



BULLETIN DE LA GESTION FORESTIÈRE

Centre de foresterie du Nord

N° 63

PROBABILITÉ D'ALLUMAGE DE FEUX COUVANTS DANS CERTAINS TYPES D'HUMUS DE LA FORÊT BORÉALE

AVANT-PROPOS

C'est en 1992, au moment où le Alaska Fire Service procédait à une évaluation pratique de la Méthode canadienne d'évaluation des dangers d'incendie de forêt (MCEDIF), qu'on a lancé l'idée d'une collaboration des chercheurs américains et canadiens pour l'étude des feux couvants dans la forêt boréale. Les chercheurs du Service canadien des forêts venaient de recueillir au Yukon de nouvelles données sur la teneur en humidité de l'humus qui pouvaient compléter utilement les résultats des travaux menés en Alaska par le U.S. Forest Service sur la probabilité d'allumage de feux couvants. Cette collaboration a abouti à la mise au point du modèle faisant l'objet du présent article et qui peut servir à la lutte contre les incendies dans les vastes étendues de forêts de l'Alaska et du nord du Canada. Il s'agit d'un exemple de la collaboration non officielle, mais néanmoins efficace, des chercheurs et des gestionnaires des États et des Territoires et, ultimement, de nos deux pays pour la protection de la portion nord-américaine de la grande forêt boréale.

INTRODUCTION

Le feu est une menace constante pour les ressources de la forêt boréale ainsi que pour les vies

humaines et la propriété au Canada et en Alaska. On connaît cependant de mieux en mieux le rôle naturel des incendies dans ces écosystèmes, et on utilise de plus en plus les brûlages dirigés pour en maintenir la diversité biologique. La prévision des risques de persistance de feux couvants est importante pour les gestionnaires forestiers qui l'utilisent pour déterminer la fréquence des feux couvants causés par la foudre et par l'homme. Ces feux mettent à rude épreuve les services de lutte contre les incendies; ils peuvent donner lieu à des incendies multiples lorsque les conditions météorologiques deviennent propices. Par ailleurs, lorsque les gestionnaires utilisent les brûlages dirigés, la prévision des feux couvants peut servir à déterminer les effets possibles de cette méthode de gestion et à évaluer les efforts qu'il faudra déployer pour circonscrire ces feux et les éteindre.

Le présent article vise à combiner les résultats de deux études distinctes afin d'élaborer des modèles simples et pratiques de prévision des feux couvants à l'intention des responsables de la lutte contre les incendies de forêt en Alaska et dans le nord-ouest du Canada. La première de ces études, réalisée par Frandsen (1997), a permis d'élaborer des équations de la probabilité d'allumage de feux couvants pour divers types d'humus dans les forêts d'Alaska. Frandsen (1997) a déterminé que cette



Ressources naturelles
Canada

Service canadien
des forêts

Natural Resources
Canada

Canadian Forest
Service

Canada

probabilité dépendait de la teneur en humidité de l'humus, de sa teneur en matière inorganique et de la densité apparente de la matière organique.

Pour adapter les équations de la probabilité d'allumage aux méthodes pratiques de lutte contre les incendies de forêt, il convient de convertir la teneur en humidité du combustible en une variable que l'on pourra mesurer facilement chaque jour à divers d'endroits. Les responsables de la lutte contre les incendies sont incapables, pour des raisons pratiques, de mesurer directement la teneur en humidité de l'humus des forêts sur de grandes superficies et pour de longues périodes. Potts et al. (1986) ont observé que même en réalisant une stratification fondée sur la position topographique, qu'un brûlage dirigé de 14 ha exigerait la collecte de 16 échantillons d'humus pour adéquatement mesurer la teneur en humidité.

L'indice de l'humus (IH) et l'indice de sécheresse (IS), deux paramètres de l'indice forêt-météo (IFM) du Canada, permettent de convertir les observations quotidiennes des conditions météorologiques en valeurs de la teneur en humidité de l'humus (Van Wagner 1987). Toutefois, il peut s'avérer plus approprié, dans le cas qui nous intéresse, d'utiliser des rapports liés au site ou à la région écologique pour la conversion des valeurs de l'IH et de l'IS en teneurs en humidité, au lieu de recourir aux équations standard de l'IFM. Dans une étude distincte, Lawson et Dalrymple (1996a) et Lawson et al. (1997) ont élaboré des équations qui mettent en rapport la teneur en humidité de l'humus de la forêt boréale à des profondeurs données et les valeurs de l'IH et de l'IS, en s'appuyant sur une série d'échantillons prélevés sur le terrain près de Whitehorse, au Yukon.

Nous présentons ci-après les équations et les graphiques décrivant la probabilité d'allumage de feux couvants dans un humus composé de divers types de mousses (*Hylocomium splendens* et *Pleurozium schreberi*), de sphaignes (*Sphagnum* spp.), de cladonies des rennes (*Cladina* spp.) ou d'aiguilles d'épinette blanche (*Picea glauca* [Moench] Voss), en fonction des valeurs quotidiennes de l'IH ou de l'IS. Nous décrivons ensuite les applications pratiques des modèles de probabilité d'allumage.

DÉRIVATION DES ÉQUATIONS D'ALLUMAGE DE FEUX COUVANTS

Sites d'étude

On a prélevé des échantillons d'humus composés de mousses, de sphaignes, de cladonies et d'aiguilles d'épinette blanche près du National Wildlife Refuge (NWR) de Tetlin, à 16 km à l'est de Tok, en Alaska (63°18' de latitude nord, 142°40' de longitude ouest), dans un peuplement d'épinettes noires à faible densité (*Picea mariana* [Mill.] BSP) (figure 1). Les échantillons d'humus composés d'aiguilles d'épinette blanche ont été recueillis sous la cime d'une épinette blanche située dans la même région, mais en terrain légèrement plus élevé.

Méthodes expérimentales et résultats

On a recueilli pour chaque type de combustible de 23 à 29 échantillons mesurant chacun 10 × 10 × 5 cm. Les valeurs moyennes du volume d'un seul échantillon sont fondées sur l'ensemble des volumes calculés à partir de deux mesures de chacune des dimensions. Les teneurs en matière inorganique ont été obtenues par incinération en laboratoire de sous-échantillons tirés de chacun des échantillons. On a également fait varier en laboratoire la teneur en humidité des échantillons sur une gamme de valeurs dont l'étendue était fixée de manière à déterminer le seuil d'allumage du feu couvant.

Pour réaliser les tests d'allumage, on a placé les échantillons d'humus dans une boîte spécialement conçue pour amorcer la combustion du côté mesurant 5 × 10 cm. Une couche de mousse de tourbe sèche, placée de ce côté, a été allumée par chauffage à l'aide d'une résistance électrique. Celle-ci servait d'amorce pour l'allumage de l'échantillon d'humus, reproduisant ainsi les conditions typiques de transfert latéral d'un feu couvant qu'on observe dans le milieu naturel.

L'allumage d'un feu couvant soutenu était jugé comme réussi; lorsqu'on obtenait la combustion complète de l'échantillon, c'est-à-dire lorsque la chaleur dégagée était suffisante pour vaincre la résistance opposée par l'humidité et la teneur en matière inorganique de l'échantillon.

On a utilisé la régression logistique pour analyser les résultats des tests d'allumage pour

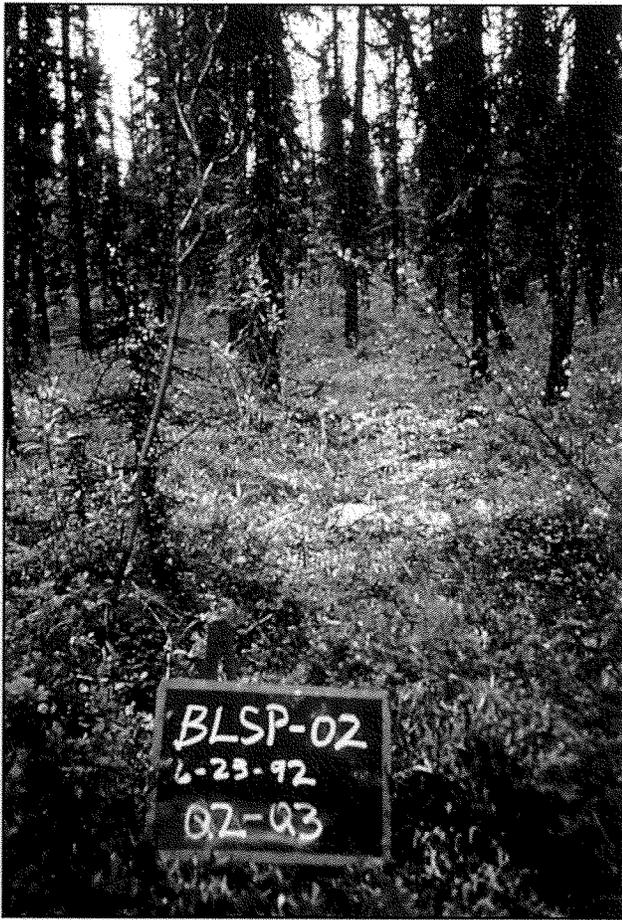


Figure 1. Peuplement d'épinettes noires et types d'humus, National Wildlife Refuge de Tetlin (Alaska). Ce site situé à Chisana a fait l'objet de brûlage dirigés les 17 et 18 juillet 1993. Des échantillons d'humus, nécessaire pour l'étude d'allumage de feux couvants réalisée en laboratoire, ont été prélevés dans un site semblable situé à moins de 500 m de ce lieu. Photographie utilisée avec l'aimable autorisation de L. Vanderlinden, U.S. Fish and Wildlife Service.

chaque type d'humus en fonction de l'humidité, de la teneur en matière inorganique et de la densité apparente.

Équation de probabilité d'allumage, Ig-1 :

$$P = 1 / (1 + \exp[-(B_0 + B_1 \times H + B_2 \times I + B_3 \times Rho)])$$

où :

P = probabilité d'allumage

exp = exponentielle

H = teneur en humidité (en pourcentage du poids sec absolu)

I = teneur en matière inorganique (en pourcentage du poids sec absolu)

Rho = densité apparente de la matière organique (kg/m^3)

$B_{0, 1, 2, 3}$ = constantes déterminées par régression logistique

On peut exprimer la probabilité d'allumage en fonction de l'humidité uniquement (figure 2) en utilisant les valeurs moyennes de la teneur en matière inorganique et de la densité apparente de la matière organique (tableau 1) pour chaque type d'humus. Nous énumérons au tableau 2 les valeurs des paramètres B_0 , B_1 , B_2 , et B_3 de l'équation de probabilité d'allumage, de la précision de l'ajustement (R^2) et du succès de la prévision (pourcentage de fiabilité) obtenues pour chaque type d'humus. Les effets de la teneur en matière inorganique et de la densité apparente de la matière organique sont pris en considération en utilisant les valeurs moyennes de ces paramètres dans les équations finales puisque leurs effets améliorent la qualité statistique de ces équations, comparativement à celles où la teneur en humidité est seul pris en considération. Il importe toutefois de noter que les valeurs des paramètres I et Rho des échantillons utilisés pour les tests d'allumage étaient celles mesurées sur le terrain, et que seul la teneur en humidité a été modifiée en laboratoire pour obtenir une gamme de valeurs (tableau 1). La teneur en humidité correspondant à la probabilité de 50 % peut être assimilée à la teneur en limite humidité pour l'allumage de chaque type d'humus.

Frandsen (1997) a proposé une seule équation pour les mousses puisque les séries de données représentant les couches supérieure et inférieure ont donné des courbes de probabilité presque identiques pour des valeurs similaires de la teneur en matière inorganique et de la densité apparente. Toutefois, pour les besoins de la présente étude, nous lui avons demandé de nous fournir des équations distinctes pour les deux couches puisque l'utilisation des deux indices d'humidité différents du système IFM permet d'obtenir une meilleure prédiction de la teneur en humidité de ces couches.

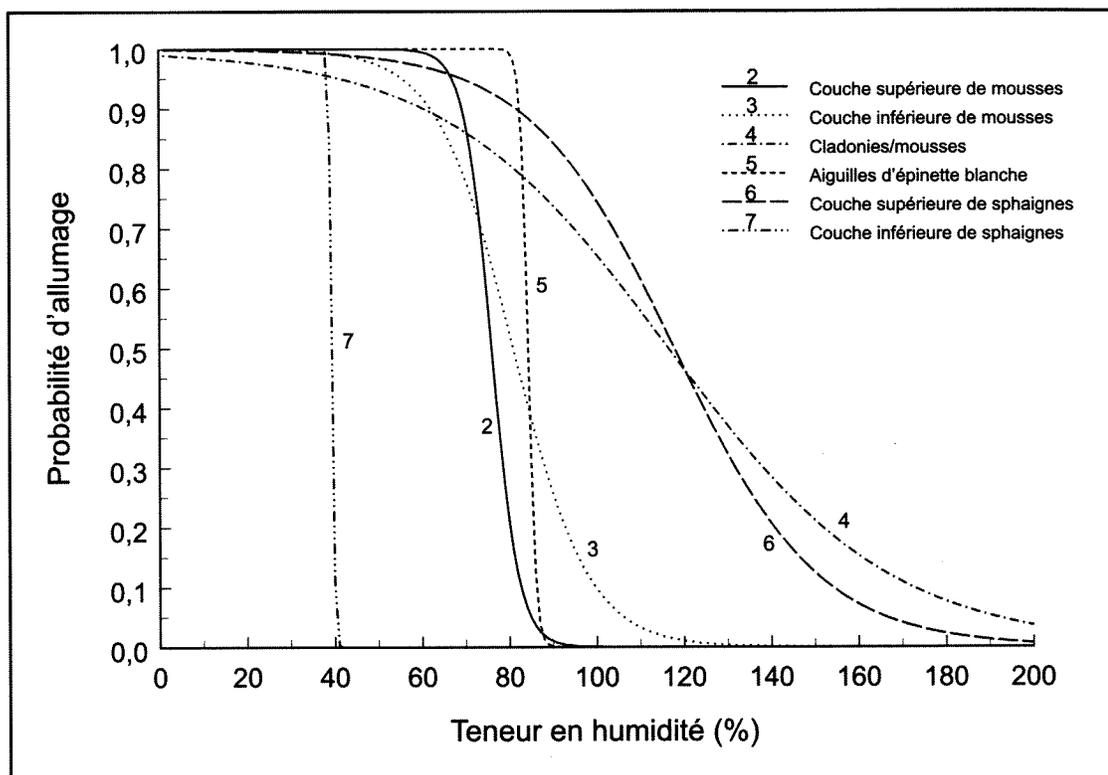


Figure 2. Probabilité d'allumage d'un feu couvant en fonction de la teneur en humidité pour divers types d'humus forestiers.

Tableau 1. Teneur moyenne en matière inorganique (I), densité apparente moyenne de la matière organique, étendue des valeurs de la teneur en humidité et profondeur du test pour chaque type d'humus

Type d'humus	Teneur moyenne en matière inorganique (I, %)	Densité apparente moyenne de la matière organique (Rho, kg/m ³)	Profondeur (cm)	Étendue de la teneur en humidité (%)
Couche supérieure de mousses	17,2	46,4	0-5	0-191
Couche inférieure de mousses	19,1	38,9	5-25	0-141
Cladonies/mousses	26,1	56,3	0-5	22-204
Aiguilles d'épinette blanche	35,9	122,0	0-5	34-125
Couche supérieure de sphaignes	12,4	21,8	0-5	50-437
Couche inférieure de sphaignes	56,5	119,0	5-25	15-80

Tableau 2. Valeurs des paramètres et de la précision de l'ajustement de l'équation de probabilité d'allumage pour chaque type d'humus

Type d'humus	B ₀	B ₁	B ₂	B ₃	R ² du modèle	Succès de prédiction (%)
Couche supérieure de mousses	13,9873	-0,3296	0,4904	0,0568	0,58	96
Couche inférieure de mousses	13,2628	-0,1167	0,3308	-0,2604	0,50	96
Cladonies/mousses	8,0359	-0,0393	-0,0591	-0,0340	0,28	75
Aiguilles d'épinette blanche	332,5604	-1,2220	-2,1024	-1,2619	0,62	100
Couche supérieure de sphaignes	-8,8306	-0,0608	0,8095	0,2735	0,51	89
Couche inférieure de sphaignes	327,3347	-3,7655	-8,7849	2,6684	0,62	100

MÉTHODES PRATIQUES DE MESURE OU DE PRÉDICTION DES VARIABLES D'ALLUMAGE DU FEU COUVANT

Teneur en humidité de l'humus

Il existe déjà un ensemble de directives et de méthodes pour l'échantillonnage destructeur de l'humus aux fins de la détermination de la teneur en humidité (Lawson et Dalrymple 1996a; Norum et Miller 1984). Ces méthodes demandent du temps, une certaine dose d'habileté et de connaissances ainsi que des équipements spéciaux (balance de laboratoire, étuve, boîtes d'échantillons). Elles conviennent pour l'étalonnage initial, mais ne sont pas pratiques pour les activités quotidiennes de lutte contre les incendies. Il convient donc d'élaborer une méthode de recharge indirecte.

Prédiction à partir des indices de la teneur en humidité du combustible

On peut établir une relation entre deux des indices d'humidité du combustible de l'IFM canadien—l'IH et l'IS—et la teneur en humidité de l'humus à des profondeurs déterminées. L'IH représente la couche F, ou couche de fermentation de la forêt boréale canadienne, dont la profondeur moyenne est de 7 cm et dont le poids à sec est de 5 kg/m² (Van Wagner 1987). L'équation standard utilisée au Canada pour définir le rapport qui existe entre l'IH et la teneur en humidité de l'humus est l'équation MC-1. L'IS représente la teneur en humidité des couches F et H (humus) beaucoup plus

profondes et beaucoup plus denses (profondeur moyenne de 18 cm et poids de 25 kg/m²) (Van Wagner 1987). On calcule la teneur en humidité correspondant à l'IS en utilisant l'équation MC-5, mais la teneur en humidité à saturation, fixé à 800 %, correspond à un réservoir d'humidité défini de 200 mm plutôt qu'à la teneur en humidité réels d'une parterre forestier bien drainé. Des études d'étalonnage particulières comme celles de Lawson et Dalrymple (1996a) et de Lawson et al. (1997) ont toutefois donné des équations utiles pour la conversion des valeurs de l'IH et de l'IS en teneur en humidité de l'humus :

Équation MC-1 :

IH standard canadien :

$$H = \exp[(IH - 244,7) / -43,4] + 20$$

Équation MC-2 :

Sphaignes, mousses et humus non différencié (2-4 cm) :

$$H = \exp[(IH - 157,3) / -24,6] + 20$$

Équation MC-3 :

Cladonies (2-4 cm) :

$$H = \exp[(IH - 106,7) / -14,9] + 20$$

Équation MC-4 :

Aiguilles d'épinette blanche (2-4 cm) :

$$H = \exp[(IH - 149,6) / -20,9]$$

Équation MC-5 :

IS standard canadien :

$$H = 800 / \exp(IS / 400)$$

Équation MC-6 :

Aiguilles d'épinette blanche (6-10 cm) :

$$H = 488,4 / \exp(IS / 267,9)$$

Les profondeurs indiquées dans ces équations désignent la portion de la couche d'humus dont la teneur en humidité a servi à déterminer le rapport avec l'IH ou l'IS; elles ne représentent pas la moyenne de la profondeur totale échantillonnée, mais plutôt les profondeurs auxquelles on peut obtenir la meilleure corrélation entre la teneur en humidité et l'IH ou l'IS.

Il importe de noter que l'équation MC-6 est recommandée pour la prévision de la teneur en humidité des couches organiques profondes des sites mésiques bien drainés de la forêt boréale à partir des valeurs de l'IS. L'équation standard canadienne (MC-5) donne une bonne corrélation avec les teneurs en humidité mesurés sur les sites mal drainés peuplés d'épinettes noires en Alaska, où il existe une couche sous-jacente de pergélisol. Les données compilées par Vanderlinden¹ laissent conclure à l'existence d'une forte corrélation entre la teneur en humidité à une profondeur de 15–18 cm, dans un peuplement d'épinettes noires mal drainé de la NWR de Tetlin, et le rapport exprimé par l'équation standard canadienne pour l'IS (équation MC-5), peut-être à cause de la présence d'une couche de glace sous-jacente qui limite le drainage du terrain.

Densité apparente et teneur en matière inorganique de l'humus

La densité apparente de la matière organique (Rho) et la teneur en matière inorganique (I) de l'humus forestier jouent un rôle important dans le processus d'allumage, mais il n'est pas nécessaire de les mesurer sur le terrain pour utiliser les équations de la probabilité d'allumage utilisées dans le présent article puisque ces équations correspondent aux valeurs moyennes de ces paramètres mesurées lors de l'étude effectuée en Alaska. Toutefois, on peut déterminer des valeurs de la densité apparente de la matière organique d'un type donné d'humus aux fins de comparaison avec les valeurs présentées dans le présent article en utilisant la méthode proposée par Lawson et Dalrymple (1996a). Le calcul de la teneur en matière inorganique nécessite un four à moufle pouvant brûler à haute température un échantillon d'humus pour

le réduire en cendre. Rares sont les gestionnaires forestiers qui peuvent recourir à une telle méthode.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les graphiques de la figure 3 illustrent les modèles de la probabilité d'allumage d'un feu couvant pour quatre types d'humus de la forêt boréale, mesurée à partir de l'IH ou de l'IS. On les obtient en convertissant l'IH et l'IS en valeurs de la teneur en humidité, à l'aide des équations MC-1 à MC-6, et en calculant la probabilité attachée à l'IH et à l'IS grâce à l'équation Ig-1. La probabilité d'allumage d'un feu couvant dans la couche supérieure de mousses s'obtient à l'aide de l'équation MC-2 avec l'IH (figure 3A), tandis que celle correspondant à la couche inférieure s'obtient à l'aide de l'équation MC-6 avec l'IS (figure 3B). La probabilité d'allumage d'un feu couvant dans un humus constitué de cladonies et de mousses s'obtient à l'aide de l'équation MC-3 avec l'IH, et celle correspondant à la couche supérieure de sphaignes s'obtient à l'aide de l'équation MC-2 avec l'IH également (figure 3A). La probabilité d'allumage d'un feu couvant dans l'humus d'aiguilles d'épinette blanche s'obtient à l'aide de l'équation MC-4 avec l'IH, et celle correspondant à la couche inférieure de sphaignes s'obtient à l'aide de l'équation MC-6 avec l'IS.

La probabilité d'allumage d'un feu couvant dans l'humus d'aiguilles d'épinette blanche (0–5 cm) et la couche inférieure de sphaignes (10–25 cm) n'est pas présentée sous forme graphique à la figure 3 puisque l'étendue complète des valeurs de cette probabilité correspond à une gamme très étroite de valeurs de la teneur en humidité (figure 2). Il est plus pratique de considérer ces valeurs comme étant simplement au-dessus ou en dessous des conditions requises pour l'allumage d'un feu couvant, tel qu'indiqué au tableau 3. Les teneur en humidité et les valeurs de l'IH et de l'IS correspondant à la probabilité d'allumage au seuil de $P = 0,5$ sont compilées au tableau 3 pour les six types d'humus.

La couche inférieure de sphaignes présente un seuil de la teneur en humidité pour l'allumage qui diminue à mesure que la teneur en matière inorganique augmente; elle se comporte de ce point de vue comme la mousse de tourbe et lui ressemble plus

¹ L. Vanderlinden, Coordonnateur régional de la lutte contre les incendies, U.S. Department of Interior, Fish and Wildlife Service, Anchorage (Alaska), communication personnelle, juin 1996.

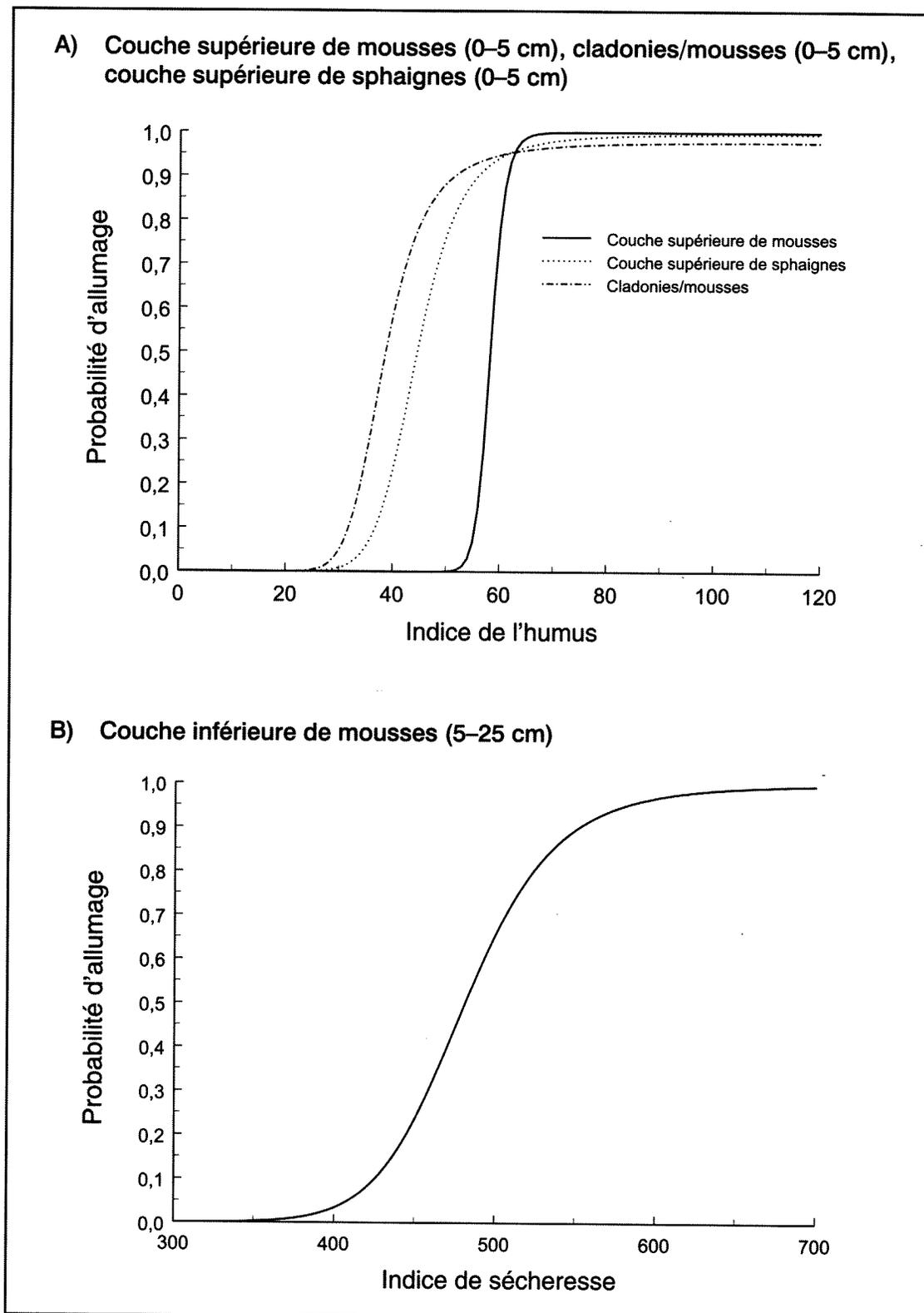


Figure 3. Probabilité d'allumage d'un feu couvant déterminée en fonction de l'indice de l'humus ou de l'indice de sécheresse.

Tableau 3. Seuil de la teneur en humidité pour l'allumage d'un feu couvant, IH ou IS par type d'humus

Type d'humus	Valeur ou étendue du seuil d'allumage ^a		
	Teneur en humidité (%)	Indice de l'humus	Indice de sécheresse
Couche supérieure de mousses	76	58	— ^b
Couche inférieure de mousses	81	—	482
Cladonies/mousses	116	39	—
Aiguilles d'épinette blanche	80–90	55–60	—
Couche supérieure de sphaignes	118	44	—
Couche inférieure de sphaignes	35–40	—	670–700

^a Seuil de la teneur en humidité pour l'allumage d'un feu couvant ($P = 0,5$); pour l'ensemble des types d'humus, la probabilité varie de $P = 0,0$ à $P = 1,0$.

^b Les tirets indiquent que l'indice n'existe pas pour le type d'humus en question.

que la couche supérieure de sphaignes (Frandsen, 1997). Cette différence est peut-être attribuable à la densité apparente plus élevée ($\times 6$) de la couche inférieure de sphaignes. Hartford (1989) a observé qu'une densité apparente plus élevée diminue la probabilité d'allumage. Les feux de tourbe peuvent se propager horizontalement sous la surface de l'humus à des teneurs en humidité beaucoup plus élevées. Sofronov et Volokitina (1986) ainsi qu'Artsybashev (1974) ont observé des feux couvants de tourbe en Sibérie qui se propageaient horizontalement malgré des teneurs en humidité atteignant 400 à 500 %.

Des valeurs de l'indice de sécheresse oscillant entre 670 et 700, qui correspondent au seuil de la teneur en humidité de la couche inférieure de sphaignes de 35 à 40 %, sont monnaie courante dans les forêts du sud de la Colombie-Britannique, mais ne s'observent que rarement dans les forêts boréales situées plus au nord, comme l'indiquent les données climatologiques de McAlpine (1990). Les valeurs réelles de l'IS sont beaucoup plus élevées que les moyennes obtenues par McAlpine puisque ce dernier n'a pas tenu compte de l'effet de l'hiver dans son analyse. Toutefois, l'étude réalisée à Whitehorse en 1992 et qui a abouti à l'équation MC-6—liée ici à l'allumage de la couche inférieure de sphaignes,

était fondée sur des mesures de l'IS inférieures à 610; la prudence est donc de mise lorsqu'on utilise le modèle fondé sur la couche inférieure de sphaignes.

On a par contre observé que des portions de sphaignes de la couche supérieure résistaient à l'allumage et à la propagation lors d'un incendie de forêt (DL3-18-95) survenu en Alberta en juin 1995 et qui s'est propagé par les cimes dans une forêt d'épinettes noires dont l'humus était composé de sphaignes, de mousses et de cladonies.² L'indice de l'humus était de 87; il était donc bien supérieur au seuil d'allumage de la couche supérieure de sphaignes présenté ici. Il convient donc ici encore d'être prudent lorsqu'on utilise ce modèle, tant qu'il n'aura pas été testé en conditions réelles. Le même avertissement vaut également pour tous les modèles présentés dans le présent article.

Essai du modèle d'allumage en conditions réelles, dans l'humus d'aiguilles d'épinette blanche

On a réalisé un nombre limité d'essais pour la détermination du seuil d'allumage de l'humus d'aiguilles d'épinette blanche dans un peuplement

² Marty Alexander, agent de recherche sur les incendies, Service canadien des forêts, Edmonton (Alberta), communication personnelle, août 1996.

mature d'épinettes d'Engelmann (*P. engelmannii* Parry ex Engelm.) et de sapins subalpins (*Abies lasiocarpa* [Hook.] Nutt.) (zone biogéoclimatique EESS) situé près de Quesnel (C.-B.) (53°11'0" de latitude nord, 122°01'15" de longitude ouest), à une altitude de 1 400 m. Les essais d'allumage comparatif ont porté sur deux variantes d'humus d'aiguilles d'épinette d'Engelmann. On a comparé le comportement de l'humus situé au pied des arbres, à des profondeurs variant entre 5 et 8 cm, à celui non protégé par le feuillage, dont la profondeur atteignait en moyenne 4 cm. Chaque matin et chaque après-midi, entre le 13 et le 21 septembre 1995 (sauf le 16), on a procédé à un test d'allumage dans chacun des deux types d'humus. Une carotte de 7 cm de diamètre, creusée jusqu'au sol minéral, a été prélevée et remplacée par de la mousse de tourbe sèche préalablement allumée sur un réchaud de camping. L'allumage était jugé réussi lorsque la mousse de tourbe se consumait complètement et que le feu couvant persistait dans l'humus pendant au moins deux heures et devait être éteint. L'allumage était raté lorsque le feu couvant dans la mousse ne se propageait pas dans l'humus environnant. Les carottes prélevées aux fins des essais d'allumage ont été subdivisées en tranches de 2 cm, et leur teneur en humidité a été déterminé par séchage au four. Les paramètres de l'IFM ont été obtenus à une station de météorologie standard voisine (Turner et Lawson 1978), et la vitesse du vent a été mesurée dans le forêt à une hauteur de 2 m, sur le lieu des

tests. Les résultats préliminaires des 32 tests ainsi réalisés sont compilés au tableau 4.

Malgré leurs limites, ces résultats portent à conclure que l'humus d'aiguilles d'épinettes d'Engelmann qui se trouve près de la base des arbres dans la région de Quesnel, soit dans une région écologique différente de celle des sites de la forêt boréale d'Alaska où les modèles de l'allumage ont été mis au point, présente des seuils d'allumage en fonction de la teneur en humidité qui sont comparables, et que cet humus se caractérise, comme ces derniers, par une marge très étroite entre les teneurs qui permettent l'allumage et celles qui l'interdisent. Les effets de la densité organique apparente, de la teneur en matière inorganique et de la vitesse du vent dans le peuplement forestier sur la probabilité d'allumage d'un feu couvant n'ont pas encore été étudiés, faute de données adéquates.

Ces résultats provisoires sont néanmoins intéressants en ce qu'ils permettent de démontrer des similitudes entre la forêt boréale et la forêt non boréale en ce qui a trait aux rapports de la teneur en humidité pour un type d'humus donné. Toutefois, le rapport entre l'IH et la teneur en humidité de l'humus d'aiguilles d'épinette d'Engelmann pour la forêt boréale et la forêt non boréale est de toute évidence passablement différent. Le modèle de la forêt boréale présenté dans le présent article donne un seuil de l'IH pour l'allumage de l'humus

Tableau 4. Résultats des tests d'allumage de feux couvants dans un peuplement d'épinettes d'Engelmann et de sapins subalpins près de Quesnel (C.-B.) réalisés en septembre 1995

Type d'humus	Profondeur (cm)	Densité apparente (kg/m ³)	Allumage	Pas d'allumage
			Moyenne de la teneur en humidité à 2-4 cm	en humidité à 2-4 cm (étendue)
Épinette d'Engelman, situé sous le feuillage	8	95-123	90 (62-145) ^a	111 (80-139) ^b
Épinette d'Engelman, en terrain dégagé	6	56-110	— ^c	117 (58-213) ^d

Note : Les essais d'allumage ont été réalisés avec une étendue de valeurs de l'indice de l'humus (IH) de 17-26 et une étendue de valeurs de l'indice de sécheresse (IS) de 88-119.

^a Nombre d'échantillons (n = 9).

^b Nombre d'échantillons (n = 7).

^c Aucun allumage n'a été obtenu parce que les valeurs propices de l'IH et de l'IS n'ont pas été atteintes pendant les tests de combustion.

^d Nombre d'échantillons (n = 16).

d'aiguilles d'épinette blanche variant de 55 à 60 (tableau 3), tandis que l'humus d'aiguilles d'épinette d'Engelmann situé au pied des arbres dans une forêt non boréale s'allumait avec des IH oscillant entre 18 et 26 (noter cependant que l'humus non protégé par le feuillage des arbres présentait un seuil d'IH plus élevé qui reste à déterminer). Le feuillage dense des épinettes d'Engelmann à Quesnel semble en effet intercepter une bonne part des précipitations avant qu'elles n'atteignent l'humus près du pied des arbres. Ce phénomène expliquerait que le seuil prévu de l'IH est plus élevé pour l'humus d'aiguilles d'épinette blanche que pour celui mesuré au pied des épinettes d'Engelmann à Quesnel, puisque l'équation de la teneur en humidité de l'humus d'aiguilles d'épinette blanche (MC-4) est fondée sur une teneur en humidité mesurée à l'écart des arbres, à des endroits plus exposés aux précipitations.

APPLICATIONS PRATIQUES DES MODÈLES

Feux couvants provoqués par la foudre et par l'homme

Anderson (1997) a décrit les trois étapes de l'évolution d'un incendie de forêt provoqué par la foudre : l'allumage du feu couvant, son entretien et l'irruption des flammes. La foudre allume dans l'humus un feu couvant qui peut persister pendant des heures, des jours et même des semaines, jusqu'à ce que les conditions deviennent favorables à l'irruption des flammes. Les feux des essais réalisés dans le cadre de la présente étude ont été allumés à l'aide de foyers placés dans l'humus; ils étaient jugés réussis lorsque le feu couvant persistait jusqu'à consommer la totalité du combustible disponible. Les modèles dont il a été question ici pourraient donc être assimilés à des indicateurs probable de l'allumage d'un feu par la foudre.

Comme la cigarette est une source de feu couvant, on pourrait croire que les modèles de probabilité d'allumage d'un feu couvant examinés dans la présente étude s'appliqueraient au risque de déclenchement d'un incendie provoqué par une cigarette. Toutefois, comme la taille et l'emplacement de la source d'allumage diffèrent (les sources d'allumage utilisées pour les tests étaient beaucoup plus grandes, et placées à côté et non au-dessus des échantillons d'humus), ces modèles ne sont probablement pas applicables directement aux

incendies causés par la cigarette. Frandsen (1997) a démontré que les seuils de la teneur en humidité pour l'allumage des divers types d'humus sont supérieurs à la limite d'allumage de Frandsen (1987) pour la mousse de tourbe, qu'on détermine en plaçant un élément chauffant porté au rouge sur un échantillon de tourbe pendant 3 minutes. Les limites d'allumage de la mousse de tourbe calculées par Frandsen (1987) et par Hartford (1989) risquent de s'appliquer plus directement à la probabilité d'un incendie amorcé par une cigarette puisque la méthodologie employée pour ces études correspond davantage à ce genre de scénario.

Les modèles actuels de combustion avec flammes feu couvant persistant (Lawson et al. 1994; Lawson et Dalrymple 1996b) s'appuient principalement sur l'indice de propagation initiale (IPI)—un des éléments de l'Indice forêt-météo—qui montre que l'irruption des flammes dépend principalement de la teneur en humidité du combustible léger et de la vitesse du vent, de la teneur en humidité de l'humus jouant un rôle secondaire à cet égard. Par contre, les modèles de la persistance du feu couvant dont il est question dans le présent article se fondent uniquement sur la teneur en humidité de l'humus, sans tenir compte de la vitesse du vent. Le vent pourrait contribuer à l'entretien des feux couvants, mais son effet n'a pas été examiné dans l'étude en laboratoire qui fait l'objet du présent article. Il influera par contre certainement sur l'irruption des flammes à partir d'un feu couvant provoqué par la foudre ou par la négligence humaine. Pour des raisons pratiques, les modèles de probabilité d'allumage abordés dans le présent article peuvent être liés à la probabilité de persistance des incendies provoqués par des feux couvants, tandis que ceux proposés par Lawson et al. (1994) et par Lawson et Dalrymple (1996b) s'intéressent à la persistance des incendies causés par une source de flammes.

Effets des brûlages dirigés et incidences sur les opérations d'extinction

Les modèles d'allumage de feux couvants ont été principalement mis au point pour nous permettre de mieux connaître les effets brûlages dirigés sur les sols organiques, et notamment les effets de la teneur en humidité, de la teneur en matière inorganique et de la densité apparente sur le transfert vertical et latéral de la chaleur. D'un point de vue pratique, toutefois, la persistance du feu couvant dans divers

types d'humus peut être prise en compte lors de ces opérations de manière à limiter ou à assurer la combustion de l'humus, selon les objectifs visés (figure 4). Van Wagner (1972) a décrit le rapport qui existe entre la combustion de l'humus et son teneur en humidité au cours d'incendies survenus dans des peuplements de pin gris, de pin blanc et de pin rouge de l'est du Canada. La combustion de l'humus



Figure 4. Combustion de l'humus le 5 août 1993, dans la zone illustrée à la figure 1. Les combustibles n'ont pas été allumés au départ, mais le feu a couvé et s'est propagé pour consommer la portion de terrain illustrée au cours d'une période de plusieurs jours. IH = 78; IS = 437 à la station météorologique automatique du National Wildlife Refuge de Tetlin, à 20 km environ du site, le 17 juillet 1993. Photographie utilisée avec l'aimable autorisation de L. Vanderlinden, U.S. Fish and Wildlife Service.

décroit à mesure que son teneur en humidité augmente et s'arrête complètement lorsque la teneur en humidité atteint 134 %. Ce teneur en humidité correspond à un IH de 25 au seuil de combustion de l'humus, tel que déterminé lors de cette série de brûlage dirigés. Ce teneur en humidité est semblable à celui correspondant au seuil d'allumage du feu couvant dans un humus de cladonies et de mousses (voir tableau 3), même si l'IH correspondant est inférieur à l'IH limite pour tous les types d'humus étudiés dans le cadre du présent article. La persistance du feu couvant en fonction du type d'humus et des conditions de combustion peut également servir à déterminer l'ampleur des efforts qui devront être consacrés à l'extinction des brûlages dirigés ou des incendies de forêt.

Même si certains résultats préliminaires laissent croire que les valeurs limites de l'IH et de l'IS pour l'allumage des feux couvants pourraient se ressembler pour différents types d'humus de la forêt boréale et de la forêt non boréale, les équations proposées dans le présent article ne devraient être utilisées que pour la forêt boréale, en attendant que des tests rigoureux ne confirment leur validité. Par ailleurs, les effets du vent sur la probabilité d'allumage des feux couvants devraient être évalués dans le cadre des essais de ces modèles en conditions réelles.

REMERCIEMENTS

L'étude sur les feux couvants réalisée en Alaska a bénéficié de l'aide du Fire Coordinating Committee du U.S. Department of the Interior, géré par le U.S. Fish and Wildlife Service. L'étude sur l'humidité du combustible réalisée au Yukon a bénéficié de l'aide du ministère des Affaires indiennes et du Nord, du Fire Management Program (Service des forêts du Yukon) et du Plan vert du gouvernement canadien. Monsieur Robin Pike, ancien étudiant inscrit à un programme coopératif à l'University of Victoria, a participé à l'analyse des données, dont la collecte avait été assurée par Rolly Kopas. Brad Armitage et Karen Sherman ont également participé à la collecte et à l'analyse des données et se sont chargés des mesures des teneurs en matière inorganique. Karen Sherman a également participé à la préparation du texte du présent article.

Marty Alexander et Kerry Anderson, du Service canadien des forêts (SCF) à Edmonton, Steve Taylor, du SCF de Victoria et Judi Beck, du Forest

Service Protection Program de la Colombie-Britannique, ont aimablement relu le texte du présent article. M. Larry Vanderlinden, du Fish and Wildlife Service (U.S. Department of the Interior) à Anchorage (Alaska) nous a fourni des données et des photographies, nous a conseillés sur le choix des sites et nous a fourni des commentaires utiles sur le présent article. Les tests réalisés à Quesnel (C.-B.) ont été parrainés par le B.C. Forest Service Protection Program, par le Réseau sur la gestion des feux de forêt du Service canadien des forêts, par Parcs Canada et par la société West Fraser Mills Ltd.

B.D. Lawson
W.H. Frandsen
B.C. Hawkes
G.N. Dalrymple
Décembre 1997

RÉFÉRENCES

- Anderson, K. 1997. A model to predict lightning-caused fire occurrences. *In Proc. Seventh Western Region Fire Weather Committee Scientific and Technical Seminar, November 22, 1994, Edmonton (Alberta). West. Reg. Fire Weather Comm. (à venir).*
- Artsybashev, E.S. 1974. Forest fires and their control. *Lesnaya Promyshlennost Publ., Moscou. Traduit du russe vers l'anglais par Amerind Publ. Co. Pvt. Ltd., New Delhi, pour le U.S. Dep. Agric. and Natl. Sci. Found., Washington, D.C. (1983).*
- Frandsen, W.H. 1987. The influence of moisture and mineral soil on the combustion limits of smoldering forest duff. *J. can. de la rech. for. 17:1540-1544.*
- Frandsen, W.H. 1997. Ignition probability of organic soils. *J. can. de la rech. for. 27:1471-1477.*
- Hartford, R.A. 1989. Smoldering combustion limits in peat as influenced by moisture, mineral content, and organic bulk density. Pages 282-286 *in D.C. MacIver, H. Auld et R. Whitewood, dir. Compte rendu du 10^e congrès sur les incendies et la météorologie forestière, 17-21 avril 1989, Ottawa (Ont.). Inst. for. nat. de Petawawa, Chalk River (Ont.).*
- Lawson, B.D.; Armitage, O.B.; Dalrymple, G.N. 1994. Ignition probabilities for simulated people-caused fires in British Columbia's lodgepole pine and white spruce-subalpine fir forests. Pages 493-505 *in Proc. Twelfth Conf. on Fire and Forest Meteorology, October 26-28, 1993, Jekyll Island, Georgia. Soc. Am. For. Bethesda, Maryland.*
- Lawson, B.D.; Dalrymple, G.N. 1996a. Ground-truthing the Drought Code: field verification of overwinter recharge of forest floor moisture. Entente Canada-C.-B. sur la mise en valeur des ressources forestières : EMVRF II, Serv. can. des for., Victoria (C.-B.). Rapp. EMVRF 268.
- Lawson, B.D.; Dalrymple, G.N. 1996b. Probabilities of sustained ignition in lodgepole pine, interior Douglas-fir, and white spruce-subalpine fir forest types. Entente Canada-C.-B. sur la mise en valeur des ressources forestières : EMVRF II, suppl. 1 du Field guide to the Canadian Forest Fire Behavior Prediction (FBP) System, Serv. can. des for., Victoria (C.-B.) Guide EMVRF 12.
- Lawson, B.D.; Dalrymple, G.N.; Hawkes, B.C. 1997. Prédiction de la teneur en humidité de la couverture morte à partir de l'indice de l'humus. *Ress. nat. Can., Serv. can. des for., Centre de for. du Pac., Victoria (C.-B.). Note de transf. technol. 6.*
- McAlpine, R.S. 1990. Évaluation saisonnière de l'indice de sécheresse de la méthode canadienne de l'indice forêt-météo. *For. Can., Inst. for. nat. de Petawawa, Chalk River (Ont.). Rapp. d'inf. PI-X-97 E/F.*
- Norum, R.A.; Miller, M. 1984. Measuring fuel moisture content in Alaska: standard methods and procedures. U.S. Dep. Agric., For. Serv., Pac. Northwest For. Range Exp. Stn., Portland, Oregon. Gen. Tech. Rep. PNW-171.
- Potts, D.F.; Ryan, K.C.; Zuuring, H.R. 1986. Stratified sampling for determining duff moisture in mountainous terrain. *West. J. Appl. For. 1(1):29-30.*
- Sofronov, M.A.; Volokitina, A.V. 1986. Ground/peat fires in the south of western Siberia. *Lesnoe-Khozyaistvo 5:56-58.*
- Turner, J.A.; Lawson, B.D. 1978. La météorologie dans la méthode canadienne d'évaluation du danger d'incendie de forêt : Manuel d'initiation aux normes et pratiques canadiennes. *Pêches et Env. Can., Serv. can. des for., Centre de for. du Pac., Victoria (C.-B.). Rapp. d'inf. BC-X-177F.*
- Van Wagner, C.E. 1987. Élaboration et structure de la méthode canadienne de l'indice forêt-météo. *Serv. can. des for., Ottawa (Ont.). Rapp. techn. de forest. 35.*
- Van Wagner, C.E. 1972. Duff consumption by fire in eastern pine stands. *J. can. de la rech. for. 2:34-39.*

PERSONNES-RESSOURCES :

Bruce D. Lawson, R.P.F.
Service canadien des forêts (retraité)
Adresse actuelle :
Ember Research Services Ltd.
4345, Northridge Crescent
Victoria (C.-B.) V8Z 4Z4

Dr. William H. Frandsen
U.S. Forest Service (retraité)
Adresse actuelle :
2509 Valley View Drive
Missoula, MT 59803

Dr. Brad C. Hawkes, R.P.F. et George N. Dalrymple
Service canadien des forêts
Centre de foresterie du Pacifique
506, West Burnside Road
Victoria (C.-B.) V8Z 1M5
250-363-0600
courrier élect. : bhawkes@pfc.forestry.ca
gdalrymple@pfc.forestry.ca

Lawson, B.D.; Frandsen, W.H.; Hawkes, B.C.; Dalrymple, G.N. 1997. Probabilité d'allumage de feux couvants dans certains types d'humus de la forêt boréale. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Nord, Edmonton (Alberta). Bulletin de la gestion forestière, n° 63.

Sa Majesté la Reine du Chef du Canada et les auteurs du présent article ne garantissent pas l'exactitude ni l'exhaustivité des informations, des énoncés et des opinions présentés dans cette publication et ils ne sauraient être tenus responsables des dommages ou des pertes qui pourraient découler de leur utilisation.

*Ressources naturelles Canada
Service canadien des forêts
Centre de foresterie du Nord
5320 - 122 Street
Edmonton (Alberta) T6H 3S5*

© Sa Majesté la Reine du Chef du Canada, 1997
No de Cat. Fo29-2/63-1997F
ISBN 0-660-95854-6
ISSN 0714-1181