notamment, les paramètres qui se sont révélés significatifs indiquent une association forte entre la sévérité nulle sur un substratum rocheux (avec affleurements). Les peuplements sur ce type de dépôt sont aussi caractérisés par une rareté d'une sévérité modérée. La sévérité forte du feu du lac Crochet s'est produite davantage dans les peuplements sur till mince et peu dans ceux sur des dépôts organiques. Dans la même veine, les peuplements sur till mince se sont révélés peu propices à ne pas être affectés par le feu puisque la sévérité nulle y est rare. Les peuplements sur des dépôts fluvio-glaciaires et lacustres ont davantage tendance à supporter une sévérité forte plutôt que modérée ou nulle.

La relation entre la hauteur des peuplements et la sévérité n'est pas significative. Bien qu'aucun ratio ne dépasse une valeur absolue de 1.96, les différences entre certaines modalités se révèlent tout de même indicatrices de tendances. Par exemple, on note que les peuplements qui ont une hauteur de 17-22 mètres ont été plus épargnés par le feu qu'ils n'ont brûlés avec une sévérité forte. Les peuplements qui ont une hauteur relativement basse (7-12 mètres) échappent rarement au feu puisqu'on note que ces peuplements ont davantage subi une sévérité du feu forte ou modérée. Les paramètres du modèle ainsi que les valeurs des ratios utilisées pour créer les figures du modèle #2 peuvent être consultés aux annexes A.3 et A.4 respectivement.

Fig.4. Ratio du paramètre log-linéaire estimé à l'écart type de l'interaction entre le type de couvert du peuplement et la sévérité

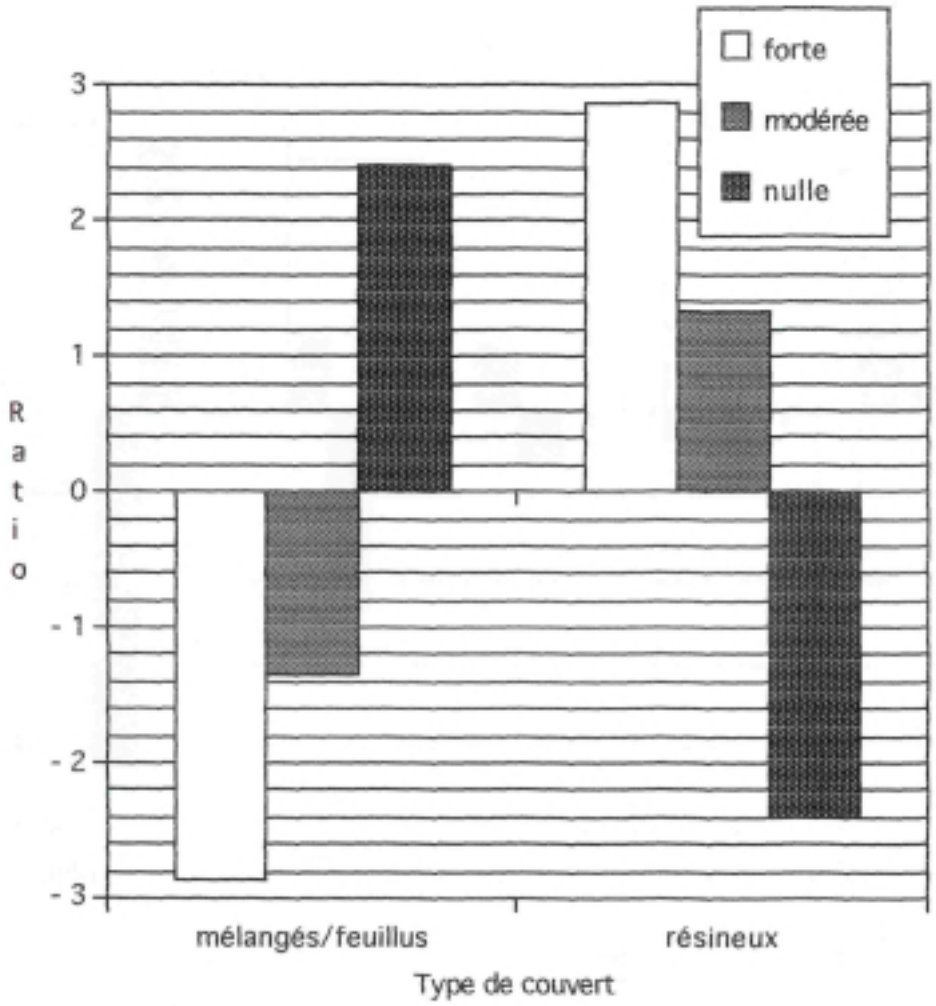
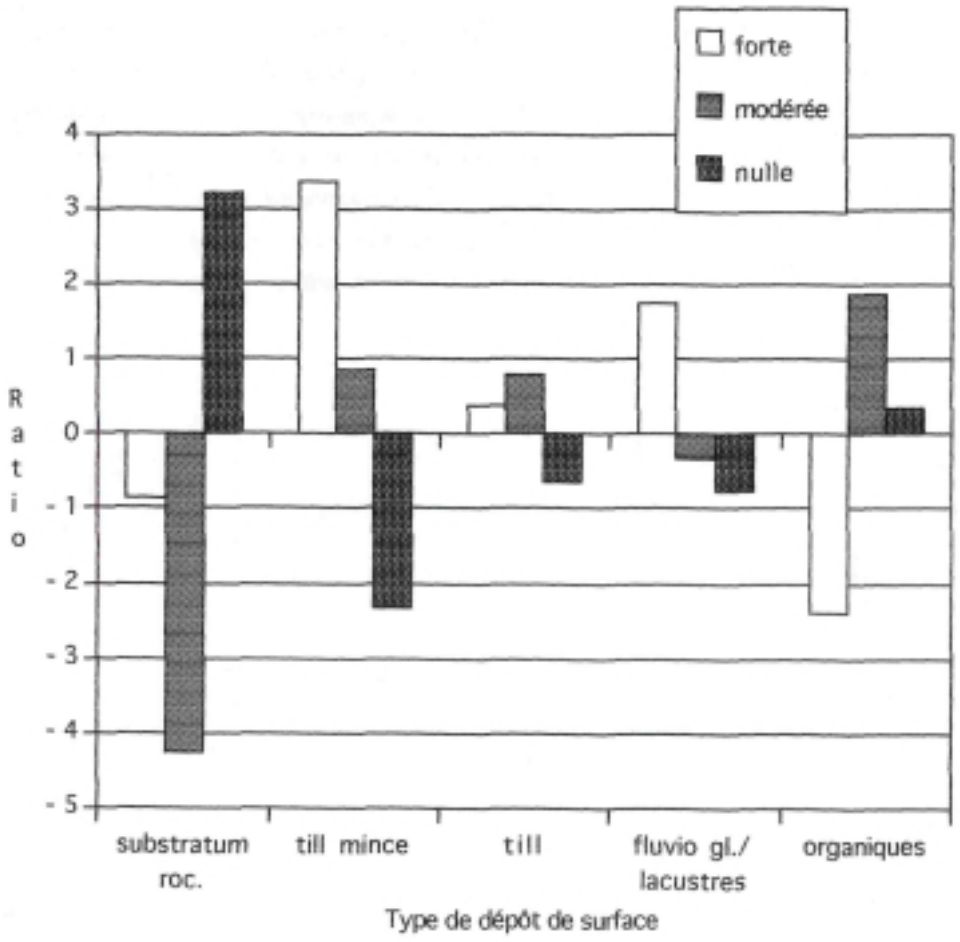


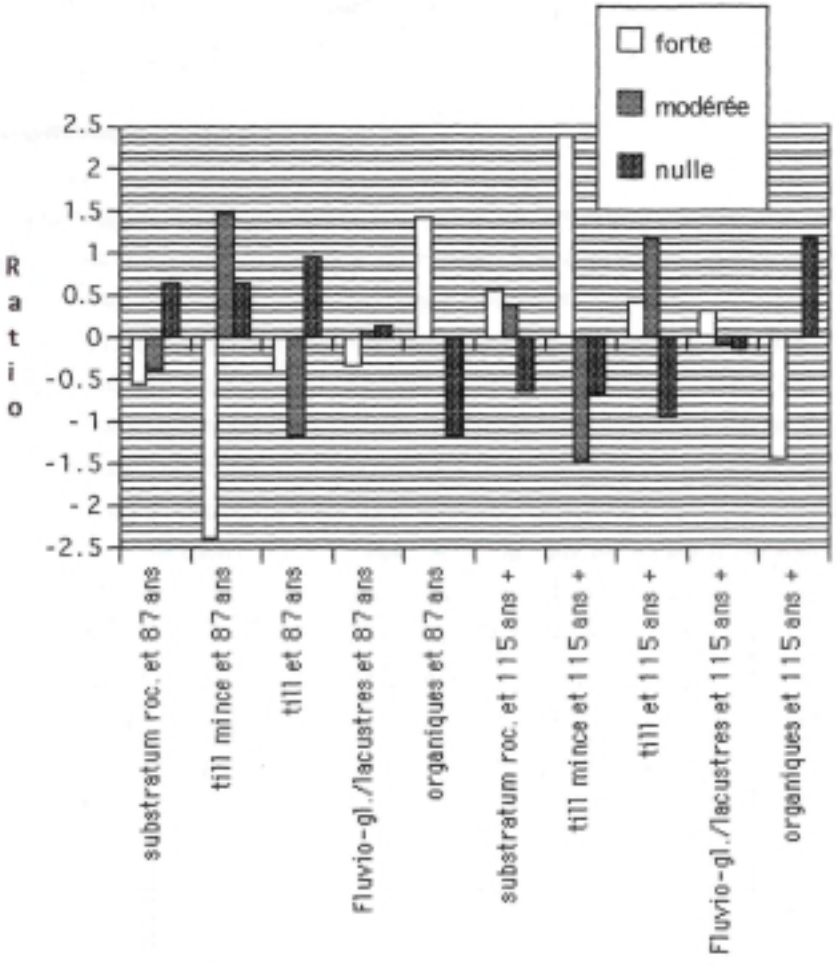
Fig.5. Ratio du paramètre log-linéaire estimé à l'écart type de l'interaction entre le dépôt de surface et la sévérité



3.2.3. Description du modèle #1

La majorité des interactions de ce modèle sont similaires au modèle #2, sauf que l'interaction entre le temps depuis le dernier feu et la sévérité est incluse dans une interaction triple qui contient les dépôts de surface. On peut observer les valeurs des ratios de cette interaction sur la fig.6. On note tout d'abord que la tendance générale indique que les peuplements matures (87 ans) ont moins de chance de subir une sévérité forte et souvent, ils ne brûlent pas du tout et ce, sur tous les dépôts de surface à l'exception des dépôts organiques. On observe l'opposé de cette dynamique pour les peuplements surannés (au moins 115 ans). Par contre, peu d'interactions se sont révélées significatives. Soulignons une sévérité forte dans les peuplements surannés sur till mince et très peu de cette sévérité dans les peueplements matures sur les mêmes dépôts. Les paramètres et les valeurs des ratios de l'interaction triple du modèle #1 peuvent être consultés aux annexes A.5 et A.6 respectivement.

Fig.6. Ratio du paramètre log-linéaire estimé à l'écart type de l'interaction entre le dépôt de surface, le temps depuis le dernier feu et la sévérité



CHAPITRE IV

DISCUSSION

4.1. Végétation résiduelle et patron du feu

Les résultats suggèrent qu'en excluant les zones où les arbres avaient été coupés antérieurement au feu, on obtient que 51% du territoire a subi un feu de cime ou un feu de surface très intense. Les feux de surface de toute sévérité et intermittents ont couvert 46% du territoire alors que le reste, soit 3%, s'est composé d'îlots de végétation résiduelle (97% de la superficie est perturbée). Ces résultats démontrent bien qu'un grand feu laisse d'importantes superficies de peuplements qui sont affectées à divers degrés suite à son passage. Un feu est loin de produire une mortalité complète de tous les peuplements sur l'ensemble de sa superficie, on constate donc la création d'une toute nouvelle mosaïque à l'intérieur même du périmètre du feu. Par contre, le taux de survie à l'intérieur des peuplements où la mortalité est variable reste indéterminé. En effet, la description qualitative du dommage aux peuplements, utilisée comme variable de la sévérité du feu, a le défaut de varier selon la personne qui fait l'évaluation et selon l'année et la saison du feu (Alexander, 1980). Par exemple, le fait que l'évaluation de la sévérité ait été déterminée seulement quelques temps après que le feu ait été contrôlé, peut fausser l'évaluation de la mortalité des arbres.

Les estimations des superficies mentionnées plus haut sont comparables à l'étude de Turner *et al.* (1994) où l'on prédit qu'en général, les grands feux sont composés d'environ 50% de feu de cime, 30% de feu de surface de forte sévérité et 20% de feu de surface de sévérité faible. Ces auteurs ont d'ailleurs observé que les classes de sévérité et la mosaïque forestière résultante suite à de petits feux (lorsque la superficie journalière brûlée était inférieure à 1250 hectares) étaient plus difficiles à prévoir que celles des grands feux.

La superficie totale perturbée pour le feu du lac Crochet, bien que plus élevée (97%), est comparable à celles obtenue par Eberhart et Woodard (1987) pour des feux plus petits (classes de 2001 à 20,000 hectares) en Alberta (Tableau 6). Cette valeur est, par contre, beaucoup plus élévée que celle obtenue pour une portion d'un feu au sud de la forêt boréale québécoise où la superficie totale perturbée a atteint 87% (Dansereau et Bergeron, 1993). Cette différence pourrait s'expliquer par le fait que ce feu soit survenu dans la zone de la sapinière à bouleau blanc, une forêt composée davantage d'arbres feuillus. On se serait tout de même attendu à une aire perturbée moindre pour le feu du lac Crochet.

De plus, lors de l'étude albertaine, où 69 feux de différentes superficies (21-17,700 hectares) ont été analysés, le nombre d'îlots de végétation résiduelle par 100 hectares décroît à partir des feux se propageant sur plus de 200 hectares. Les feux entre 2001 et 20,000 hectares ont eu en moyenne 0.39 îlots par 100 hectares. La tendance se confirme donc avec les résultats de cette étude puisqu'on en retrouve seulement 0.06 / 100 hectares suite au feu du lac Crochet. Par contre, malgré une résolution similaire (~1 hectare), il se peut que notre étude sous-estime le nombre d'îlots de par la création d'une classe de végétation résiduelle dispersée. Eberhart et Woodard (1987) tentent d'expliquer la baisse du nombre des îlots par le fait que les grands feux ont davantage de chances d'avoir des vents qui changent de direction et ainsi, certains îlots potentiels pourraient brûler subséquemment. Les conditions extrêmes des grands feux sont aussi évoquées. Le nombre peu élevé d'îlots dans l'étude du feu du lac Crochet n'a probablement pas pu être causé par le fait que 14.26% du territoire brûlé ait fait l'objet de coupes totales antérieurement au passage du feu puisqu'en les excluant, la valeur de ce paramètre passe à 0.07 îlots / 100 hectares seulement. Par contre, la fréquence peu élevée de peuplements feuillus pourrait expliquer ce phénomène. D'autre part, les îlots de végétation résiduelle du feu du lac Crochet, si on les compare toujours aux feux de 2001-20,000 hectares, ont une superficie médiane deux fois plus élevée.

Il a été observé que les valeurs de l'indice de configuration de l'incendie augmentaient simultanément avec l'étendue des feux de forêt (Eberhart et Woodard,1987; Delong et Tanner, 1996). Cette augmentation indique une irrégularité plus prononcée dans le tracé des grands incendies. Notre étude n'y fait pas exception. De grands feux, en raison de leur plus longue durée, peuvent avoir une configuration plus complexe (Foster, 1982), qui peut être

provoquée par d'importants coupe-feux. D'ailleurs, la configuration principale de l'incendie du lac Crochet semble bien être causée par un grand lac allongé du nord au sud. L'indice de lisière semble également augmenter avec la superficie des feux de forêt, indiquant des bénéfices accrus pour les espèces qui exploitent ce type d'habitat (Eberhart et Woodard,1987). Par contre, la valeur de l'indice de lisière obtenu pour le feu du lac Crochet, bien que située à l'intérieur de l'écart type, est inférieure à celle obtenue par Eberhart et Woodard (1987) pour des feux de superficies comparables. Le petit nombre d'îlots de végétation résiduelle en est sûrement la cause. Il se pourrait donc que cet indice se stabilise pour les feux de grande envergure.

La proportion du territoire perturbé à moins de 500 mètres (30.8%) est très faible si on la compare au 86.1% de l'étude albertaine (Eberhart et Woodard, 1987). De plus, légèrement moins de la moitié du territoire perturbé se retrouve à plus de 1000 mètres d'une zone épargnée. Les taux s'expliquent également en partie par le fait qu'une portion du territoire avait déjà été coupée, augmentant du même coup la distance entre les îlots de végétation résiduelle. On peut considérer que ces taux soient même légèrement inférieurs en réalité puisqu'il existe d'autres coupes qui n'ont pas brûlé sur le pourtour du feu.

On peut aussi comparer ces résultats aux feux de 1988 (229,465 hectares) dans le parc Yellowstone aux États-Unis. Dans ce parc, les superficies des feux de cime et des feux de sévérité modérée se situaient dans une large proportion (près de 100%) à moins de 500 mètres des zones faiblement ou non brûlées (Turner *et al.*, 1994). Ces différences s'expliquent par la résolution plus précise de l'étude menée au parc Yellowstone. Une unité cartographique de la sévérité du feu du lac Crochet plus petite aurait pu tenir compte davantage de tous les îlots de végétation résiduelle en séparant davantage les classes où les arbres verts et les arbres avec la cime rougie étaient rassemblés.

Par contre, pour le feu du lac Crochet, en considérant non pas uniquement les îlots de végétation résiduelle mais la végétation résiduelle dispersée, on a obtenu un pourcentage de superficie perturbée beaucoup plus élevé à 500 mètres (84.0%) et presque la totalité de cette superficie (99.2%) à 1000 mètres. La régénération de ces espaces ne représente pas un problème pour le pin gris et l'épinette noire qui ont des cônes sérotineux et semi-sérotineux,

respectivement. Ces cônes résistent au feu (Johnson, 1992) et permettent à ces espèces de se maintenir sur le territoire pourvu qu'elles soient présentes avant le feu de forêt. Autrement, les distances de la végétation résiduelle peuvent être importantes pour la recolonisation des autres espèces (épinette blanche, bouleau blanc, peuplier faux-tremble et sapin baumier) (Johnson, 1992). En effet, Galipeau *et al.* (1997) ont observé que pour l'épinette blanche et le sapin baumier, la distance d'une zone préservée et le dépôt de surface constituaient des composantes importantes pour la recolonisation de sites brûlés. Par contre, il semble qu'une végétation résiduelle dispersée ait peu d'influence sur le patron de recolonisation de ces deux espèces (Galipeau *et al.*, 1997). Donc, les grandes distances des sites brûlés par rapport aux îlots de végétation résiduelle ou au pourtour du feu mesurées dans cette étude expliqueraient en partie la présence restreinte de ce type d'espèce sur le territoire.

D'autre part, bien que la progression journalière du feu soit connue, notre étude n'en a pas tenu compte. Van Wagner (1983) stipule que la variabilité qui existe d'un feu à l'autre montre qu'il est important que les études sur les effets du feu soient reliées directement au comportement spécifique du feu. En effet, une étude plus exhaustive devrait s'appuyer davantage sur les conditions météorologiques et sur le comportement du feu en estimant la progression temporelle du feu.

4.2. Facteurs locaux et sévérité du feu

La distribution spatiale de la sévérité du feu contribue aux connaissances que l'on a sur l'hétérogénéité de la mosaïque forestière. La variation de la sévérité en relation avec des facteurs locaux peut nous renseigner davantage sur la dynamique de cette mosaïque. L'étude détaillée d'un grand feu comme celui du Lac Crochet est pertinente de par le fait que les feux de cette ampleur ont une grande importance dans le façonnement de la mosaïque forestière. En effet, ces feux marquent le paysage forestier naturel jusqu'au passage du prochain grand feu (Turner et Romme, 1994).

On sait qu'un feu produit divers degrés de sévérité en relation avec les conditions climatiques avant et pendant le feu, le type de végétation, la distribution et l'accumulation du combustible, et les éléments physiographiques (Heinselman, 1973; Tande, 1979). Plusieurs auteurs croient que des conditions de feu extrêmes pourraient annuler l'influence de facteurs locaux, au-delà d'une certaine limite d'intensité (Turner et Romme, 1994; Turner *et al.*, 1994). Par exemple, lors d'un feu en Alberta, il a été rapporté que sur une période où le feu était très intense, la propagation s'est produite dans tous les types de peuplements (Rowe et Scotter, 1973). L'importance de conditions très sèches sont aussi mises en évidence par Fryer et Johnson (1988) pour expliquer le rôle mineur qu'a joué l'élévation et les types de combustibles dans le comportement et le patron d'un incendie. D'ailleurs, Bessie et Johnson (1995) soutiennent que le comportement du feu (intensité du feu de surface et occurrence de feu de cime) a une forte relation avec les conditions atmosphériques alors que la relation avec des variables du combustible est faible. Pourtant, malgré l'ampleur et la grande intensité du feu du lac Crochet, suggérant un effet minimal des facteurs locaux sur la sévérité, les résultats de l'analyse indiquent qu'il y a tout de même une forte influence de certaines composantes du territoire.

Les analyses log-linéaires, réalisées dans le cadre de la deuxième section de cette recherche, ont permis de dégager des tendances qui démontrent qu'effectivement la sévérité est influencée par des facteurs à une échelle locale. La relation entre la sévérité et le type de couvert est connue depuis longtemps. L'étude confirme que la présence de feuillus dans les peuplements réduit la sévérité du feu tandis que les conifères ont tendance à brûler plus sévèrement. C'est donc dire que plusieurs arbres résineux survivent au feu grâce à la proximité d'arbres feuillus. En effet, dans des peuplements mélangés, il a été observé que le danger de feu de cime et de surface augmente avec la proportion de conifères à l'intérieur de ce peuplement (Rowe et Scotter, 1973). Les conifères sont généralement plus inflammables (particulièrement le pin gris) que les espèces feuillues (Van Wagner, 1983) ce qui s'explique de par l'architecture du couvert et de par le fait que les feuilles des conifères contiennent moins d'eau et plus de résines inflammables. Ces dernières caractéristiques combinées à la minceur de l'écorce des conifères font en sorte que la mortalité chez ce type d'arbre est très élevée même à des intensités faibles (Johnson, 1992).

Van Wagner (1978) a observé que lorsque le couvert d'une forêt est élevé et que les arbres sont clairsemés, un feu de surface seulement pourrait se propager. Il s'avère que la hauteur et la densité n'aient pas joué un rôle dans la sévérité du feu du lac Crochet. Quelques tendances ont tout de même été observées pour la hauteur. On a constaté que les peuplements très hauts ont été affectés moins sévèrement par le feu. L'impossibilité du feu à atteindre le feuillage des arbres est suggérée pour interpréter ce résultat puisque dans les peuplements plus bas, on obtient sensiblement le contraire, soit une sévérité forte ou modérée. Notons aussi que les peuplements élevés sont en majorité des peuplements feuillus, traduisant donc un effet indirect du couvert.

Dans la forêt boréale, le dépôt de surface est un facteur abiotique important pour expliquer les différences de végétation et la dynamique d'un site à l'autre (Bergeron et Bouchard, 1984; Sims *et al.*, 1989). Les résultats de cette étude abondent dans le même sens en ce qui concerne son effet sur la sévérité d'un feu. Premièrement, les analyses ont révélé une tendance forte des peuplements vers une sévérité nulle sur un substratum rocheux. La continuité du combustible et la présence d'arbres feuillus seraient les éléments qui freineraient la progression du feu dans ces peuplements. Les dépôts organiques semblent se comporter de façon similaire, peu de leurs peuplements ayant brûlés sévèrement. L'humidité présente sur ces dépôts ainsi que la possibilité de portions adjacentes du territoire étant dénudées d'arbres sont les raisons évoquées. Dans leur article, Dansereau et Bergeron (1993) rapportent aussi plusieurs îlots de végétation résiduelle sur des tourbières et sur des dépôts organiques et des alluvions dans leur reconstitution de l'historique des feux d'une région du sud de la forêt boréale québécoise. Finalement, un dernier dépôt, celui de till mince, se démarque des autres dans l'expression de la sévérité. Il est difficile de commenter les résultats selon lesquels les peuplements sur ce dernier type de dépôt aient brûlé plus sévèrement que les autres dépôts. La présence d'un sous-couvert dominé par les résineux pourrait expliquer ce phénomène puisque ce type de dépôt est également associé à un couvert feuillu et mélangé.

L'effet de l'âge des peuplements sur la sévérité du feu suscite différentes opinions et il est probable que son influence soit variable selon les situations. Habituellement, on croit que les peuplements âgés brûlent plus sévèrement. Quelques observations contraires peuvent être

notées dans la littérature. Par exemple, on suggère que plusieurs espèces de conifères sont davantage sujet à un feu de cime lorsqu'elles sont jeunes ou modérément âgées (Van Wagner, 1978), des feux sévères pouvant se produire dans des peuplements qui ne sont pas âgés de plus de 10 ans (Van Wagner, 1983). Foster (1982) note que les peuplements d'épinette noire semblent être légèrement moins inflammables avec l'âge dans une étude dans le sud-est du Labrador due à un changement des conditions locales vers un milieu plus humide et plus froid.

Le temps depuis le dernier feu est une variable qui influence la sévérité dans cette étude, mais son effet varie selon le type de dépôt. Cette variable est semblable à l'âge des peuplements (considérant une installation rapide des peuplements après feu en forêt boréale), et elle se rapproche également de l'accumulation de combustible, qui fait partie des éléments proposés pour influencer le comportement du feu (Rowe et Scotter, 1973). En général, on peut affirmer que les peuplements surannés ont brûlé plus sévèrement que les peuplements matures sur tous les dépôts, l'opposé s'étant produit sur les dépôts organiques. Il est donc possible que la localisation des peuplements sur ces derniers dépôts fait de ces sites des lieux propices au développement de forêts anciennes. La présence très rare de peuplements jeunes sur le territoire étudié n'a pas permis d'effectuer des observations sur ces peuplements.

CONCLUSION

Les résultats de cette recherche permettent de suggérer un nombre d'avenues intéressantes dans le contexte de l'aménagement durable de la forêt boréale et plus spécifiquement pour la zone de la pessière à mousses. Les paramètres du patron et de la sévérité qui ont été calculés dans cette étude ainsi que ceux des autres études mentionnées définissent en quelque sorte l'hétérogénéité qui est créée par les feux de forêt. En somme, ces paramètres, les composantes du territoire, le régime de perturbations et d'autres variables décrivant la mosaïque forestière pourraient éventuellement guider un aménagement qui respecte la dynamique naturelle. Ainsi, il serait possible de se doter de stratégies d'aménagement qui pourront protéger la biodiversité et respecter les divers usages de la forêt, tout en permettant la continuité à long terme de la récolte de la ressource à des fins économiques.

Pour l'instant, l'hétérogénéité spatiale de la sévérité d'un feu résulte en un environnement qui est beaucoup plus diversifié que les patrons de coupes forestières (Delong et Tanner, 1996). Suite à cette étude, on ne peut proposer de modèles d'aménagement, mais éventuellement, des coupes totales de patrons variables et de diverses superficies, accompagnées de zones à préserver, seraient probablement la voie à suivre. Cet aménagement devrait également tenir compte de la possibilité de perturbation sur le territoire. Toutefois, on se doit d'en connaître davantage sur la mosaïque naturelle de paysages distincts pour que ces propositions d'aménagement deviennent réalité.

Une constatation importante qui ressort de cette étude est l'effet potentiellement néfaste de la coupe de récupération sur la mosaïque forestière, particulièrement si les îlots de végétation résiduelle sont coupés. Dans la répartition des classes de sévérité, on remarque que les parcelles créées par un feu de cime peuvent couvrir de grandes étendues qui en moyenne atteignent près de 200 hectares. Si on considère les parcelles des coupes forestières antérieures au feu en plus des coupes de récupération suite au feu, d'énormes superficies

ouvertes peuvent être créées. La plupart des paramètres, qui ont été calculés dans cette étude, seraient totalement modifiés. De plus, on ne peut que craindre les répercussions de la coupe des îlots de végétation résiduelle puisqu'elle perturbe les milieux et les organismes qui semblent avoir échappé au feu. Si la végétation résiduelle survit et sert de source de graines, la coupe de récupération pourrait possiblement limiter la recolonisation des sites brûlés et affecter non seulement la biodiversité des écosystèmes forestiers, mais également les coûts associés au reboisement.

L'étude a donc permis de cerner plusieurs tendances sur la variation de la sévérité du feu et sur la dynamique forestière dans la pessière noire à mousses du Québec. En effet, ce type d'étude est très important pour mieux comprendre la dynamique de la mosaïque forestière de la forêt boréale et pour se doter de plan d'aménagement et de conservation de cet écosystème dans un proche avenir. D'autres études plus approfondies sur la question sont sans aucun doute nécessaires afin de progresser. Notons par exemple le début d'un projet de caractérisation de la mosaïque forestière dans divers paysages du centre de la forêt boréale québécoise qui semble prometteur. Des études proposées incluent la recherche sur l'ampleur des feux les plus grands, la régénération et la mortalité à l'intérieur des feux et des aménagements, l'évaluation de l'effet de plus d'un siècle de coupes forestières et d'influence humaine intensive sur la mosaïque forestière, l'effet potentiel du changement climatique et bien d'autres. D'ailleurs, les changements climatiques à l'échelle mondiale doivent être évalués puisqu'ils pourraient changer la fréquence et la sévérité des feux (Turner et Romme, 1994).

Lors de cette étude, la reconstitution de l'historique des feux s'est réalisée sur un territoire significativement plus grand que le feu lui-même en couvrant une superficie de 3500 km^2. Une fois l'échantillonnage sur le terrain complété pour couvrir l'ensemble de ce territoire, on pourra en savoir plus sur l'étendue générale des feux durant certaines périodes de l'histoire et ainsi comparer les grandes années de feu avec d'autres études. La reconstitution permettra de quantifier le régime des feux et de définir la mosaïque forestière de ce type de paysage avant les coupes forestières et le feu du lac Crochet. De plus, il serait intéressant de comparer le feu du lac Crochet avec un autre feu qui a couvert une superficie similaire durant la même période en 1995 mais qui est situé dans la sapinière à bouleau blanc.

BIBLIOGRAPHIE

Alexander M.E. 1980. Calculating and interpreting forest fire intensities. *Canadian Journal of Botany* 60: 349-357.

Attiwill, P.M. 1994. The disturbance of forest ecosystems: the ecological basis for conservative management. *Forest Ecology and Management* 63: 247-300.

Bard, A., *et al.* 1984. Normes d'inventaire forestier. Gouvernement du Québec, Les publications du Québec. 177 p.

Bergeron, Y. 1991. The influence of island and mainland lakeshore landscapes on boreal forest fire regimes. *Ecology* 72(6): 1980-1992.

Bergeron, Y., et Bouchard, A. 1984. Use of ecological groups in analysis and classification of plant communities in a section of western Québec. Vegetatio 56: 45-63.

Bessie, W.C., et Johnson, E.A., 1995. The relative importance of fuels and weather on fire behaviour in supalpine forests. *Ecology* 76: 747-762.

Brown, J.K., et DeByle, N.V. 1987. Fire damage, mortality, and suckering in aspen. *Canadian Journal of Forest Research* 17: 1100-1109.

Byram, G.M. 1959. Combustion of forest fuels. In *Forest fire: control and use.* McGraw-Hill, New York.

Cogbill, C.V. 1985. Dynamics of the boreal forests of the Laurentian Highlands, Canada. *Canadian Journal of Forest Research* 15: 252-261.

Dansereau, P.R., et Bergeron, Y. 1993. Fire history in the southern boreal forest of northwestern Quebec. *Canadian Journal of Forest Research* 23(1): 25-32.

Delong, S.C., et Tanner D. 1996. Managing the pattern of forest harvest: lessons from wildfire. *Biodiversity and Conservation* 5:1191-1205.

Dixon W.J. 1990. BMDP Statistical Software (Volume 1). University of California Press. Berkeley, CA. 630 p.

Eberhart, K.E., et Woodard P.M. 1987. Distribution of residual vegetation associated with large fires in Alberta. *Canadian Journal of Forest Research* 17: 1207-1212.

Engelmark, O. 1987. Fire history correlations to forest type and topography in northern Sweden. *Annales Botannici Fennici* 24: 317-324.

Environnement Canada 1993. Normales climatiques au Canada, 1961-1990. Service de l'environnement atmosphérique. Programme climatologique canadien.

Franklin, J.F. 1993. Preserving biodiversity: species, ecosystems, or landscapes. *Ecological Applications* 3: 202-205.

Fryer, G.I., and Johnson, E.A. 1988. Reconstructing fire behaviour and effects in a subalpine forest. *Journal of Applied Ecology* 25: 1063-1072.

Forestry Canada (Fire danger group) 1992. Development and structure of the canadian forest fire behaviour system. Forestry Canada Science and Sustainable Development Directorate, Ottawa, Information Report ST-X-3.

Foster, D.R. 1982. The history and pattern of fire in the boreal forest of southeastern Labrador. *Canadian Journal of Botany* 61: 2459-2471.

Galipeau C., Kneeshaw, D., et Bergeron, Y., 1997. White spruce and balsam fir colonization of a site in the southeastern boreal forest as observed 68 years after fire. *Canadian Journal of Forest Research* 27: 139-147.

Gasaway, W.C., et Dubois, S.D. 1985. Initial response of moose, *Alces alces*, to a wildfire in interior Alaska. *The Canadian Field-Naturalist* 99(2): 135-140.

Gauthier, S., Leduc, A., et Bergeron Y. 1996. Forest dynamics modelling under natural fire cycles: a tool to define natural mosaic diversity for forest management. *Environmental Monitoring and Assessment* 39: 417-434.

Gauthier, S. 1991. Structure génétique et sérotinisme de populations de pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) soumises à deux régimes de feux distincts. Thèse de doctorat, Département des sciences biologiques. Université de Montréal. Montréal (Québec). 210 p.

Heinselman, M.L. 1981. Fire intensity and frequency as factors in the distribution and structure of northern ecosystem. In *Proceedings of fire regimes and ecosystem properties.* United States Forest Service General Technical Report Wo-26. pp.7-57.

Heinselman, M.L. 1973. Fire in the virgin forests of the Boundary Waters Canoe Area, Minnesota. *Quarternary Research* 3: 329-382.

Johnson, E.A. 1992. *Fire and Vegetation Dynamics: Studies from the North American Boreal Forest*, Cambridge University Press, Cambridge. 129 p.

Johnson, E.A., and Gutsell, S.L. 1994. Fire frequency models, methods and interpretations. *Advances in Ecological Research* 25: 239-287.

Kafka, V. 1996. Stage à l'Unité de recherche et développement forestiers de l'Abitibi-Témiscamingue. Effets du changement climatique sur la fréquence des feux au sud de la forêt boréale. Bilan de stage présenté comme exigence partielle de la maîtrise en Sciences de l'environnement, Université du Québec à Montréal.

Knight, D.H., et Wallace L.L. 1989. The Yellowstone Fires: Issues in landscape ecology. *Bioscience* 39(10): 700-706.

Laveault, S. 1995. Rapport final d'incendie - Généralités. Société de protection des forêts contre le feu. Val d'Or, Québec.

Legendre, L., et Legendre, P. 1984. Écologie Numérique. Tome 1: Le traitement multiple des données écologiques. Presses de l'Université du Québec, Québec, Canada. p.162-218.

Lemay, R. 1996. Travaux de brûlage, travail d'extinction et conditions météorologiques de l'incendie de forêt du Lac Crochet.Société de protection des forêts contre le feu. Val d'Or, Québec.

Nordin, J.O., et Grigal D. F., 1976. Vegetation, site, and fire relationships within the area of the Little Sioux fire, northeastern Minnesota. *Canadian Journal of Forest Research* 6: 78-85.

Norusis, M.J., 1985. SPSS^{X} Advanced Statistics Guide, SPSS Inc., Chicago IL. p. 295-364.

Paré, É., Caron, A., et Cloutier, A. 1996. Informations complémentaires Feu 996 par plusieurs intervenants. Société de protection des forêts contre le feu. Val d'Or, Québec.

Pickett, S.T.A. et White, P.S. 1985. The ecology of natural disturbance and patch dynamics. Academic Press, New York.

Potzger, J.E. et Courtemanche, A. 1956. A series of bogs across Québec from de St-Lawrence valley to James Bay, Canadian Journal of Botany 34: 473-500.

Romme, W.H., et Knight, D.H. 1981, Fire frequency and subalpine forest sucession along a topographic gradient in Wyoming. *Ecology* 62(2): 319-326.

Rowe, J.S. 1983. Concepts of fire effects on plant individuals and species. In *The Role of Fire in Northern Circumpolar Ecosytems*, ed. R.W. Wein & D.A. MacLean, New York: John Wiley & Sons. p.135-154.

Rowe, J.S., et Scotter,G.W. 1973. Fire in the boreal forest. *Quaternary Research* 3: 444-464.

Rowe, J.S. 1972. Forest regions of Canada. Canadian Forestry Service Publication No. 1300, 172 p.

Stocks, B.J., et Flannigan, M.D. 1987. Analysis of the behaviour and associated weather for a 1986 northwestern Ontario wildfire: Red Lake, Number 7. In *Postprint Volume Ninth Conference Fire and Forest Meteorology,* 21-24 April 1987, San Diego, California American Meteorological Society. p. 94-100.

Sims, R.A., Towill, W.D., Baldwin, K.A., et Wickware, G.M. 1989. Field Guide to Forest Ecosystems Classification for Northwestern Ontario, Ontario Ministry of Natural resources, Ontario.

Tande, G.F. 1979. Fire history and vegetation pattern of coniferous forests in Jasper National Park, ALberta. *Canadian Journal of Botany* 57: 1912-1931.

Thibault, M. et Hotte, D. 1985. Les régions écologiques du Québec méridional, 2e approximation. Ministère de l'Énergie et des Ressources. Québec.

Tremblay, G. 1974. Géologie du Quaternaire, régions de Rouyn-Noranda et d'Abitibi, Comtés d'Abitibi-est et d'Abitibi-ouest, Ministère des Richesses naturelles, Québec, Doss. Publ.236. 100 p.

Turner, M.G., et Romme, W.H. 1994. Landscape dynamics in crown fire ecosystems. *Landscape Ecology* 9(1): 59-77.

Turner M.G., Hargrove, W.W., Gardner, R.H., and Romme, W.H. 1994. Effects of fire on landscape heterogeneity in Yellowstone National Park, Wyoming. *Journal of Vegetation Science* 5: 731-742.

Van Wagner, C.E. 1983. Fire behaviour in northern conifer forests and shrublands. In *The Role of Fire in Northern Circumpolar Ecosytems*, ed. R.W. Wein & D.A. MacLean, New York: John Wiley & Sons. p.65-80.

Van Wagner, C.E. 1978. Age-class distribution and the forest fire cycle. *Canadian Journal of Forest Research* 18(6): 818-820.

Viereck, L.A. 1983. The effects of fire in black spruce ecosystems of Alaska and northern Canada. In *The Role of Fire in Northern Circumpolar Ecosytems*, ed. R.W. Wein & D.A. MacLean, New York: John Wiley & Sons. p.201-220.

Vincent, J-S. et Hardy, L. 1977. L'évolution et l'extension des lacs Barlow et Ojibway en territoire québécois. Géographie physique et quaternaire 31: 357-372.

Zackrisson, O. 1977. Influence of forest fires on the North Swedish boreal forest. *Oikos* 29: 22-32.

ANNEXE A

A.1 Schéma de la stratification du territoire..... 54

A.2 Compatibilité des appellations cartographiques..... 55

A.3 Tableau des paramètres et écarts types sous le modèle #2 56

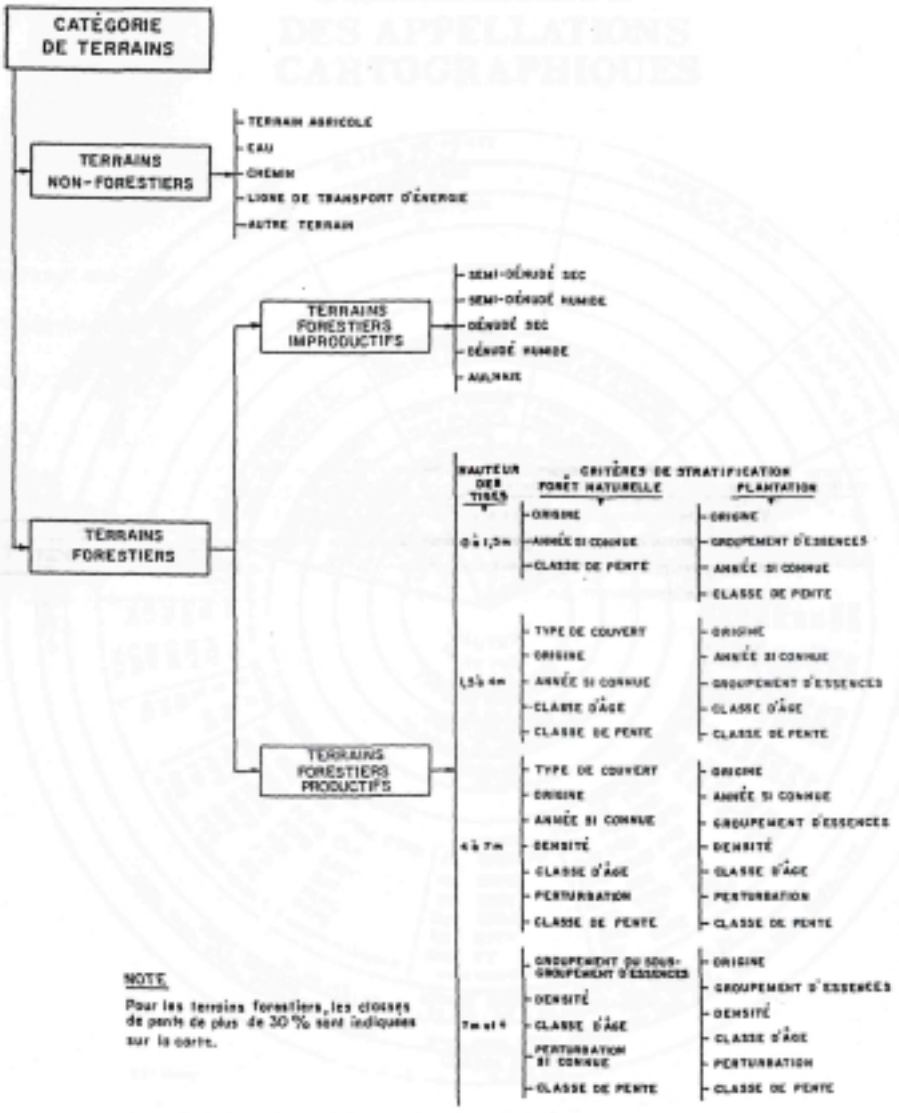
A.4 Ratios de la valeur observée à l'erreur standard asymptotique sous le modèle #2..... 58

A.5 Tableau des paramètres et écarts types sous le modèle #1..... 59

A.6 Ratios de la valeur observée à l'erreur standard asymptotique sous le modèle #1..... 60

Annexe A.1

SCHÉMA DE LA STRATIFICATION DU TERRITOIRE

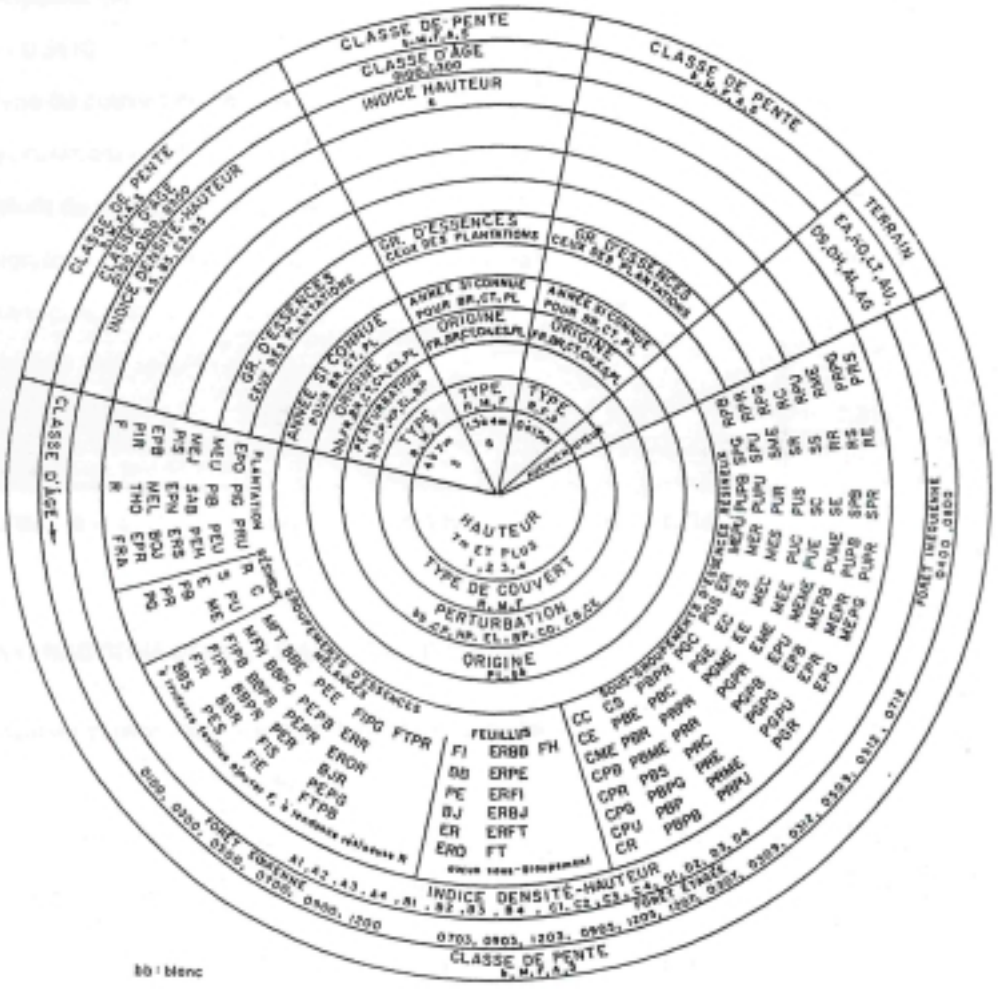


NOTE

Pour les terrains forestiers, les classes de pente de plus de 30 % sont indiquées sur la carte.

Annexe A.2

COMPATIBILITÉ DES APPELLATIONS CARTOGRAPHIQUES



bb : blanc

Chaque secteur est identifié à la partie centrale du cercle.
Les critères de stratification sont les codes méconographiques, qui seront utilisés sur les formulaires.

Annexe A.3

Tableau des paramètres sous le modèle #2

EFFETS SIMPLES

Moyenne (θ)

θ = 0.5410

Type du couvert du peuplement (λ_C)

feuillus/mélangés: **-1.262** résineux: **1.262**

Dépôt de surface du peuplement (λ_D)

organique: **-2.008** roc: **0.467** till: **0.665**

fluvio-gl./lacustre: -0,282 till mince: **1.158**

Hauteur des peuplements (λ_H)

0-7 m: **-1.598** 7-12m: **-1.000** 12-17m: **1.785** 17-22m: **0.814**

Sévérité du feu (I_S)

forte: **0.874** modérée: **0.830** nulle: **-1.705**

INTERACTIONS DOUBLES AVEC LA SÉVÉRITÉ

Type du couvert du peuplement vs sévérité du feu (λ_{CS})

	sévérité du feu		
type de couvert	forte	modérée	nulle
feuillus/mélangés	**-0.195**	-0.093	**0.288**
résineux	**0.195**	0.093	**-0.288**

Dépôt de surface du peuplement vs sévérité du feu (λ_{DS})

	sévérité du feu		
Dépôt de surface	forte	modérée	nulle
organique	**-0.552**	0.411	0.141
roc	-0.108	**-0.547**	**0.655**
till	0.041	0.086	-0.127
fluvio-gl./lacustres	0.243	-0.047	-0.196
till mince	**0.376**	0.096	**-0.472**

Hauteur du peuplement vs sévérité du feu (λ_{HS})

	sévérité du feu		
Hauteur	forte	modérée	nulle
17-22m	-0.147	-0.035	0.182
12-17m	0.031	0.031	-0.062
7-12m	0.120	0.213	-0.333
0-7m	-0.004	-0.210	0.213

Annexe A.4.

Ratio de la valeur observée à l'erreur standard asymptotique sous le modèle #2.
Les valeurs en italique dépassent le seuil de |1.96|, $\alpha = 0.05$.

Facteurs	SÉVÉRITÉ		
Type de couvert	Forte	Modérée	Nulle
Feuillu ou mélangé	*-2.87*	-1.34	*2.41*
Conifère	*2.87*	1.34	*-2.41*
Hauteur			
0-7 mètres	-0.02	-1.12	0.67
7-12 mètres	0.80	1.40	-1.18
12-17 mètres	0.33	0.33	-0.37
17-22 mètres	-1.24	-0.29	0.86
Dépôts de surface			
Substratum rocheux	-0.87	*-4.25*	*3.20*
Till mince	*-3.36*	0.86	*-2.32*
Till	0.38	0.80	-0.65
Fluvio-gl./lacustres	1.76	-0.34	-0.78
Organiques	*-2.39*	1.88	0.35

Annexe A.5

Tableau des paramètres sous le modèle #1

INTERACTION TRIPLE AVEC LA SÉVÉRITÉ

Dépôt de surface du peuplement vs temps depuis le dernier feu vs sévérité du feu (λ_{DTS})

		sévérité du feu		
Dépôt de surface	Temps-feu	forte	modérée	nulle
organique	115 ans et plus	-0.487	0	0.487
	87 ans	0.487	0	-0.487
roc	115 ans et plus	0.075	0.048	-0.123
	87 ans	-0.075	-0.048	0.123
till	115 ans et plus	0.054	0.139	-0.193
	87 ans	-0.054	-0.139	0.193
fluvio-gl./lacustres	115 ans et plus	0.051	-0.014	-0.038
	87 ans	-0.051	0.014	0.038
till mince	115 ans et plus	**0.306**	-0.174	-0.132
	87 ans	**-0.306**	0.174	0.132

Annexe A.6.

Ratio de la valeur observée à l'erreur standard asymptotique sous le modèle #1.
Les valeurs en italique dépassent le seuil de |1.96|, $\alpha = 0.05$.

Facteurs	SÉVÉRITÉ		
Dépôt de surface Temps depuis feu	Forte	Modérée	Nulle
Substratum rocheux 115 ans et plus	0.55	0.38	-0.64
Substratum rocheux 87 ans	-0.55	-0.38	0.64
Till mince 115 ans et plus	*2.39*	-1.47	-0.65
Till mince 87 ans	*-2.39*	1.47	0.65
Till 115 ans et plus	0.41	1.17	-0.95
Till 87 ans	-0.41	-1.17	0.95
Fluvio-gl./lacustres 115 ans et plus	0.32	-0.09	-0.14
Fluvio-gl./lacustres 87 ans	-0.32	0.09	0.14
Organiques 115 ans et plus	-1.43	0	1.17
Organiques 87 ans	1.43	0	-1.17