

# Pyrogéographie

Université   
de Montréal



Laboratoire de  
Paléoécologie

# Comptes rendus du cours Pyrogéographie GEO6139

Université de Montréal  
Numéro 1 Hiver 2017

## *Sommaire :*

### **Réponse écosystémique aux feux dans les écosystèmes de toundra**

*par A. Dessain et R. El Ghoneimi*

Résumé.....	3
Feux: implications globales .....	3
Régime des feux dans les toundras.....	3
Changements édaphiques suite aux feux .....	4
Composition de la végétation et dynamique de repeuplement .....	5
Balance du carbone .....	6
Enjeux de gestion .....	6
Conclusion .....	7
Références.....	7

### **L'Homme au sein de la pyrosphère : de la préhistoire à aujourd'hui**

*par J. Paillard*

Résumé.....	9
Le feu .....	9
Période préhistorique : le feu comme outils.....	9
La relation Homme-Feu durant la période post-industrielle.....	10
Conclusion .....	12
Références.....	13

### **Fire behaviours at different scales: Implication for forest management**

*par M. Perrault-Hébert et Y. Negash*

Abstract .....	16
Introduction .....	16
Fire behaviours.....	16
Fire behaviours at the broad-scale .....	18
Implication for Ecosystem Management .....	20
References.....	21

Édité par O. Blarquez, couverture : flickr Caribb (CC BY-NC-ND 2.0).

Journal étudiant en libre accès distribué sous licence CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

# Réponse écosystémique aux feux dans les écosystèmes de toundra

Aurélie Dessain<sup>1</sup> et Rayan El Ghoneimi<sup>1</sup>

(1) Département de Géographie, Université de Montréal, Montréal

## Résumé

L'augmentation des feux dans les toundra entraîne une série de processus à l'origine de changements écosystémiques majeurs. L'augmentation de la fréquence et de la sévérité des feux affecte la composition floristique, la nature du sol, le pergélisol, la balance du carbone et les dynamiques socio-économiques. Généralement, les plantes vasculaires sont dominantes dans les premiers stades de recolonisation. Les arbustes sont plus abondants dans les premières décennies suite au feu. La combustion de la couche organique libère les sols minéraux et modifie le bilan radiatif se résultant en une fonte accélérée du pergélisol et une variation de la disponibilité des nutriments. La combustion du carbone et l'augmentation de la production primaire modifient le bilan du carbone. Ces impacts ont des conséquences climatiques, écosystémiques, sociales et économiques présentant des défis de gestion.

## Feux: implications globales

Les variations de la composition végétale, des conditions édaphiques et de la séquestration du carbone après feux démontré par de nombreuses études sont aujourd'hui source de préoccupation. Les toundras sont aujourd'hui des écosystèmes rarement affectés par les feux. Toutefois, une augmentation de la fréquence des feux est observée dans les dernières décennies en lien avec les changements climatiques. Les changements écosystémiques en réponse aux feux affectent en retour le régime des feux et le bilan radiatif du milieu (Landhausser et Wein, 1993).

Les écosystèmes nordiques jouent un rôle majeur dans le bilan global du carbone en stockant des quantités importantes, principalement dans les sols organiques et les sols gelés. Les perturbations telles que les feux pourraient avoir un impact majeur sur la capacité de stockage des sols. Les hautes latitudes pourraient alors devenir une source de carbone ayant des répercussions sur le système climatique local et global (Mack et al. 2011, Hu et al. 2015).

La réponse du régime des feux aux changements climatiques est encore aujourd'hui peu documentée. L'étude de la réponse écosystémique des toundras au feu est essentielle pour orienter les mesures de gestion des feux en milieu nordique. En plus d'affecter la dynamique climatique locale et globale, les feux sont susceptibles d'affecter plusieurs activités économiques

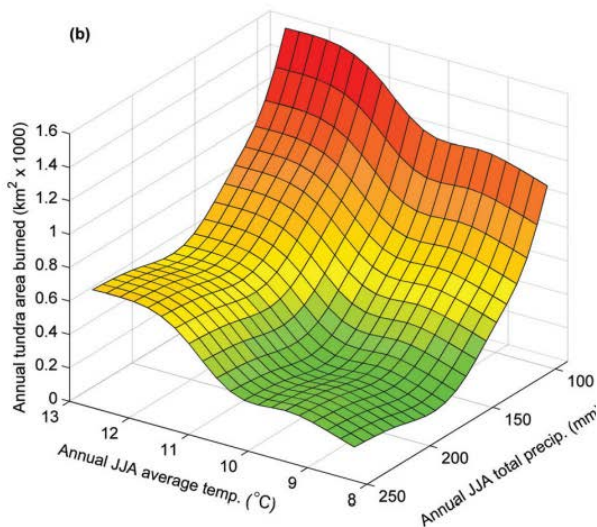
essentielles à la survie des communautés nordiques. Une bonne gestion des feux doit alors considérer les services écosystémiques des feux et leur valeur écologique.

## Régime des feux dans les toundras

Les feux dans la toundra sont peu fréquents, mais ont des impacts significatifs sur la dynamique de la végétation et des sols. L'augmentation de la fréquence et de l'intensité des feux prédites par un climat plus chaud et plus sec pourrait altérer le paysage arctique et subarctique en lien avec les changements climatiques (Landhausser et Wein, 1993). La structure des régions arctique et subarctique est changeante en réponse aux changements climatiques. La transformation d'un écosystème à faible production primaire vers un écosystème dont la biomasse disponible est en augmentation affecte la fréquence et la propagation des feux (Payette, Filion et Delwaide, 2008).

Selon Higuera et al. (2008), le régime des feux dans la toundra arctique est expliqué par l'interaction entre la température, l'humidité et la végétation (figure 1). L'effet combiné de la disponibilité en combustible et de la faible humidité a contrecarré les températures froides dans le passé résultant en une augmentation de la fréquence des feux. La composition végétale des toundras du tardiglaciaire dominé par le bouleau augmentait la flammabilité de l'écosystème. La détérioration du climat durant le

petit-âge glaciaire explique une déforestation des toundras et donc une diminution de l'incidence des feux jusqu'à nos jours. Ces facteurs sont entre autres à l'origine de grandes variations du régime des feux démontrée dans les études paléocéologiques (Higuera et al, 2008; Payette, Filion et Delwaide, 2008, Hu et al. 2015)



**Figure 1:** Relation feu-Climat dans la toundra arctique, Alaska (Hu et al. 2015).

L'augmentation des températures, la variation du couvert nival, la minéralisation des sols, la disponibilité des nutriments et l'augmentation du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère augmentent la production primaire et favorisent l'établissement des arbustes dans la toundra. La recolonisation après perturbation favorise à long terme les peuplements arbustifs mieux adaptés aux nouvelles conditions climatiques et édaphiques (Landhausser et Wein, 1983; Tape, Sturm et Racine, 2006; Goetz, Bunn, Fiske et Houghton, 2005). En concordance avec les études paléocéologiques, l'augmentation des températures et de la densité du couvert arbustif aura un effet direct sur le régime des feux, pouvant s'apparenter à ceux observés dans le passé (Higuera et al, 2008). L'augmentation de la biomasse disponible devient suffisante pour la propagation d'un feu (Landhausser et Wein, 1983). Les feux en augmentation dans les toundras depuis les dernières 50 années ont un impact sur la composition de la végétation, la nature des sols et le pergélisol. Une

augmentation des feux est attendue au cours du 21<sup>e</sup> siècle (Higuera et al. 2008)

### Changements édaphiques suite aux feux

Les feux ont un impact direct sur le sol des toundras où le pergélisol est présent sur une grande partie du territoire. Les variations édaphiques ont un impact sur la balance du carbone, sur la recolonisation, sur la décomposition de la matière organique et donc sur le régime des feux.

Après le passage d'un feu, une augmentation de l'épaisseur de la couche active du pergélisol est généralement observée (De Baets, Quine, Van de Weg et Shaver, 2016). L'isolation du sol est diminuée par la combustion de la couche organique en surface. L'enlèvement de la biomasse isolante libère des couches à bas albédo. Le dévoilement des strates inférieures du sol résulte en une augmentation de l'absorption et de la conduction de la chaleur (De Baets, Quine, Van de Weg et Shaver, 2016 ; Liljedahl, Hinzman, Busey et Yoshikawa, 2007). Les sols peuvent aussi se réchauffer plus tôt augmentant la saison de croissance des végétaux (Ross, Wein et Bliss, 1973).

La fonte du pergélisol contribue à la décomposition du carbone dans les strates inférieures du sol et à son relâchement dans l'atmosphère (Mack et al., 2011). Un pergélisol riche en glace permet une plus grande stabilité due à une augmentation de l'humidité de la couche active diminuant les variations thermiques. Ainsi, la conductivité de la chaleur et l'augmentation de l'humidité dans le sol ont un effet contraire. Les effets du feu sur le sol et le pergélisol varient donc spatialement (Liljedahl, Hinzman, Busey et Yoshikawa, 2007).

Les feux sévères brûlant en profondeur la matière organique du sol provoquent la transformation d'un système dominé par les sols organiques vers une dominance de sol minéral. Cette transformation a un effet direct sur la température du sol et la disponibilité des nutriments augmentant le succès de reproduction des espèces décidues (Landhausser et Wein, 1993 ; Bret-Harte et al, 2013). La fonte du pergélisol affecte l'hydrologie du sol et la disponibilité en nutriment. La disponibilité en nutriment serait aussi expliquée par l'absence de

végétation après feu, donc un faible taux d'assimilation par les plantes. La diminution de la compétition pour les nutriments du sol favorise le rétablissement de la végétation ayant des besoins en nutriments plus importants (Bret-Harte et al, 2013).

Ross, Wein et Bliss (1973) démontrent une augmentation de la concentration en azote, phosphore, potassium et magnésium dans les tissus végétaux après feu. Trois raisons sont décrites. (1) Les nutriments relâchés par les feux sont absorbés efficacement par les plantes. (2) L'augmentation de la couche active du pergélisol permet une plus vaste colonisation des racines et donnant accès à une plus grande réserve de nutriment. (3) Le réchauffement des sols permet une plus grande activité des micro-organismes fixateurs et décomposeurs (Ross, Wein et Bliss, 1973). Ainsi, les feux jouent un rôle important dans la chimie des sols et la disponibilité des nutriments. Cela impacte notamment la recolonisation après feu et la balance du carbone.

### **Composition de la végétation et dynamique de repeuplement**

Suite à un feu, la biomasse atteint des taux de production comparables à ceux avant le feu après quelques années expliqué par l'augmentation de la température du sol et la disponibilité en nutriment. Toutefois, la composition végétale change à court et long terme. Plusieurs stratégies de résistance au feu sont présentes dans la toundra. La sévérité et la profondeur de combustion du feu auront un impact sur la stratégie privilégiée lors de la recolonisation. (Racine, Johnson et Viereck, 1987).

De façon générale, le feu favorise les espèces ayant des mécanismes de reproduction végétative. Les mousses et lichens n'ont pas ces mécanismes et sont peu présents dans les premiers stades de succession. La combustion de la banque de graine dans le sol est l'un des principaux déterminants de la composition végétale après feu. Lorsque le taux de combustion est important, les espèces natives sont désavantagées (Barret, Rocha, Van de Weg et Shaver, 2012).

Les poacées et les cypéracées ont un rétablissement rapide après feu. Leurs mécanismes de reproduction asexuée (rhizomes) leur permettent

d'émerger rapidement après feu. Une augmentation de la floraison et de la production de graine chez certaines espèces est observée dans les premières années suivant le feu (Jandt et Meyers, 2000; Racine, Jandt, Meyers et Dennis, 2004; Racine, Johnson et Viereck, 1987; Ross, Wein et Bliss, 1973). Les espèces herbacées sont plus résistantes que les mousses, lichens et arbustes aux feux. Le passage d'un feu élimine la compétition permettant une dominance des poacées et des cypéracées durant les premières années (Racine, Johnson et Viereck, 1987). Les genres *Epilobium* et *Calamagrotis* sont généralement observés en abondance dans les premiers stades de succession expliquée par leur résistance aux feux et l'augmentation de leur production de graine après feu (Racine, Jandt, Meyers et Dennis, 2004).

Le couvert arbustif est généralement en augmentation dans les décennies suivant le feu. Les variations du sol, du pergélisol de la disponibilité des nutriments et de l'humidité suite au feu combinées aux changements climatiques favorisent l'établissement des arbustes et leur pérennité (Myers-Smith et al., 2001). Racine, Jandt, Meyers, et Dennis (2004) ont observé une augmentation du diamètre, une plus grande abondance et une plus grande diversité d'arbustes 24 ans après un feu en Alaska. Les stratégies de reproduction (sexuée et asexuée) du bouleau nain expliquent sa domination des couverts arbustifs (Ropars et Boudreau, 2012).

Les feux influencent la compétition entre les plantes vasculaires et invasculaires. Les plantes invasculaires telles que les lichens sont plus compétitives sur les sols pauvres, froids et organiques des toundras. Les plantes vasculaires sont plus adaptées aux sols minéraux. La destruction de la couche organique et les variations chimiques du sol par les feux favorisent les plantes vasculaires. De plus, les plantes vasculaires, dont les racines sont plus profondes ont des mécanismes de survie au feu plus développés que les plantes invasculaires. Les mousses et lichens ont un rétablissement beaucoup plus lent après feu (Jandt et Meyers, 2000). Les grands herbivores tels que les caribous affectent aussi le développement des lichens (Ropars et Boudreau, 2012).

L'augmentation des feux dans les toundras pourrait provoquer un changement définitif quant à la composition de la végétation des toundras. Cela implique des changements majeurs pour la faune, pour les communautés locales, sur le bilan radiatif et la balance du carbone (Mack et al., 2011).

### **Balance du carbone**

Les sols des toundras sont d'importants puits de carbone par la conservation du carbone dans les sols organiques et dans le pergélisol sur des périodes de temps prolongées. Les feux augmentent les transferts de carbone du sol vers l'atmosphère et diminuent les capacités de stockage (Mack et al. 2011). En plus de réduire directement les puits de carbone, les feux affectent la structure des écosystèmes et limitent leur capacité de stockage.

Les changements des écosystèmes de toundra auront un impact direct sur la balance du Carbone. La fonte du pergélisol et l'altération des sols organiques ont un impact direct sur la séquestration du carbone. Ces éléments ont aussi un impact majeur sur la production et la décomposition de la biomasse altérant le régime des feux et le cycle du carbone (Hu et al. 2015). Le changement d'une toundra herbacée vers une toundra arbustive influence la biomasse ligneuse sous-terrainne et la création de litière impliquées dans le cycle du carbone. L'augmentation de la biomasse à la surface du sol augmente les risques de feu et leur propagation. L'augmentation du couvert arbustif augmente l'absorption de l'énergie solaire pouvant accentuer le réchauffement régional. Ce réchauffement a un impact direct sur la fonte des neiges, sur la profondeur de la couche active du pergélisol et sur la saison de croissance. Ces conséquences se traduisent par une intensification de la production primaire et une augmentation du CO<sub>2</sub> relâché dans l'atmosphère (Loranty, Goetz et Beck, 2011). L'augmentation de la production primaire modifie le régime des feux. Ainsi, malgré que la croissance des végétaux permette le stockage du carbone, son effet est limité dans le temps par une augmentation des feux (Hu et al., 2015).

Les feux enclenchent une série de processus, dont le relâchement rapide de carbone du sol vers l'atmosphère et le verdissement des toundras. Les

toundras pourraient alors devenir des sources de carbone accentuant les processus de dérèglement climatique (Stich et al, 2007).

### **Enjeux de gestion**

Les régions nordiques ont une grande diversité culturelle par l'interaction des communautés autochtones et non autochtones. L'économie est principalement basée sur les richesses naturelles. La faible biodiversité des régions nordiques rend les communautés vulnérables aux différents changements environnementaux. La gestion des feux en milieu nordique présente plusieurs défis en termes de conservation de la biodiversité, de la protection des ressources et des communautés (Chapinet al., 2004). En Alaska, la régénération après feu est source de revenu par une augmentation des ressources exploitables (champignons, baies, faune). Les politiques de gestion des feux doivent alors jongler avec les services écosystémiques des feux en régions nordiques et la protection des ressources naturelles et des communautés (Chapin et al., 2004).

La modification des écosystèmes en zone arctique et subarctique a un effet direct sur les populations locales. Plusieurs enjeux sont affectés par la modification de la structure des écosystèmes. Parmi ceux-ci, le lent rétablissement des lichens affecte les populations de caribou dans les hautes latitudes (Hu et al, 2015 ; Vors et Boyce, 2009). Le déclin des populations a un impact direct sur les activités socio-économiques des populations nordiques. Plusieurs communautés dépendent de la chasse pour leur survie dans les environnements hostiles (Vors et Boyce, 2009). Bien que les zones arctiques et subarctiques soient peu habitées, les toundras en Alaska accueillent plusieurs communautés en expansion. Les mesures de gestions des feux doivent alors considérer les impacts socio-économiques des feux (Hu et al, 2015)

Les politiques actuelles de l'Alaska adoptent la suppression des feux où ils représentent un risque pour les biens et les personnes. Le vieillissement des populations végétales (en raison de la suppression des feux), le réchauffement climatique, la fonte du pergélisol et l'augmentation de la population vont contribuer à une diminution de l'efficacité des mesures

de contrôle des feux (Chapin et al., 2003). La migration des espèces arbustives dans les toundras présente un risque de propagation des feux de forêt vers les toundras. Les politiques futures devront alors reconsidérer leurs priorités. D'autres méthodes telles que des feux artificiels et le contrôle des combustibles peuvent être considérés avec prudence (DeWilde et Chapin, 2006).

## Conclusion

Le régime de feux dans les hautes latitudes a connu plusieurs fluctuations d'avantages associées au couvert végétal. Les feux tendent à être plus importants depuis les dernières décennies et leur augmentation est envisageable au cours du prochain siècle (Higuera et al., 2008; Payette, Filion et Delwaide, 2008; Hu et al. 2015).

La variation du régime des feux a un impact direct sur le sol. La combustion de l'horizon organique diminue l'isolation du pergélisol et diminue l'albédo de la surface du sol. La profondeur de la couche active du pergélisol augmente généralement dans les années suivant les feux affectant l'humidité du sol et la disponibilité des nutriments (Bret-Harte et al., 2013).

Les changements de la composition de la végétation sont expliqués par les changements de la nature du sol et divers mécanismes de résistance et de recolonisation suite aux feux. Les espèces herbacées sont prédominantes à court terme en raison de leur capacité de reproduction végétative. Les espèces arbustives atteignent souvent des taux égaux ou supérieurs aux taux avant feu favorisés par l'augmentation de la superficie des sols minéraux. Les changements édaphiques et les stratégies de survie et de colonisation défavorisent certaines espèces natives. Les lichens ont généralement un rétablissement plus lent (Racine, Johnson et Viereck 1987; Racine, Jandt, Meyers, et Dennis, 2004).

Ces changements affectent la séquestration du carbone et le bilan radiatif tendant à une augmentation accélérée des températures. On pourrait alors assister à un déclenchement hâtif de la saison de croissance et une augmentation de la production primaire (Mack et al., 2011).

La réponse écosystémique des toundras aux feux pourrait alors apporter d'importants

changements menant à des transformations systémiques rapides. Le changement du régime des feux et la réponse des écosystèmes représente des défis de gestion pour les communautés nordiques dont les activités économiques sont principalement basées sur les ressources naturelles. L'efficacité réelle des politiques de gestion des feux dans les régions nordiques mériterait d'être contestée.

Sachant que les changements climatiques sont plus accentués aux pôles, les changements observés dans les écosystèmes nordiques doivent être surveillés de près. L'étude de leur impact sur la dynamique climatique globale est aujourd'hui très pertinente.

## Références

- Barret, K., Rocha, A.V., Van de Weg, M.J. et Shaver, G. (2012). Vegetation shifts observed in arctic tundra 17 years after fire, *Remote Sensing Letter*, 3, 8,
- Bret-Harte, M.S., Mack, M.C., Shaver, G.R., Huebner, D.C., Johnston, M., Mojica, C.A. et al (2013). The response of Arctic vegetation and soils following an unusually severe tundra fire, *Philosophical transactions of the royal society B*, 368, 20120490.
- Chapin, F.-S., Rupp, T.S., Starfield, A.-M., DeWilde, L., Zavaleta, E., S., Fresco, N. et al. (2003). Planning for resilience: modeling change in human-fire interactions in the Alaskan boreal forest, *Front Ecological Environment*, 1, 5, 225-261.
- Chapin, F.S., Peterson, G., Berkes, F., Callaghan, T.V., Angelstam, p. et Apps, M. (2004). Resilience and vulnerability of northern regions to social and environmental change, *Ambio*, 33, 6, 344-349.
- De Baets, S., Quine, T.A., Van de Weg, M. et Shaver, G.R. (2016). Investigating the controls on soil organic matter decomposition in tussock tundra soil and permafrost after fire, *Soil biology and biochemistry*, 99, 108-116.
- DeWilde, L. et Chapin, F.S. (2006). Human impacts on the fire regime of interior Alaska: Interactions among fuels, Ignition sources and fire suppression, *Ecosystems*, 9, 1342-1353.
- Goetz, S., Bunn, A.G., Fiske, G.J. et Houghton, R.A. (2005). Satellite-observed photosynthetic trends across boreal North America associated with climate and fire disturbance, *PNAS*, 12, 38, 13521-13525.
- Higuere, P., Brubaker, L.B., Anderson, P.M., Brown, T.A., Kennedy, A.T. et Hu, S. F. (2008). Frequent fires in ancient shrub tundra: Implication of paleorecords for arctic *Environmental change*, PLoS ONE, 3, 3, e0001744.
- Jandt, R.R. et Meyers, C.R. (2000). *Recovery of lichens in tussock tundra following fire in northwestern Alaska*, Department of interior, Bureau of land management (BLM-Alaska Open File Report 82). Repéré à <https://pdfs.semanticscholar.org/583b/7d55f289ddb5882c54f3ead1af4d287bc321.pdf>

- Hu, F., Higuera, P.E., Duffy, P., Chipman, M.L., Rocha, A.V., Young, A.M. et al. (2015). Arctic tundra fires: natural variability and responses to climate change, *Front Ecological Environment*, 13, 7, 369-377.
- Landhausser, S. et Wein, R. (1993). Postfire vegetation recovery and tree establishment at the arctic treeline: climate-change-vegetation-response hypotheses, *Journal of Ecology*, 81, 665-672
- Liljedahl, A., Hinzman, L., Busey, R. et Yoshikawa, K., (2007). Physical short-term changes after a tussock tundra fire, Seward Peninsula, Alaska, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 112, F02S07.
- Loranty, M.M., Goetz, S.J. et Beck, P.S.A. (2011). Tundra vegetation effects on pan-Arctic albedo, *Environmental Research Letters*, 6, 024014, 7 p.
- Mack, M.C., Bret-Harte, M.S., Hollingsworth, T.S., Jandt, R.R., Schuur, E.A.G., Shaver, G.R. et Verbyla, D.L. (2011). Carbon loss from an unprecedented Arctic tundra wildfire, *Nature*, 475, 489-492.
- Myers-Smith, I., Forbes, B., Wilking, M., Hallinger, M., Lantz, T., Blok, D., et al. (2011). Shrub expansion in tundra ecosystems: dynamics, impacts and research priorities, *Environmental Research Letters*, 6, 045509, 15p.
- Payette, S., Filion, L. et Delwaide, A. (2008). Spatially explicit fire-climate history of the boreal forested-tundra (Eastern Canada) over the last 2000 years, *Philosophical transactions of royal society*, 363, 2301-2316.
- Racine, C.H., Johnson, L.A. et Viereck, L.A. (1987). Patterns of vegetation recovery after tundra fires in Northwestern Alaska, U.S.A. *Arctic and alpine research*, 19, 4, 461-469.
- Racine, C., Jandt, R., Meyers, C. et Dennis, J. (2004). Tundra fire and vegetation change along a hillslope on the Seward Peninsula, Alaska, U.S.A. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 36, 1, 1-10.
- Ropars, P. et Boudreau, S. (2012). Shrub expansion at the forest-tundra ecotone: spatial heterogeneity linked to local topography, *Environmental Research Letters*, 7, 015501, 9p.
- Ross, W., Wein, R. et Bliss, L.C. (1973). Changes in arctic *Eriophorum* tussock communities following fire, *Ecology*, 54, 4, 845-852.
- Stich, S., McGuire, A.D., Kimball, J., Gedney, N., Gamon, J., Engstrom, R. et al. (2007). Assessing the carbon balance of circumpolar arctic tundra using remote sensing and process modeling, *Ecological applications*, 17, 1, 213-234.
- Tape, K., Sturm, M. et Racine, C. (2006). The evidence for shrub expansion in Northern Alaskan and the Pan-Arctic, *Global Change Biology*, 12, 686-702.
- Vors, L.S. et Boyce, M.S. (2009). Global declines of caribou and reindeer, *Global Change Biology*, 15, 2626-2633.



# L'Homme au sein de la pyrosphère : de la préhistoire à aujourd'hui

Jordan Paillard<sup>1,2</sup>

(1) Chaire en Aménagement Forestier Durable, UQAT (1) Département de Géographie, Université de Montréal, Montréal

## Résumé

Le contrôle du feu est définitivement ce qui distingue l'Homme des autres espèces vivantes. Utilisé d'abord comme moyen de cuisson, le feu est ensuite devenu un outil aux nombreuses utilités pour les communautés de chasseurs-cueilleurs, il aura ensuite permis le développement de l'agriculture durant le néolithique qui sera exacerbé au cours la révolution industrielle. C'est donc tout d'abord en tant qu' « agent d'allumage » que l'Homme a modifié le régime des feux naturels en augmentant sa fréquence. Afin de sécuriser les zones habitées, l'Homme est ensuite devenu un « agent de suppression » des feux, diminuant ainsi la fréquence et la biomasse brûlée, mais augmentant également le risque de feux catastrophiques. Une gestion des feux plus durable imitant le régime « naturel » des feux a alors été mise en place. Cependant, de grandes incertitudes demeurent quant aux politiques de gestions a adopter dans le contexte actuel et futur des changements climatiques.

## Le feu

En 1935, le U.S Forest Service Fire Suppression mettait en place le *10 am rule*, dont le mot d'ordre était d'éteindre tout départ de feu avant 10h00 du matin (Forest History Society, 2015). Depuis l'introduction de cette politique, de nombreuses études ont permis d'établir que le feu est un élément majeur de la dynamique et du maintien de plusieurs écosystèmes (Bond et al., 2005). Ainsi, les politiques de gestion du feu tendent depuis plusieurs décennies vers un retour à un régime de feu naturel, c'est-à-dire, sans l'influence de l'Homme. Or, depuis les premières traces de foyer, il y a près de 1.9 million d'années (Wrangham et al., 1999), l'Homme n'a jamais cessé d'influencer directement et/ou indirectement le régime des feux à travers de nombreuses pratiques telles que la chasse, l'agriculture, le pastoralisme, la guerre, la métallurgie, la déforestation, la fragmentation du paysage et la suppression des feux (Pausas et Keeley, 2009). Le retour à un régime de feu « naturel » semblerait donc compromis. Néanmoins, l'ampleur avec laquelle l'Homme aurait eu un impact sur le régime des feux fait débat. La relation Homme-Feu au cours de l'Histoire a déjà fait l'objet d'études approfondies menées autant par des écologues (Bowman et al., 2011, Pausas et Keeley, 2009) que par

des anthropologues (Gowlett, 2016) et a permis de mettre en évidence une évolution de l'utilisation du feu, de l'impact de l'Homme sur les régimes des feux et ainsi d'établir un cadre théorique. Cet article de synthèse s'impose alors comme une mise à jour de ces précédentes revues de littérature et présentera la relation Homme-Feu durant les périodes préhistorique et post-industrielle.

## Période préhistorique : le feu comme outils

### *Le feu dans les sociétés de chasseurs-cueilleurs*

Bien qu'il soit admis que l'Homme ait largement utilisé le feu depuis sa « découverte » il y a près de 1.9 million d'années (Wrangham et al., 1999), il est cependant difficile d'identifier et de quantifier l'impact de cette utilisation sur le régime des feux de forêt durant la période préhistorique. En effet, les variations du régime de feu dépendent en grande partie des variables climatiques (précipitations et températures) et il est donc généralement impossible de conclure avec certitude que tel changement de régime est dû à l'Homme et non au climat (Pyne, 1995). Néanmoins, lorsque pour une région donnée, les variables climatiques et le régime des feux sont découplés et que des preuves

archéologiques/paléoécologiques mettent en évidence la présence de l'Homme, il est alors possible de supposer que celui-ci ait joué un rôle dans la modification de ce régime (Bowman et al., 2011).

L'une des plus anciennes traces d'un impact intensif de l'Homme sur son environnement et sur le régime de feux daterait de l'arrivée des aborigènes en Australie vers 55.6 ka (Saltré et al., 2016) et de l'utilisation du fire-stick farming. Technique encore pratiquée par certaines tribus aborigènes, le fire-stick farming (Bird et al., 2008, Pausas et Keeley, 2009) est aujourd'hui considéré comme l'une des premières formes de gestion du territoire et du feu. Elle consiste à allumer des feux lorsque les conditions sont peu propices au développement de feu sévère (faible quantité de combustible, durant la nuit ou tôt le matin, peu de vent) et leur aurait notamment permis de défricher des zones, favorisant le développement de petits gibiers et de tubercules comestibles, facilitant le déplacement au travers de la végétation buissonnante et permettant de concentrer le gibier (Bird et al., 2008, Pausas et Keeley, 2009). Selon plusieurs auteurs, la chasse aurait par ailleurs grandement contribué à l'extinction de la mégafaune australienne entre 55 ka et 42 ka (Saltré et al., 2016, Flannery, 1990, Miller et al., 2005, Miller et al., 2016). L'utilisation du fire-stick farming aurait alors permis d'éviter une accumulation de la quantité de combustible et une fermeture de la forêt causée par la disparition des grands herbivores, qui aurait sinon donné lieu à des feux plus grands et plus sévères (Pausas et Keeley, 2009, Lopes Dos Santos et al., 2013). Selon plusieurs études (Kershaw, 1986, Clark, 1983), certaines forêts tropicales de l'Australie auraient connu une transition vers des forêts d'Eucalyptus, puis vers des prairies sous l'influence de l'utilisation du feu par les aborigènes. En outre, bien que le cas de l'Australie soit l'un des plus documentés, il apparaît que la majorité des sociétés de chasseurs-cueilleurs ont eu recours à des techniques semblables au fire-stick farming (Pyne, 1995). Cette première forme d'utilisation du feu aurait donc artificiellement augmenté la fréquence des feux, favorisé la formation d'écosystèmes de prairies formant ainsi une boucle de rétroaction positive.

### *Le feu et l'agriculture*

Le début du néolithique vers 10 000 cal. BP marque le développement de l'agropastoralisme au Proche-Orient et ainsi d'une emprise plus grande de l'Homme sur son environnement. En effet, l'utilisation du feu pour défricher (slash-and-burn) afin de convertir des forêts en terres arables a été largement pratiquée depuis le début de l'holocène jusqu'à nos jours, et ce dans plusieurs régions du monde (Schüpbach et al., 2015, Delcourt et al., 2016, Munoz et Gajewski, 2010, Clark et Royall, 1995, Vannière et Martineau, 2005, Vannière et al., 2016). Selon Fyfe et al. (2015), le pourcentage de couvert forestier en Europe aurait connu une baisse de près de 20% entre 6000 cal. BP et 2000 cal. BP puis de 30% entre 2000 cal. BP et 500 cal. BP. Cette déforestation par le feu aura donc entraîné une augmentation de l'influx de charbon de bois (Molinari et al., 2013, Vannière et al., 2011) et du flux de levoglucosan – composé organique aromatique issu de la combustion de la lignine – entre 4000 et 2500 cal. BP (Zennaro et al., 2015). Cependant, la part de l'Homme dans les changements de régime des feux fait débat. En effet, d'après Marlon et al. (2008, 2013), l'impact de l'Homme sur le régime des feux ne serait observable qu'à partir de la révolution industrielle vers 1750 et la diminution de la biomasse brûlée depuis les 2000 dernières années serait avant tout le résultat d'un refroidissement climatique. Néanmoins, cette baisse de biomasse brûlée pourrait aussi s'expliquer par une diminution du couvert forestier (Fyfe et al., 2015) et/ou par une augmentation de la fragmentation du paysage (Archibald et al., 2012, 2009, Molinari et al., 2013). Avec l'essor de l'agriculture, l'Homme aurait donc d'une part, artificiellement augmenté la fréquence des feux et la quantité de biomasses brûlées lors de la phase de déforestation entre 4000 cal. BP et 2000 cal. BP, et d'autre part, maintenu une fréquence de feux importante en pratiquant le slash-and-burn pour défricher les terres en jachère.

### **La relation Homme-Feu durant la période post-industrielle**

#### *La révolution industrielle*

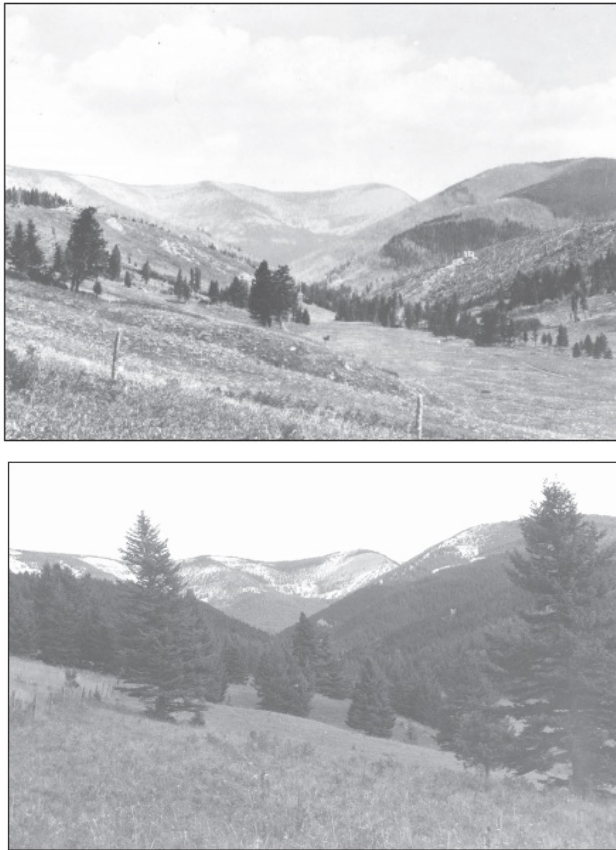
La déforestation et la conversion des terres entreprise depuis l'essor de l'agriculture durant le néolithique connaissent une accélération majeure avec la révolution industrielle (Goldewijk et al., 2016). Selon le modèle History Database of the Global Environment (HYDE 3.2) (Goldewijk et al., 2016), les superficies dédiées à l'agriculture ont doublé en seulement 150 ans, passant de 2.3% des terres en 1700 à 4.5% en 1850. Le pastoralisme connaît également une évolution similaire pour la même période, passant de 5.1% à 9.2%. À l'échelle globale, ces activités, couplées à une forte croissance démographique vont alors entraîner une brusque augmentation de la biomasse brûlée (Marlon et al., 2008, Pechony et Shindell, 2010). Cependant, à une échelle plus fine, un bilan contraire a pu être observé comme c'est le cas pour les écosystèmes de prairies et de savanes. En effet, selon plusieurs études menées en Amérique du Nord (Covington et Moore, 1994, Belsky et Blumenthal, 1997, Madany et West, 1983) et en Afrique du Sud (Archibald et al., 2009), le surpâturage aurait causé une forte réduction de la strate végétale inférieure (herbacées) et une discontinuité du combustible entraînant ainsi une diminution de la taille des feux, de leur fréquence et donc une augmentation du recrutement d'espèces arborées.

### *Le contrôle des feux : de la suppression à une gestion raisonnée*

Malgré une augmentation des températures, une diminution des précipitations, et une conversion soutenue des terres, la fin du 19<sup>ème</sup> siècle est marquée par une tendance à la baisse de la biomasse brûlée (Pechony et Shindell, 2010, Marlon et al. 2008, Bowman et al., 2011). Celle-ci s'explique notamment par une augmentation de la fragmentation du paysage (Pausas et Keeley, 2009, Marlon et al. 2008), une diminution de la densité de végétation (Pechony et Shindell, 2010) et donc de la quantité de combustible, une transition vers une végétation moins inflammable (Marlon et al., 2008) et le début de la mise en place de politique de suppression des feux (Pechony et Shindell, 2010, Marlon et al., 2008). Aux États-Unis, The Great Fire of 1910, marque un tournant majeur

dans la suppression des feux. Au total, cet événement aura causé la perte de 85 vies humaines et brûlé une superficie de 12 000 km<sup>2</sup> (Forest History Society, 2014). En outre, il aura également contribué à renforcer la pensée selon laquelle le feu est un danger devant être supprimé. La suppression des feux a donc été mise en place pour répondre à l'apparition et à l'augmentation de zones urbaines dans des secteurs propices aux feux de forêt ou wildland urban interface (WUI) (Hammer et al., 2007). La suppression des feux, dont le but premier est d'éteindre tous dépôts de feu, a donc entraîné une augmentation de la quantité en combustible, de l'intervalle entre les feux, de la sévérité des feux et de leur taille (Parsons et DeBenedetti, 1979, Pausas et Keeley, 2009). Les efforts entrepris par cette politique ont permis de réduire aux États-Unis les superficies brûlées de 200 000 km<sup>2</sup> à 20 000 km<sup>2</sup> entre 1930 et 1960 (MacCleery, 2011). Cependant, l'accumulation de la quantité de combustible (voir figure 1) a permis le développement de grands feux de forêt de fortes intensités, comme celui qui toucha le parc de Yellowstone en 1988, brûlant une superficie de 3 213 km<sup>2</sup> (Barker, 2007). Le développement des connaissances sur les feux de forêt ainsi que des événements catastrophiques tel que celui de Yellowstone a amené une remise en question des pratiques de suppression des feux. Considérée à présent comme une perturbation essentielle au maintien des écosystèmes, la suppression totale des feux n'est pratiquée que lorsque des vies humaines ou des infrastructures clés sont menacées (Pyne, 1995). De nouvelles techniques ont alors vu le jour afin de maintenir et de restaurer la biodiversité des écosystèmes forestiers, tout en protégeant les intérêts publics. L'une des plus pratiquées consiste à imiter le régime naturel des feux en provoquant des incendies à un intervalle donné, estimé généralement par dendrochronologie. Cette technique de contrôle du feu, aussi connue sous le nom de *prescribed fire*, est le plus souvent pratiquée lorsque les conditions sont peu propices à des feux sévères soit vers la fin de l'hiver, au début du printemps ou durant l'automne (Knapp et al, 2009) et pourrait s'apparenter à l'utilisation du fire-stick farming des aborigènes d'Australie ou des Premières Nations Amérindiennes. Dans leur revue de littérature, Knapp et al. (2009) soulignent néanmoins

que cette technique ne tient pas toujours compte de la saisonnalité des feux de chaque écosystème. Les feux déclenchés sont alors de moindre intensité et affectent notamment les espèces à cônes sérotineux qui nécessitent des feux de fortes intensités et des températures élevées pour libérer les graines contenues dans les cônes.



**Figure 1** : Résultat de 71 ans (1909 en haut, 1980 en bas) de suppression des feux. Forêt National Lewis and Clark. (Keane et al., 2002).

### *Les feux et les changements climatiques*

Autre conséquence de la révolution industrielle, les émissions croissantes de gaz à effets de serre, liés aux activités anthropiques, ont entraîné des changements climatiques globaux. Selon la région observée, ces derniers ont provoqué, provoquent et provoqueront des modifications du régime de précipitation et des températures moyennes se reflétant par une baisse ou une hausse de l'activité des feux (Krawchuk et al.,

2009, Moritz et al., 2012, Yang et al., 2014). À l'échelle globale, les changements climatiques auraient causé entre 1979 et 2013, une augmentation de 18.7% de la longueur de la saison des feux, de 108.1% des surfaces affectées par des longues saisons de feux ( $>1\sigma$  au-dessus de la moyenne historique) et une augmentation de 53.4% de la fréquence des longues saisons de feux (Jolly et al., 2015). À l'horizon 2100, les modèles indiquent une augmentation de la probabilité des feux de 62% pour les hautes et moyennes latitudes et une diminution de 20% pour les tropiques (Moritz et al., 2012). À l'échelle régionale, dans l'ouest des États-Unis, les superficies brûlées ont doublé entre 1984 et 2015 (Abatzoglou et Williams, 2016). À l'horizon 2046, cette augmentation pourrait atteindre 169% selon le modèle développé par Yue et al. (2013). Pour la région boréale, les surfaces brûlées ont également connu une augmentation durant les dernières décennies malgré des outils et des techniques plus efficaces de suppression des feux (Soja et al., 2007). Flannigan et al. (2009) estime que les surfaces brûlées doubleraient d'ici 2100 avec une augmentation de près de 50% de la fréquence des feux. Cette augmentation de l'activité des feux à l'échelle globale, et plus particulièrement dans la région boréale, viendrait à son tour renforcer les changements climatiques en cours par l'émission de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub> (Oris et al., 2014, Liu et al., 2014, Soja et al., 2007, Flannigan et al., 2009).

### **Conclusion**

Depuis sa « découverte », il y a près de 1.9 million d'années (Wrangham et al., 1999), le feu est alors apparu comme un catalyseur du développement de l'humanité et de l'impact de l'Homme sur son environnement. Utilisé d'abord comme moyen de cuisson, le feu est ensuite devenu un outil aux nombreuses utilités pour les communautés de chasseurs-cueilleurs, et aura ensuite permis le développement rapide de l'agriculture durant le néolithique qui sera exacerbé au cours la révolution industrielle. Au cours de l'Histoire, l'Homme s'est donc rapidement imposé comme un « agent d'allumage » des feux, entraînant une hausse de leur fréquence et favorisant une végétation plus tolérante

à des feux fréquents. Ainsi, la pensée selon laquelle le continent américain et l'Australie étaient des terres immaculées avant l'arrivée des premiers colons tient plus du romanesque que de la réalité. La révolution industrielle marque un tournant majeur dans la relation Homme-Feu. Au début du XX<sup>ème</sup> siècle, de l'agent d'allumage, l'Homme est ensuite devenu un agent de suppression des feux pour sécuriser des zones habitées (WUI) dans des régions propices aux feux de forêt. Les surfaces brûlées ont donc considérablement diminué durant le XX<sup>ème</sup> siècle causant des modifications importantes sur la végétation régionale. Pour répondre aux déséquilibres causés par ces politiques, la gestion du feu tend depuis plusieurs décennies vers un retour à un régime de feu naturel s'apparentant à la pratique du fire-stick farming utilisé depuis des millénaires par les Aborigènes et les Premières nations Amérindiennes. En parallèle de ces différents impacts directs locaux et régionaux, l'Homme et ses émissions de gaz à effets de serre tendent à modifier le climat à l'échelle globale et donc indirectement, le régime des feux. Bien que certaines régions devraient connaître une baisse du régime des feux, la situation globale tend vers une augmentation de la longueur de la saison des feux, de la fréquence des événements de sécheresses et des surfaces brûlées. Cette étude aura permis de mettre en lumière que l'Homme fait partie intégrante du régime naturel des feux depuis des millénaires, mais que son impact à l'échelle globale entraîne des conséquences non durables particulièrement depuis la révolution industrielle. Ce domaine de recherche, qui se situe à la rencontre entre l'anthropologie, l'écologie, la paléoécologie, la géographie, l'archéologie et la démographie bénéficierait grandement d'un effort de recherche multidisciplinaire commun afin de mieux anticiper et gérer les risques liés aux feux dans un contexte d'accroissement démographique et de changements climatiques.

## Références

- Abatzoglou, J. T., & Williams, A. P. (2016). Impact of anthropogenic climate change on wildfire across western US forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(42), 11770–11775. <https://doi.org/10.1073/pnas.1607171113>
- Amatulli, G., Camia, A., & San-Miguel-Ayanz, J. (2013). Estimating future burned areas under changing climate in the EU-Mediterranean countries. *Science of the Total Environment*, 450–451, 209–222. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.02.014>
- Archibald, S., Roy, D. P., van Wilgen, B. W., & Scholes, R. J. (2009). What limits fire? An examination of drivers of burnt area in Southern Africa. *Global Change Biology*, 15(3), 613–630. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01754.x>
- Archibald, S., Staver, a. C., & Levin, S. a. (2012). Evolution of human-driven fire regimes in Africa. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(27), 847–852. <https://doi.org/10.1073/pnas.1118648109>
- Barker, R. (2010). Scorched earth. *Archaeology*. <https://doi.org/10.1126/science.320.5880.1139b>
- Belsky, a. J., & Blumenthal, D. M. (1997). Effects of Livestock Grazing on Stand Dynamics and Soils in Upland Forests of the Interior West. *Efectos del Pastoreo sobre la Dinamica de Arboles y Suelos en Bosques en el Altiplano del Occidente Interior*. *Conservation Biology*, 11(2), 315–327. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1997.95405.x>
- Bliege Bird, R., Bird, D. W., Coddling, B. F., Parker, C. H., & Jones, J. H. (2008). The “fire stick farming” hypothesis: Australian Aboriginal foraging strategies, biodiversity, and anthropogenic fire mosaics. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(39), 14796–14801. <https://doi.org/10.1073/pnas.0804757105>
- Bond, W. J., Woodward, F. . I., & Midgley, G. F. (2005). The Global Distribtuion of Ecosystems in a world without Fire. *New Phytologist*, 165(2), 525–538. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01252.x>
- Bowman, D. M. J. S., Balch, J., Artaxo, P., Bond, W. J., Cochrane, M. A., D'Antonio, C. M., ... Swetnam, T. W. (2011). The human dimension of fire regimes on Earth. *Journal of Biogeography*, 38(12), 2223–2236. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2011.02595.x>
- Clark, J. S., & Royall, P. D. (1995). Transformation of a northern hardwood forest by aboriginal (Iroquois) fire: charcoal evidence from Crawford Lake, Ontario, Canada. *The Holocene*, 5(1), 1–9. <https://doi.org/10.1177/095968369500500101>
- Covington, W. W., & Moore, M. M. (1994). Postsettlement changes in natural fire regimes and forest structure: ecological restoration of old-growth ponderosa pine forests. *Journal of Sustainable Forestry*, 2(1–2), 153–181.
- Delcourt, P. A., Delcourt, H. R., Ison, C. R., Sharp, W. E., Gremillion, J., Delcourt, P. A., ... Gremillion, K. J. (2016). Society for American Archaeology Prehistoric Human Use of Fire , the Eastern Agricultural Complex , and Appalachian Oak-Chestnut Forests : Paleoecology of Cliff Palace Pond , Kentucky Published by : Society for American Archaeology Stable URL : <http://ww>, (May).

- Flannery, T. F. (1990). Pleistocene faunal loss: implications of the aftershock for Australia's past and future. *Archaeology in Oceania*, 25(2), 45–55. <https://doi.org/10.1002/j.1834-4453.1990.tb00232.x>
- Flannigan, M., Stocks, B., Turetsky, M., & Wotton, M. (2009). Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest. *Global Change Biology*, 15(3), 549–560. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01660.x>
- Fyfe, R. M., Woodbridge, J., & Roberts, N. (2015). From forest to farmland: Pollen-inferred land cover change across Europe using the pseudobiomization approach. *Global Change Biology*, 21(3), 1197–1212. <https://doi.org/10.1111/gcb.12776>
- Hammer, R. B., Radeloff, V. C., Fried, J. S., & Stewart, S. I. (2007). Wildlandurban interface housing growth during the 1990s in California, Oregon, and Washington. *International Journal of Wildland Fire*, 16(3), 255–265. <https://doi.org/10.1071/WF05077>
- J. A. J. Gowlett. (2016). The discovery of fire by humans\_ a long...pdf. Retrieved from <http://rstb.royalsocietypublishing.org/content/371/1696/20150164>
- Jolly, W. M., Cochrane, M. a, Freeborn, P. H., Holden, Z. a, Brown, T. J., Williamson, G. J., & Bowman, D. M. J. S. (2015). Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. *Nature Communications*, 6(May), 7537. <https://doi.org/10.1038/ncomms8537>
- Keane, R. E., Ryan, K. C., Veblen, T. T., Allen, C. D., Logan, J., & Hawkes, B. (2002). Cascading effects of fire exclusion in Rocky Mountain ecosystems: a literature review. USDA Forest Service, Rocky Mt. Res. Stn. Gen. Tech. Rep. GTR-91, (May).
- Kershaw, A. P. (1986). Climatic change and Aboriginal burning in north-east Australia during the last two glacial/interglacial cycles. *Nature*, 322(6074), 47–49. <https://doi.org/10.1038/322047a0>
- Klein Goldewijk, K., Beusen, A., Doelman, J., & Stehfest, E. (2016). New anthropogenic land use estimates for the Holocene; HYDE 3.2. *Earth System Science Data Discussions*, (December), 1–40. <https://doi.org/10.5194/essd-2016-58>
- Knapp, E. E., Estes, B. L., & Skinner, C. N. (2009). Ecological effects of prescribed fire season: A literature review and synthesis for managers. General Technical Report No. PSW-GTR-224, (September), 1–80. Retrieved from <http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=BaOl-7PVLQIC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Ecological+Effects+of+Prescribed+Fire+Season+:+A+Literature+Review+and+Synthesis+for+Managers&ots=FwhMmK7uWz&sig=MuiDnNiOCDRsZMjy7stqPXIY29A>
- Krawchuk, M. A., Moritz, M. A., Parisien, M. A., Van Dorn, J., & Hayhoe, K. (2009). Global pyrogeography: The current and future distribution of wildfire. *PLoS ONE*, 4(4). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0005102>
- Liu, Y., Goodrick, S., & Heilman, W. (2014). Wildland fire emissions, carbon, and climate: Wildfire-climate interactions. *Forest Ecology and Management*, 317, 80–96. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.02.020>
- Lopes dos Santos, R. a., De Deckker, P., Hopmans, E. C., Magee, J. W., Mets, A., Sinninghe Damsté, J. S., & Schouten, S. (2013). Abrupt vegetation change after the Late Quaternary megafaunal extinction in southeastern Australia. *Nature Geoscience*, 6(8), 627–631. <https://doi.org/10.1038/ngeo1856>
- MacCleery, D. W. (1992). *American Forests: A History of Resiliency and Recovery*. Forest History Society Issues.
- Madany, M. H., & West, N. E. (1983). Livestock Grazing-Fire Regime Interactions within Montane Forests of Zion National Park, Utah. *Ecology*, 64(4), 661–667. <https://doi.org/10.2307/1937186>
- Marlon, J. R., Bartlein, P. J., Carcaillet, C., Gavin, D. G., Harrison, S. P., Higuera, P. E., ... Prentice, I. C. (2008). Climate and human influences on global biomass burning over the past two millennia. *Nature Geoscience*, 1(October 2008), 697–702. <https://doi.org/10.1038/ngeo468>
- Marlon, J. R., Bartlein, P. J., Daniau, A. L., Harrison, S. P., Maezumi, S. Y., Power, M. J., ... Vannière, B. (2013). Global biomass burning: A synthesis and review of Holocene paleofire records and their controls. *Quaternary Science Reviews*, 65, 5–25. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.11.029>
- Miller, G., Magee, J., Smith, M., Spooner, N., Baynes, A., Lehman, S., ... DeVogel, S. (2016). Human predation contributed to the extinction of the Australian megafaunal bird *Genyornis newtoni* ~47 ka. *Nature Communications*, 7, 10496. <https://doi.org/10.1038/ncomms10496>
- Molinari, C., Lehsten, V., Bradshaw, R. H. W., Power, M. J., Harmand, P., Arneht, A., ... Sykes, M. T. (2013). Exploring potential drivers of European biomass burning over the Holocene: A data-model analysis. *Global Ecology and Biogeography*, 22(12), 1248–1260. <https://doi.org/10.1111/geb.12090>
- Moritz, M. a., Parisien, M.-A., Batllori, E., Krawchuk, M. a., Van Dorn, J., Ganz, D. J., & Hayhoe, K. (2012). Climate change and disruptions to global fire activity. *Ecosphere*, 3(6), art49. <https://doi.org/10.1890/ES11-00345.1>
- Munoz, S. E., Gajewski, K., & Peros, M. C. (2010). Synchronous environmental and cultural change in the prehistory of the northeastern United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(51), 22008–13. <https://doi.org/10.1073/pnas.1005764107>
- Oris, F., Asselin, H., Ali, A. A., Finsinger, W., & Bergeron, Y. (2014). Effect of increased fire activity on global warming in the boreal forest. *Environmental Reviews*, 22(3), 206–219. <https://doi.org/10.1139/er-2013-0062>
- Parsons, D. J., & DeBenedetti, S. H. (1979). Impact of fire suppression on a mixed conifer forest. *Forest Ecology and Management*, 2, 21–33.
- Pausas, J. G., & Keeley, J. E. (2009). A burning story: The role of fire in the history of life. *BioScience*, 59(7), 593–601. <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.7.10>

- Pechony, O., & Shindell, D. T. (2010). Driving forces of global wildfires over the past millennium and the forthcoming century. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(45), 19167–70. <https://doi.org/10.1073/pnas.1003669107>
- Pyne, S. J. (1995). *World fire: the culture of fire on earth*.
- Saltré, F., Rodríguez-Rey, M., Brook, B. W., Johnson, C. N., Turney, C. S. M., Alroy, J., ... Bradshaw, C. J. A. (2016). Climate change not to blame for late Quaternary megafauna extinctions in Australia. *Nature Communications*, 7, 10511. <https://doi.org/10.1038/ncomms10511>
- Schüpbach, S., Kirchgeorg, T., Colombaroli, D., Beffa, G., Radaelli, M., Kehrwald, N. M., & Barbante, C. (2015). Combining charcoal sediment and molecular markers to infer a Holocene fire history in the Maya Lowlands of Petz'n, Guatemala. *Quaternary Science Reviews*, 115, 123–131. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.03.004>
- Society, F. H. (2014). The 1910 Fires. Retrieved from <http://www.foresthistory.org/ASPNET/Policy/Fire/FamousFires/1910Fires.aspx>
- Society, F. H. (2015). U.S. Forest Service Fire Suppression. Retrieved from <http://www.foresthistory.org/ASPNET/Policy/Fire/Suppression/Suppression.aspx>
- Soja, A. J., Tchebakova, N. M., French, N. H. F., Flannigan, M. D., Shugart, H. H., Stocks, B. J., ... Stackhouse, P. W. (2007). Climate-induced boreal forest change: Predictions versus current observations. *Global and Planetary Change*, 56(3–4), 274–296. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.028>
- Vannière, B., & Martineau, R. (2005). Histoire des feux et pratiques agraires du Néolithique à l'âge du Fer en région Centre: implications territoriales, démographiques et environnementales. *Gallia Préhistoire*, 47(1), 167–186. <https://doi.org/10.3406/galip.2005.2049>
- Vannière, B., Blarquez, O., Rius, D., Doyen, E., Brücher, T., Colombaroli, D., ... Olofsson, J. (2015). 7000-year human legacy of elevation-dependent European fire regimes. *Quaternary Science Reviews*, 132, 206–212. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.11.012>
- Vannière, B., Power, M. J., Roberts, N., Tinner, W., Carrión, J., Magny, M., ... Vescovi, E. (2011). Circum-Mediterranean fire activity and climate changes during the mid-Holocene environmental transition (8500-2500 cal. BP). *The Holocene*, 21(1), 53–73. <https://doi.org/10.1177/0959683610384164>
- Wrangham, R. W., Jones, J. H., Laden, G., Pilbeam, D., Conklin-brittain, N. N., Pilbeam, D., ... Tappen, M. (1999). The Raw and the Stolen. *Current Anthropology*, 40(5), 567–577. <https://doi.org/10.1086/300083>
- Yang, J., Tian, H., Tao, B., Ren, W., Kush, J., Liu, Y., & Wang, Y. (2014). *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2000, 1–15. <https://doi.org/10.1002/2013JG002532>.Received

# Fire behaviours at different scales: Implication for forest management

Maude Perrault-Hébert <sup>1</sup> & Yonathan Negash <sup>1</sup>

(1) Département de Géographie, Université de Montréal, Montréal

## Abstract

Afin d'établir une nouvelle approche d'aménagement forestier basé sur le régime de perturbation naturel, il est préalablement nécessaire de définir la variabilité naturelle de la fréquence, la forme, la taille et le type de feu. L'objectif de ce travail est de faire une brève revue de littérature sur les différents facteurs naturel et anthropique qui influencent le comportement des feux à différente échelle et de discuter de l'importance de ces notions pour la mise en place d'un cadre de référence en aménagement forestier. Trop souvent la complexité de la forme et de la taille des feux est négligée lors de la délimitation des coupes forestières. Finalement, l'influence des premières nations sur les régimes de feux devrait être davantage étudiée afin d'établir la période seuil adéquate où les activités de l'homme ont modifié le régime de feu en Amérique du Nord.

## Introduction

Naturally induced forest fires are as old as the forests themselves. They have, and still do, play important roles in determining a plant's biome distribution, as some species adapt and spread, while others fail to adapt and become extinct after the disturbance (Pausas et al. 2016). In fact, wildfire is an integral part of the cycle of regeneration of numerous ecosystems and many species of vegetable and animal depend on it (Keith et al. 2002; Nappi et al. 2015; Pausas et al. 2016). For this reason, during the last two decades, the forest management industry has tried to understand better fire dynamics and their impact on vegetation and fauna with the goal of establishing forestry practices inspired by natural disturbance regime (Landres et al. 1999; Gauthier et al. 2008). This new approach in forest management has as objective the maintenance of biodiversity and services provided by ecosystems. However, to set up this approach, it will be necessary to establish beforehand the natural reference state as well as to understand the factors that influence the fire behaviours (Landres et al. 1999; Swetnam et al. 1999; Moritz et al. 2011). The objective of this work is to make a brief literature review on natural and anthropic factors that influence fire behaviour at

different scales. Finally, we discussed the implication of this knowledge to define a good natural reference state in the context of ecosystem management.

## Fire behaviours

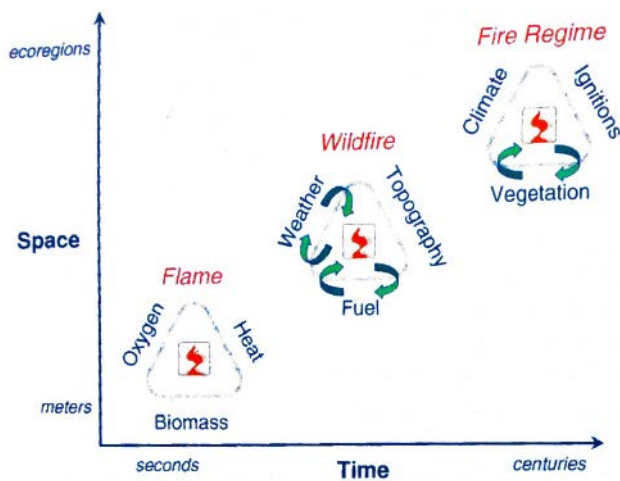
Depending on the scale of studies, fire can be characterized by the rate of its spread, its type, its extent, its intensity, its frequency and its severity as to name widely applied attributes among others (Ryan 2002; Falk et al. 2007). These characteristics depend on fire behaviours at different scales. Within contexts of smaller space and time scales, fire is a chemical reaction which stems from interactions between, oxygen, fuel, and ignition sources (Moritz et al. 2011). In the absence of one of these elements, fire cannot start.

This concept can be modelled by a Fire Triangle where each side of the triangle is necessary to maintain the flame (Fig. 1). At the scale of wildfire, the elementary fire requirements are governed by three groups of variables such as fuel, weather, and landforms (Johnson 1996; Moritz et al. 2011). Finally, within a broad scale of time and space, the fire behaviour (better known as the fire regime at this scale) is influenced by 1) vegetation, 2) Natural and Anthropic ignitions and 3) regional climate change.



### Fire Behaviours at the Scale of a Wildfire

At the scale of wildfire, three groups of variables influence fire behaviours such as 1) type and structure of fuel, 2) weather, which influences the ignition probability and supply oxygen carried by wind 3) and landforms, which influences heat transfer (Johnson 1996; Moritz et al. 2011). These variables determine fire dynamics, which is to say if the fire will stay on the ground or it will climb towards the tree crowns (surface fire, ground fire vs. crown fire). These variables are also responsible for the rate of fire spread (active, passive or independent crown fire) and the size of fire (Scott and Reinhardt 2001).



**Figure 1:** “Controls on fire at different scales of space and time. This framework adds a fire regime triangle (upper right) to the traditional triangles used to characterize combustion (lower left) and the fire environment (middle). Mechanisms most relevant to landscape resilience would tend to be operating at and between the scales of wildfire and a fire regime. Arrows represent feedback between fire and the forces controlling fire at different scale” (taken from Moritz et al. (2011))

### Fuel

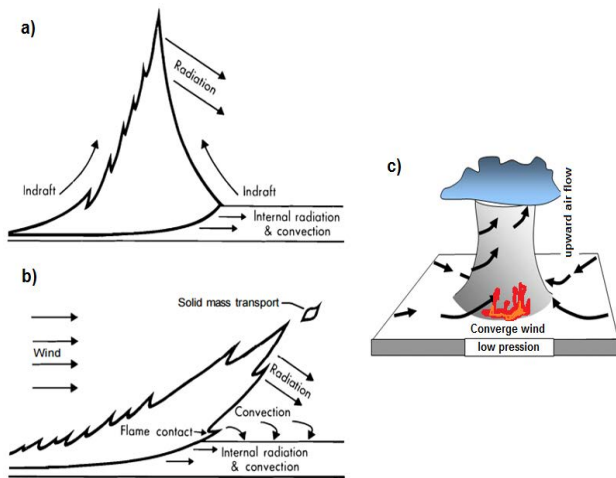
The flammability of fuel can be defined by their capacity to ignite and sustain a flame. It’s usually quantified by the following three components: ignitability, sustainability and combustibility

(Anderson 1970; Gill and Zylstra 2005; Pausas et al. 2016). Vegetation flammability change from one species of plant to another, and from one forest to another. At a plant scale, the flammability depends on the chemical composition of the plant and the structure of its organs (Pausas et al. 2016). At the scale of landscapes, the flammability depends mostly on the stand type and stand structure. In either case, higher fuel capacity with significant contact of sufficient oxygen volume (surface to volume ratio), induces intense fire and sustains the flame (Rothermel 1972). The stand structure is also a key factor which determines if the fire stay on ground or climb to the crown (Turner and Romme 1994; Scott and Reinhardt 2001). For example, a ground fire that starts in a stand where there is a high canopy bulk density and low canopy base height is more susceptible to develop into a crown fire, which will eventually hasten the spread to other trees. On the contrary, open stands characterized by the self-pruning plant species restrict the fire to surface by promoting the fire to burn quickly as a fast-flammable strategy (Pausas et al. 2016).

### Weather

Weather also plays an important role that determines fire behaviour at scale of a wildfire. Firstly, lightning that arises during thunderstorms are the earliest natural causes of ignition of a wildfire (Gedalof 2011). Secondly, wildfire arises more frequently in hot and dry biome (Gedalof 2011). For example, many North American forest case studies demonstrate that fire starts typically when percentage of humidity is lower than the temperature in Celsius degrees (Anonym, 2014). Moreover, the weather, more specifically the wind, plays also an important role in the fire spread rate (Rothermel 1972) (fig. 2). More particularly, the wind feed the fire with oxygen, and modify the nature of the flames as to increase heat transfer (Radiation and convection) to neighbouring vegetation. This causes a positive feedback loop as heat generated by the fire creates a local depression which allows the surrounding air to gust towards the fire to resupply it with oxygen at an exponential rate. In extreme cases, this phenomenon can generate fire whirls. The

convection column can transport solid masses of burning fuel over hundreds of meters, sometime several kilometres, to ignite an independent fire (Martin and Hillen 2016). The phenomenon is called spotting. A study carried out in Australia has shown that mean distance of spotting varies between 5 and 12 km and it can reach up to 25 km in extreme cases (Ellis 2011). In conclusion, the wind is probably the most important factor which controls fire behaviours, and especially the most unpredictable factor.

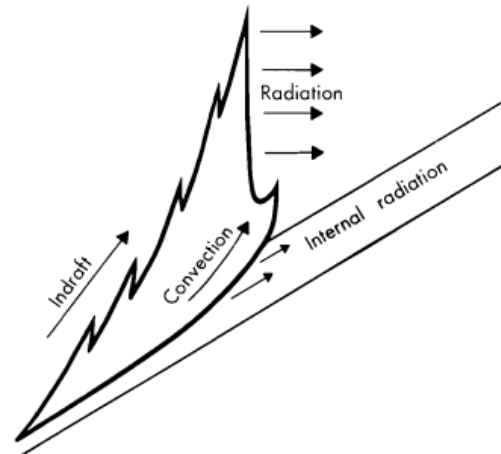


**Figure 2:** Schematic of a) no-wind and b) wind-driven fire (taken from Rothermel 1972) and c). Schematic of feedback loop between fire and wind.

**Landform**

The landform is the unique group of variables which doesn't change significantly in time except in rare exception (ex.: landslide, earthquake or volcano). The two principal topographic variables that affect fire behaviour are the slope and the natural fuel breaks such as a waterbody or a cliff. In the absence of wind, the slope has an effect of increasing fire spread upward the slope (Rothermel 1972).

The shape of the front flame on a slope favours the transfer of heat in plants at the top of the slope, which promotes the drying of the plants and their ignition. In presence of an upslope wind, this effect can be amplified. But on the other hand, the presence of downslope wind on a steep slope can cancel the slope effect (Ryan 2002).



**Figure 3:** Schematic of upslope fire (taken from Rothermel 1972)

**Fire behaviours at the broad-scale**

At a broad scale of time and space, the fire regime is typically characterized by the frequency, the intensity, and the size of fire (Falk et al. 2007). At this scale, the variables that influence fire regimes are 1) vegetation, 2) natural and anthropic ignitions, and 3) regional climate changes. It is widely recognized that the climate is the most important driver that modifies historic fire regimes. However, it's very important to consider as well the implications have made on historic fire regimes.

We will begin this section by treating to distant geologic periods, the End of the Devonian/Beginning of Carboniferous and end this section with more recent Quaternary period. From these two geological periods stand point, we aim to draw some similarities as well as contrasts in an effort to better understand a natural reference state.

*Fire Regimes Towards the End of the Devonian and the Carboniferous period*

In earlier geological periods, natural forest fires ignitions are known to only have been triggered by lightning or volcanoes (Pyne 1996). Fossil charcoals from previous periods, show that regions with low vegetation cover tend to have frequent fires, but a weaker severity (Pyne et al. 1996). Marine shales discovered recently contain charcoal that confirm frequent fire disturbances at the end of the Devonian

period (Rimmer et al. 2015). The fossils from the period known as the ‘charcoal gap’ show that frequent fires were indeed the norm in North East America (Rimmer et al. 2015). They show much of the plants that burned during this period were either herbaceous or shrubs, suggesting that the behaviour of the fires were on the surface. With the discovery of these charcoals, we now know the Devonian period was the ‘incubating’ period, through frequent fire regimes, for many plant species. In following geologic period, the Carboniferous/Mississippian, the large trees that dominated the land provide testaments to the selective evolutionary role played by fire. During the Carboniferous period, fire still played more evolutionary role due to the high volume of oxygen generated by the plants. Towards the end of this period, the level of oxygen is estimated to have reached 35% (Wildman et al., 2004), which would have been sufficient to ignite humid fuel (see table below, taken from Wildman et al., 2004). The outcomes were much higher tree growths and more varied plant species.

### *Fire Regimes in Pre-Industrial Revolution*

Fire regimes were affected by Native American population long before the arrival of European settlers, but estimates vary when this practice started (Hessburg 2003). Dendrochronological fire records from studies carried out in the Interior Columbia River Basin, show intentional fires as having been practiced much earlier (Agee 1993). There are also later accounts written by European explorers who noted Native American fire regimes, however many of these accounts cannot be deemed scientific observations (Moulton 1983). The overall academic consensus however is that Native American did indeed modify the region’s fire regimes. The fire behaviour can be characterized as low-severity and high-frequency (Sauer 1971; White 1991; Dobyns 1981; Pyne 1982; Robbins 1994; Robbins 1997). The purpose of this fire was to clear land for small scale subsistence farming, food gathering and access to hunting, including travel (Pyne 1982). Introduction of Spanish horses into the region later in the 15th century, ushered a period of wide area burning to

supply forage for the newly acquired herds (Hessburg 2003). The regions that were subjected to frequent fire had drier environments dominated by herbaceous plants in lower altitudes (Whitney 1994; Vale 2002). These types of fuel are conducive for raging surface fire that would reduce the fuel load, but they are unlikely to damage the soil. Regrowth of conifers in these regions after they became federal lands, confirm the past Native American fire practices (Vale 2002).

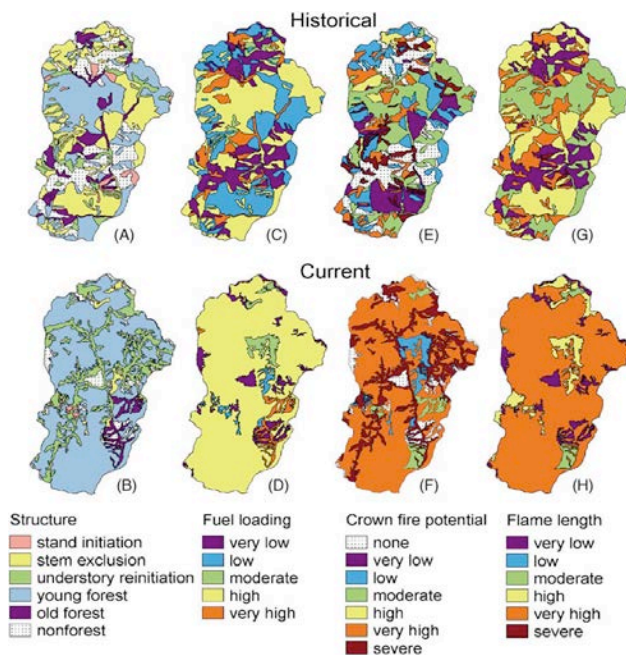
At the start of the 19th century migrants inspired by utopian agrarian society begun to arrive into Interior Columbia Basin. The sedentary agriculture, as practiced by the settlers, required little to no fire regime unlike its previous occupants who were predominantly hunter-gather (White 1991; Robbins 1997). It can then be inferred that the overall fuel capacity, at least northwestern prairies, have remained unchanged after the arrival of the new settlers.

### *‘Capitalist Fire Regimes’*

Forest fire regimes begun to change rapidly with the advent of large scale economic activity in the Inlands (White 1991). Disturbance to the forest ecology started earlier with the arrivals of fur trappers and small groups of gold prospectors. But it reached its zenith when industries improved their overall efficiency with great help from energy tapped from the Carboniferous era that became the main fuel for the steam engines (Robbins, 1997). With the introduction of railroads, remote natural forests with a balanced ecosystem, became to be seen as sources of wealth. Commercial ranching interests, miners and loggers saw the untapped primary products as waiting to be redistributed to far-flung markets for profits. Old-growth timbers were the first to be logged to the mills where the steam machines were better configured to process larger tree trunks to maximize profit. The discovery of gold in the mountains also triggered the stripping of mountain tops with hydraulics which then had the effect of changing the region’s hydrosphere (White et al. 1999).

Within a context of broad temporal change, the cumulative outcome of the late anthropogenic interventions is the fragmentation of the Interior

Northwestern ecosystem, where high amount fuel loads started to accumulate in spatially isolated regions (Fig. 4). In absence of a countervailing ecological opinion, the US Federal government also instituted the ‘National Forest Service’ (NFS) in the early 20th century which was responsible of suppressing forest fires from public lands (van Wagtenonk 2007). The government could not have helped redress the ecological imbalance building up since the NFS legislation did ignore the role of forest fire in ecosystems (van Wagtenonk 2007).



**Figure 4:** “Maps of the Peavine Creek drainage, a dry forest sub-watershed of Lower Grand Ronde sub-basin in Blue Mountains province displaying historical and current structural classes (A and B), fuel loading (C and D), crown fire potential under wildfire conditions (E and F), and flame length under wildfire conditions (G and H)”. (taken from Hessburg et al. 2003)

The general consensus of the legislators of the day was ‘forest fire must be stopped at all cost’. In the northwestern territories, the consequences of ecological imbalances caused by industrialists’ interventions, were successive and severe wildfires. The Tillamook Burns were one of the major series of fires that occurred between 1933 and 1951 with severe implications to the environment, such as badly damaged soils (Wells 1999).

To sum up, we can pose the question as what truly sets apart natural fires from anthropogenic fires. Both the late Devonian and current Quaternary periods experienced changing fire regimes. But their difference lies principally in the resulting structure of the plant ecosystem. Otherwise said, when the Devonian fires lead to super plant growth and more varied species, the late Holocene fires lead to fragmented environments. Hence, the importance of fire regimes for maintaining environmental coherence cannot be left ignored.

### Implication for Ecosystem Management

The ecosystem management base on natural disturbance is increasingly considered like a better alternative to maintain biodiversity and ecosystem service (Landres et al. 1999; Gauthier et al. 2008; Dragotescu and Kneeshaw 2012). However, this approach is very difficult to implement because the fire behaviour at different scales of time and space is very complex phenomena and impact of this behaviour varies greatly from one ecosystem to another. At the scale of wildfire, to mush time, the frequent large scale fires justify the use of clear-cut harvesting in the boreal zone (Bergeron et al. 2006). However, in fact, the shape, the size, and the intensity was more complex and depends on several factors often unpredictable. For example, at the scale of wildfire, several studies have demonstrated the importance, for the fauna and the flora, of residual islands and biological leg within the burned areas (McRae et al. 2001; Heikkala et al. 2014; Nappi et al. 2015). In future, the great challenge for the forestry industry will be to find a good proportion between even- and uneven-aged management to maintain the historical age-class structure (Bergeron et al. 2006). At the scale of the landscape, this approach also requires the establishment of a reference state. That is, the annual natural variability of areas affected by fires which determine the proportion of land that can be harvested each year without affecting the historical age-class structure (Bergeron et al. 2006; Bergeron et al. 2010). However, although widely established in some region of the world the influence of the native’s people on the historical fire regimes in North America are still poorly understood. Neglecting the importance

of the impact of the native's peoples in the fire regime could have serious consequences. This would have the effect of overvaluing the variability of historical fire frequency and therefore overvaluing the harvestable areas without affecting the historical age-class structure.

## References

- Agee, J.K., 1993. Fire ecology of Pacific Northwest Forests. Island Press, Washington, DC.
- Anderson, H. (1970). Forest fuel ignitibility. *Fire technology* 6(4): 312-319.
- Anonyme, Cours avancé en comportement des incendies de forêt : Manuel du participant (2014), Société de protection des forêts contre le feu, Québec, Canada
- Bergeron, Y., D. Cyr, C. R. Drever, M. Flannigan, S. Gauthier, D. Kneeshaw, È. Lauzon, A. Leduc, H. L. Goff, D. Lesieur and K. Logan (2006). Past, current, and future fire frequencies in Quebec's commercial forests: implications for the cumulative effects of harvesting and fire on ageclass structure and natural disturbance-based management. *Canadian Journal of Forest Research* 36: 2737-2744.
- Bergeron, Y., D. Cyr, M. P. Girardin and C. Carcaillet (2010). Will climate change drive 21st century burn rates in Canadian boreal forest outside of its natural variability: collating global climate model experiments with sedimentary charcoal dat. *International Journal of Wildland Fire* 19: 1127-1139.
- Boyd, R., (1986). Strategies of Indian burning in the Willamette Valley. *Can. J. Anthropol.* 5 (1), 65-86
- Dobyns, H., (1981). From fire to flood: historic human destruction of Sonoran Desert riverine oases. Ballena Press, Socorro, NM, pp. 15-19
- Dragotescu, I. and D. D. Kneeshaw (2012). A comparison of residual forest following fires and harvesting in boreal forests in Quebec, Canada. *Silva Fenn* 46(3): 365-376.
- Ellis, P. F. (2011). The aerodynamic and combustion characteristics of eucalypt bark: a firebrand study.
- Falk, D. A., C. Miller, D. McKenzie and A. E. Black (2007). Cross-scale analysis of fire regimes. *Ecosystems* 10(5): 809-823.
- Gauthier, S., M.-A. Vaillancourt, D. Kneeshaw, P. Drapeau, L. De Grandpré, Y. Claveau and D. Paré (2008). Aménagement forestier écosystémique : Origines et fondements. Aménagement écosystémique en forêt boréale. S. Gauthier, M.-A. Vaillancourt, A. Leduc et al., Presse de l'Université du Québec: 41-60.
- Gedalof, Z. e. (2011). Climate and spatial patterns of wildfire in North America. *The landscape ecology of fire*, Springer: 89-115.
- Gill, A. M. and P. Zylstra (2005). Flammability of Australian forests. *Australian Forestry* 68(2): 87-93.
- Gromtsev, A. (2002). Natural disturbance dynamics in the boreal forests of European Russia: a review. *Silva Fennica* 36(1): 41-55.
- Johnson, E. A. (1996). Fire and vegetation dynamics: studies from the North American boreal forest, Cambridge University Press.
- Heikkala, O., M. Suominen, K. Junninen, A. Hämäläinen and J. Kouki (2014). Effects of retention level and fire on retention tree dynamics in boreal forests. *Forest Ecology and Management* 328: 193-201.
- Hessburg, P and Agee, J (2003). An environmental narrative of Inland Northwest United States forests, 1800-2000
- Keith, D. A., W. L. McCaw and R. J. Whelan (2002). Fire regimes in Australian heathlands and their effects on plants and animals. *Flammable Australia: the fire regimes and biodiversity of a continent*. Cambridge University Press, Cambridge: 199-237.
- Landres, P. B., P. Morgan and F. J. Swanson (1999). Overview of the use of natural variability concepts in managing ecological systems. *Ecological Applications* 9(4): 1179-1188.
- McRae, D., L. Duchesne, B. Freedman, T. Lynham and S. Woodley (2001). Comparisons between wildfire and forest harvesting and their implications in forest management. *Environmental Reviews* 9(4): 223-260.
- Moritz, M. A., P. F. Hessburg and N. A. Povak (2011). Native fire regimes and landscape resilience. *The Landscape Ecology of Fire*, Springer: 51-86.
- Moulton, G.E. (Ed.), (1983-1993). *The Journals of the Lewis and Clark Expedition*, 8 vols. University of Nebraska Press, Lincoln
- Nappi, A., P. Drapeau and A. Leduc (2015). How important is dead wood for woodpeckers foraging in eastern North American boreal forests? *Forest Ecology and Management* 346: 10-21.
- Pausas, J. G., J. E. Keeley and D. W. Schilck (2016). Flammability as an ecological and evolutionary driver. *Journal of Ecology*.
- Pyne, S. J., Andrews, P. L., and Laven, R. D.: *Introduction to wildland fire*, 2 edition, Wiley, New York, 769 pp., 1996
- Pyne, S.J., (1982). *Fire in America: A Cultural History of Wildland and Rural Fire*. University Of Washington Press, Seattle, WA, 680 pp.
- Rimmer, S., Hawkins, Scott, A., Cressler W, (2015). Fossil charcoal in Late Devonian marine shales: An indicator of expanding terrestrial ecosystems, fire, and atmospheric change
- Rothermel, R. C. (1972). A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels.
- Robbins, W.G., (1997). *Landscapes of Promise: The Oregon Story: 1800-1940*. University of Washington Press, Seattle, WA, 392 pp.
- Ryan, K. C. (2002). Dynamic interactions between forest structure and fire behavior in boreal ecosystems. *Silva Fennica* 36(1): 13-39.
- Sauer, C.O., (1971). *Sixteenth Century North America: The Land and the People As Seen by the Europeans*. University of California Press, Berkeley, CA, 19 pp.
- Scott, J. H. and E. D. Reinhardt (2001). Assessing crown fire potential by linking models of surface and crown fire behavior.

- Swetnam, T. W., C. D. Allen and J. L. Betancourt (1999). Applied historical ecology: using the past to manage for the future. *Ecological Applications* 9(4): 1189-1206.
- Turner, M. G. and W. H. Romme (1994). Landscape dynamics in crown fire ecosystems. *Landscape Ecology* 9(1): 59-77.
- Vale, T.R. (Ed.), 2002. *Fire, Native Peoples, and the Natural Landscape*. Island Press, Washington, DC, 238 pp
- van Wagtenonk, J. (2007). The History and Evolution of Wildland Fire Use. *Fire Ecology Special Issue*, Vol. 3, No.2, 2007
- Wells G. (1999). The Tillamook: A created Forest Comes of Age. *Environmental History* Vol. No. 3
- White, R., 1999. Indian land use and environmental change. In: Boyd, R. (Ed.), *Indians, Fire, and the Land in the Pacific Northwest*. Oregon State University Press, Corvallis, OR, pp. 36-49.
- Whitney, G.G., 1994. *From Coastal Wilderness to Fruited Plain: A History of Environmental Change in Temperate North America from 1500 to the Present*. Cambridge University Press, New York, NY, 451 pp
- Wildman, R., Hickey, L, Dickinson, M, Berner, R, Robinson, J., Dietrich, M., Essenhigh, R., and Wildman, C. (2004). *Geological Society of America*, Vol. 32, No. 5, pp.457-460