

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

**EST- CE QUE LA SUPPRESSION DES FEUX A EU UN EFFET
SUR LE REGIME DES FEUX EN FORÊT BORÉALE ?**

**RAPPORT DE SYNTHÈSE ENVIRONNEMENTALE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DU DOCTORAT EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT**

PAR

Amar Madoui

Avril, 2008

Résumé

La forêt boréale est caractérisée par un régime de feu dynamique au cours du temps. Il a subi beaucoup de changements depuis le Petit Âge glaciaire et les plus significatifs sont la diminution des superficies brûlées et l'allongement du cycle de feu. Depuis plus d'une dizaine d'années, des études se sont intéressées à la question de savoir si ces changements sont d'origine naturelle ou bien anthropique suite à la suppression des feux. La question est loin d'être tranchée entre les nombreux auteurs. Certains attribuent ces changements à des causes climatiques. D'autres, par contre, trouvent que c'est la suppression des feux instaurée depuis la moitié du 20^{ème} siècle qui en est responsable. Ils signalent que la moyenne des superficies brûlées et la fréquence des feux ont diminué depuis la mise en place de cette opération. En effet, une augmentation du nombre des petits feux est signalée en forêt boréale dans les zones sous protection intensive et est attribuée à l'efficacité de la lutte active. Signalons toutefois l'absence de preuves empiriques que cette diminution soit due principalement à la suppression des feux. Cependant, selon certaines études, c'est la coïncidence de cette diminution avec le changement climatique qui a fait qu'elle soit attribuée beaucoup plus à la suppression et non pas au changement du climat et aux autres activités humaines qui ont certainement joué un rôle important. Les récentes études, que se soit au Canada ou en Europe, suggèrent également que c'est le changement climatique qui en est la principale cause. Notre conclusion conforte également cette dernière hypothèse.

En raison de la complexité des interactions entre le climat, le feu et l'homme au cours du temps, faut-il encore parler d'un régime de feu naturel pour évoquer des changements subis à cause de la suppression ? Quelque soit la réponse, des études plus poussées sont recommandées au Québec. En comparant la zone sous protection intensive avec celle sous protection restreinte et en tenant compte de la variabilité des autres paramètres entre ces zones, cela permettra sans doute de mieux comprendre le lien entre la suppression et le régime de feu en forêt boréale.

Mots clés : Forêt boréale, suppression des feux, régime de feu, activités anthropiques, changement climatique.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|-----------|
| LISTE DES FIGURES..... | ii |
| LISTE DES TABLEAUX..... | iv |
| Introduction | 1 |
| Première partie: Régime de feu et système de protection au Québec..... | 4 |
| 1. La notion du régime de feu..... | 4 |
| 1.1. Le cycle de feu, l'intervalle entre les feux et la fréquence | 7 |
| 1.2. La taille du feu | 9 |
| 1.3. L'intensité et la sévérité du feu | 11 |
| 1.4. Conclusion | 12 |
| 2. La suppression du feu | 13 |
| 2.1. L'organisation de la protection des feux au Québec..... | 13 |
| 2.2. Le comportement des incendies..... | 16 |
| 2.3. La charge d'incendies | 16 |
| 2.4. Les ressources disponibles..... | 17 |
| 2.5. La capacité du système de protection | 18 |
| 2.6. Pourquoi la suppression des feux..... | 19 |
| Deuxième partie: Analyse et réponse à la question..... | 20 |
| 3. Effet de la suppression sur le régime de feu..... | 20 |
| 3.1. Effet de la suppression des feux sur la taille des feux | 20 |
| 3.2. Effet de la suppression des feux sur la fréquence de feux | 29 |
| 4. Discussion..... | 33 |
| 5. Conclusion..... | 42 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|----|
| Figure 1. Distribution théorique des classes d'âge sous un cycle de feu égale à 100 ans (Tiré de Van Wagner, 1978)..... | 6 |
| Figure 2. Estimation du cycle de feu dans les régions écologiques boréales du Québec (Tiré de Gauthier et al. 2001) | 9 |
| Figure 3. Distribution de la taille des feux de la forêt boréale de l'ouest québécois (Tiré de Gauthier et al. 2000) | 11 |

| | |
|---|----|
| Figure 4. Exemple d'une carte d'impact du feu (Leduc et al. 2007) | 13 |
| Figure 5. Territoire protégé du Québec | 15 |
| Figure 6. Variabilité annuelle du nombre et de la superficie totale des feux dans la pessière à mousse de l'ouest du Québec | 16 |
| Figure 7. Les éléments responsables des résultats de la protection des forêts contre le feu (Lemaire 2002) | 17 |
| Figure 8. Capacité du système de lutte en fonction des ressources actuelles (2002) de la SOPFEU (Lemaire 2002) | 19 |
| Figure 9. Effet de la suppression sur la distribution de la taille des feux (Tiré de Leduc 2002) | 22 |
| Figure 10. Évolution des superficies brûlées dans la zone sous protection intensive selon l'origine du feu (Tiré de Leduc 2002). | 23 |
| Tableau 4. Tendance de la taille des feux après 1970 (Adapté de Leduc 2002) | 24 |
| Figure 11. Distribution de la taille des feux avant et après 1971 (Tiré de Leduc 2002) | 25 |
| Figure 12. Les deux cas possibles de l'augmentation des feux de petites tailles. (a) dans le cas où la suppression est la cause de la diminution des feux de grandes tailles. (b) dans le cas où l'augmentation des petits feux est due à forte détection en période de suppression. | 25 |
| Figure 13. Distribution de la fréquence des feux par taille de classe pour les zones de protection (a) extensive en Ontario ¹ et (b) intensive et modérée (Tiré de Ward and Tithecott 1993). | 28 |
| Figure 14. Distribution de la moyenne annuelle de la taille des feux (ha) dans les zones à protection intensive, à protection modérée et à protection extensive (1976-1990) en utilisant la même échelle pour le vertical. (Redessiner à partir des données présentées par Ward et Tithecott (1993)) (Miyaniishi et Johnson 2001). | 28 |
| Figure 15. Le taux de brûlage moyen annuel à travers Ontario (tiré de Sun et Martell 2008) | 31 |
| Figure 16. Distribution de classe d'âge de la forêt classes ontarienne (OMNR 1986) (Tiré de Ward Tithecott 1993)..... | 38 |
| Figure 17. Distribution théorique des classes d'âge sous un CF=100 ans (Van Wagner, 1978)..... | 38 |

| | |
|--|----|
| Figure 18. Distribution du temps depuis feu pour les zones à fort, modéré et faible niveau de protection dans l'est et l'ouest de l'Ontario. La ligne pleine représente le cycle de feu calculé en utilisant un estimateur vraisemblance maximale (FC = cycle de feu) (Bridge et al. 2005)..... | 40 |
| Figure 19. La superficie brûlée cumulative par an pour le paysage insulaire du Lac Duparquet (Québec). La ligne de régression correspond à la constance de la fréquence des feux pour la période avant et après 1870 (tiré de Bergeron 1991)..... | 41 |
| Figure 20. Différence de superficie de 26% entre celle calculée par le Ministère et celle générée par l'image satellite de 1985 pour le feu 7087 de 1980..... | 44 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|----|
| Tableau 1. Définitions des principaux paramètres du régime de feu selon les auteurs | 5 |
| Tableau 2. Estimation des cycles de feu dans quatre régions boréale de l'est de l'Ontario et de l'ouest du Québec (tiré de Bergeron et al. 2001)..... | 7 |
| Tableau 3. Moyennes annuelles des superficies brûlées (ha) pour les périodes pré et post 1970 selon les causes (Tiré de Leduc 2002) | 22 |
| Tableau 4. Tendance de la taille des feux après 1970 (Adapté de Leduc 2002..... | 24 |
| Tableau 5. L'importance des feux < 100 ha dans la pessière à mousse de l'ouest du Québec avant et après 1970 | 26 |
| Tableau 6. L'importance des feux < 100 ha dans la pessière à mousse de l'ouest du Québec avant et après 1990 | 27 |
| Tableau 7. Comparaison du régime de feu avant suppression et actuel pour les zones sous protection intensive et modérée en Ontario (données de 1976-2000) (tiré de Ward et al. 2001). | 38 |

Introduction

Depuis que l'homme a pris connaissance de l'importance d'une ressource naturelle, il a commencé à chercher les moyens d'en tirer d'abord le maximum de profit puis de la préserver une fois qu'il sentait qu'elle est menacée. La forêt n'échappe pas à cette idée et non plus la forêt boréale qui a supporté et supporte encore la prospérité des canadiens en général et des Québécois en particulier.

Adaptée aux diverses perturbations naturelles, essentiellement les feux, et dont certaines de ses espèces végétales en dépendent pour leur établissement et leur développement, la forêt boréale s'est adaptée à vivre avec et le feu faisait donc partie de son fonctionnement et de sa dynamique. Il était généralement allumé de façon naturelle par la foudre, ou volontairement par les autochtones. Ces derniers vivaient en parfaite harmonie avec l'ensemble des composantes de cet écosystème, en n'exerçant sur la forêt que la charge nécessaire dont ils avaient besoin. Ils ont pratiqué une exploitation douce de la forêt pour leur subsistance à travers des modes de gestion basées sur leur propre expérience acquise durant des générations (Rapport Coulombe 2004) et les amérindiens par exemple n'allumaient des feux près de leur campement que dans des conditions de faible susceptibilité aux grands incendies (Lewis 1982; Johnson 1992).

Toutefois, avec l'afflux important des colons européens à partir du XVII^e siècle et l'augmentation de leurs besoins vis-à-vis de cet écosystème, de profondes modifications se sont opérées (Lefort et al. 2003) qui ont changé de façon importante l'utilisation des forêts. Leurs empreintes commençaient à être visibles et parfois sont devenues indélébiles dans une grande partie de cette forêt. Depuis, et avec le temps, ils ont vite compris que les feux pouvaient occasionner de pertes considérables aussi bien en vies humaines qu'en de biens et ressources naturelles et ont fini par déclarer la guerre totale aux feux de forêts en faisant de la suppression une pratique systématique contre tout feu pouvant toucher les forêts accessibles (Blanchet 2003). Cette conception de la suppression des feux et l'amélioration du système de protection ont été renforcées par les feux catastrophiques qui ont connus certaines régions de l'Amérique du Nord et spécifiquement le Canada entre 1825 et 1923 (Blanchet 2003) avec l'augmentation de la valeur de la matière ligneuse. L'idée de suppression du feu a été même aussi le champ de bataille des groupes de protection de la nature pour justifier la conservation des vieilles forêts. Ainsi, les activités de l'organisation de la suppression des feux ont connu généralement du succès dans la majorité des

cas (Stocks 1991; Anderson et al. 2000; Blanchet 2003).

Avec l'introduction progressive de nouvelles technologies que ce soit dans le domaine du transport ou des télécommunications ou encore, plus récemment, de l'informatique et de la télédétection, les opérations de suppression sont devenues relativement plus efficaces. Depuis quelques décennies, l'efficacité des programmes de lutttes contre les feux a fait que 97% des feux déclarés dans les forêts commerciales du Canada n'ont pas dépassé les 200 ha (Stocks 1991). Toutefois, la capacité sans cesse croissante de saper les feux qui jadis régissaient la dynamique de cet écosystème forestier a conduit aujourd'hui vers une nouvelle problématique. En effet, l'application de la suppression des feux a entraîné, dans certaines régions du monde, l'établissement des conditions favorables à des incendies de plus en plus grands et de plus en plus catastrophiques (Minnich 1983; Clark 1990; Wang et al. 2007).

En plus de supposé occasionner des changements dans les régimes de feu (Wein et Moore 1979; Stocks et Simard 1993; Ward et Tithecott 1993; Martell 2002; Lefort et al. 2003), nous savons maintenant que l'idée initiale de supprimer tous les feux, a prouvé qu'elle n'était ni économiquement faisable ni écologiquement désirée (Stocks 1991; Drolet 2002). Certains (Agee et Huff 1987; Clark 1990; Shang et al. 2004) sont allés même à avancer que cette opération a fait que la fréquence des feux et leur sévérité ont augmenté en raison de l'accumulation des combustibles. D'autres, par contre suggèrent que la suppression active n'aurait qu'une faible influence sur le régime de feu (Lefort 1998) et n'a affecté que la distribution de la taille des feux (Leduc 2002). Alors que selon Urban et al. (1987), il est difficile d'évaluer l'impact des pratiques de suppression sur les écosystèmes naturels et sur le régime de feu à cause de l'occurrence concomitante des variations climatiques.

Une façon d'évaluer si la suppression de feu a affecté le régime de feu en forêt boréale est de déterminer si elle a diminué la tailles des feux (Bridge et al. 2005). En accord avec ces derniers auteurs, c'est en regardant entre autres ce paramètre que je vais essayer de répondre à la question, si la suppression du feu a eu un effet sur le régime de feu en forêt boréale, à travers ce rapport.

Vu que chaque région écologique a son propre régime de feu et que la question a été traitée partout et dans les différentes régions forestières du monde, j'ai jugé utile de concentrer ma réflexion sur les travaux effectués en forêt boréale du Canada en prenant comme exemple la forêt ontarienne, ou spécifiquement celle du Québec bien que certains travaux effectués ailleurs

pourront être cités à l'occasion et utilisés à titre de comparaison. J'insisterai principalement sur l'effet de la suppression des feux sur les superficies brûlées et la fréquence des feux.

Les principaux points retenus pour essayer de répondre à la question sont les suivants :

Dans la première partie de ce travail, je commencerai par une revue succincte de littérature sur la notion de régime du feu en forêt boréale en essayant de regarder les principaux paramètres qui le définissent ainsi que les facteurs qui l'influencent. Il sera ensuite question de la notion de la suppression du feu et de l'actuel système de protection au Québec.

Dans une deuxième partie, j'essayerai de répondre à la question sous forme de discussion et de voir si la suppression de feux a influencé le régime de feu en forêt boréale québécoise. Mon opinion sur la question et une proposition des points de réflexions sur le sujet seront données dans la conclusion.

Première partie : Régime de feu et système de protection au Québec

1. La notion du régime de feu

La combinaison de la fréquence, l'ampleur et la taille définissent un régime de perturbation pour une région forestière donnée et la dynamique forestière est influencée par ce type de régime (Pickett et White 1985). Dans le cas de la forêt boréale, le régime de perturbation le plus important est celui généré par les feux et plus particulièrement des feux de cimes, caractérisés par de forte intensité et couvrant de grande surface (Van Wagner 1983). Ils tendent à homogénéiser leur effet sur l'ensemble du paysage quelque soit la topographie ou le type de combustible (Bergeron et al. 2007). Il en résulte une végétation évolue en fonction des conditions climatiques et édaphiques, et du temps écoulé depuis le dernier feu survenu dans la région (Bergeron et Dansereau 1993).

Selon le dictionnaire de la foresterie (2003), le régime de feu est une expression qui réfère au patron global inscrit à travers les âges par les feux de végétation, lequel est caractéristique d'une région naturelle ou d'un écosystème. Il comprend les variations dans les caractéristiques des feux, soit le cycle de feu, l'occurrence des feux, la proportion annuelle brûlée, le type, l'intensité, la sévérité, l'intervalle, la taille, la saison et la source d'allumage (Tableau 1). Il réfère donc à la nature de feu se produisant au cours des longues périodes et des effets immédiats sur l'écosystème (Brown 2000). C'est donc, l'ensemble des paramètres précédemment cités qui définissent la notion de régime de feu dans un territoire donné (Weber et Flannigan 1997). Ces paramètres dépendent à leur tour du type de peuplement en place, du climat, des sols et de la topographie (Manuel de foresterie 1996) et ont une influence significative sur plusieurs attributs de la forêt boréale (Bergeron et al. 2007). Le régime de feu affecte ainsi la distribution des espèces (Flannigan et Bergeron 1998; Le Goff et Sirois 2004) de même que la distribution des classes d'âge des peuplements (Bergeron et al. 2001). Celle-ci suivra, hypothétiquement, une fonction exponentielle négative (Figure 1) dans laquelle près de 37% des peuplements seront plus âgés qu'un cycle de feu de 100 ans (Johnson et Van Wagner 1985).

| Paramètres | Définitions |
|---------------------|--|
| Occurrence de feu | <ul style="list-style-type: none"> - Nombre de feux par unité de surface par an (Bergeron 1991) - Nombre de feux allumés dans un territoire donné sur une période de temps donné (Gauthier et al. 2001) |
| Cycle de feu | <ul style="list-style-type: none"> - Nombre d'années nécessaires pour brûler une superficie égale à celle du territoire à l'étude (p.ex., région écologique) (Gauthier et al. 2001) - C'est la rotation du feu (Heinslman, 1973) - Il peut être estimé à partir de la distribution du temps écoulé depuis le dernier feu (Bergeron 1991) |
| Intervalle des feux | <ul style="list-style-type: none"> - Temps écoulé entre deux feux successifs dans une zone précise (Gauthier et al. 2001; FAO 2002). La taille de la zone doit être clairement spécifiée. <p>L'intervalle moyen entre les feux dans une région donnée correspond au cycle de feu (lorsque le risque de brûler est indépendant de l'âge et lorsque le risque de brûler de chaque site est indépendant).</p> |
| Fréquence des feux | <ul style="list-style-type: none"> - Une situation où l'on tient compte de l'occurrence et de la taille des feux (Johnson et Van Wagner 1985) - Superficie brûlée annuellement (Bergeron et al. 2001) - La proportion du territoire incendiée annuellement (Gauthier 2002) - Nombre de feux par unité de surface par an (Romme 1982)² - Le nombre moyen d'incendies par unité de temps dans une zone donnée (FAO 2002)² |
| Taille de feu | <ul style="list-style-type: none"> - Superficie couverte par un événement de feu et l'ensemble des événements de feu ayant sévi dans une région écologique constitue la distribution de taille des feux (Gauthier et al. 2001) |
| Intensité du feu | <ul style="list-style-type: none"> - Taux d'énergie libéré par unité de temps par unité de longueur du front de feu (Byram 1959). |
| Sévérité du feu | <ul style="list-style-type: none"> - Effet global du feu sur l'écosystème (Brown et DeByle 1987). - Définie par ce qui se passe dans un secteur qui est entrain de brûler (Brown 2000). - Degré de destruction de la matière organique et la température atteinte au sol (Rowe 1983). - Effet du feu sur les organismes vivants et profondeur à laquelle le feu pénètre la couche organique du sol (Gauthier et al. 2001) |

Tableau 2. Définitions des principaux paramètres du régime de feu selon les auteurs.

² Pour éviter la confusion, je n'adopterai pas cette définition dans le rapport puisque ces définitions correspondent à celle de l'occurrence.

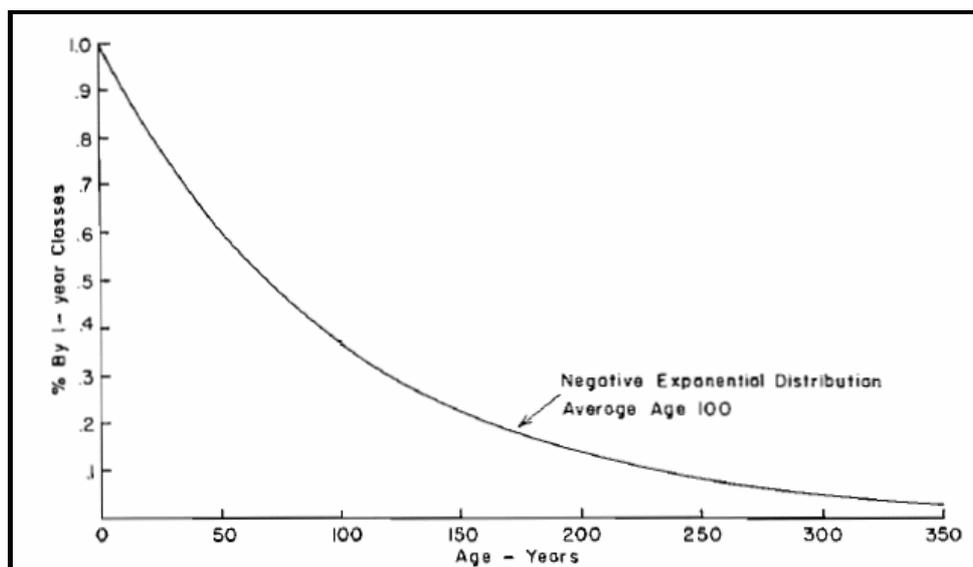


Figure 1. Distribution théorique des classes d'âge sous un cycle de feu égale à 100 ans (tiré de Van Wagner, 1978, modifié)

Un régime de perturbation est propre à chaque écosystème ou une région donnée, et du fait des connaissances fragmentaires sur les régimes de feu en forêt boréale, il est imprudent de généraliser les résultats d'études régionales à l'ensemble du territoire (Leduc et al. 2000). Cela est imputé à des variations spatiales considérables à plusieurs échelles aussi bien locales que régionales (Johnson et Van Wagner 1985; Gauthier et al. 2001; Keane et al. 2004).

Il est à signaler qu'étant donné que le régime de feux est soumis à de nombreux facteurs naturels et culturels, il ne change qu'à la suite d'une modification importante du climat ou des politiques d'aménagement, ou d'une profonde altération de la structure du combustible en raison de l'influence humaine³. Cela souligne le caractère dynamique du régime de feu qui est en lien avec les influences des conditions climatiques et les interventions humaines (Bergeron et al. 1998). Ces influences se manifestent au niveau de la fréquence, la taille des superficies brûlées, l'intensité ou la sévérité (Bergeron et Flannigan 1995; Bessie et Johnson 1995; Weber et Flannigan 1997; Gauthier 2002). La dynamique du régime de feu résulte donc des interactions qui existent entre les composantes des écosystèmes forestiers et les diverses conditions sous-jacentes (Li 2000). Ce qui peut influencer l'un de ces paramètres, aura certainement un effet sur le régime du feu en question. Ainsi, les activités humaines peuvent altérer le régime de feu

³ http://nfdp.cfm.org/compendium/fires/index_f.php

naturel par l'allumage ou la suppression en changeant la probabilité de sa propagation (Li 2000).

Dans le présent rapport et en réponse à la question, il est nécessaire de décider sur le choix des paramètres du régime des feux sur lesquels s'attarder. Le cycle de feu, la fréquence, la taille ainsi que l'intensité et la sévérité seront regardés de près, mais pour la réponse à la question, seuls ceux pris en compte par les différents auteurs seront traités.

1.1. Le cycle de feu, l'intervalle entre les feux et la fréquence

Le régime de feu est déterminé en partie par le cycle du feu. Ce dernier est défini comme le temps (nombre d'années) nécessaire pour brûler une superficie équivalente à celle du territoire à l'étude (Johnson et Van Wagner 1985; Johnson et al. 1990; Johnson et Gutsell 1994). La superficie à l'étude doit être clairement spécifiée. Par exemple, si la superficie du territoire à l'étude est de 100 000 hectares et il faut 50 ans de feux pour brûler les 100 000 ha dans cette superficie, le cycle de feu aurait été de 50 ans. Ceci n'implique pas que toute la superficie serait brûlée dans un seul cycle; il se trouve que des portions du territoire peuvent être épargnées par le feu, d'autres peuvent être brûlées plus d'une fois (Bergeron et al. 1998; Leduc et al. 2000; Gauthier et al. 2001). Il y en résulte que les régions épargnées auront des peuplements ayant un âge supérieur au cycle de feu, alors que d'autres portions auront un âge égal ou inférieur au cycle de feu. Le paysage serait alors constitué d'une multitude de peuplements d'âges et de compositions différentes (Bergeron et Harvey 1997; Bergeron et al. 1999; Leduc et al. 2000; Gauthier et al. 2001).

Quant à l'intervalle entre les feux est défini comme le temps écoulé entre deux feux au même site. Dans le territoire à l'étude, le cycle de feu est aussi caractérisé par l'intervalle moyen entre les incendies forestiers à différents sites ou encore l'âge moyen des forêts après feu sur l'ensemble d'une région écologique (Bergeron 1991; Gauthier et al. 2001). C'est l'équivalent de la rotation du feu selon Heinselman (1973). Pour un territoire donné, il peut être facilement calculé à partir d'une règle de trois une fois que les superficies totales brûlées sur une période donnée sont connues (Lefort 1998).

Il est important de noter que le cycle de feu n'est pas le même partout en forêt boréale, mais il varie d'une région à une autre et change en fonction du temps (Flannigan et al. 1998). Bergeron et al. 2001; Gauthier et al. 2001). De même, depuis la fin du Petit Âge Glaciaire, suite à la

diminution de la fréquence des feux, il s'est considérablement allongé dans certaines régions (Bergeron et al. 2001; Lesieur et al. 2002; Lefort et al. 2003; Lauzon et al. 2007) ce qui a comme conséquence l'accentuation de la proportion des forêts anciennes et surannées (Bergeron et al. 2001; Lesieur et al. 2002). À partir des reconstitutions de l'historique des feux sur les 300 dernières années au Québec, d'importantes variations se sont révélées dans les cycles de feu entre les diverses régions écologiques boréales (Tableau 2) aussi bien dans la sapinière que dans la pessière (Bergeron et al. 2001).

| Région | Superficie (Km ²) | Âge moyen (année) | % de forêts de plus de 100 ans | Cycle de feu | | |
|-----------------------------|-------------------------------|-------------------|--------------------------------|--------------|-----------|-------|
| | | | | 1920-1999 | 1850-1920 | <1850 |
| Forêt modèle du Lac Abitibi | 8245 | 172 | 78 | 521 | 234 | 132 |
| Abitibi Ouest | 15793 | 139 | 57 | 325 | 146 | 83 |
| Abitibi est | 3294 | 111 | 54 | 191 | 86 | / |
| Québec central | 3844 | 127 | 56 | 273 | 123 | 69 |

Tableau 2. Estimation des cycles de feu dans quatre régions boréales de l'est de l'Ontario et de l'ouest du Québec (Tiré de Bergeron et al. 2001)

De même, des estimations des cycles de feux pour une durée plus courte d'environ 100 ans pour chaque région écologique a montré une grande variabilité spatiale (Figure 2) dans le cycle de feu à travers le Québec (Gauthier 2001).

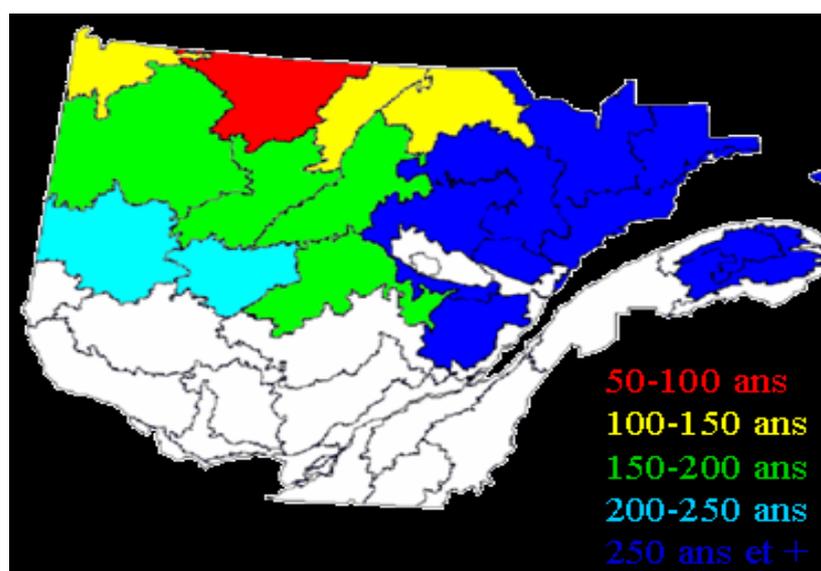


Figure 2. Estimation du cycle de feu dans les régions écologiques Boréales du Québec (Tiré de Gauthier et al. 2001)

L'historique du feu de forêts est reflété par l'actuelle distribution des classes d'âge (Van Wagner 1978). La distribution d'âge des forêts donne une idée du type de forêts qui existe dans un paysage et quelles sont les proportions des différents stades de succession des forêts (Wallenius 2002). Le cycle de feu peut être reflété par la distribution des classes d'âge des peuplements (Weir et al. 2000).

Selon Gauthier (2002), bien que le terme fréquence soit parfois utilisé pour parler du nombre de feux (voir Tableau 2), la fréquence de feu se définit plus souvent qu'autrement comme la proportion du territoire incendiée annuellement. Elle est donc très dépendante de l'échelle à laquelle on l'observe et sa mesure est une caractérisation quantitative sur un espace donné (fréquence régionale) (Pickett et White 1985).

C'est depuis 1850, correspondant à la fin du Petit Âge Glaciaire qu'une modification de la fréquence des feux en forêt boréale a été signalée (Bergeron et Brisson 1990; Bergeron 1991; Bergeron et Archambault 1993; Bergeron et al. 2001). D'ailleurs, cette diminution naturelle de la fréquence des feux au cours du 20^e siècle observée au Québec n'est pas un phénomène isolé. Plusieurs études empiriques réalisées ailleurs en Amérique du nord et en Europe corroborent en effet les observations effectuées au Québec (Flannigan et al. 1998). Bien que cette diminution est souvent attribuée à la suppression des feux (Bergeron 1998; Flannigan et al. 1998), il apparaît que le changement climatique serait également en cause (Bergeron et Archambault 1993). La possibilité d'y avoir beaucoup de variabilité spatiale de comportement de feu à cause du climat plus chaud, même dans les régions dont la fréquence de feu est faible a été évoquée (Bergeron et Flannigan 1995; Flannigan et al. 1998).

1.2. La taille du feu

La taille du feu est la superficie couverte par un événement de feu et l'ensemble des événements de feu ayant sévi dans une région écologique constitue la distribution de taille des feux (Gauthier et al. 2001). Cette dernière détermine l'allure de la mosaïque forestière régionale et affecte la régénération des espèces (Gauthier et al. 2001).

La taille d'un incendie dépend, en plus des conditions météorologiques, du type de végétation, de

la topographie, de la présence de coupe-feu. Elle varie grandement dans le temps et les événements de plus grandes tailles se produisent lors des saisons où les indices de risque de feu sont extrêmes, indiquant des niveaux de sécheresse élevés.

Le nombre de feux par unité de surface correspond à l'occurrence des feux (Bergeron 1991; Gauthier et al. 2001) alors que la fréquence des feux fait référence à une situation où l'on tient compte de l'occurrence et de la taille des feux (Johnson et Van Wagner 1985). Elle est déterminée par les conditions climatiques mais aussi par une source d'ignition (Wein et Maclean 1983). Le nombre d'ignition est un des facteurs qui détermine la quantité de feux dans un paysage, alors que les conditions du combustible, le patron climatique et la topographie déterminent la taille des feux (Granstrom 1993).

En forêt boréale, la superficie moyenne annuelle brûlée aussi bien des conifères que des mixtes est imposée par les feux de grande taille (> 1000 ha) malgré qu'ils ne représentent qu'un faible nombre par rapport au nombre total des feux enregistrés (Leduc et al. 2000) (Figure 3). Ce sont ces feux qui imprègnent la structure d'âge et la configuration des paysages forestiers boréaux et qui sont responsables de la régénération naturelle des forêts (Johnson et al. 1998).

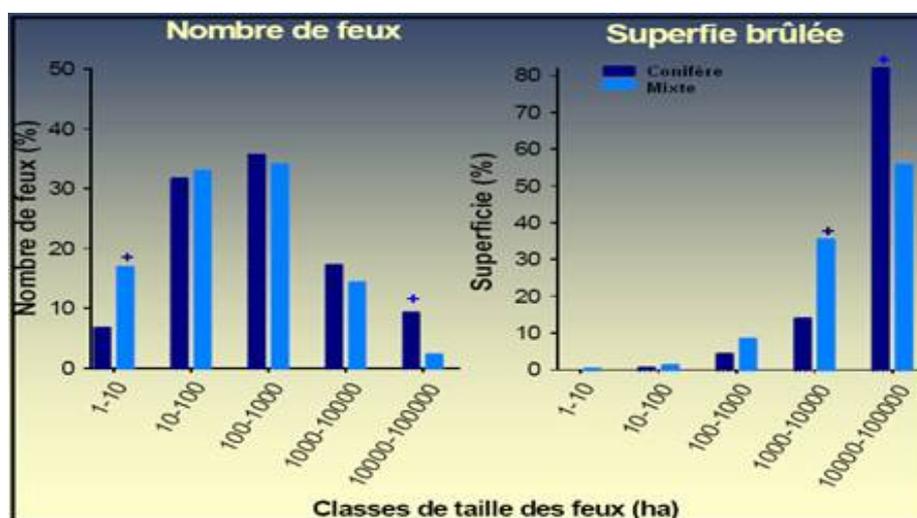


Figure 3. Distribution de la taille des feux de la forêt boréale de l'ouest québécois (Tiré de Gauthier et al. 2000)

1.3. L'intensité et la sévérité du feu

L'intensité du feu (ou la puissance du front du feu) est définie comme le taux d'énergie libéré par unité de temps par unité de longueur du front de feu (Byram 1959). Elle est exprimée en watt par mètre linéaire de front de feu (W/m). L'intensité du feu détermine les parties des plantes qui ont survécues sur le sol puisque les feux brûlent rarement de façon homogène sur un territoire donné (Turner et Romme 1994; Delong et Tanner 1996; Miller et Urban 1999; Carcaillet et al. 2001). Il y aura souvent, des plages de végétation épargnées par le feu, d'autres touchées à différents degrés (Gauthier et al. 2001; Kafka et al. 2001; Leduc et al. 2007) par suite des influences topographiques (configuration du terrain), climatiques (humidité, vent) et biotiques (type et état des combustibles) (Van Wagner 1983; McRae et al. 2001).

Quant à la sévérité du feu, elle peut se définir comme l'effet global du feu sur l'écosystème (Brown et DeByle 1987) et inclut d'une part la sévérité du feu au niveau de la canopée quand il provoque la mortalité des arbres et d'autre part la sévérité du feu au niveau du sol quand l'épaisseur de matière organique est consommée (Ryan et Noste 1985). En d'autre terme, la sévérité du feu réfère à l'effet total du feu sur l'écosystème (Brown et DeByle 1987) et elle est définie par ce qui se passe dans un secteur qui est entrain de brûler (Brown 2000). Sur les cartes de sévérité des feux (Figure 4), cet impact lors du feu est signalé par une classe désignant les zones faiblement touchées par la flamme (Gauthier et al. 2001). Les cartes d'impact de feu représentant les dommages causés aux arbres sont établies immédiatement après feu par voie aérienne en délimitant sur des levés topographiques (1/50 000), les polygones des peuplements ayant été affectés par le feu. Elles servent de guide à la récupération des bois brûlés (Kafka 1997; Bergeron et al. 2002). Ce qui différencie les cartes d'impact de la sévérité, c'est que ces cartes représentent la mortalité immédiate après feu alors que la sévérité représente non seulement la mortalité immédiate après feu mais aussi la mortalité qui survienne après au cours des années qui suivent le passage du feu ainsi que l'épaisseur de la matière organique consommée.

D'autres auteurs (Rowe 1983) définissent la sévérité du feu par le degré de destruction de la matière organique ainsi que par la température atteinte au sol. Cette dernière aura une grande importance sur la distribution de lits de germination pour la régénération après feu (Gauthier 2002). Elle implique une estimation des effets de feu plutôt qu'une estimation du comportement du feu lui-même (Rowe 1983). L'intensité du feu influence la sévérité du feu (Brown et DeByle

1987) et les feux dit sévères sont associés à des taux de mortalité élevés à court et moyen termes (c'est-à-dire une mortalité immédiate ou échelonnée durant la première année suivant le feu).

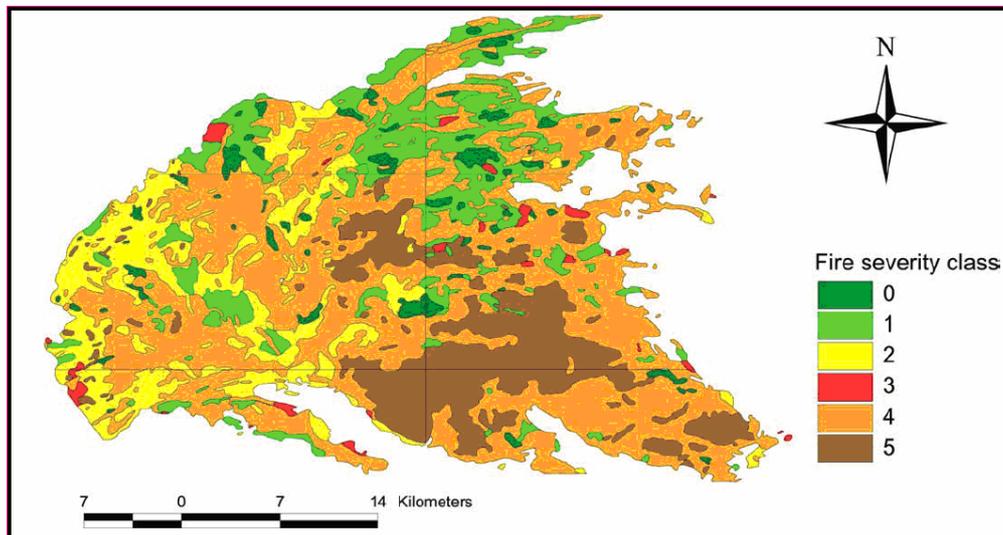


Figure 4. Exemple d'une carte d'impact du feu (Leduc et al. 2007)

1.4. Conclusion

La forêt boréale est un système assez complexe et qui varie d'une région à l'autre sous l'effet du climat, du milieu physique et du régime de perturbations (Gauthier et al. 2001). Et à cause de cette complexité spatiale, il est difficile de généraliser les effets locaux à l'échelle régionale.

Le régime de feu naturel, qui a caractérisé la forêt boréale au cours de son histoire, a subi de changement avec le temps. A-t-il gardé encore ses caractéristiques naturelles⁴ ou historiques ? Car les activités humaines ont joué et jouent encore un important rôle dans la dynamique et le façonnement du paysage de cette immense forêt.

⁴ Régime de feu naturel: C'est le régime de feu qui suppose l'absence totale de l'influence de l'homme; alors que le régime de feu historique est le régime de feu avant la mécanisation de la suppression active des incendies. Larjavaara, M. (2005). "Climate and forest fires in Finland – influence of lightning-caused ignitions and fuel moisture." Dissertationes Forestales 5, The Finnish Society of Forest Science: 35 p. 2005)

2. La suppression du feu

Il est important de comprendre comment se pratiquent les opérations de la suppression des feux au Québec. Selon le manuel de foresterie (1996), la suppression concerne les activités qui s'échelonnent de l'attaque initiale à l'extinction finale. L'attaque initiale s'organise aussitôt que l'incendie est signalé au groupe d'intervention. Les effectifs et les équipements ne quitteront le site qu'une fois l'incendie est déclaré éteint. La stratégie de suppression combine l'attaque terrestre avec l'attaque aérienne (Ward et Mawdsley 2000). L'attaque initiale à des échelles spatiale et temporelle est typiquement mesurée en hectares et en nombre d'heures (Cumming 2005). Plus les superficies brûlées sont petites, plus les dommages et les coûts sont faibles.

2.1. L'organisation de la protection des feux au Québec

Lutter activement contre les incendies de forêts au Québec date depuis la fin du dernier siècle et s'est étendue progressivement sur l'ensemble du territoire protégé au même rythme que l'expansion de l'industrie forestière. Le système a connu une évolution au cours du temps en parallèle avec les connaissances, de la technologie et du budget. Le Ministère des ressources naturelles est responsable de la protection des feux de forêts au Québec et depuis 1994, c'est la Société de protection des feux contre le feu (SOPFEU), organisation privée à but non lucratif, qui s'occupe de la prévention, la détection et la lutte. «*Minimiser les dommages des incendies forestiers tout en gardant le coût des activités à l'intérieur de limites acceptables*» est son objectif selon les normes et directives de la direction de la conservation des forêts (Lemaire 2002).

Le territoire protégé du Québec est divisé en deux zones d'interventions dans le programme de protection des forêts contre les feux (Figure 5). Une zone sous protection intensive d'une superficie de 52 millions d'hectares qui couvre l'ensemble de la forêt commerciale québécoise. Elle s'étend du sud du Québec jusqu'aux environs du 51^{ième} parallèle nord où tous les feux sont combattus de manière systématique et doivent être contrôlés avant d'atteindre les 3 ha. La deuxième zone d'intervention se situe au nord de la zone de protection intensive et se caractérise par une protection restreinte. Pour des raisons économiques, les feux sont laissés à brûler librement et le travail de protection se résume principalement à des fonctions d'observations et de surveillances (Drolet 2002). Toutefois, certains feux dans cette zone peuvent être combattus à des

fins de sécurité civile.

La zone de protection intensive est sous la responsabilité de la SOPFEU alors que la zone de protection restreinte est sous la responsabilité de la direction de la conservation des forêts du ministère des Ressources naturelles et de la faune du Québec. Le système de détection aérien de la SOPFEU couvre l'ensemble de la zone de protection intensive. La détection des feux se fait principalement par des vols de reconnaissance. Plus d'une trentaine d'avions sillonnent la zone de protection intensive à des fréquences établies en fonction des indices de danger d'incendie et des prévisions météorologiques.

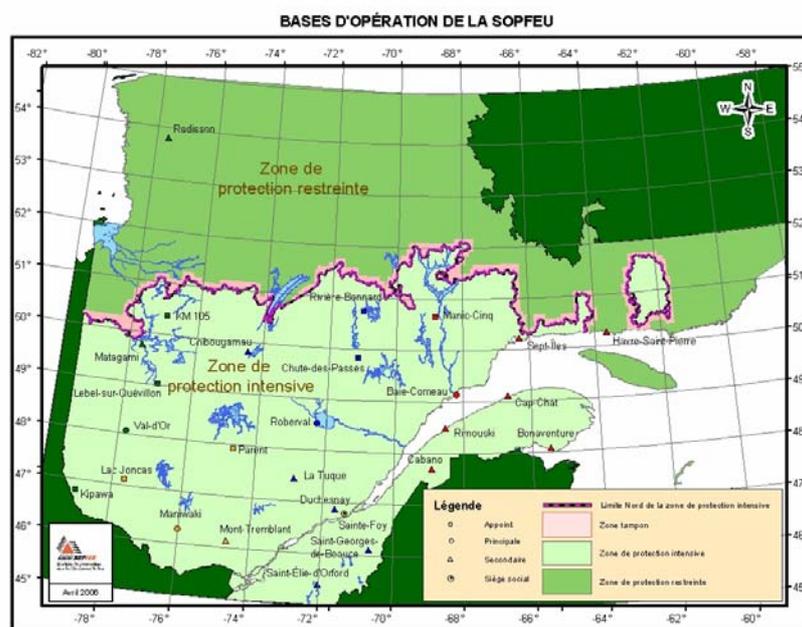


Figure 5. Territoire protégé du Québec (Site web SOPFEU)

L'objectif de la SOPFEU est d'utiliser ses ressources de façon optimale afin de (Lemaire 2002): (i) détecter les feux de moins de 0,5 ha, (ii) attaquer tout nouvel incendie dans l'heure qui suit sa découverte, (iii) maîtriser le feu avant 10 h le lendemain, (iv) l'éteindre avant qu'il n'atteigne trois ha.

Le système d'information sur lequel se base la SOPFEU doit être performant. Son coût d'opération annuel s'élève à environ 62 millions \$ dont 11,7 millions \$ est réservée aux activités de suppressions (moyenne des 10 dernières années) (Lemaire 2002). Il est à noter que malgré les ressources et les technologies avancées dont elle bénéficie, la SOPFEU ne peut prévoir le nombre

de feux quel aura à faire face au cours des semaines ou des mois à venir à cause de la variabilité chaotique de l'occurrence des feux et de la superficie brûlée dans le temps, tel que démontrées dans la figure 6.

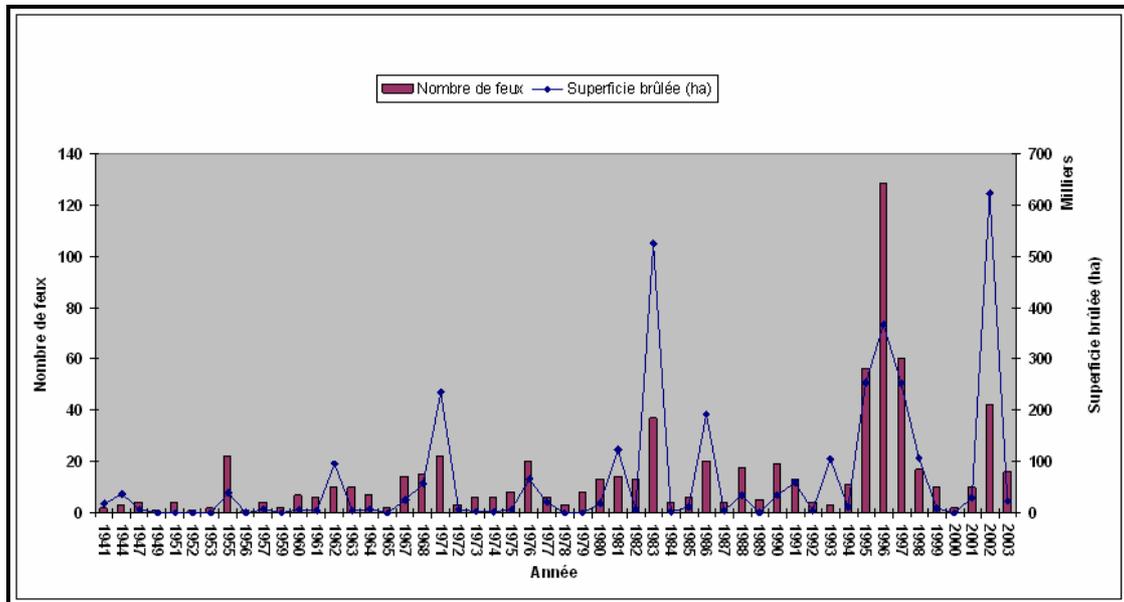


Figure 6. Variabilité annuelle du nombre et de la superficie totale des feux dans la pessière à mousse de l'ouest du Québec

En forêt boréale, les feux causés par la foudre sont de loin les plus importants du point de vue des dommages qu'elles causent. L'analyse de la superficie brûlée d'un bilan depuis 1972 (Lemaire 2002) révèle que 79% des feux sont causés par la foudre et le reste, 21 %, sont dus à des causes anthropiques. Toutefois, seulement 1,7% de ces feux sont à eux seuls responsables de plus de 97% des superficies brûlées.

Trois éléments sont responsables des résultats de la protection des forêts contre le feu : (i) le comportement du feu, (ii) la charge du feu et (iii) les ressources disponibles lors de son déclenchement (Figure 7) (Lemaire 2002). Ces éléments influencent le délai ainsi que la durée de l'intervention et par conséquent, ils ont un impact direct sur les résultats.

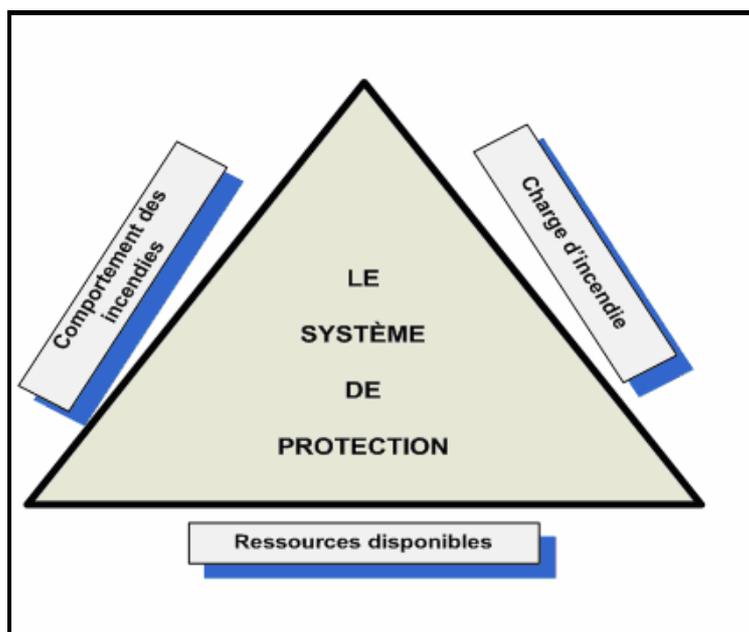


Figure 7. Les éléments responsables des résultats de la protection des forêts contre le feu (Tiré de Lemaire 2002).

2.2. Le comportement des incendies

Le comportement des incendies est le facteur le plus important quant aux résultats de la lutte contre le feu. Trois principales composantes influencent le comportement du feu : Les conditions météorologiques, la topographie et les types de combustibles (Trabaud 1980). Les deux premières sont fixes dans le temps et ne peuvent être modifiées de manière préventive alors que les combustibles le pourraient par différentes pratiques d'aménagement forestier. La SOPFEU calcule quotidiennement des prévisions de comportement du feu pour optimiser le positionnement de ses ressources (Lemaire 2002).

2.3. La charge d'incendies

Par notion de charge d'incendies, on fait référence au nombre d'incendies, à leur distribution temporelle et spatiale ainsi qu'à leur accessibilité (Lemaire 2002). C'est le deuxième facteur dont dépend l'efficacité de la suppression des feux. Bien que les feux puissent être relativement faciles à combattre, les superficies brûlées pourraient être importantes si le nombre de feux à combattre dans un court laps de temps est élevé.

L'influence des incendies d'origine humaine sur les superficies brûlées est faible car ils sont, dans la majorité des cas, rapidement détectés puisqu'ils surviennent dans des régions peuplées et l'intervention est rapide, donc efficace. Quant aux feux de foudre, ils présentent une autre problématique parce qu'ils se déclarent souvent en grand nombre et durant une courte période (Lemaire 2002) et de façon contagieuse (Gauthier 2002). Ils apparaissent généralement en «grappes» dans des régions éloignées moins accessibles par la route. La prévision de leur occurrence autant en termes de nombre que de localisation n'est pas précise avec la technologie et les connaissances actuelles. L'intervention pour ces feux est par surcroît périlleuse et difficile à cause des conditions météorologiques orageuses qui sont associées à leur ignition et représentent ainsi un défi de taille pour toute organisation de protection des forêts contre l'incendie (Lemaire 2002). Ici, une question se pose : Si la technologie le permet, est-ce que la suppression sera meilleure ? Lequel est plus déterminant, la technologie ou bien les conditions météorologiques ? Il est bien clair que quelque soit les moyens disponibles et le système de protection mis en place, rien ne peut se mesurer à la force de la nature. Ce qui explique que tout système de protection a ses limites et par conséquent ne peut être efficace à 100%. L'identification des priorités pour les régions à protéger devient de plus en plus recommandée (Lemaire, com. pers.).

2.4. Les ressources disponibles

Elles sont le dernier élément à avoir une conséquence sur les résultats une fois la charge d'incendies et leur comportement connus. Vu que les ressources humaines et matérielles dont disposent la SOPFEU sont limitées par rapport à l'immensité du territoire à protéger (52 millions d'hectares), la SOPFEU surveille constamment les dangers de feu ainsi que les probabilités d'occurrence pour pouvoir optimiser le déploiement de ses ressources et au besoin faire appel à des ressources additionnelles. Sur ce point, est-ce que plus de ressources matérielles et humaines rendent-elles la suppression efficace et à quel prix ? Si oui, les conditions météorologiques ne seront-elles plus un problème ? Toutefois, la capacité du système de protection est difficile à exprimer à cause du nombre élevé de variables qui interviennent.

2.5. La capacité du système de protection

L'indicateur de la capacité de ce système dépend de deux variables ; la charge d'incendies et leur comportement exprimé par leur intensité (kW/m) (Figure 8).

| | | Nombre de feux déclarés Simultanément | | |
|----------------|-------------------|---------------------------------------|--------------------|--------------------------|
| Intensité kW/m | 0 à 50 | 51 à 100 | > 101 | |
| 0 à 2000 | Situation normale | Situation normale | Situation critique | Situation de débordement |
| 2000 à 6000 | | | | |
| > 6000 | | Situation critique | | |

Figure 8. Capacité du système de lutte en fonction des ressources actuelles (2002) de la SOPFEU (Lemaire 2002)

D'après ce système, il semble que de bons résultats sont obtenus dans les situations normales, c'est-à-dire si la SOPFEU est appelée à intervenir sur moins de 50 incendies simultanément peu importe leurs intensités (Lemaire 2002). Les résultats sont aussi généralement bons si le nombre d'incendies à combattre se situe entre 51 et 100 à condition que leur intensité soit modérée est au-dessous de 6000 kW/m. La situation sera critique si l'intensité de plusieurs incendies dépasse les 6000 kW/m et les résultats dépendront souvent de la distribution spatio-temporelle des feux. La situation est qualifiée de critique si le nombre de feux dépasse les 100 même s'ils sont peu intenses. Par contre si la majorité de ces incendies sont modérés ou intenses, le système de protection est en situation de débordement.

Quel enseignement tirons-nous de la lecture de ce système ? Le système ne peut éteindre tous les feux, particulièrement ceux qui sont les plus intenses. Si la limite de la forêt commerciale est prolongée plus au nord (après la révision de la limite nordique actuellement en cours), comment l'actuel système se comportera-t-il devant de telle situation où le risque de feu est plus élevé et

les feux sont de très grands étendus ? Ces derniers pourraient présenter un comportement différent de ceux survenant au sud (Parisien et al. 2004).

Pour ne citer qu'un exemple extrême, entre le 10 et le 13 juin 1996, 509 foyers de feu se sont déclarés. Les 50 premiers ont pu être éteints à une surface moyenne de 2 ha ; les 50 suivants à 44 ha en moyenne ; alors que les 409 qui restaient ont brûlé en moyenne 565 ha par incendie pour un total de 233 000 ha (Lemaire 2002). Cette situation montre clairement que l'efficacité de l'intervention est fonction du nombre de feux à combattre et de leur intensité et que les incendies de forêts au Canada ne pourront jamais être complètement éliminés, même certains arguent qu'il ne devraient pas l'être (Stocks 1991). Pour Drolet (2002), la stratégie actuelle de supprimer les feux de façon générale et globale devrait faire l'objet d'une sérieuse remise en question.

2.6. Pourquoi la suppression des feux

La mesure dans laquelle l'homme influence le régime de feu forestier intéresse les écologistes pour comprendre la forêt et la dynamique de paysage et les aménagistes forestiers et les décideurs pour déterminer les coupes qui répondent à un aménagement durable (Bridge et al. 2005).

De nos jours, la suppression des feux est requise pour maintenir une certaine ressemblance du régime de feu historique (Conard et Weise 1998) en diminuant les feux d'origine humaine. Elle est souvent recommandée comme option pour diminuer la perte de bois due aux feux de forêts (Dale et al. 2001). En effet, elle a permis la disponibilité de 35% de bois récolté annuellement en Ontario (Ward et Mawdsley 2000). Cependant, cette opération présente plusieurs limites, que se soit logistique, économique et écologique (Stocks 1991) et selon Todd et Jewkes (2006), la suppression ne fait que retarder ce qu'on ne pourra jamais éviter.

Deuxième partie : Analyse et réponse à la question

3. Effet de la suppression sur le régime de feu

Comme ça été déjà signalé, une façon de voir si la suppression des feux a affecté le régime de feu en forêt boréale est de déterminer si elle a diminué la taille des feux (Bridge et al. 2005) et la superficie annuelle, ce dont nous traiterons principalement.

3.1. Effet de la suppression des feux sur la taille des feux

La taille des feux fait référence à la superficie brûlée par un événement de feu (Gauthier et al. 2001). Depuis le début du 20^{ème} siècle, plusieurs changements ont été observés dans le régime de perturbation de la forêt boréale du Canada et le plus significatif est probablement la diminution dans les superficies brûlées (Clark 1990; Bergeron 1991; Bergeron et Archambault 1993; Larsen 1996; Leduc 2002). La majorité des études attribuent cette diminution aux activités de la suppression (Ward et Tithecott 1993; Podur et Martell 2007), mais d'autres trouvent que c'est le changement climatique qui en est la cause (ex. Bergeron et Archambault 1993). Par contre, Zhang et Chen (2007) trouvent que ce sont les deux qui sont responsables des changements dans le cycle du feu.

Au Québec, selon Leduc (2002), la suppression des feux a modifié la distribution de la taille des feux mais pas la moyenne annuelle des superficies brûlées (Figure 9). La comparaison de la période avant la suppression intensive (de 1940 à 1970) avec la période de lutte modernisée des incendies (de 1971 à 1997) a montré que les efforts déployés pour combattre les feux ont été particulièrement efficaces pour ceux d'origine humaine. Alors que la superficie des feux d'origine anthropique a diminué significativement depuis 1970, date de mise en place des mesures de suppression modernisée (Tableau 3 ; Figure 10), les feux de foudre demeurent encore très importants (Drolet 2002; Leduc 2002). De plus, malgré les efforts consentis, les feux engendrés par la foudre brûlent encore en moyenne 57 700 ha depuis 1970 représentant ainsi 75% de la superficie moyenne brûlée annuellement. Ceci indique clairement que les superficies brûlées restent relativement élevées malgré les efforts déployés et que la suppression n'aurait eu aucun effet notable sur la moyenne des superficies brûlées annuellement (Leduc 2002). Boulet

(1996 dans Drolet 2002) abonde dans le même sens pour les feux de foudre dont le système de protection n'est pas efficace aujourd'hui et ceci malgré les moyens matériels et financiers mis en place.

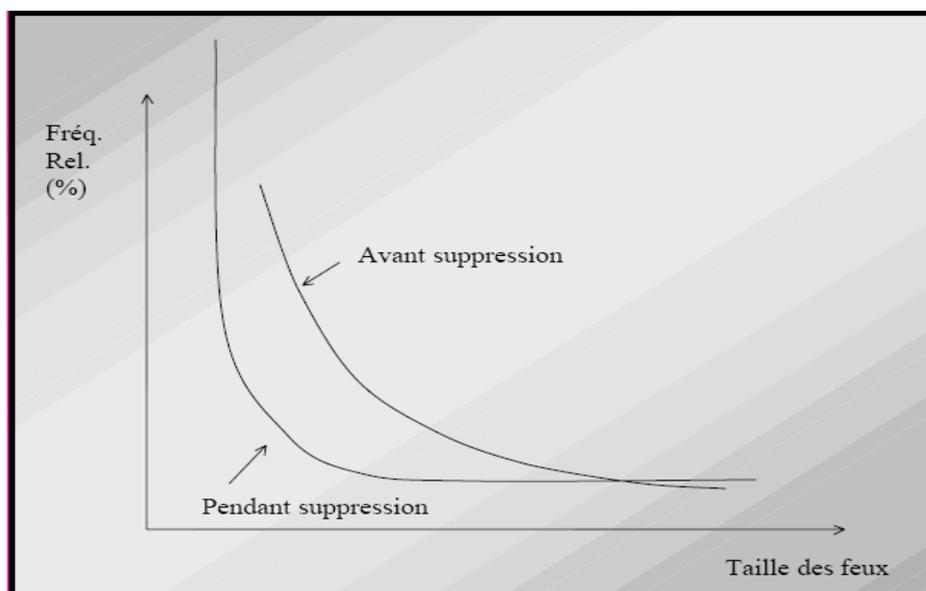


Figure 9. Effet de la suppression sur la distribution de la taille des feux (Tiré de Leduc 2002)

| | 1924 - 1969 (45 ans) | 1970 - 2001 (31 ans) | Différence (%) |
|---------------|-------------------------|-------------------------|----------------|
| Homme | 66,664 | 15,630 | -76.55 |
| Foudre | 9,827 | 42,084 | +76.64 |
| TOTAL | 76,491 | 57,714 | - 24.55 |

Tableau 3. Moyennes annuelles des superficies brûlées (ha) pour les périodes pré et post 1970 selon les causes (Tiré de Leduc 2002)

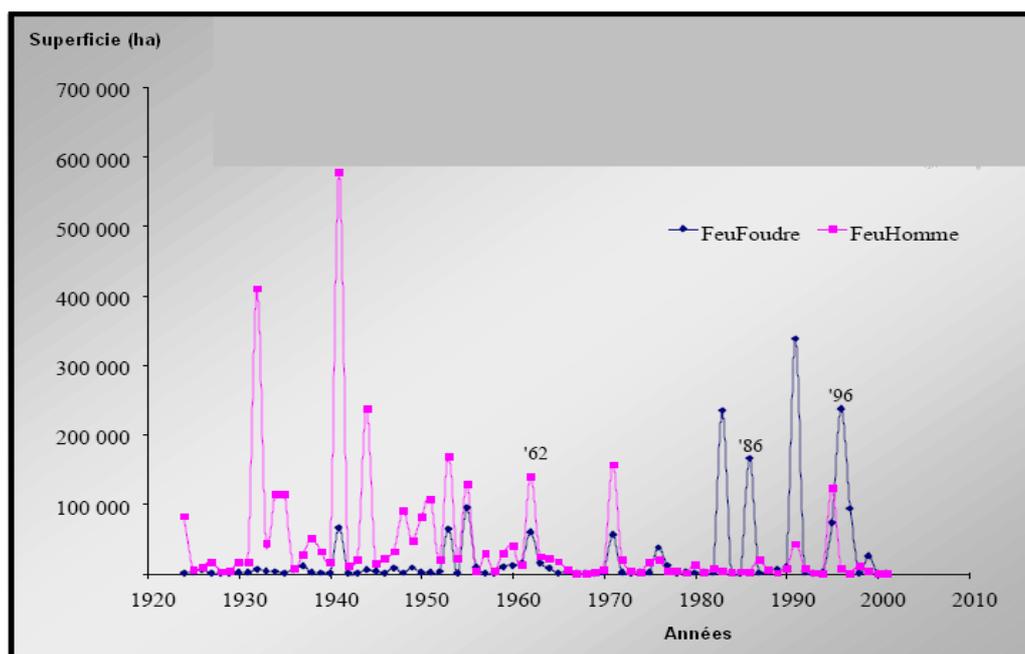


Figure 10. Évolution des superficies brûlées dans la zone sous protection intensive selon l'origine du feu (Tiré de Leduc 2002).

Au Québec, depuis la mise en place des mesures de la suppression active des feux, qui a commencé à utiliser des bombardiers d'eau aux alentours de 1970 (Bergeron et al. 2001), et selon les dirigeants de la Société de conservation du Nord-Ouest du Québec, la suppression significative des feux n'est entrée en vigueur que depuis 1972 (Bergeron 1991), la moyenne des superficies brûlées annuellement a chuté de 30% (Leduc 2002). La question qui est restée posée : Est-ce que cette diminution est seulement attribuable à la suppression car, selon Bergeron et Le Goff (2005), la suppression des feux a bénéficié aussi de la fragmentation du paysage et du développement du réseau routier qui jouent le rôle de coupe-feu et facilitent l'accès et le travail des pompiers. Ces activités humaines, et en particulier la fragmentation de paysage, ont été en partie confondues avec les impacts de la suppression dans d'autres régions du monde (Keeley et Fotheringham 2001). Toutefois, l'observation du tableau 3 donné par Leduc (2002) et l'examen du pourcentage des deux catégories de feu, font révéler que ce qui était sauvé des feux d'origine humaine par la suppression a été consommé par les feux causés par la foudre. Il semble qu'après 1970, il y a eu diminution de 76,55% des feux d'origine humaine contre une augmentation de 76,64 de feux d'origine naturelle. C'est comme si une partie de la forêt devait être brûlée quelque soit l'origine du feu.

Est-ce la suppression des feux a affecté la distribution des tailles des feux au Québec ?

Comme nous l'avons précédemment vu, la taille du feu est un paramètre important du régime du feu et deux régions peuvent être distinctes quant à la taille du feu même si leur cycle de feu ne présente pas beaucoup de différence (Bergeron et al. 2004).

La seule étude qui traite du sujet au Québec est celle de Leduc (2002). En considérant les feux de foudre déclarés en pessière à mousses (Tableau 4), il apparaît que les feux de taille intermédiaire (entre 500 et 5000 ha) tendent à diminuer après 1970 sous l'effet de la suppression, alors que les feux de petite taille (<500 ha) apparaissent en augmentation (Leduc 2002). Quant à la fréquence des grands feux dépassant les 5000 ha, elle n'a pas subi de modification en période de suppression (Figures 11). Leduc (2002) conclut que la lutte contre les incendies semble effectivement altérer la distribution de la taille des feux de sorte que les feux de taille entre 500 et 5000 ha se sont diminués au profit des feux de plus petites tailles (<500 ha). Néanmoins, il écarte la possibilité que cette diminution soit le résultat de la suppression seule et l'attribue beaucoup plus à la meilleure détection de ces feux de petites tailles en période de suppression (Weber et Stocks 1998). Miyanishi et Johnson (2001) notaient aussi ce même constat et signalent que le nombre de feux de petites tailles dans les zones non protégées est sous-estimé. En raison de l'éloignement de la région sans protection des habitants et des routes, la plupart des petits feux sont susceptibles de passer inaperçus ou ne sont pas signalés (Bridge et al. 2005).

| Taille de feux (ha) | Tendance après 1970 |
|----------------------------|----------------------------|
| 10 – 500 | augmentation |
| 500 – 5000 | diminution |
| > 5000 ha | constante |

Tableau 4. Tendance de la taille des feux après 1970 (Adapté de Leduc 2002)

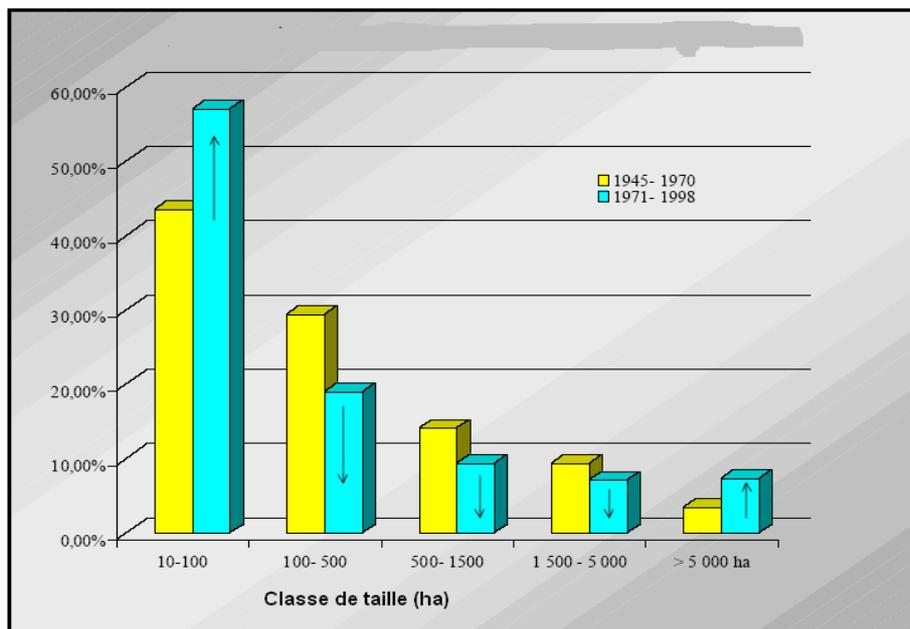


Figure 11. Distribution de la taille des feux avant et après 1971 (Tiré de Leduc 2002)

L'augmentation des feux de petites tailles peut être causée par deux facteurs : ou bien, la suppression aurait réussi effectivement de limiter la taille des feux ce qui fait qu'il y aura plus de feux de petites tailles issus des grands feux (figure 12a) ou bien, c'est la meilleure surveillance dans les régions sous protection qui fait que le nombre de feux de petits tailles rapportés est plus important (figure 12b). Toutefois la question qui reste posée dans ce deuxième cas est la suivante : À quoi est due donc la diminution des feux de tailles intermédiaires?

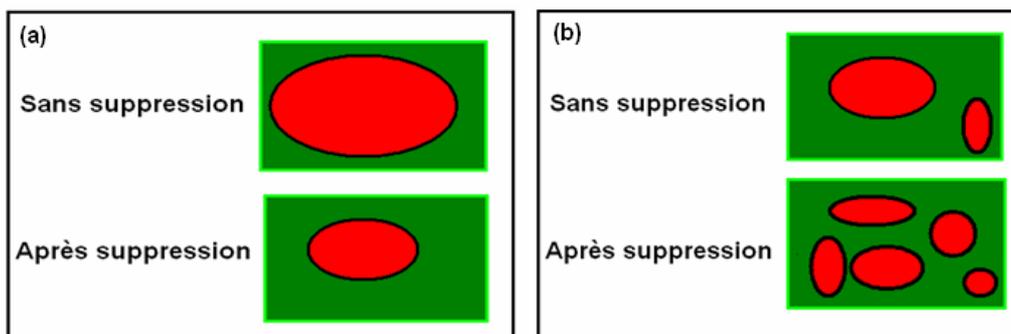


Figure 12. Les deux cas possibles de l'augmentation des feux de petites tailles. (a) dans le cas où la suppression est la cause de la diminution des feux de grandes tailles. (b) dans le cas où le dénombrement de petits feux est meilleur du à la forte détection en période de suppression.

Pour apporter plus de clarté au sujet de la diminution des feux de petites tailles au cours du temps, j'ai calculé le nombre de feux enregistrés dans la pessière à mousse de l'ouest de Québec avant et après 1970 pour la période de 1943 au 2003 (Tableau 5). Il apparaît qu'après 1970 le nombre de feux <100 ha a augmenté et il est passé de 37 à 377. Il ne devrait pas être attribué directement à la suppression des feux pour la simple raison que le nombre total des feux détectés a augmenté aussi et est passé de 162 avant 1970 à 979 après 1970, soit plus de 80% d'augmentation. En essayant de voir si cette tendance se maintient après, suite au développement des moyens de détection et de lutte de la SOPFEU, j'ai refais le même calcul, mais cette fois-ci en considérant les données avant et après 1990 (Tableau 6) ; le nombre de feux <100 ha a encore augmenté, de même que le nombre total des feux détectés. Selon ces données, il est clair que les feux sont beaucoup plus détectés après 1970 qu'avant et il est justifiable qu'ils soient en plus grand nombre. Ceci n'explique toutefois pas la diminution du nombre des feux de taille intermédiaire qui pourraient être due à la suppression ce qui expliquerait d'ailleurs la diminution de la moyenne des superficies brûlées constatées par Leduc (2002). Seulement, il faudrait faire intervenir aussi d'autres facteurs qui pourraient avoir un effet sur cette diminution comme les conditions propices aux grands feux qui sont devenues moins favorables à cause du changement climatique ainsi qu'à la fragmentation du paysage qui a joué le rôle de coupe feu (Bergeron et Le Goff (2005).

| Périodes | Nombre total de feux | Nombre de feux < 100ha | % |
|--------------------------------------|----------------------|------------------------|--------------|
| Avant 1970 (1940- 1969) 29 ans | 162 | 37 | 22,84 |
| Après 1970 (1970-2003) 33 ans | 979 | 377 | 38,51 |
| Total | 1141 | 414 | 36,28 |

Tableau 5. L'importance des feux < 100 ha dans la pessière à mousse de l'ouest du Québec avant et après 1970

| Périodes | Nombre total de feu | Nombre de feux < 100ha | % |
|--------------------------------------|---------------------|------------------------|--------------|
| Avant 1990 (1940- 1989) 49 ans | 467 | 100 | 21,41 |
| Après 1990 (1990-2003) 13 ans | 674 | 314 | 46,57 |
| Total | 1141 | 414 | 36,28 |

Tableau 6. L'importance des feux < 100 ha dans la pessière à mousse de l'ouest du Québec avant et après 1990

En Ontario, le sujet de l'effet de la suppression des feux en forêt boréale a soulevé un grand débat depuis le rapport de Ward et Tithecott (1993). Ces derniers, en comparant des données à partir des rapports d'incendies des zones protégées soumises à la suppression, avec celles des zones non protégées, ont montré que la suppression des feux en Ontario a entraîné une réduction de la superficie brûlée annuellement et une dominance des feux de petites tailles comparativement à ce qui a été observée dans les zones sans suppression (Figure 13). Ces résultats reconnus comme une évidence, ont été cités ultérieurement dans la littérature (ex. Li 2000; Ward et Mawdsley 2000) sans présenter de nouvelles données. Toutefois, Miyanishi et Johnson (2001) contestaient leur résultat. D'abord à cause de la courte période considérée (15 ans) qui ne reflétait pas toute la variabilité de l'occurrence des feux et des superficies brûlées en forêt boréale, et la différence d'échelle de présentation des données (Figure 14), puis ils ne donnaient aucune preuve que la diminution constatée est due à la suppression des feux et non pas au changement climatique. La figure 14 montre bien qu'il y a, en réalité, peu de différence entre les deux zones pour les feux supérieurs à 40 hectares comparativement à ce qui a été montré en présentant les données séparément; ce qui prouve qu'il y a insuffisance et non fiabilité des données de la zone extensive. En même date, en réponse à Miyanishi et Johnson (2001), Ward et al. (2001) confirment bel et bien, par des données historiques et récentes des feux, l'allongement du cycle de feux dans les forêts ontariennes protégées depuis le début de la suppression.

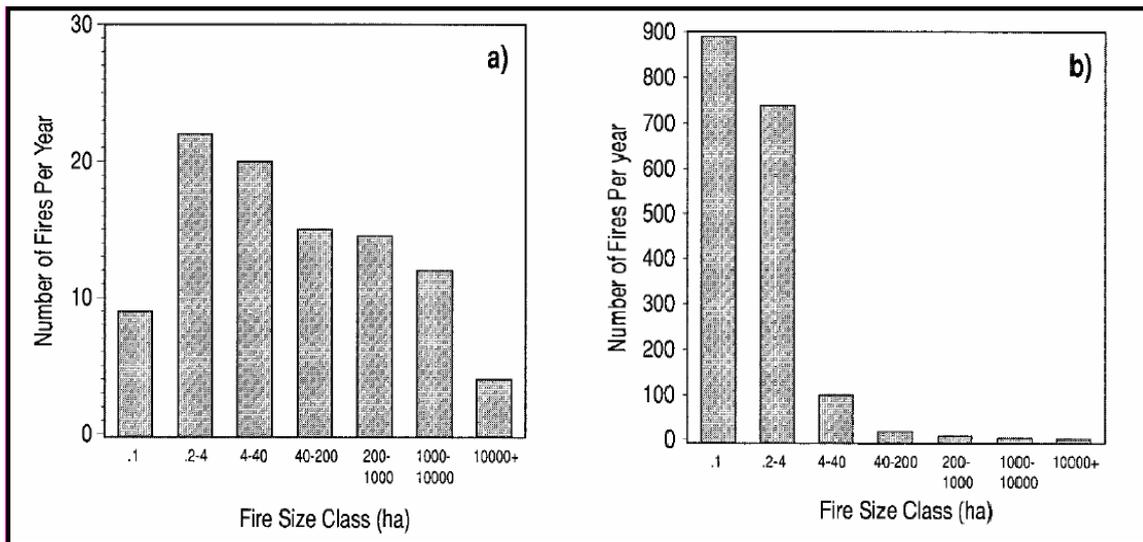


Figure 13. Distribution de la fréquence des feux par taille de classe pour les zones de protection en Ontario (a) extensive⁵ et (b) intensive et modérée (Tiré de Bridge et al. 2005).

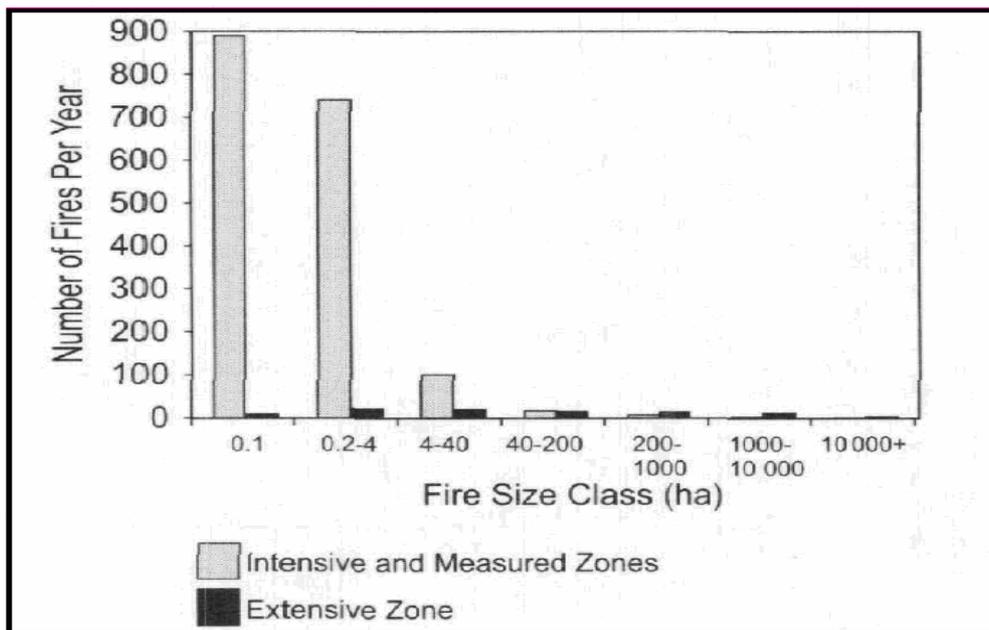


Figure 14. Distribution de la moyenne annuelle de la taille des feux (ha) dans les zones à protection intensive, à protection modérée et à protection extensive (1976-1990) en utilisant la même échelle pour le vertical. (Redessiner à partir des données présentées par Ward et Tithecott (1993)) (Miyanishi et Johnson 2001).

⁵ La légende de la figure 2 dans l'article de Bridge et al. 2005 est inversée. Il fallait lire pour (a) extensive et pour (b) intensive et modérée. De même, à la page 43, il fallait lire *Ward and Tithecott used 15 years of data* et non *25 years*.

D'autres études suggèrent que l'hypothèse de la suppression des feux n'a jamais été vérifiée et d'autres paramètres peuvent influencer le régime de feu comme la fragmentation de la forêt et des différences dans le climat, le paysage et l'utilisation du sol (Keeley et al. 1999; Weir et al. 2000; Bridge et al. 2005).

En Alberta, Cumming (2005) a constaté que la probabilité qu'un feu devienne grand était significativement plus faible après l'adoption de la nouvelle stratégie de la suppression. Bien qu'il signale que l'efficacité de l'attaque initiale pour la période entre 1968 et 1998 a permis de diminuer les tailles et les durées de quelques feux qui aura pu être plus importants si l'attaque initiale n'était pas efficace; il ne trouve toutefois pas de tendance dans la moyenne annuelle de la taille des grands feux ou des feux échappés.

Ailleurs, en forêts acadiennes, Loo et Ives (2003) suggèrent que les mesures efficaces de protection contre l'incendie et de suppression au cours des 50 dernières années ont réduit la fréquence et la taille des feux, et par conséquent réduit l'habitat des espèces adaptées au feu. De même, Wein et Moore (1977) rapportent qu'au Nouveau Brunswick, la taille moyenne des feux a décliné à partir de 1920 jusqu'au 1975 et a passé de 20 à 4 ha.

Cependant, selon McAlpine et Hirsch (1999), même avec des grands efforts de suppression, environ 3 - 4% des feux s'échappent à la lutte et suggèrent que la suppression peut réduire le nombre et la taille de feux dans des conditions climatiques modérées, mais ne peut pas arrêter les grands événements de feu sous les conditions climatiques extrêmes (Drolet 2002). Récemment, Podur et Martell (2007) ont utilisé la base de données des feux et les données météorologiques du Ministère des Ressources Naturelles d'Ontario dans un modèle de simulation de la suppression pour étudier la relation entre les conditions météorologiques des feux, la suppression des feux et la surface brûlée par les grands feux en Ontario. Leurs résultats suggèrent que, bien que les conditions météorologiques sévères limitent l'efficacité de la suppression, cette dernière a un effet significatif sur la superficie brûlée même pendant des saisons de feux sévères.

Ailleurs, Barrett et al. (1991) ont souligné que l'instauration des techniques de suppression dans le Montana a contribué à diminuer les superficies brûlées et, Brown et al. (1994) et Brown et Bradshaw (1994) signalent qu'il y avait plus d'aires brûlées avant la période de la mise en place du programme de suppression de feux.

En Suède, Linder et al. (1997) suggèrent que les changements observés dans le régime de feu et de la structure des peuplements dans les réserves sont principalement causés par la suppression des feux dans l'ensemble du paysage. De même, en Chine, ils attribuent la forte modification des régimes de perturbation de feu au cours du 20^{ème} siècle à l'influence humaine. En revanche, le succès de la suppression des feux, couplés avec un climat plus chaud et plus sec en raison du réchauffement climatique, ont conduit à l'accumulation du combustible et a donné lieu à des feux de plus grande intensité et d'étendue que ceux qui ont eu lieu historiquement dans la région (Wang et al. 2007).

3.2. Effet de la suppression des feux sur la fréquence de feux

Le nombre de feux était depuis longtemps modifié par l'homme de telle sorte que, depuis les années 1990, il a augmenté dans certaines parties du monde comme les tropiques en raison de l'utilisation du feu comme moyen de défrichage (Goldammer 1991) où en région méditerranéenne à des fins agro-pastorales (Madoui 2002); alors qu'il est diminué dans d'autres régions, comme l'Amérique du Nord en raison de la suppression des feux (Tilman et al. 2000). Au moment de la colonisation européenne, les feux étaient une chose fréquente dans beaucoup d'écosystèmes Nord-américains, mais la fréquence des feux a baissé drastiquement à cause des coupes feu, de la suppression de feu active et de la diminution du taux des feux d'origine humaine (Tilman et al. 2000). Elle a permis dans les paysages affectés par la suppression d'avoir un cycle de feu qui pourraient être plus grand que 2700 ans (Baker 1995).

Dans d'autres situations, et dans d'autres types d'écosystème dans l'ouest des États-Unis, il y eu en revanche, une forte augmentation de la superficie moyenne annuelle brûlée depuis le milieu des années 1970 probablement en raison de l'accumulation du combustible causée par la suppression de feu du 20^{ème} siècle (Minnich 1983; Grissino-Mayer et Swetnam 2000). De même, au Parc d'État d'Itasca, Clark (1990) suggère que la fréquence des feux aurait augmenté de 20 à 40 % au cours du 20^e siècle si la suppression de feux n'avait pas été mise en place en 1910 et ce, en raison de conditions climatiques plus chaudes et plus sèches.

Cependant, de nombreuses études réalisées aussi bien en Amérique du Nord qu'en Europe ont signalé une diminution de la fréquence des feux et ce malgré l'augmentation des températures depuis la fin du Petit Âge Glaciaire (1850).

Au Canada, Wein et Moore (1979) ont signalé une augmentation du cycle de feux de 65 à 1000 ans pour la forêt acadienne. Bien que la question ne soit pas encore tranchée en forêt ontarienne (voir plus loin), le cycle de feu serait passé de 65 à 580 ans en raison des activités de suppression selon Ward et Tithecott (1993). Ils ont rapporté aussi que le taux de brûlage dans les forêts protégées en Ontario est faible comparativement à celles non protégées à cause de la suppression (Ward et al. 2001). De même, très récemment, Sun et Martell (2008) ont divisé le territoire ontarien en 35 zones homogènes du point de vue végétation, climat, topographie, patrons d'utilisation du sol et niveau de protection et développé un modèle statistique de la variation spatiale de la superficie brûlée par les feux de foudre en fonction du climat et du niveau de protection dans chaque zone. Leurs résultats suggèrent qu'il y a une relation statistiquement significative entre la proportion annuelle moyenne de la superficie brûlée d'une zone, les conditions météorologiques de la zone et l'effort de suppression (Figure 15).

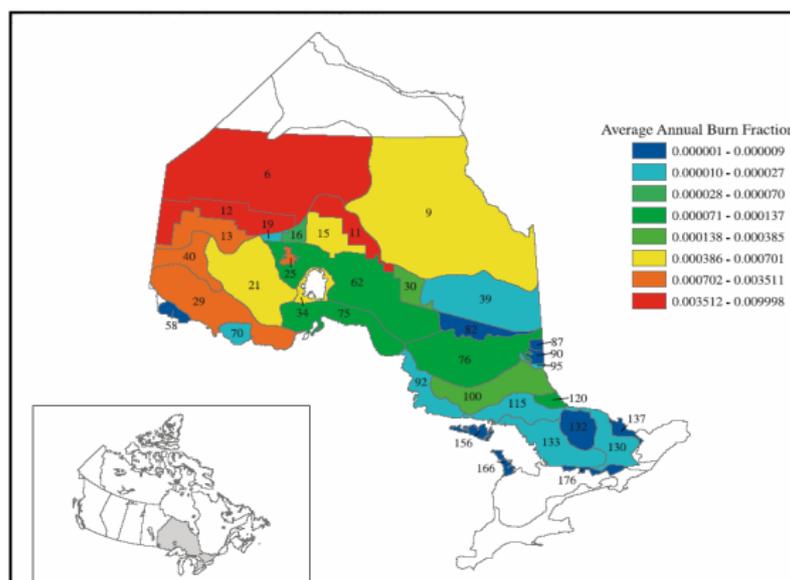


Figure 15. Le taux de brûlage moyen annuel à travers Ontario (Tiré de Sun et Martell 2008)

Alors que selon certains auteurs, la suppression des feux n'a aucun effet sur le changement de la fréquence des feux. Bridge et al. (2005) signalent qu'il n'y a pas de preuves empiriques suffisantes pour montrer que la suppression a modifié le cycle de feu en forêt boréale ontarienne. L'observation des données ne montrent pas de changement qui pourrait être détecté dans le temps du cycle de feu entre 1921 et 1995 dans les zones sous la suppression intensive ; ce qui laisse

comprendre qu'il n'y pas de changement dans la fréquence des feux.

Ailleurs, dans le Parc National du Glacier en Colombie britannique, selon Johnson et al. 1990, la suppression n'a pas réduit les aires brûlées durant les conditions favorables au déclenchement de feux. D'autres, par contre, signalent que les activités humaines étaient trop faibles pour avoir un impact significatif sur le régime du feu. Dans le parc national de Kootenay en Colombie Britannique, le cycle de feu a subi une augmentation suite à la diminution de la fréquence des feux depuis 1780 en passant d'un cycle de 60 ans à celui de 130 ans, et il est maintenant supérieur à 2700 ans depuis un autre changement qui s'est opéré au cours de 1928 (Masters 1990). Après modélisation, Wang et al. (2007) signalent qu'une forte suppression de feu au Nord-est de la Chine créerait un paysage avec une faible fréquence de feu.

À cause de l'importante influence humaine sur les forêts de la Fennoscandinavie méridionale et centrale (Pitkanen 2000; Wallenius et al. 2004; Groven et Niklasson 2005), la plupart des études attribuent la diminution de la fréquence des feux depuis le milieu du 19^{ème} siècle à l'activité de la suppression, considérée très efficace. Dans le passé, les feux forestiers ont été fréquents sur la plupart de la Fennoscandinavie et les peuplements brûlaient d'habitude aux intervalles d'à peu près 50 à 100 ans (Zackrisson 1977; Niklasson et Granstrom 2000; Wallenius et al. 2004; Wallenius et al. 2007) alors qu'actuellement, les feux sont très rares en raison de plus d'un siècle de protection efficace contre le feu (Wallenius et al. 2007). Dans le nord de la Suède, Zackrisson (1977) signale que l'allongement du cycle moyen de feu de 80 ans à 155 ans est dû à l'efficacité de la suppression du feu pendant les derniers deux siècles et notent que le feu n'est plus un facteur de rajeunissement des forêts. Engelmark et al. (1994) ont montré que la fréquence des feux a diminué de manière significative à partir de 1870 ce qui coïncide avec le réchauffement qui a commencé à la fin du Petit Âge Glaciaire. Certains attribuent toutefois cette baisse de la fréquence à des raisons économiques, dans le but de protéger les ressources ligneuses (Niklasson et Granstrom 2000; Groven et Niklasson 2005).

Les diminutions dans la fréquence de feu pendant le dernier siècle ont été observées dans beaucoup d'études. Cependant la coïncidence de ces diminutions avec une augmentation d'activités humaines a fait qu'elle soit attribuée à la suppression (Bergeron et Flannigan 1995). Bergeron (1991) a montré une diminution dans la fréquence de feu dans des îles sur le Lac Duparquet dans la forêt boréale du sud du Québec, et comme la suppression ne peut expliquer la

diminution de la fréquence des feux au niveau régional, il l'a attribuée aux fluctuations climatiques. Plus tard, Bergeron et Archambault (1993) ont relié cette diminution à des périodes de sécheresse favorisant le feu qui seraient moins importantes. Récemment, Bergeron et al. (2006) ont attribué le changement de cycles de feu du plus court dans le passé aux cycles plus longs durant les 63 dernières années à l'effet combiné du changement climatique et la suppression des feux améliorée. Mais ils reconnaissent que la suppression demeure inefficace face aux grandes étendues de forêt naturelle où l'accès est limité et quand les conditions de saison de feu sont particulièrement sévères. Flannigan et al. (1998), rapportent que les diminutions observées dans la fréquence des feux étaient auparavant, dans la plupart des cas, attribuées à la suppression des feux, mais ses résultats montrent que le changement climatique peut également avoir joué un rôle important. Depuis 1850, des conditions climatiques pourraient avoir contribué à la création de conditions plus humides moins favorables aux feux (Girardin et al. 2006). Même les dernières études récentes, que se soit au Canada ou en Europe, abondent dans le même sens et attribuent la diminution de la fréquence des feux et l'allongement du cycle de feu au changement climatique (Carcaillet et al. 2007; Lauzon et al. 2007). À cause du caractère sévère des feux en forêt boréale qui sont fortement influencés par l'état du système climatique, et que les feux de foudre sont responsables des grandes superficies envers lesquels la suppression est inefficace, il est évident que la diminution constatée de la fréquence des feux en forêts boréale pourrait être liée prioritairement au changement climatique qu'à l'activité de la suppression.

4. Discussion

La majorité des travaux réalisés en Amérique du Nord et en Eurasie signalent une diminution au niveau de la fréquence des feux (ex. Bergeron et Brisson 1990; Bergeron 1991; Flannigan et al. 1998) et un allongement du cycle de feu depuis le 19^{ème} siècle (ex. Baker 1995; Zhang et Chen 2007) et la plupart attribuent ces diminutions aux activités de la suppression bien que d'autres travaux (ex. Bergeron et Archambault 1993 et Lauzon et al. 2007) les attribuent au changement climatique manifesté depuis le Petit Âge Glaciaire.

Il est clair maintenant que les avis sont partagés sur cette question. Bien que la plupart des auteurs reconnaissent qu'il y a une diminution des superficies brûlées, certains sont convaincus que la suppression est la cause ; d'autres par contre, sont partisans de l'idée que l'opération de la suppression a ses limites et que son effet est minime sur la moyenne annuelle des superficies brûlées et d'autres facteurs pourraient en être responsables.

Si la question est traitée du côté de la superficie annuelle brûlée, il faut rappeler qu'en forêt boréale, ce sont les grands feux qui sont responsables de la moyenne annuelle de la superficie brûlée malgré qu'ils ne représentent en nombre que 10% (Leduc et al. 2000) (Figure 15), Et comme la SOPFEU ne peut intervenir efficacement sur les grands feux (Leduc 2002; Lemaire 2002), essentiellement ceux allumés par la foudre à cause des conditions météorologiques qui les accompagnent et qui limitent son intervention, la suppression ne pourrait pas avoir d'impact sur la superficie moyenne annuelle. Cette dernière sera donc dépendante des conditions biotiques et abiotiques du milieu et sa variation obéit principalement aux facteurs dominants durant le feu, généralement les conditions météorologiques.

Toutefois, il ne faut surtout pas sous-estimer les efforts déployés lors de la lutte active (l'attaque initiale) qui est considérée très efficace (Cumming 2005) et qu'il y a au moins 25% de diminution de la superficie moyenne annuelle enregistrée après la mise en place de la suppression modernisée au Québec (Leduc 2002). Seulement, il faut le rappeler encore une fois que la suppression n'est surtout efficace que pour intervenir sur les feux d'origines humaines, qui sont facilement détectables et dont leur accessibilité est facilitée grâce au réseau routier disponible à l'intérieur des forêts commerciales (Lefort et al. 2004). En intervenant sur cette catégorie de feux, en limitant la taille des feux, cela a altéré la distribution de la taille des feux caractéristique de la forêt boréale québécoise (Leduc 2002).

Accepter l'hypothèse que la suppression des feux a affecté le régime des feux en forêt boréale, implique de revenir à la définition même de ce terme. Il a été vu que le régime du feu est une expression qui réfère au patron global inscrit à travers les âges par les feux de végétation qui englobe les variations dans les caractéristiques des feux, soit le cycle de feu, l'occurrence des feux, la proportion annuelle brûlée, la catégorie, l'intensité, la sévérité, l'intervalle, la taille, la saison et la source d'allumage. Si le régime de feu est une expression globale des variations du feu à travers les âges, il est peut être important de déterminer ces âges et de chercher les changements qu'il a subi.

1/ Tout d'abord, est-ce que 30 ans de suppression des feux au Québec (la durée prise par Leduc en 2002) est suffisante pour faire apparaître un changement dans un régime de perturbation ? Personnellement je n'ai pas de réponse directe à cette question, toutefois, je me demande si depuis 1970, le système de protection mis en place par le Québec est resté le même au cours du temps du point de vue efficacité ? Barney et Stocks (1983) avancent que l'efficacité de la suppression variera grandement selon la période d'évolution technologique et, Blanchet (2003) précise que le système de protection au Québec n'a atteint qu'aujourd'hui sa maturité. Encore, faut-il le rappeler que, quelque soit l'efficacité du système de protection en place, il ne pourra jamais éliminer complètement les feux ni leurs effets (Drolet 2002). À cet égard Lefort et al. 2003, en tenant compte de ce fait, ont estimé que le climat était majoritairement responsable de la variation dans la taille des feux, tandis que les moyens de suppression s'améliorant dans le temps ne comptaient que pour une faible partie de cette explication

2/ Comme l'ont souligné plusieurs auteurs, la réduction de la fréquence des feux et par conséquent les superficies brûlées sont attribuées au changement climatique observé depuis la fin du Petit Âge Glaciaire (Bergeron 1991; Bergeron et al. 2001). La question qui se pose alors est la suivante : Est-ce que, depuis 1850 jusqu'au 1970, il y a eu aussi diminution de la fréquence et de la superficie brûlée dans des régions où l'influence humaine est "nulle" ? Si cette situation se réalise, il serait facile d'avancer que la suppression n'a fait que contribuer à ce changement. Mais, récemment, Lauzon et al. (2007) signalent la diminution de la fréquence des feux durant la période allant de 1920 à 2003 au Québec et l'attribuent au changement climatique. Leur résultat confirme que la diminution de la fréquence des feux est indépendante de la suppression et rejoint entre autres les résultats de Bridge et al. (2005) en Ontario et celle de Carcaillet et al. (2007) en

Europe où l'activité humaine est beaucoup plus prononcée. Au Québec, Bergeron (1991) a déjà montré le même changement sur les îles sans suppression que sur la terre ferme où se pratique la suppression.

Comme les études favorables à l'hypothèse que la suppression a eu un effet sur le régime de feux manquent de preuves empiriques et se sont basées sur des données non suffisantes pour révéler de genre d'effet, et en accord avec les dernières études précédemment mentionnées (Bergeron 1991; Bridge et al. 2005 et Carcaillet et al. 2007), je peux suggérer que la suppression n'est pas responsable **à elle seule** de la diminution de la fréquence des feux et de la superficie brûlée en forêt boréale et que les changements climatiques en sont aussi responsables. Ceci me permet d'avancer que la suppression n'a pas eu d'effet direct sur le régime des feux en forêt boréale québécoise au moins selon les données disponibles à ce jour. Une des façons, qui pourrait à mon avis l'appuyer, au lieu de comparer des données d'avant et d'après la mise en place de la suppression modernisée, comme cela été fait par Leduc (2002), il serait plus intéressant de regarder s'il y a un changement dans le cycle de feu ou la taille des feux dans la zone sous protection restreinte et de le comparer avec la zone sous protection intensive soumise à la suppression. Seuls les feux de foudre seraient considérés toute en tenant compte bien sûr de la variabilité écologique spatiale intra et inter zone existante.

Je vais regarder comment les auteurs ont abordé l'effet de la suppression des feux sur la taille et la fréquence des feux (cycle de feu).

Comment la suppression a diminué la taille des feux ?

Les auteurs qui ont étudié cette question ont comparé des données, soit d'une région soumise à la suppression des feux avec une autre laissée sans protection (ex. Ward et Tithecott 1993 en Ontario) ; soit deux périodes de la même région, avant et après la mise en place de l'opération de la suppression des feux (Leduc 2002 au Québec). Pour la première étude qui a soulevé beaucoup de réactions, selon Miyanishi et Johnson (2001), en plus de la courte période prise en compte pour la comparaison (15 ans), il y a sous estimation des feux de petite taille dans la région non protégée à cause des limites de leur détection comparativement à la région sous protection (j'ai donné un exemple au Québec sur ce point à la page 25). En plus, Ward et Tithecott (1993) ne donnaient aucune preuve que la diminution dans la taille des feux dans la région soumise à la

suppression des feux est attribuable à la suppression et non pas à d'autres facteurs comme le changement du climat. Ne pourrait-il pas s'agir de la coïncidence avec la mise en place de la suppression des feux pour lui attribuer l'effet (Bergeron et Flannigan 1995)?

Pour évaluer les arguments donnés par Ward et Withecott (1993) et appuyés et justifiés par la suite par Ward et al. (2001) de l'évidence de l'effet de la suppression sur le régime des feux, Bridge et al. (2005) ont regardé si la suppression des feux a changé la taille des feux et la moyenne annuelle des superficies brûlées et le cycle de feux en utilisant de nouvelles données et une nouvelle approche.

A propos de l'effet de la suppression sur la taille des feux, du fait que les feux de foudre sont beaucoup plus détectés dans la zone sous protection que dans celle sans protection, ce qui implique que le nombre de feux de foudre dans cette région n'est pas bien connu. En conséquence, il n'est pas possible d'avancer que la moyenne annuelle des superficies brûlées est plus élevée dans la zone sans protection du moment que la moyenne annuelle des superficies brûlée en forêt boréale est imposée essentiellement par les grands feux. Aussi, comme je l'ai précédemment signalé pour la pessière à mousse de l'ouest du Québec, le fait que le nombre de feux de petites tailles (<100 ha) a augmenté, c'est parce que le nombre total des feux détectés a augmenté aussi et ne devrait pas être l'effet direct de la suppression.

En outre, de telle comparaison spatiale de Ward et Tithecott (1993) et Ward et al. (2001) implique que la seule différence entre ces deux régions est uniquement la politique de la suppression sans prendre en compte d'autres paramètres qui peuvent influencer le régime de feu comme la fragmentation du paysage, la différence de climat, l'occupation du sol et la confusion dans les causes des feux (Keeley et al. 1999; Weir et al. 2000). Plus loin, Bridge et al. (2005) montrent bien qu'il existe de différence de végétation et de climat entre les deux parties ontariennes, est et ouest et qu'il faut les analyser séparément, chose qui a été ignorée par Ward et al. (2001).

Comment la suppression a diminué la fréquence des feux ?

En réponse à ce que la suppression des feux a changé la fréquence de feux et allongé le cycle de feu, la majorité des études sur l'historique des feux en forêt boréale ont généralement constaté

un changement du cycle de feu aux alentours du 20^{ème} siècle dans les régions avec ou sans suppression des feux (Bergeron 1991; Bergeron et Archambault 1993; Larsen 1996; Weir et al. 2000; Bergeron et al. 2001) et par conséquent ce changement a été souvent attribué aux fluctuations climatiques observées depuis le Petit Âge Glaciaire survenu au nord américain. Le fait que ce changement climatique a coïncidé avec la mise en place des opérations de suppression, le premier semble plus raisonnable d'être le responsable (Bridge et al. 2005) malgré que Bergeron et al. (2004) suggèrent qu'il faut être prudent sur les prévisions quant aux effets des changements climatiques à cause de notre incertitude. Bien que de nos jours, le réchauffement climatique attribué à l'augmentation des concentrations de CO₂ et qui est associé à l'augmentation de la température et par conséquent devrait augmenter la fréquence des feux, Flannigan et al. (1998) prédit une diminution dans le risque des feux dans l'est de la forêt boréale suite à une élévation prévue des précipitations ce qui diminue la fréquence des feux et allonge le cycle. De telles conditions plus humides pourraient être moins favorables aux feux (Girardin et al. 2006)

En ce qui concerne le cycle de feu, peu d'études ont étudié cet aspect à part celles de Ward et Tithecott (1993) et Ward et al. (2001) en Ontario, jugées superficielles et non convaincantes par Bridge et al. (2005).

Comme le changement du cycle de feu est reflété par la distribution d'âge de peuplement (Weir et al. 2000), Ward et Tithecott (1993) ont dressé la distribution des classes d'âges des peuplements pour l'Ontario (Figure 16) pour montrer l'effet de la suppression sur le cycle de feu. Il l'ont comparé au modèle de l'exponentiel négative, modèle accepté pour la forêt boréale (Van Wagner, 1978)(Figure 17) et comme la distribution n'était pas conforme au modèle, ils ont conclu que le cycle de feu a changé et ont attribué ce changement à la suppression.

Selon Miyaniishi et Johnson (2001), Ward et Tithecott (1993) ne mentionnaient pas dans leur rapport si cette distribution des classes d'âge est celle de toute la Province de l'Ontario. Si c'est le cas, Miyaniishi et Johnson (2001) ne trouvent pas de raison valable d'inclure dans cette distribution la zone sous protection extensive pour montrer un effet qui n'existe pas pour la simple raison que la suppression n'est pas pratiquée dans cette zone. Par contre si la distribution concerne uniquement les zones sous protection intensive et modérée, Ward et Tithecott (1993) ne donnaient aucune preuve de l'homogénéité spatiale du régime des feux dans ces zones.

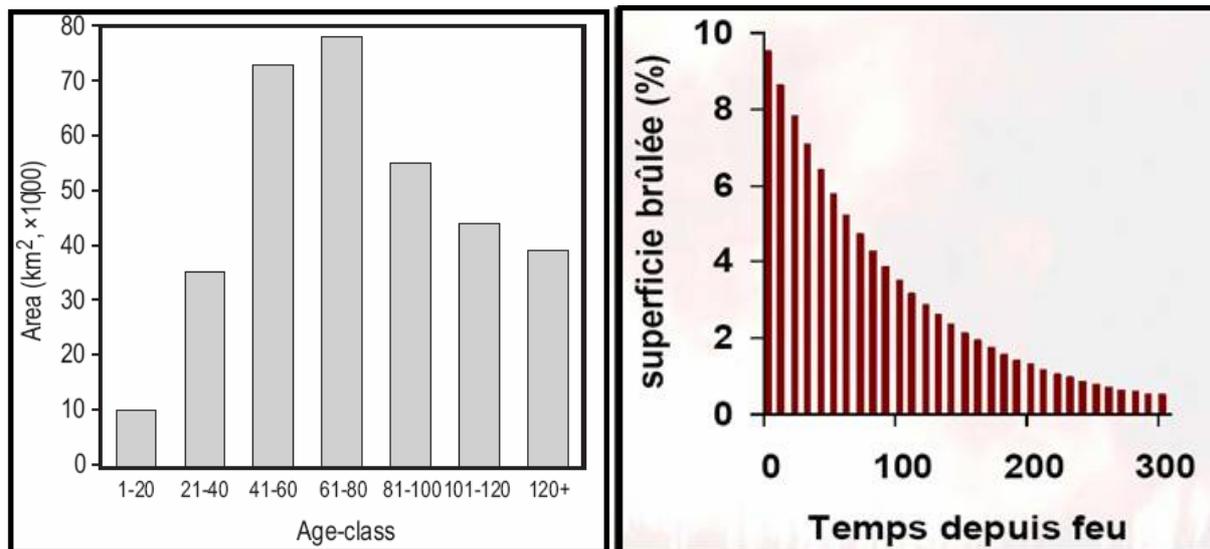


Figure 16. Distribution de classe d'âge de la forêt ontarienne (OMNR 1986) (Tiré de Ward et Tithecott (1993))

Figure 17. Distribution théorique des classes d'âge sous un CF=100 ans (Van Wagner, 1978)

En réponse à Miyanishi et Johnson (2001), Ward et al. (2001) signalent que le rapport de 1993 était d'abord un document interne destiné essentiellement pour stimuler la réflexion sur la gestion des feux en Ontario et n'a jamais été soumis à un examen scientifique. Ils confirment, par contre dans la publication de 2001, en utilisant cette fois-ci une période plus longue de 25 ans, que la suppression a effectivement un effet sur le régime des feux. En comparant l'actuel cycle de feu ou l'intervalle du retour du feu avec l'intervalle du retour du feu historique estimé par différentes études sur l'historique des feux dans la même région ou dans des régions avoisinantes, ont conclut que la suppression a effectivement allongé le cycle de feu, diminué la moyenne annuelle de la fraction brûlée ainsi que la moyenne annuelle des superficies brûlées (Tableau 7). Elle a permis aussi d'avoir des forêts plus vieilles en absence de coupes. Toutefois, leurs données utilisées concernent uniquement les zones sous protection intensive et modérée pour lesquelles les données sont disponibles et fiables et ont reconnu l'insuffisance des données de la zone sous protection extensive.

| | Estimated pre-suppression era | Current era (1976–2000) |
|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| Total area (ha) | 49 280 000 | 49 280 000 |
| Fire return interval (years) | 65 | 604 |
| Mean area burned annually (ha) | 739 200 | 81 544 |
| Mean annual burned fraction | 1.5% | 0.166% |

Tableau 7. Comparaison du régime de feu avant suppression et actuel pour les zones sous protection intensive et modérée en Ontario (données de 1976-2000) (tiré de Ward et al. 2001).

L'évidence de l'effet de la suppression des feux sur les superficies brûlées a été soutenue par la suite par plusieurs auteurs (ex. Martell 2002 ; Cumming 2005, Podur et al. 2007, Sun et Martell 2008).

En fin, Ward et al. (2001) reconnaissent que le régime de feu a été, au cours des 200 dernières années, influencé par plusieurs facteurs, entre autres, la suppression et suggèrent que des analyses plus approfondies de ses facteurs sur la dynamique et la nature complexe du changement de ce régime est précieuse pour les gestionnaires.

Pour invalider les résultats précédents, Bridge et al. 2005 se sont basés sur l'hypothèse suivante : Si durant la période avant 1950, le cycle de feu a changé il ne devrait pas être du à l'effet de la suppression pour la simple raison que cette dernière n'a été efficace qu'à partir de 1950 (Bergeron et al. 2004). De même, si elle a eu un effet, il se manifestera après cette date et on aurait un changement dans le cycle de feu qu'on ne devrait pas l'avoir avant 1950. Pour l'élucider, ils ont comparé les deux régions avec et sans protection, mais en séparant la partie est de l'Ontario de celle de l'ouest à cause de la différence dans la végétation et le climat que caractérise les deux parties. Leurs résultats n'ont montré aucune tendance de changement dans le cycle de feu entre 1921 et 1995 pour toutes les régions des deux parties (Figure 18) ce qui est en

accord avec ce qui a été constaté avant par d'autres auteurs, entre autres Bergeron (1991) (Figure 19) et Bergeron et al. (2001), que le cycle de feu n'a pas subi de changement et cela depuis 1920.

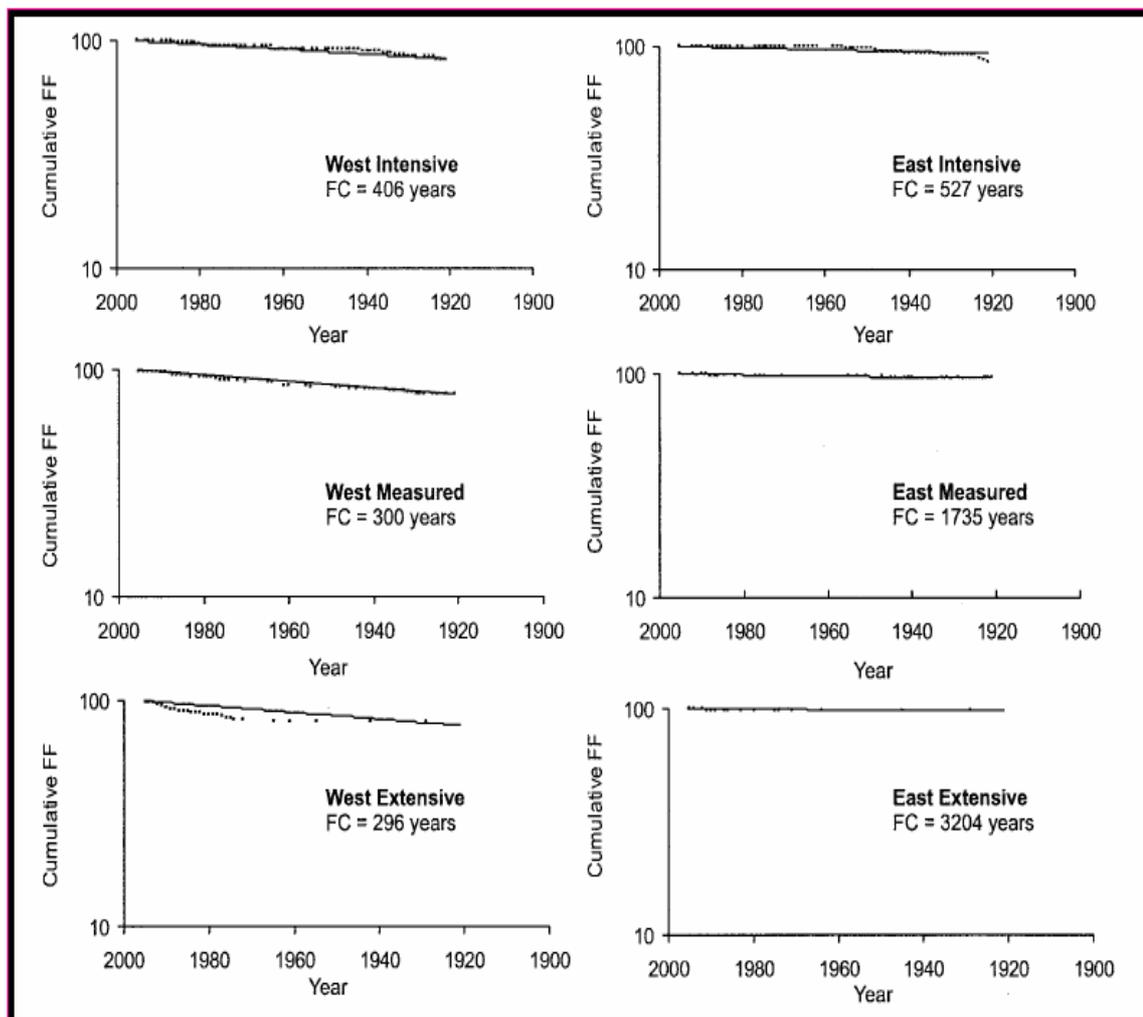


Figure 18. Distribution du temps depuis feu pour les zones à fort, modéré et faible niveau de protection dans l'est et l'ouest de l'Ontario. La ligne pleine représente le cycle de feu calculé en utilisant un estimateur vraisemblance maximale (FC = cycle de feu) (Bridge et al. 2005).

Pour expliquer pourquoi la tendance du cycle de feu dans la partie Est est inverse par rapport à la partie Ouest, en plus de l'influence climatique due à la baie James, il faut faire intervenir la diminution des jours d'orage ainsi que la diminution de la durée de la saison de feu au Nord et à l'Est (Johnson 1992), comme cela a été montré à l'ouest du Québec (Bergeron et Archambault

1993). Toutefois, selon Bridge et al. (2005), quelque soit l'explication, il est clair que les causes des différences dans le cycle observées peuvent être autres que la suppression des feux ni même être rattachées directement aux changements climatiques (Bergeron et al. 2004) et qu'entre le temps, la suppression et la superficie brûlée, il y a une grande complexité (Podur et Martell 2007).

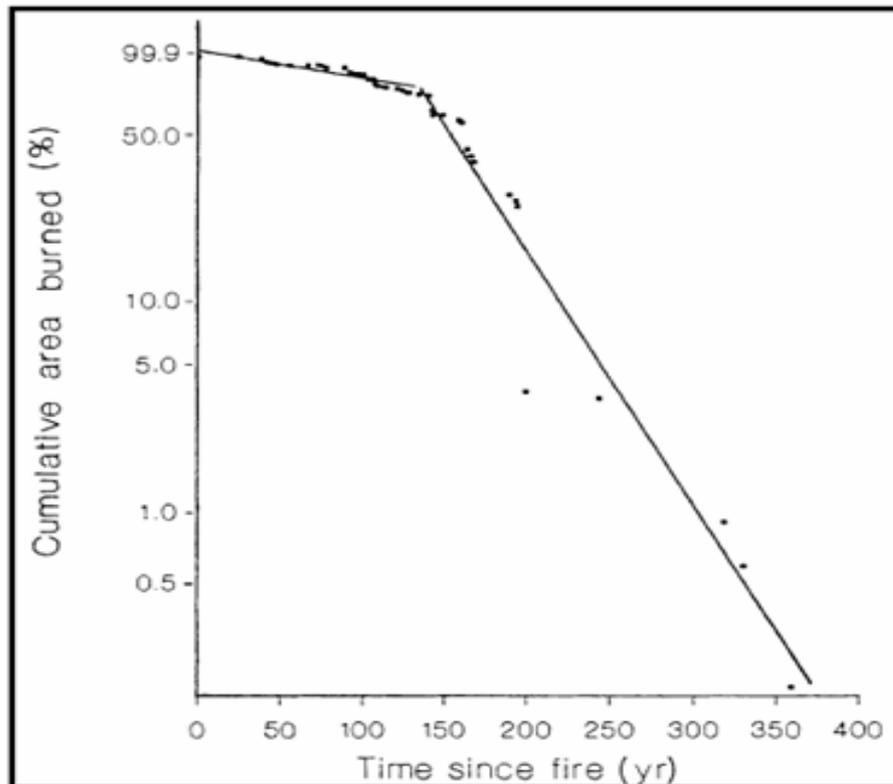


Figure 19. La superficie brûlée cumulative par an pour le paysage insulaire du lac Duparquet (Québec). La ligne de régression correspond à la constance de la fréquence des feux pour la période avant et après 1870 (Tiré de Bergeron 1991).

5. Conclusion

L'effet de la suppression sur le régime des feux demeure posé. Bien que les différentes études signalent une diminution de la fréquence des feux ainsi que de la superficie brûlée depuis le début du dernier siècle, mais ils restent partagés sur les causes de cette diminution. La suppression a eu tout de même certains effets en forêt boréale. Elle apparaît avoir modifié la distribution des tailles des feux mais pas la moyenne annuelle des superficies brûlées. En période de suppression, les feux de petites tailles sont en grand nombre dans les zones protégées car ils sont mieux détectés et facilement rapportés comparativement à ceux des zones non protégées qui sont généralement éloignés, donc négligés. Il se trouve aussi que la suppression est plus efficace pour les feux d'origine humaine, mais les grands feux demeurent importants. Ceci montre que le changement peut être sur la taille des feux, mais peu sur la fréquence car les grands feux ont peu changé en nombre et en superficie.

La réponse à la question posée mérite une certaine prudence. Il n'est pas prudent d'avancer que la suppression, à elle seule, a eu un effet sur le régime de feu en forêt boréale car il faut faire intervenir aussi l'influence simultanée des autres facteurs que le régime de feu a dû subir depuis le Petit Âge Glaciaire.

Car pour admettre que la suppression est la seule responsable du changement dans le régime des feux, il faut accepter que les effets des autres facteurs qui ont agi sur le régime du feu au cours du temps, à savoir le changement climatique, la fragmentation du paysage et les autres activités humaines, soient nuls ; alors que ce n'est pas le cas. Toutefois, si on se réfère à l'étude de Bergeron (1991) et Lauzon et al. (2007) au Québec et Bridge et al. (2005) en Ontario qui suggèrent que le changement observé dans le cycle de feu en forêt boréale est survenu bien avant que la suppression active des feux soit en vigueur, et sans tenir en compte des importants feux rapportés récemment en Russie (Engelmark et al. 1994), il paraît suffisant, comme argument, que la diminution de la fréquence des feux et son impact sur le régime des feux soit attribuée principalement aux fluctuations climatiques qui ont eu lieu depuis la fin du Petit âge glaciaire (-1850) (Bergeron 1991 ; Bergeron et Archambault 1993).

Ceci ne sous-estime en aucune manière l'impact de la suppression qu'elle avait et pourrait avoir en forêt boréale. Toutefois, l'effet de la suppression des feux sur le régime des feux au Québec

est prématuré à mettre en évidence par rapport aux données actuellement disponibles. Comme je l'ai signalé précédemment, pour élucider cet effet, je suggère que la comparaison soit beaucoup plus spatiale et temporelle que simplement temporelle. Cela signifie, qu'au lieu de regarder avant et après la mise en place de la suppression dans la zone protégée uniquement, il serait judicieux de comparer les deux zones au Québec, à savoir la zone sous protection intensive où la suppression des feux est systématique et la zone sous protection restreinte par rapport au cycle de feu ou bien aux superficies brûlées. Bien entendu qu'il faut tenir compte de la variabilité écologique intra et inter zone qui peut exister car il a été déjà mentionné que le régime des feux au Québec est propre à chaque région écologique (Gauthier 2001).

En procédant ainsi, vu que la diminution dans la fréquence des feux et l'allongement du cycle de feu, constatée depuis le milieu du 20^{ème} siècle, est évidente à cause du changement du climat, il est clair qu'elle doit se manifester aussi dans la zone sous protection restreinte même après 1970. Si cette situation se réalise, il serait plus facile d'écarter l'hypothèse de l'effet de la suppression sur le régime du feu en forêt boréale québécoise.

Et comme la taille des feux est un paramètre important dans l'estimation du cycle de feu et la caractérisation du régime de feu, un point qui mérite probablement d'être soulevé est celui de la délimitation des superficies brûlées au Québec. La question qui se pose, est-ce que la délimitation de la taille des feux dans la zone sous protection restreinte se fait-elle de la même façon que dans celle sous protection intensive ? Dans celle-ci et d'après notre connaissance, la détermination de la taille des feux et la délimitation du périmètre du feu se fait à partir des cartes forestières en survolant les régions affectées par le feu en début de matinée ou en fin de journée. Et à cause de la fumée et des conditions atmosphériques qui y règnent, il est difficile de déterminer la superficie brûlée et la localisation avec certitude (Flannigan et Vonder Haar 1986).

La visualisation sous Arc Gis de la base de données des feux fournie par le MRNF (Ministère des ressources naturelles et de la faune) pour la période s'étalant de 1943 au 2003, et sa superposition sur des images satellites Landsat des années 1985, 1995, 2000 et 2005 fournies par le CFL (Centre forestier des Laurentides), révèlent des insuffisances au niveau de l'exactitude des limites de ces feux. Sans aller jusqu'à faire des calculs, je peux toutefois l'évaluer entre 20 et 30% de surestimation des superficies brûlées (Figure 20). Certains feux n'apparaissent même pas sur l'image satellite à cause des erreurs de localisation. Je me demande si ces erreurs n'auront pas

d'effet lors du calcul de la distribution des tailles des feux pour les deux zones et encore plus pour la zone sans suppression qui est insuffisamment surveillée et les feux qui s'y déclarent sont vraisemblablement mal rapportés à cause de son éloignement?

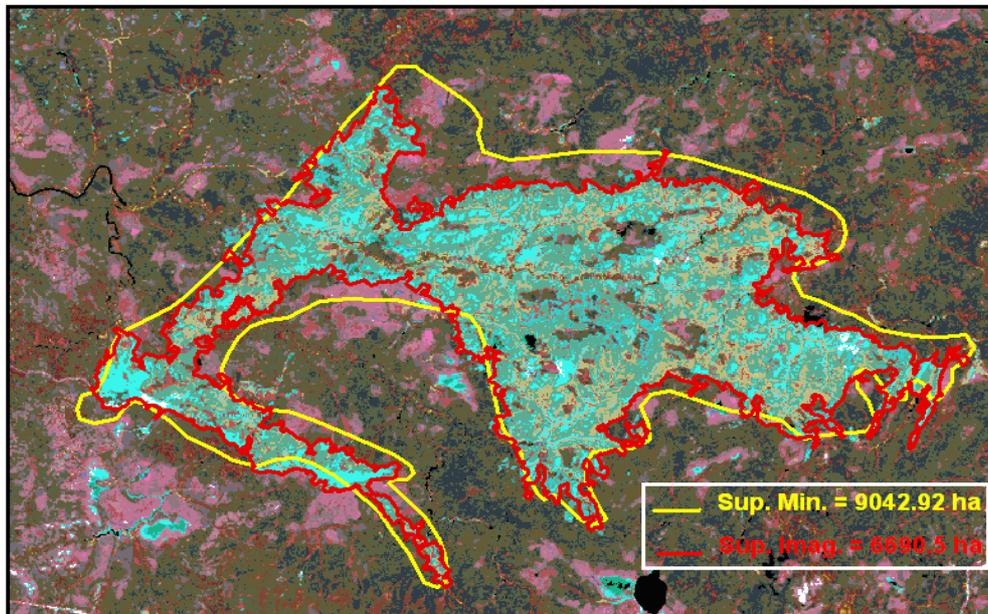


Figure 20. Différence de superficie de 26% entre celle calculée par le Ministère et celle générée par l'image satellite de 1985 pour le feu 7087 de 1980.

Encore même, cette délimitation n'influe-t-elle pas sur les îlots résiduels et les péninsules qui pourraient être inclus de façon exagérée dans le périmètre du feu. Des résultats préliminaires d'une étude (en cours) sur la quantité des habitats résiduels dans les feux de la pessière à mousse de l'ouest du Québec (voir Madoui et al. 2008), en se basant sur des limites des feux générées à partir des images satellites, ont montré qu'il pourrait y avoir entre 5 et 55% d'habitats résiduels avec une moyenne de 22% dans les feux étudiés. Si ce taux concerne les données des feux de la zone sous protection intensive, il serait sans doute plus important dans la zone sous protection extensive et encore plus avant la période de la suppression. Bridge et al. (2005) soulèvent ce genre de situation mais ils sous-estiment leurs effets car selon Eberhart et Wooddard (1987), ces îlots résiduels et ces îles occupent souvent de petite proportion, soit inférieurs à 10%.

En fin, il apparaît que le régime de feu a été au cours du temps influencé de façon complexe par plusieurs facteurs aussi bien humains que naturels. Et vu que l'interaction et la complexité

entre ces facteurs sont difficiles à discerner, il n'est pas facile de faire apparaître cette influence et la relier uniquement à la suppression.

Disons que la suppression est devenue nécessaire une fois que l'homme s'est approprié des forêts; donc la suppression est là pour "corriger ses erreurs" commises envers cet écosystème. Quand il brûle, il faut qu'il supprime ou essaie de supprimer. Est-ce qu'il intervient aussi sur un feu naturel qui ne menace ni des vies ni des biens matériels?

Et comme la présence de l'homme se manifeste de plus en plus en forêt boréale et son impact est bien visible dans bien des régions, nous ne pourrions pas parler d'une autre définition du régime du feu qui puisse inclure, en plus les paramètres qui le définissent, les activités humaines ? Ces activités qui englobent la fragmentation, le réseau routier, l'utilisation du sol, etc. Et comme le suggèrent récemment (Flannigan et al. 2008), que les rétroactions et les interactions entre l'homme, le feu, le climat et les écosystèmes doivent être bien comprises.

Références

- Agee, J. K. and M. H. Huff (1987). "Fuel succession in a western hemlock–Douglas fir forest." Canadian Journal of Forest Research **17**: 699–704
- Anderson, K., D. L. Martell, M. Flannigan and D. Wang (2000). "Modeling of fire occurrence in the boreal forest region of Canada." In Fire, climate change and carbon cycling in the boreal forest, Kasischke, E.S. and B.J. Stocks (eds.) Springer, new York.: 357-367.
- Baker, W. L. (1995). "Longterm response of disturbance landscapes to human intervention and global change." Landscape Ecology **10**(3): 143-159.
- Bergeron, Y. (1991). "The Influence of Island and Mainland Lakeshore Landscapes on Boreal Forest-Fire Regimes." Ecology **72**: 1980-1992.
- Bergeron, Y. (1998). "Consequences of Climate Changes on Fire Frequency and Forest Composition in the Southwestern Boreal Forest of Quebec. (version française)." Geographie Physique Et Quaternaire **52**: 167-173.
- Bergeron, Y. and S. Archambault (1993). "Decreasing frequency of forest fires in the southern boreal zone of Quebec and its relation to global warming since the end of the Little Ice Age'." The Holocene **3**(3): 255.
- Bergeron, Y. and J. Brisson (1990). "Fire Regime in Red Pine Stands at the Northern Limit of the Species' Range." Ecology **71**(4): 1352-1364.
- Bergeron, Y. and P. R. Dansereau (1993). "Predicting the composition of Canadian southern boreal forest in different fire cycles." J. Veg. Sci. **4**(827–832).
- Bergeron, Y., P. Drapeau, S. Gauthier and N. Lecomte (2007). "Using knowledge of natural disturbances to support sustainable forest management in the northern Clay Belt." The Forestry Chronicle **83**(3): 326.
- Bergeron, Y. and M. D. Flannigan (1995). "Predicting the effects of climate change on fire frequency in the southeastern Canadian boreal forest." Water, Air, & Soil Pollution **82**(1): 437-444.
- Bergeron, Y., S. Gauthier, M. Flannigan and V. Kafka (2004). "Fire regimes at the transition between mixedwood and coniferous boreal forest in Northwestern Quebec." Ambio **33**: 356-360.

- Bergeron, Y., S. Gauthier, V. Kafka, P. Lefort and D. Lesieur (2001). "Natural Fire Frequency for the Eastern Canadian Boreal Forest: Consequences for Sustainable Forestry." Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere **31**: 384-391.
- Bergeron, Y. and B. Harvey (1997). "Basing Silviculture on Natural Ecosystem Dynamics: an Approach Applied to the Southern Boreal Mixedwood Forest of Quebec." Forest Ecology and Management **92**: 235-242.
- Bergeron, Y., B. Harvey, A. Leduc and S. Gauthier (1999). "Forest management guidelines based on natural disturbance dynamics: stand- and forest-level considerations." For. Chron. **75**: 49-54.
- Bergeron, Y., P. J. H. Richard, C. Carcaillet, S. Gauthier, M. Flannigan and Y. T. Prairie (1998). "Variability in fire frequency and forest composition in Canada's southeastern boreal forest: a challenge for sustainable forest management."
- Bessie, W. C. and E. A. Johnson (1995). "The relative importance of fuels and weather on fire behavior in subalpine forests." Ecology **76**(3): 747-762.
- Blanchet, L. (2003). Feux de forêt, l'histoire d'une guerre, Trait d'Union, 183 p.
- Bridge, S. R. J., K. Miyanishi and E. A. Johnson (2005). "A critical evaluation of fire suppression effects in the boreal forest of Ontario." Forest Science **51**(1): 41-50.
- Brown, J. K. (2000). "Chapter 1: introduction and fire regimes." USDA Forest Service - General Technical Report RMRS-GTR **2**: 7.
- Brown, J. K. and N. V. DeByle (1987). "Fire damage, mortality, and suckering in aspen." Can. J. For. Res. **17**: 1100-1109.
- Byram, G. M. (1959). Forest fire behavior, In: Davis, K.P. Forest fire control and use. New York: McGraw-Hill: 90-123.
- Carcaillet, C., Y. Bergeron, P. J. H. Richard, B. Frechette, S. Gauthier and Y. T. Prairie (2001). "Change of fire frequency in the eastern Canadian boreal forests during the Holocene: does vegetation composition or climate trigger the fire regime?" Journal of Ecology **89**(6): 930-946.
- Carcaillet, C., I. Bergman, S. Delorme, G. Hornberg and O. Zackrisson (2007). "Long-term fire frequency not linked to prehistoric occupations in northern swedish boreal forest." Ecology **88**(2): 465-477.

- Clark, J. S. (1990). "Twentieth-century climate change, fire suppression, and forest production and decomposition in northwestern Minnesota." Canadian journal of forest research **20**(2): 219-232.
- Conard, S. G. and D. R. Weise (1998). "Management of fire regime, fuels, and fire effects in southern California chaparral: lessons from the past and thoughts for the future." Tall Timbers Fire Ecology Conference Proceedings **20**: 342-350.
- Cumming, S. G. (2005). "Effective fire suppression in boreal forests." Canadian Journal of Forest Research **35**: 772-786.
- Dale, V. H., L. A. JOYCE, S. M. RONALD P, N. M. AYRES, M. D. FLANNIGAN, P. J. HANSON, L. IRLAND, A. LUGO, C. J. PETERSON, D. SIMBERLOFF, F. J. SWANSON, B. J. STOCKS and B. M. WOTTON (2001). "Climate Change and Forest Disturbances. Climate change can affect forests by altering the frequency, intensity, duration, and timing of fire, drought, introduced species, insect and pathogen outbreaks, hurricanes, windstorms, ice storms, or landslides." BioScience: 723-734.
- Delong, S. C. and D. Tanner (1996). "Managing the pattern of forest harvest: lessons from wildfire." Biodiversity and Conservation **5**: 1191-1205.
- Drolet, B. (2002). "La protection des forêts contre le feu. Bilan et perspectives." Actes du colloque sur l'aménagement forestier et le milieu, Chicoutimi, les 9, 10 et 11 avril 2002: 7-17.
- Engelmark, O., L. Kullman and Y. Bergeron (1994). "Fire and Age Structure of Scots Pine and Norway Spruce in Northern Sweden During the Past 700 Years." New Phytologist **126**(1): 163-168.
- Flannigan, M. D. and Y. Bergeron (1998). "Possible Role of Disturbance in Shaping the Northern Distribution of *Pinus resinosa*." Journal of Vegetation Science **9**(4): 477-482.
- Flannigan, M. D., Y. Bergeron, O. Engelmark and B. M. Wotton (1998). "Future Wildfire in Circumboreal Forests in Relation to Global Warming." Journal of Vegetation Science **9**: 469-476.
- Flannigan, M. D., B. Kochtubajda and K. A. Logan (2008). Forest Fires and Climate Change in the Northwest Territories. Cold Region Atmospheric and Hydrologic Studies. The Mackenzie GEWEX Experience: 403-417.
- Flannigan, M. D. and T. H. Vonder Haar (1986). "Forest fire monitoring using NOAA satellite AVHRR." Canadian journal of forest research **16**(5): 975-982.

- Gauthier, S. (2002). "Régime des feux au Québec." In l'aménagement forestier et le feu. Actes du colloque sur l'aménagement forestier et le milieu, Chicoutimi, les 9, 10 et 11 avril 2002: 19-26.
- Gauthier, S., A. Leduc, Y. Bergeron and P. Drapeau (2001). "Les perturbations naturelles et la diversité écosystémique." Le naturaliste canadien **125**: 10-17.
- Girardin, M. P., J. C. Tardiff, M. D. Flannigan and Y. Bergeron (2006). "Forest fire-conductive drought variability in the southern canadian boreal forest and associated climatology inferred from tree rings." Canadian Water Ressources Journal **31**(4): 275-296.
- Goldammer, J. (1991). Tropical wild-land fires and global changes- Prehistoric evidence, present fire regimes, and future trends, Global biomass burning - Atmospheric, climatic, and biospheric implications. Cambridge, MA, MIT Press, p. 83-91.
- Granstrom, A. (1993). "Spatial and Temporal Variation in Lightning Ignitions in Sweden." Journal of Vegetation Science **4**(6): 737-744.
- Grissino-Mayer, H. D. and T. W. Swetnam (2000). "Century scale changes in fire regimes and climate in the Southwest." The Holocene **10**(2): 207-214.
- Groven, R. and M. Niklasson (2005). "Anthropogenic impact on past and present fire regimes in a boreal forest landscape of southeastern Norway." Canadian Journal of Forest Research **35**: 2719-2726.
- Groven, R. and M. Niklasson (2005). Anthropogenic impact on past and present fire regimes in a boreal forest landscape of southeastern Norway. **35**: 2719-2726.
- Johnson, E. A. (1992). Fire and Vegetation Dynamics: Studies from the North American Boreal Forest, Cambridge University Press, New York, New York, USA.
- Johnson, E. A., G. I. Fryer and M. J. Heathcott (1990). "The Influence of Man and Climate on Frequency of Fire in the Interior Wet Belt Forest, British Columbia." Journal of Ecology **78**(2): 403-412.
- Johnson, E. A. and S. L. Gutsell (1994). "Fire frequency models, methods and interpretations." Advances in Ecological Research **25**: 239-287.
- Johnson, E. A. and C. E. Van Wagner (1985). "The theory and use of two fire history models." Can. J. For. Res **15**(1): 214-220.

- Kafka, V., S. Gauthier and Y. Bergeron (2001). "Fire impacts and crowning in the boreal forest : study of a large fire in western Quebec." International Journal of Wildland Fire **10**: 119-127.
- Keane, R. E., G. J. Cary, I. D. Davies, M. D. Flannigan, R. H. Gardner, S. Lavorel, J. M. Lenihan, C. Li and T. S. Rupp (2004). "A classification of landscape fire succession models: spatial simulations of fire and vegetation dynamics." Ecological Modelling **179**(1): 3-27.
- Keeley, J. E. and C. J. Fotheringham (2001). "Historic fire regime in southern California shrublands." Conservation Biology **15**: 1536-1548.
- Keeley, J. E., C. J. Fotheringham and M. Morais (1999). "Reexamining fire suppression impacts on brushland fire regimes." Science **284**(5421): 1829-1832.
- Larjavaara, M. (2005). "Climate and forest fires in Finland – influence of lightning-caused ignitions and fuel moisture." Dissertationes Forestales 5, The Finnish Society of Forest Science: 35 p.
- Larsen, C. P. S. (1996). "Fire and climate dynamics in the boreal forest of northern Alberta, Canada, from AD 1850 to 1989." The Holocene **6**(4): 449.
- Lauzon, E., D. Kneeshaw and Y. Bergeron (2007). "Reconstruction of fire history (1680-2003) in Gaspesian mixedwood boreal forests of eastern Canada." Forest Ecology and Management **244**(1-3): 41-49.
- Le Goff, H. and L. Sirois (2004). "Black spruce and jack pine dynamics simulated under varying fire cycles in the northern boreal forest of Quebec, Canada." Can. J. For. Res **34**(12): 2399-2409.
- Leduc, A. (2002). "Effet de la suppression des incendies forestiers sur les régimes des feux." In l'aménagement forestier et le feu. Actes du colloque sur l'aménagement forestier et le milieu, Chicoutimi, les 9, 10 et 11 avril 2002: 85-90.
- Leduc, A., Y. Bergeron, P. Drapeau, B. Harvey and S. Gauthier (2000). "Le régime naturel des incendies forestiers: un guide pour l'aménagement durable de la forêt boréale." L'Aubelle **135**.
- Leduc, A., Y. Bergeron and S. Gauthier (2007). "Relationships Between Prefire Composition, Fire Impact, and Postfire Legacies in the Boreal Forest of Eastern Canada." USDA Forest Service Proceedings RMRS-P-46CD: 187-193.

- Lefort, P. (1998). "Influence du climat et de la colonisation canadienne sur le régime des feux de forêt dans la région du lac Abitibi." mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en biologie, Université du Québec à Montréal 88 p.
- Lefort, P., S. Gauthier and Y. Bergeron (2003). "The Influence of Fire Weather and Land Use on the Fire Activity of the Lake Abitibi Area, Eastern Canada." Forest Science **49**(4): 509-521.
- Lefort, P., A. Leduc, S. Gauthier and Y. Bergeron (2004). "Recent Fire Regime (1945-1998) in the Boreal Forest of Western Quebec." Ecoscience **11**: 433-445.
- Lemaire, G. (2002). "Lutte direct. portée et limites." In l'aménagement forestier et le feu. Actes du colloque sur l'aménagement forestier et le milieu, Chicoutimi, les 9, 10 et 11 avril 2002: 77-84.
- Lesieur, D., S. Gauthier and Y. Bergeron (2002). "Fire Frequency and Vegetation Dynamics for the South-Central Boreal Forest of Quebec, Canada." Can. J. For. Res **32**: 1996-2009.
- Lewis, H. T. (1982). Fire technology and resource management in Aboriginal North America and Australia, In: Williams, N. and Hunn, E. (eds). Resource Managers: North American and Australian hunter-gatherers. Aboriginal Studies Press, Canberra. Pp 45-68.
- Li, C. (2000). "Reconstruction of natural fire regimes through ecological modelling." Ecological Modelling **134**(2-3): 129-144.
- Madoui, A. (2002). "Les incendies de forêt en Algérie: Historique, bilan et analyse." Forêt méditerranéenne **23**(1): 23-30.
- Manuel de foresterie (1996). Ordre des ingénieurs forestiers du Québec. Les presses de l'Université Laval. Québec.
- Martell, D. L. (2002). "Wildfire regime in the boreal forest (multiple letters)." Conservation Biology **16**(5): 1177-1178.
- Masters, A. M. (1990). "Changes in forest fire frequency in Kootenay National Park, Canadian Rockies." Can. J. Bot. **68**(8): 1763-1767.
- McRae, D. J., L. C. Duchesne, B. Freedman, T. J. Lynham and S. Woodley (2001). "Comparisons between wildfire and forest harvesting and their implications in forest management." Environ. Rev. **9**: 223:260.
- Miller, C. and D. L. Urban (1999). "Interaction between forest heterogeneity and surface fire regimes in the southern Sierra Nevada." Can. J. For. Res. **29**: 202-212.

- Minnich, R. A. (1983). "Fire Mosaics in Southern California and Northern Baja California." Science, New Series **219**(4590): 1287-1294.
- Niklasson, M. and A. Granstrom (2000). "Numbers and sizes of fires: Long-Term spatially explicit fire history in a Swedish boreal landscape." Ecology **81**(6): 1484-1499.
- Parisien, M. A., K. G. Hirsch, S. G. Lavoie, J. B. Todd and V. G. Kafka (2004). Saskatchewan Fire Regime Analysis, Nat. Resour. Can., Can. For. Serv., North. For. Cent., Edmonton, AB. Inf. Rep. NOR-X-394.
- Pickett, S. T. A. and P. S. White (1985). "The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics. ." in S. T. A. Pickett and P. S. White, editors. The ecology of natural disturbance and patch dynamics. Academic Press, Orlando, Florida.: 3-13.
- Pitkanen, A. (2000). "Fire frequency and forest structure at a dry site between AD 440 and 1110 based on charcoal and pollen records from a laminated lake sediment in eastern Finland." The Holocene **10**(2): 221.
- Podur, J. J. and D. L. Martell (2007). "A simulation model of the growth and suppression of large forest fires in Ontario." Int. J. Wildland Fire **16**(3): 285-294.
- Rapport Coulombe (2004). "Commission d'étude sur la gestion de la forêt publique québécoise." 243 + annexes.
- Rowe, J. S. (1983). "Concepts of fire effects on plants individuals and species." In R.W. Wein & D.A. MacLean (eds.). The Role of Fire in Northern Circumpolar Ecosystems. John Wiley & Sons, New York: 135-153.
- Ryan, K. C. and N. V. Noste (1985). "Evaluating prescribed fires. USDA For. Serv." In Lotan, J. E., Kilgore, B. M., Fischer, W. C., and Mutch, R. W. Proceedings-symposium and workshop on wilderness fire (1983 November 15-18; Missoula, MT). USDA, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, UT, USA. **General Technical Report INT 182**: 230–238.
- Shang, B. Z., H. S. He, T. R. Crow and S. R. Shifley (2004). "Fuel load reductions and fire risk in central hardwood forests of the United States: a spatial simulation study." Ecological Modelling **180**: 89-102.
- Stocks, B. J. (1991). "The extent and impact of forest fires in northern circumpolar countries." In: Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications (J.S. Levine, ed.), MIT Press, Cambridge, MA.: 197-2002.

- Stocks, B. J. and A. J. Simard (1993). "Forest fire management in Canada." Disaster Management **5**(1): 21-7.
- Tilman, D., P. Reich, H. Phillips, M. Menton, A. Patel, E. Vos, P. D. and J. KNOPS' (2000). "Fire Suppression and Ecosystem Carbon Storage." Ecology **81**: 2680-2685.
- Trabaud, L. (1980). Impact biologique et écologique des feux de végétation sur l'organisation, la structure et l'évolution de la végétation des garrigues du Bas-Languedoc. Thèse Doctorat d'État en Sciences, univ. Sci. Tech. du Languedoc, Montpellier: 288 p.
- Turner, M. G. and W. H. Romme (1994). "Landscape dynamics in crown fire ecosystems." Landscape Ecology **9**(1): 59-77.
- Van Wagner, C. E. (1983). Fire behaviour in northern conifer forests and shrublands. in R.W. Wein and D.A. MacLean, eds., The Role of Fire in Northern Circumpolar Ecosystems. John Wiley and Sons, New York. 65–80.
- Wallenius, T. H., T. Kuuluvainen and I. Vanha-Majamaa (2004). "Fire history in relation to site type and vegetation in Vienansalo wilderness in eastern Fennoscandia, Russia." Can. J. For. Res. **34**: 1400–1409.
- Wallenius, T. H., S. Lilja and T. Kuuluvainen (2007). "Fire history and tree species composition in managed *Picea abies* stands in southern Finland: Implications for restoration." Forest Ecology and Management **250**(1-2): 89-95.
- Wang, H., H. S. Heb and X. Li (2007). "The long-term effects of fire suppression and reforestation on a forest landscape in Northeastern China after a catastrophic wildfire." Landscape and Urban Planning **79**: 84-95.
- Ward, P. C. and W. Mawdsley (2000). Fire management in the boreal forest of Canada. in Fire, climate change and carbon cycling in the boreal forest, , Kasischke, E.S. and B.J. Stocks (eds.) Springer, new York. 66-84.
- Ward, P. C. and A. G. Tithecott (1993). "The impact of fire management on the boreal landscape of Ontario." Aviation, Flood and Fire Management Branch Publication **305**: 12.
- Weber, M. G. and M. D. Flannigan (1997). "Canadian boreal forest ecosystem structure and function in a changing climate: impact on fire regimes." Environ. Rev. **5**(3): 145–166.
- Weber, M. G. and B. J. Stocks (1998). "Forest fires in the boreal forests of Canada." In: Moreno, J.S., Editor, , 1998. Large Forest Fires, Backbuys, Leiden, The Netherlands, : 215–233.

- Wein, R. W. and D. A. Maclean (1983). An overview of fire in northern ecosystems. The Role of Fire in Northern Circumpolar Ecosystems. Wiley, New York, . R. S. In: Wein, Maclean, D.A. (Eds.), : 230 pp.
- Wein, R. W. and J. M. Moore (1979). "Fire history and recent fire rotation periods in the Nova Scotia Acadian Forest." Can. J. For. Res **9**(2): 166-178.
- Weir, J. M. H., E. A. Johnson and K. Miyanishi (2000). "Fire Frequency and the Spatial Age Mosaic of the Mixed-Wood Boreal Forest in Western Canada." Ecological Applications **10**(4): 1162-1177.
- Zackrisson, O. (1977). "Influence of Forest Fires on the North Swedish Boreal Forest." Oikos **29**(1): 22-32.