



Prédiction quotidienne des incendies de forêts causés par la foudre

P. Kourtz et B. Todd
Institut forestier national de Petawawa • Rapport d'information PI-X-112F



Forêts Forestry
Canada Canada

Canada

Prédiction quotidienne des incendies de forêts causés par la foudre

P. Kourtz et B. Todd

Rapport d'information PI-X-112F
Institut forestier national de Petawawa
Forêts Canada

1993

©Ministre des Approvisionnements et Services Canada, 1993
Numéro de catalogue Fo46-11/112-1992F
ISBN 0-662-98344-0
ISSN 0228-0736
Imprimé au Canada

Il est possible d'obtenir sans frais des exemplaires de cette publication en communiquant avec :

Forêts Canada
Centre national de diffusion des publications
Institut forestier national de Petawawa
Chalk River (Ontario)
K0J 1J0

Téléphone : (613) 589-2880

Des copies ou des microfiches de cette publication sont en vente à l'adresse suivante :

Micromédia Ltée
Place du Portage
165, rue Hôtel-de-Ville
Hull (Québec)
J8X 3X2

This publication is also available in English under the title
Predicting the Daily Occurrence of Lightning-Caused Forest Fires.

DONNÉES DE CATALOGAGE AVANT PUBLICATION (CANADA)

Kourtz, Peter H.

Prédiction quotidienne des incendies de forêts
causés par la foudre

(Rapport d'information ; PI-X-112F)
Publ. aussi en anglais sous le titre: Predicting
the daily occurrence of lightning-caused forest
fires.

Comprend un résumé en anglais.
Comprend des références bibliographiques.
ISBN 0-662-98344-0

N° de cat. MAS Fo46-11/112-1992F

1. Forêts -- Incendies -- Prévision -- Canada.
2. Forêts -- Incendies -- Canada -- Prévention
et maîtrise. 3. Foudre. I. Todd, B. (James
Bernard), 1949-. II. Institut forestier national
de Petawawa. III. Titre. IV. Coll.: Rapport
d'information (Institut forestier national de
Petawawa) ; PI-X-112F.

SD421.36K6814 1993

634.9'615'0971

C93-099578-3

Table des matières

v	Résumé/ Abstract
1	Le problème des incendies causés par la foudre
1	Structure générale du système de prédiction
2	Renseignements sur les manifestations de la foudre
2	La nature des éclairs
3	Saisie de l'information sur les manifestations de la foudre
3	Allumage dû à la foudre
3	Qualité de l'information
4	Éléments du processus d'allumage
8	Estimation des feux couvants
9	Feux détectables
10	Formulation d'une prévision de l'incendie
13	Évaluation des prédictions
15	Sommaire
16	Références
<u>Tableaux</u>	
6	1. Classement de la taille des orages
6	2. Classement de la localisation de la maille relativement à l'orage
7	3. Proportion d'éclairs à courant continu
8	4. Répartition hypothétique de la pluie
8	5. Équations de la probabilité d'allumage (Latham et Schlieter, 1989)
9	6. Équations de la probabilité de persistance du feu
11	7. Probabilité de détecter les feux causés par la foudre
11	8. Équations décrivant la probabilité de détection
14	9. Exemple de sortie du programme de prédiction
14	10. Comparaison des prédictions des feux causés par la foudre pour cinq journées, dans la région de Québec et de la Mauricie
<u>Figures</u>	
2	1. Composantes du processus de détection des feux causés par la foudre.
5	2. Stade de l'allumage des feux causés par la foudre.
3	3. Activité orageuse dans une maille du Nord-Ouest de l'Ontario (31 juillet 1988)
10	4. Enchaînement de la période où les feux causés par la foudre sont détectables.
17	Annexe 1. Correspondance entre les types de combustibles du Québec, et ceux de Latham et de Schlieter
18	Annexe 2. Équations de la persistance du feu fondées sur le type de combustible, l'indice du combustible léger (ICL), l'indice de l'humus (IH) et l'humidité relative (HR)

Résumé

La foudre cause le tiers des 9 000 incendies de forêt qui se déclarent au Canada. Chaque année, les incendies de cette origine consomment 90 % de la superficie totale brûlée par les incendies et ils coûtent aux Canadiens au moins 150 millions de dollars en biens détruits et en opérations d'extinction. Contrairement aux incendies causés par la négligence humaine, les incendies allumés par la foudre surviennent souvent en nombre élevé dans des localités éloignées. Cependant, un organisme moderne de lutte est en mesure d'éteindre tous ces feux lorsqu'ils sont encore de modestes foyers, mais seulement au cas où il disposerait de suffisamment de temps pour déployer les équipes d'intervention avant que le feu ne se propage. Pour qu'une telle stratégie porte fruit, il faut donc prédire, des heures d'avance, la survenue des incendies dus à la foudre.

L'article décrit la méthode dont on se sert pour prédire le nombre et l'emplacement quotidiens des incendies causés par la foudre. Un réseau de capteurs automatisés saisit l'emplacement et le nombre d'éclairs au sol. Pour chaque éclair, on utilise les données convenables sur le type de combustibles, la météo et l'humidité dans des modèles des processus d'allumage, de combustion lente et de détectabilité. Le modèle d'allumage prédit la probabilité qu'un éclair allume un foyer de combustion. Le modèle de détectabilité prédit la probabilité que le foyer soit visible durant les heures dangereuses (pour l'incendie). Enfin, le modèle de combustion lente renseigne sur la probabilité qu'un feu se maintienne jusqu'au lendemain, habituellement en couvant.

Comme les feux peuvent couvrir pendant longtemps, chaque éclair observé au cours des dix journées qui ont précédé est considéré comme un foyer potentiel pour le lendemain. Les feux qui auraient été allumés jusqu'au dixième jour précédent sont considérés comme ayant eu la possibilité de couvrir; ils cessent d'être pris en considération dès qu'ils sont détectés. Aux feux résiduels, on ajoute les nouveaux feux susceptibles de se déclarer et le nombre prévu de feux détectables au cours de la prochaine période dangereuse pour obtenir le nombre de feux prédits pour la journée où on se trouve.

Les résultats des évaluations sont présentés et expliqués. En général, le programme de prédiction donne des résultats assez bons pour les orages petits à moyens qui surviennent en matinée ainsi que pour les orages moyens à gros de nuit. De même, pour la veille, le modèle de combustion lente et de survie des feux semble fidèle. Toutefois, les prévisions laissent à désirer quand il s'agit des orages d'après-midi, des précipitations dont on ne connaît pas la quantité et du modèle de combustion lente appliqué à des périodes de plus de deux jours.

Le programme de prédiction pourrait être considéré davantage comme un système expert: les connaissances précises de la physique de la foudre, de la répartition géographique des précipitations et du comportement du feu sont combinées à l'opinion des spécialistes sur les divers processus par lesquels se déclarent les incendies dus à la foudre. Il reste beaucoup à apprendre sur la physique de la foudre, les modalités d'allumage, les conditions nécessaires à l'allumage, le processus de combustion lente et les conditions nécessaires à la production de fumée.

Abstract

Lightning causes one third of the 9000 wildfires that occur in Canada. Annually, these lightning-caused fires account for 90% of the area burned and cost Canadians at least 150 million dollars in suppression costs and values destroyed. Unlike the fires caused by human negligence, lightning-caused fires often occur in multiple numbers in remote locations. A modern fire control organization can suppress all of these fires while they are still small only if it has time to position sufficient suppression forces before the fires occur. Therefore, predicting the occurrence of lightning fires hours in advance is an essential component of a successful suppression strategy.

This paper describes the method currently used to predict the daily number and location of lightning-caused fires. A network of automated lightning sensors provides the locations and numbers of cloud-to-ground lightning flashes. For each flash the appropriate weather, fuel type, and moisture data are combined with models of the ignition, smouldering, and detectability processes. The ignition model predicts the chance of a flash causing ignition. The detectability model forecasts the probability of a fire being visually detectable during the burning period. The smouldering model tells us the chances of a fire surviving overnight (usually in a smouldering state).

Because fires can remain in a dormant state for long periods, each flash that occurred during the previous 10 days is considered a potential ignition point for the current day. Fires predicted to have been ignited up to 10 days earlier are given the opportunity to smoulder; they are removed from consideration after detection. Remaining fires combined with likely new fires and the expected number of detectable fires during the next burning period gives the number of fires predicted for that day.

Evaluation results are presented and discussed. In general, the prediction program produces fair to good results for small to medium morning storms and medium to large overnight storms. As well, for the previous day, the smouldering/survival model seems to work well. Poor predictions are generated, however, from afternoon storms, from occasions when rainfall data is not available, and from the smouldering model for periods longer than two days.

The prediction program is perhaps best thought of as being an expert system where specific knowledge of lightning physics, rainfall patterns, and fire behavior are combined with expert opinions of the various lightning fire occurrence processes. There is still much to learn about lightning physics, how fires are ignited, the conditions necessary for ignition, the smouldering process, and the conditions needed for smoke production.

Le problème des incendies causés par la foudre

Les incendies causés par la foudre préoccupent beaucoup les organismes de lutte au Canada. Entre 1973 et 1982, la foudre a allumé 34 % de tous les incendies de forêt, pour une moyenne d'environ 3 100 incendies par année. Même si ce taux ne représente que le tiers, ces incendies ont détruit en moyenne 1,8 million d'hectares par année, soit 87 % de toute la superficie brûlée (Ramsey et Higgins, 1986). Malgré l'absence de statistiques précises sur les dépenses consacrées annuellement à la lutte et à l'extinction ainsi que sur la valeur des pertes, les incendies causés par la foudre accaparent, selon les estimations, jusqu'aux trois quarts de toute l'enveloppe affectée à la lutte contre l'incendie au Canada, qui totalise 109 millions de dollars. De même, les pertes causées par ces incendies ont, de façon prudente, été estimées égales aux coûts de l'extinction.

Les coûts et les pertes élevés qu'entraînent les incendies causés par la foudre s'expliquent par l'éloignement des foyers ainsi que par le nombre élevé d'incendies qui se déclarent presque en même temps. Durant leur passage au-dessus des régions forestières éloignées, les cellules orageuses locales allument un nombre variable d'incendies selon la nature du combustible et son humidité. Les gros orages qui dirigent vers le sol des éclairs par milliers peuvent n'allumer aucun incendie, tandis que les petits orages allument un incendie à chacun des quelques éclairs qu'ils lancent. Ordinairement, dans la forêt boréale canadienne, une cellule orageuse active qui déverse peu ou point de pluie sur des combustibles forestiers secs allumera des douzaines d'incendies rapprochés. Des cellules successives peuvent déclencher, dans la même journée, des centaines d'incendies dans une région forestière. Le nombre élevé de ces nouveaux foyers simultanés de même que leur éloignement fréquent rendent la détection et l'intervention difficiles. Faute de déceler ces incendies ou faute de s'y attaquer, on peut assister, quand les conditions sont optimales, à la naissance de gros incendies. La mise en place de ressources suffisantes pour la détection et l'attaque initiale, en prévision des incendies prévus qui sont causés par la foudre, est un élément essentiel de la doctrine de l'extinction des petits feux. Si l'on dispose d'un bon système de prédiction des incendies (causés par la foudre) qui est accouplé à un système moderne de détection

dans le visible et l'infrarouge et à une force d'attaque vigoureuse du haut des airs, on est capable de supprimer les gros incendies causés par la foudre.

Le système de prédiction que nous proposons de décrire repose en grande partie sur les connaissances publiées de la physique de la foudre, sur les expériences de laboratoire à l'aide des processus d'allumage (par simulation de la foudre) et de combustion lente des combustibles forestiers, des réseaux de capteurs qui détectent la foudre ainsi qu'à l'aide des bases de données constituées sur les conditions météorologiques et les combustibles forestiers. Surtout, il repose sur quelque 20 années d'expérience dans la recherche de moyens de prédire les incendies causés par la foudre. À ce titre, il circule beaucoup d'opinions subjectives sur les divers processus importants et beaucoup d'hypothèses sur la nature de ces processus. De fait, ce système de prédiction des incendies causés par la foudre est un grand système expert.

Structure générale du système de prédiction

Le système que nous décrivons est une tentative de doter l'organisme de lutte des moyens de détection et d'attaque initiale qui lui permettront d'être averti de l'emplacement des foyers et du nombre d'incendies susceptibles de se déclarer à cause de la foudre, au cours de la période de propagation où l'on se trouve et ou au cours de la période suivante. À cette fin, le système allie les renseignements obtenus des réseaux provinciaux de détection de la foudre en ce qui concerne le temps réel d'incendies causés par la foudre aux renseignements sur le type de combustible forestier, l'indice forêt-météo et le comportement du feu. Une vaste région, disons 100 000 km², est subdivisée en unités géographiques rectangulaires ou mailles d'environ 50 km². Dans un système moderne de lutte, ces mailles constituent la structure de base de l'information sur le feu, les conditions météorologiques et le combustible. Les données sur les éclairs décelés par des capteurs; la nature des combustibles, habituellement estimée à partir d'images prises par les satellites; l'intensité des précipitations, actuellement obtenue de la station météorologique la plus rapprochée mais que, dans un proche avenir, on obtiendra de radars de détection des précipitations, tous ces renseignements sont emmagasinés sur chacune de

ces mailles, et, pour chacune de ces dernières, on prédit le risque d'incendie causé par la foudre. La somme de ces prédictions permet de faire des prédictions des incendies à l'échelon régional. Ce système a été créé pour le Centre de lutte contre l'incendie de la Société de conservation de l'Outaouais, dans le S.-O. du Québec, et il a été éprouvé. Il est maintenant déployé dans d'autres régions d'intervention de la province.

La prédiction des incendies causés par la foudre comporte quatre fonctions (figure 1). La première est la collecte de renseignements sur le nombre de décharges électriques au sol, le moment où elles surviennent et leur polarité (positive ou négative) dans chaque maille de 50 km². Ces renseignements sont fournis grâce à la liaison à un système entièrement automatisé de localisation de la foudre.

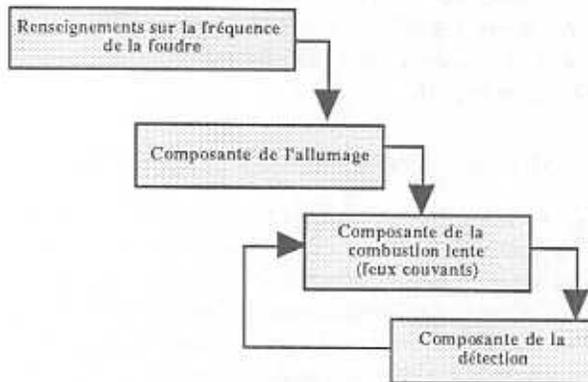


Figure 1. Composantes du processus de détection des feux causés par la foudre.

La deuxième fonction permet de prédire le nombre prévisible de tisons. Comme, en moyenne, les incendies de forêt sont provoqués par un nombre relativement modeste d'éclairs, il faut combiner les renseignements recueillis sur la survenue des éclairs avec les renseignements sur la nature des combustibles et leur humidité, l'indice forêt-météo ainsi que le comportement du feu afin d'estimer le nombre de tisons susceptibles d'être allumés par les éclairs.

La troisième fonction permet de prédire d'abord la probabilité qu'un tison devienne un feu couvant et, deuxièmement, la probabilité que ce feu couve, s'il y a lieu d'une période de propagation dans la journée, jusqu'à la même période le lendemain.

La quatrième fonction permet d'estimer le nombre de feux couvants qui seront visibles au cours de la période de propagation maximale visée par les prévisions. Cette estimation constitue la prédiction finale de l'incendie causé par la foudre. Les feux qui continuent à couvrir, invisibles, durant la période de propagation visée par les prévisions restent capables de continuer à couvrir jusqu'à la période dangereuse suivante. Ce sont les feux à retardement. On pense qu'ils peuvent subsister jusqu'à 10 jours. Cette persistance, d'une période de propagation à l'autre, dépend du moment de l'allumage, des caractéristiques du combustible dans lequel le feu couve ainsi que des conditions météorologiques et de l'humidité actuelles.

Renseignements sur les manifestations de la foudre

La nature des éclairs

Si l'on veut prédire le nombre d'incendies causés par la foudre, il faut comprendre les rudiments de la physique de la foudre. La foudre se définit comme une décharge rapide et massive de l'électricité atmosphérique par les nuages au cours d'un orage. La première mesure à distance des champs électriques d'un orage a été effectuée par Wilson (1916), qui étudiait la physique de la foudre et qui a été le premier à décrire la structure électrique des orages. Par la suite, la recherche a considérablement élargi nos connaissances de la foudre et, par là même, elle a permis d'identifier quatre types fondamentaux de décharges : entre les nuages, des nuages à l'air, à l'intérieur du nuage et du nuage au sol (Uman et Krider, 1989). Les décharges du nuage au sol ont été étudiées de manière détaillée à cause de leur puissance destructrice.

Les décharges du nuage au sol peuvent toutes être qualifiées soit de négatives, soit de positives. Au cours d'un gros orage caractéristique de l'est du Canada, on peut compter jusqu'à 5 000 éclairs du type du nuage au sol sur une période de huit heures. Environ 90 % de ces éclairs sont négatifs, c'est-à-dire que des parties du nuage qui renferment une charge négative excessive, qui sont habituellement situées à la base du nuage, émettent une décharge vers le sol. Sur le parcours de la foudre, un éclair négatif peut comporter plusieurs impulsions (traits de retour), si rapides qu'elles échappent à l'œil. Chaque trait de retour

correspond à une décharge rapide et massive, qui peut être suivie par un intervalle de faible intensité au cours duquel une charge moins intense de courant se maintient pendant une période beaucoup plus longue. Entre 25 et 50 % de tous les éclairs vers le sol présentent ces manifestations de courant continu (Uman et Krider, 1989). Se sont des courants très puissants, de l'ordre de 30 à 200 A (Shindo et Uman, 1989). Latham (1980) a construit un modèle selon lequel la température au cœur de ces courants continus se situe entre 6 000 et 12 000 °K. Orville (1972) a même enregistré des intensités et des températures plus élevées dans certains éclairs isolés et particulièrement intenses.

Contrairement aux éclairs négatifs, presque tous les éclairs positifs sont constitués de plusieurs décharges de courant continu (Latham, 1989) et ils comportent habituellement un seul trait de retour qui dure au moins 61 ms (Fuquay, 1980).

Les éclairs à décharges de courant continu sont particulièrement intéressants en ce qu'ils sont capables d'allumer des incendies de forêt (Bellaschi, 1947; Fuquay et collab. 1967 et 1979). Les éclairs qui s'accompagnent de traits en retour d'une durée supérieure à 40 ms sont dits à courant continu long (Kitagawa et collab., 1962; Fuquay, 1980; Shindo et Uman, 1989). Les travaux antérieurs de recherche montrent que, en moyenne, au cours de la saison des incendies, 20 % environ de tous les éclairs négatifs comportent une décharge longue de courant continu (Fuquay, 1980). Toutefois, les travaux récents ont permis de distinguer deux autres types de décharges de courant continu: les courtes, qui durent de 10 à 40 ms et les « douteuses », qui durent de 1 à 10 ms (Shindo et Uman, 1989). Le pourcentage d'éclairs à décharges de courant continu qui se manifestent au cours d'un orage et qui risquent d'allumer un incendie de forêt varie de 12 à 50 %.

Les mécanismes par lesquels la foudre déclenche l'incendie restent inconnus. On pense que la foudre frappe la cible en forêt parce que cette dernière est, du moins au départ, un bon conducteur en raison de son humidité superficielle ou interne. Un trait en retour court possède beaucoup d'énergie mais dure trop peu de temps pour provoquer l'évaporation complète de ce qui se trouve dans le chenal conducteur.

Tout au plus la cible peut exploser sous l'effet de la pression de la vapeur surchauffée. D'autre part, un éclair à courant continu a le temps nécessaire, au cours de la longue période d'écoulement du courant, d'évaporer l'humidité dans les éléments conducteurs, ce qui crée un réchauffement suffisant, par effet de la résistance électrique, pour carboniser ou allumer l'objet.

Saisie de l'information sur les manifestations de la foudre

Les organismes canadiens de la lutte contre les incendies de forêt utilisent le système de détection des décharges de foudre de Lightning Location Protection Incorporated (Noggle et collab., 1976) pour la saisie des renseignements sur la foudre, chaque fois qu'un éclair brille. Ce système est constitué d'un ensemble de capteurs de direction et d'un analyseur de position centrale. Chaque capteur est sensible aux nombreux éclairs produits jusqu'à une distance d'environ 150 km, selon l'énergie de l'éclair. Les éclairs très énergétiques, qui ne représentent qu'une faible proportion du nombre total d'éclairs, peuvent être décelés jusqu'à des distances de 300 à 400 km. Les éclairs peu énergétiques, d'autre part, peuvent ne pas être décelés, même à proximité des capteurs. Ces derniers, grâce à des algorithmes internes, différencient les éclairs du nuage au sol de tous les autres types d'éclairs. Pour chaque éclair vers le sol, le capteur détermine et enregistre la direction, l'heure, la polarité, l'intensité et le nombre de traits de retour, et ces renseignements sont acheminés, par ordinateur, vers l'analyseur de position centrale, lequel, par un procédé de triangulation, estime la position de l'éclair. Les points et les heures de chute de la foudre sont mémorisés sous forme de tableaux, et ces renseignements peuvent être visualisés sous forme de points sur une carte et sous forme de sommaires qui, pour chaque maille géographique, montrent les caractéristiques des éclairs selon les distributions de fréquence et la répartition dans le temps. Cette saisie en temps réel et cette mémorisation des données constituent la première étape de la prédiction appliquée à la foudre.

Allumage dû à la foudre

Qualité de l'information

L'allumage du combustible forestier par un éclair dépend de nombreux facteurs. Certaines conditions sont nécessaires pour qu'un incendie

soit causé par la foudre. L'éclair doit être constitué d'une phase en courant continu d'une durée suffisante. Quelque part sur le trajet du courant, il doit se trouver du combustible. Ce dernier doit posséder la densité apparente et la siccité qui permettent l'allumage. Les précipitations qui tombent sur le foyer doivent être minimales pour que la combustion s'entretienne ou, encore, le foyer doit être protégé contre la pluie.

Malheureusement, on ne possède pas la plus grande partie des renseignements nécessaires à la prédiction des conséquences d'un éclair du nuage au sol. Les systèmes de détection déployés dans la plus grande partie des forêts protégées au Canada ne permettent pas la localisation précise des éclairs. Les difficultés de minutage, les erreurs découlant de l'emplacement et de l'orientation des capteurs ainsi que la résolution insuffisante du pointé des capteurs, qui entachent d'une forte erreur la base et la triangulation, tout cela concourt à limiter la précision de la localisation des éclairs. Ces erreurs augmentent en raison de la distance des capteurs. Des erreurs de localisation de plusieurs kilomètres sont fréquentes. En outre, un nombre considérable d'éclairs n'est même pas décelé.

Même si l'emplacement exact de chaque éclair était connu, il ne serait pas possible de modéliser avec précision le processus d'allumage, parce que d'autres données critiques comme l'âge du combustible, sa densité apparente, la profondeur de la couche organique et le taux d'humidité restent inconnus. Actuellement, les renseignements dont on dispose sur les peuplements ligneux de la plupart des régions forestières du Canada ne se rapportent pas à un emplacement précis et ils datent souvent d'une dizaine d'années. Les systèmes d'information géographique (SIG) numérisés sur les peuplements forestiers de la plupart des régions du Canada ne seront pas accessibles avant au moins cinq ans. De même, on ne disposera pas de renseignements détaillés sur les précipitations, dans des localités spécifiques, tant que l'on ne disposera pas de réseaux étendus de radars de détection des précipitations. Or, ces renseignements sont essentiels aux calculs de l'humidité des combustibles. Aujourd'hui, les mesures des précipitations ne sont enregistrées que deux fois par jour, dans des stations largement disséminées dans une région. Ainsi, le

système de prédiction doit s'accommoder de renseignements généraux sur la fréquence de la foudre, les conditions d'humidité et la nature des combustibles ainsi que sur les conditions propices à l'incendie. On utilise des données généralisées à l'échelon de la maille plutôt que de renseignements qui se rapportent à l'emplacement de chaque éclair. La prédiction du nombre de foyers allumés par la foudre dans une cellule donnée exige que l'on pose des hypothèses sur la proportion d'éclairs à courant continu qui ont frappé, la répartition des précipitations ainsi que la répartition et l'humidité des combustibles dans la maille.

Plusieurs modèles de l'allumage des combustibles forestiers par la foudre ont été construits par le passé (Kourtz, 1977 et 1984; Fuquay et collab., 1979). Ces modèles fondés sur l'activité de la foudre, le déplacement des orages ainsi que l'humidité et la densité apparente des combustibles ont été éprouvés à l'échelon opérationnel par plusieurs organismes de défense contre l'incendie du Canada et des États-Unis, avec un taux variable de réussite. Ils reposent sur de nombreuses hypothèses relativement aux propriétés physiques des cellules orageuses et des éclairs, à la répartition des précipitations ainsi qu'à l'humidité et à la nature des combustibles. Le système que nous décrivons leur ressemble en ce qu'il intègre les meilleures données disponibles obtenues par les capteurs, les derniers résultats de la recherche et l'opinion des spécialistes pour estimer et décrire les propriétés physiques des éclairs et les conditions propices à l'incendie.

Éléments du processus d'allumage

La détermination des feux allumés par la foudre exige que l'on estime le nombre d'éclairs à courant continu, les caractéristiques des précipitations et l'état des combustibles. La figure 2 montre les divers paramètres qui servent à cette estimation.

(1) Estimation du nombre d'éclairs à courant continu

L'estimation de la proportion des éclairs à courant continu est une étape nécessaire dans la prédiction des feux causés par la foudre. La recherche a montré que de 12 à 50 % de tous les éclairs négatifs du nuage au sol et 95 % de tous les éclairs positifs du nuage au sol possèdent une phase à courant continu. Les éclairs négatifs à courant continu varient, en durée, de 1 à plus de 40 ms et

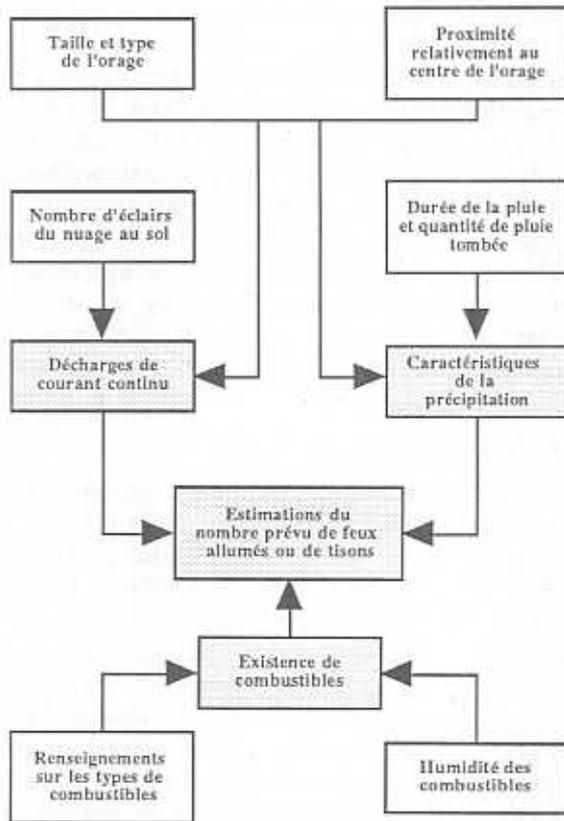


Figure 2. Stade de l'allumage des feux causés par la foudre.

ils se subdivisent en éclairs douteux, en éclairs courts et en éclairs longs, tandis que les éclairs positifs à courant continu durent plus de 61 ms. La recherche a montré que les deux types d'éclairs pouvaient allumer des incendies.

Latham (1989) a décrit le calcul de la probabilité qu'un éclair du nuage au sol possède une phase à courant continu, d'après le nombre et la durée des traits de retour. Toutefois, les systèmes contemporains de localisation mesurent la polarité de chaque éclair et le nombre de traits de retour, mais non la durée de ces derniers. Dans un proche avenir, ces systèmes pourraient être modifiés afin de surveiller la durée des traits de retour, ce qui rendrait possible l'emploi de la technique d'estimation de courant continu élaboré par Latham. D'ici là, la proportion d'éclairs à courant continu au cours d'un orage doit être estimée dans chaque cellule orageuse.

La latitude, le moment de la journée et les variations saisonnières sont d'importants facteurs dans l'estimation de la décharge de courants continus. Baughman et Schmid (1977) ont constaté

que les orages de l'Alaska étaient généralement moins intenses, plus isolés et plus petits que les orages de l'ouest du Montana et qu'ils produisaient moins d'éclairs à courant continu. En outre, la gravité des orages diffère selon l'heure du jour. En Alaska, les orages les plus intenses surviennent à la fin de la matinée et au début de l'après-midi, tandis que dans le Montana ils se manifestent à la fin de l'après-midi. Ces travaux ont été confirmés par ceux d'Orville (1990), qui a observé que les caractéristiques des éclairs variaient selon la latitude. Son étude des éclairs de l'est des États-Unis révèle que l'intensité de pointe des éclairs observés en Floride était deux fois plus grande que l'intensité des éclairs observés en Nouvelle-Angleterre. Flannigan et Wotton (1991) ont décelé des tendances saisonnières dans la foudre observée dans le nord-ouest de l'Ontario. Ils ont constaté que les manifestations de la foudre augmentaient en juin pour culminer en juillet puis graduellement baisser encore en août et plus rapidement encore en septembre.

La fréquence des incendies causés par la foudre a été étudiée au Québec, en Ontario et en Colombie-Britannique. Les rapports entre la taille et la puissance des cellules orageuses, le nombre et le lieu des éclairs, la hauteur et le lieu des précipitations et les taux consécutifs d'allumage des incendies ont été étudiés en détails. On a constaté que les petits orages isolés de la fin de l'après-midi, qui lancent peu d'éclairs, causaient souvent une forte proportion d'incendies de forêt. Réciproquement, ces derniers sont rarement imputés aux gros orages ayant une grande concentration d'éclairs près du centre de l'orage. Une explication possible de ce paradoxe est la quantité plus forte de précipitations qui survient au milieu des gros orages. Une autre explication est la variation des manifestations à courant continu au cours de l'orage et la capacité des éclairs à haute énergie de rayonner à partir du centre des petites cellules orageuses vers la périphérie, pour allumer un incendie. Ces études ont montré que la fréquence des incendies causés par la foudre dépend de l'emplacement et de la gravité des orages ainsi que de la proximité de l'éclair relativement au centre de l'orage.

La prédiction des incendies causés par la foudre débute par l'estimation de la proportion d'éclairs à courant continu qui se sont produits dans chaque maille au cours des huit dernières

heures. Les éclairs à courant continu sont corrélés à la taille de l'orage et à la proximité du centre de ce dernier. Le classement de l'orage est la première étape. La région forestière est subdivisée en 8 à 10 sous-régions d'une superficie d'environ 12 000 km². Le nombre total d'éclairs dans chaque sous-région et le pourcentage de la superficie qui a été témoin des manifestations des éclairs permettent de classer les orages en cinq catégories (tableau 1).

Tableau 1. Classement de la taille des orages

Type d'orage	Nombre d'éclairs	
	de 0 à 40 % de la superficie touchée	de 41 à 100 % de la superficie touchée
Très petit	0 - 100	0 - 250
Petit	101 - 250	251 - 500
Moyen	251 - 600	501 - 900
Gros	601 - 1200	901 - 1800
Très gros	1201+	1801+

Nota : Taille des mailles : 12 000 km²; période de temps: 8 h.

Une fois que ce classement a été effectué, on tente de classer le centre et le périmètre de l'orage. À cette fin, on utilise le nombre d'éclairs dans chaque maille et le classement de l'orage dans la sous-région (tableau 2).

On se sert d'un nombre à deux chiffres pour décrire à la fois la taille de l'orage dans la maille et la position de cette dernière relativement à l'orage. Par exemple, le nombre 54 désigne le centre (4) d'un très gros orage (5), tandis que 51 désigne la périphérie (1) d'un très gros orage (5).

La figure 3 montre l'activité orageuse dans une seule sous-région, dans la nuit du 31 juillet 1988, dans le Nord-Ouest de l'Ontario, où on a compté 2 995 éclairs dans 79 des 80 mailles.

Une fois que la taille de l'orage et la position de la maille sont classées, on peut estimer la proportion d'éclairs à courant continu (tableau 3). Ces estimations sont fondées sur des études de plusieurs années portant sur la manifestation de la foudre ainsi que sur la prédiction des incendies causés par la foudre. Ainsi, au cours des petits orages, le taux d'éclairs à courant continu est plus élevé que dans les gros orages et il est également plus élevé en périphérie de l'orage qu'au centre. Ce taux sert à calculer le nombre total d'éclairs à courant continu dans chaque maille au cours de la période de huit heures.

(2) Caractéristiques de la pluie

Comme la pluie influe directement sur l'humidité des combustibles, elle influe fortement sur l'allumage des foyers d'incendie causé par la foudre. Pour l'allumage, trois paramètres de la pluie sont importants: la hauteur de pluie, l'intensité de la pluie (quantité par unité de temps), intensité et la durée. Fosberg (1972) a constaté que la durée était le plus important de ces trois paramètres. Les combustibles possèdent une capacité limitée d'absorber l'eau dans une courte période de temps. Dans une flaque, ils s'imbibent lentement. Les longues pluies, même tranquilles, éteignent la plupart des foyers allumés par la foudre avant que ceux-ci ne deviennent visibles.

Dans une région de défense contre l'incendie, on compte ordinairement environ 25 stations météorologiques forestières qui mesurent les précipitations deux fois par jour, à 8 et à 13 h. On fait correspondre ces données, de chaque station, avec la maille qui convient le mieux (souvent la maille la plus rapprochée). Comme les stations météorologiques surveillent souvent des superficies de plus de 5 000 km², la mesure, deux fois par jour, de la pluie tombée au moyen d'un

Tableau 2. Classement de la localisation de la maille relativement à l'orage

Type d'orage	Position de la maille relativement à l'orage, sur la carte de base			
	Centre (4)	Près du centre (3)	Près de la périphérie (2)	Périphérie (1)
Très petit (1)	11+ ^a	7 - 10	4 - 6	1 - 3
Petit (2)	16+	11 - 15	6 - 10	1 - 5
Moyen (3)	26+	16 - 25	9 - 15	1 - 8
Gros (4)	45+	28 - 44	13 - 27	1 - 12
Très gros (5)	67+	34 - 66	18 - 33	1 - 17

^a Nombre d'éclairs par maille.

Nota : intervalle de 8 h.

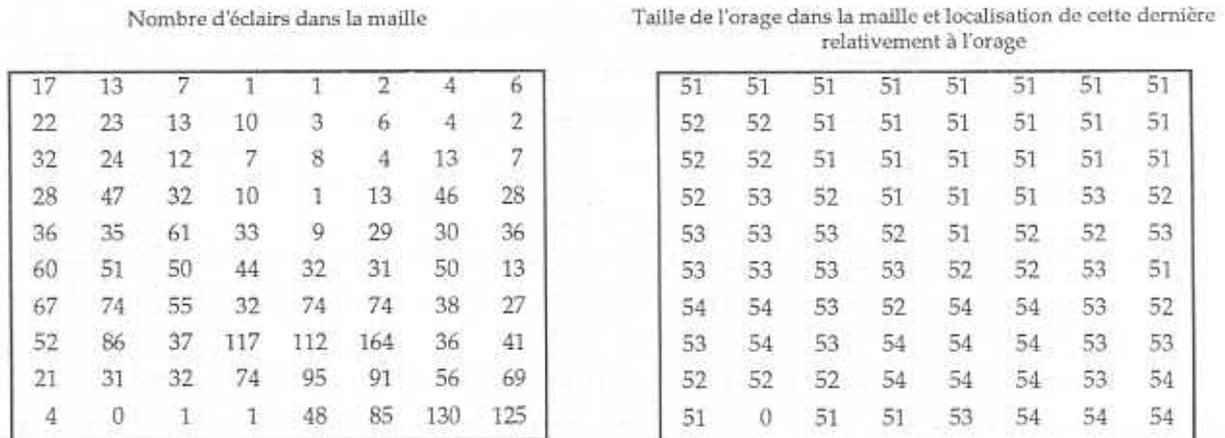


Figure 3. Activité orageuse dans une maille du Nord-Ouest de l'Ontario (31 juillet 1988)

Tableau 3. Proportion d'éclairs à courant continu

Type d'orage	Centre de l'orage (4)	Près du centre de l'orage (3)	Près de la périphérie de l'orage (2)	Périphérie de l'orage (1)
Très petit (1)	0,25	0,33	0,50	0,66
Petit (2)	0,20	0,25	0,33	0,50
Moyen (3)	0,15	0,20	0,25	0,33
Gros (4)	0,10	0,15	0,20	0,25
Très gros (5)	0,05	0,10	0,15	0,20

réseau de pluviomètres installés à de grandes distances ne peut suffire à bien représenter la hauteur ou la répartition de la pluie apportée par les orages. Tant que les organismes de défense contre les incendies de forêt du Canada ne déploieront pas de réseaux de radars de détection des précipitations, il sera impossible de disposer de mesures précises de la hauteur des précipitations. Pour le moment, on ne peut qu'effectuer des estimations grossières de la hauteur, de l'intensité et de la durée des pluies.

La recherche a montré qu'il existait un rapport entre le nombre d'éclairs vers le sol et la hauteur des précipitations (Levin et Ziv, 1974; Marshall et Radhakant, 1978; Piepgrass et collab., 1982). Ce rapport, combiné au nombre total d'éclairs à l'intérieur d'une maille, à la hauteur des précipitations mesurée dans les stations météorologiques et au classement de l'orage, selon la marche décrite dans les pages précédentes, sert à estimer la répartition de la pluie.

Le classement de la taille de l'orage dans chaque maille et la position de cette dernière dans l'orage, selon le nombre d'éclairs (tableau 2), sont comparés à la hauteur correspondante de pluie

déterminée à partir de la station météorologique la plus proche. Par hypothèse, on pose que la répartition des éclairs traduit plus fidèlement la réalité des orages. On applique un coefficient de correction pour s'assurer d'une correspondance approximative de la répartition des pluies et des éclairs (tableau 4). Par exemple, la station météorologique peut être située, d'après la répartition des éclairs, à la périphérie de l'orage. On augmente alors la quantité de pluie dans les mailles les plus rapprochées du centre de l'orage. On améliore ainsi l'estimation de la pluie tombée dans chaque maille et, en conséquence, l'estimation de l'humidité des combustibles.

(3) Existence des combustibles

Le troisième élément du processus d'allumage est l'existence de combustibles possédant les caractéristiques favorables à l'allumage. Taylor (1969) a constaté que les incendies causés par la foudre se déclarent dans les combustibles fins constitués de la litière et de l'humus brut d'aiguilles de conifère, sous les arbres, dans le bois pourri des chandelles mortes et dans les cimes vivantes. Latham et Schlieter (1989) ont construit des équations de la probabilité d'allumage de huit types de combustibles de l'ouest des États-Unis.

Tableau 4. Répartition hypothétique de la pluie^a

Type d'orage	Centre de l'orage (4)	Près du centre (3)	Près de la périphérie (2)	Périphérie de l'orage (1)
Très petit (1)	1,0	0,3	0,2	0,1
Petit (2)	1,0	0,5	0,3	0,2
Moyen (3)	1,0	0,6	0,5	0,3
Gros (4)	1,0	0,8	0,6	0,5
Très gros (5)	1,0	0,9	0,8	0,6

^a Un pluviomètre situé à la périphérie d'un très petit orage est censé mesurer un dixième (0,1) de la quantité mesurée par un pluviomètre situé au centre de l'orage.

Tableau 5. Équations de la probabilité d'allumage (Latham et Schlieter, 1989)

Type de combustibles	Éclairs négatifs	Éclairs positifs
Litière de pin ponderosa	$1,04 \times e^{-0,054 Mf}$	$0,92 \times e^{-0,087 Mf}$
Humus brut de pin tordu	$(1 + e^{3,84 - 0,6 Df})^{-1}$	$(1 + e^{5,13 - 0,68 Df})^{-1}$
Humus brut de douglas taxifolié	$(1 + e^{5,48 - 1,28 Df})^{-1}$	$(1 + e^{6,69 - 1,39 Df})^{-1}$
Humus brut d'épinette d'Engelmann	$0,8 - 0,014 Mf$	$0,62 \times e^{-0,050 Mf}$
Mousse de sphaigne	$0,84 \times e^{-0,060 Mf}$	$0,71 \times e^{-0,070 Mf}$
Bois pourri (en gros morceaux)	$0,59 \times e^{-0,094 Mf}$	$0,44 \times e^{-0,11 Mf}$
Bois pourri (en poudre 2,4 cm de profondeur)	$0,73 - 0,011 Mf$	$0,6 - 0,11 Mf$
Bois pourri (en poudre 4,8 cm de profondeur)	$0,9 \times e^{-0,056 Mf}$	$0,86 \times e^{-0,06 Mf}$

Nota : Mf désigne l'humidité, dans l'intervalle entre 0 et 40 %; Df désigne la profondeur de l'humus brut, entre 0 et 10 cm.

Ces équations permettent d'estimer la probabilité d'allumage à partir de la durée du courant continu, de la polarité (positive ou négative) de l'éclair, de l'épaisseur et de l'humidité du combustible ainsi que, de façon limitée, de la densité apparente du combustible. Les huit types de combustibles comprennent la litière de pin ponderosa, l'humus brut de pin tordu, l'humus brut de douglas taxifolié, l'humus brut d'épinette d'Engelmann, la mousse de sphaigne, des morceaux de bois pourri ainsi que de la poudre de bois pourri de 2,4 et de 4,8 cm d'épaisseur. Les probabilités d'allumage des aiguilles courtes de pin dépendaient principalement de l'épaisseur de la couche de combustible, tandis que celles des autres combustibles dépendaient de l'humidité de ces derniers. Le tableau 5 donne les équations de la probabilité d'allumage de chaque combustible selon le type d'éclair.

Les renseignements sur les combustibles du Québec doivent être tirés de cartes de la répartition des essences ligneuses ou d'images de satellite à faible résolution. On ne possède de renseignements que sur les types généraux de couverture forestière, exprimés en pourcentage du couvert dans chaque maille. En tout, au Québec, on distingue 27 types de combustibles. À l'annexe 1, on fait correspondre chaque type à un

des types de Latham et Schlieter. On estime l'épaisseur de chaque type de combustible, tandis que l'humidité de ce dernier est calculée à partir de la hauteur corrigée des précipitations.

Par hypothèse, on pose que les éclairs sont uniformément distribués entre tous les types de couvert forestier de la maille. Le nombre d'éclairs et leur polarité dans la maille servent à estimer le nombre d'éclairs à courant continu qui touchent chaque type de couvert. La hauteur corrigée de pluie dans la maille (tableau 4) ainsi que l'indice du combustible léger (ICL) de la Méthode canadienne de l'Indice Forêt-Météo (Van Wagner, 1987) servent à estimer l'humidité sous chaque type de couvert forestier. À l'aide de la relation présentée à l'annexe 1 et des équations applicables de Latham et Schlieter du tableau 5, on calcule le nombre prévu d'allumages dans la maille.

Estimation des feux couvants

L'étape suivante de la prédiction des incendies causés par la foudre consiste à estimer le nombre de foyers qui continueront de couvrir. Le foyer allumé dans la soirée ou la nuit doit couvrir au moins jusqu'à la prochaine période de propagation du lendemain pour qu'on puisse détecter le feu. Dans les conditions

météorologiques et les conditions d'humidité du combustible que l'on observe ordinairement dans la forêt boréale canadienne, la plupart de ces feux s'éteignent spontanément au cours de la première nuit. Même s'ils persistent, ils peuvent continuer à couvrir, sans plus, durant la journée et ne pas commencer à se propager rapidement à cause de l'humidité du combustible. Lorsque les conditions sont propices au maintien d'une combustion lente, mais trop humides pour la propagation rapide du feu, les feux couvants peuvent continuer à couvrir jusqu'à la prochaine période de propagation du lendemain. Les feux qui ont couvé durant toute une période de propagation sont dits feux à retardement. Il est fréquent d'observer de tels feux causés par la foudre qui avait tombé trois ou quatre jours auparavant. Certains de ces feux se sont révélés avoir couvé, sans être décelés, pendant jusqu'à 10 jours. Pour prédire la survenue d'un incendie au cours de la prochaine période de propagation, il faut donc prendre en considération tous les éclairs des 10 derniers jours.

La combustion lente dépend de la densité apparente des combustibles et de leur humidité. D'après les estimations effectuées sur le terrain au moyen de compteurs d'éclairs, Kourtz (1974) a établi une corrélation fortement positive entre le nombre d'éclairs, la siccité des combustibles moyens avant l'orage et le nombre de feux allumés. Des expériences consécutives en laboratoire ont permis de déterminer l'indice de combustion lente ou de feu couvant (IFC) (équation [1]).

$$IFC = 15 \times e^{\frac{-300}{(ICL)^2}} \quad [1]$$

Cet indice se fonde sur l'indice de l'humus (IH) et sur l'indice de sécheresse (IS) de la Méthode canadienne de l'Indice Forêt-Météo. S'il est inférieur à 75, la probabilité de feu couvant est faible. Le feu peut couvrir quand l'indice dépasse 100, et la situation devient très dangereuse lorsque l'indice dépasse 200.

Outre les facteurs pris en considération dans le calcul de l'indice, sont également importants le temps d'allumage, le type de combustible et son humidité ainsi que l'humidité relative, pour déterminer la probabilité qu'un feu couvant subsistera jusqu'à la prochaine période de propagation. Huit équations ont été construites pour décrire la probabilité que subsiste le feu en

fonction de l'IFC (tableau 6). L'annexe 2 montre l'équation qui convient le mieux à la détermination de la persistance du feu d'après le moment de l'allumage, le type de combustible, l'indice du combustible léger, l'indice de l'humus et l'humidité relative, le type de combustible étant le facteur le plus déterminant. La probabilité de persistance est également une fonction du moment où survient l'allumage. Les feux à retardement possèdent la probabilité maximale de persistance parce qu'ils ont déjà couvé dans des conditions où le combustible s'y prête, pendant plus d'une période de propagation. Les feux qui se déclarent au cours de la journée ont une probabilité légèrement plus grande de persister jusqu'en soirée que les feux allumés la nuit précédente.

Tableau 6. Équations de la probabilité de persistance du feu

Probabilité	Équation ^a
Ultra faible	5,54 ln(SMI)
Très faible	-19,0 + 11,13 ln(SMI)
Faible	-38,5 + 16,72 ln(SMI)
Modérée	-58,0 + 22,31 ln(SMI)
Moyenne	-77,5 + 27,90 ln(SMI)
Forte	-97,0 + 33,49 ln(SMI)
Très forte	-116,5 + 39,08 ln(SMI)
Extrêmement forte	-136,0 + 44,67 ln(SMI)

^a L'expression ln réfère au logarithme népérien (ou naturel).

Feux détectables

Les organismes de lutte sont désireux de pouvoir prédire le nombre et l'emplacement général des feux visibles qui ont été causés par la foudre au cours de la période de propagation ou au cours de la période de propagation suivante. À l'aide de cette information, ils peuvent planifier le trajet des patrouilles aériennes pour la détection visuelle.

Beaucoup de feux couvants ne dégagent pas suffisamment de fumée pour être visibles tant que la combustion ne s'accélère pas au point d'être près de commencer en étant accompagnée de flammes. Le moment de la détection est critique parce que la plupart des feux peuvent être décelés seulement lorsque la combustion commence à s'accélérer. Les patrouilles découvrent peu de feux durant les périodes où les combustibles sont humides, même si beaucoup de ces feux peuvent couvrir. Si les organismes de lutte retardent la

détection jusqu'au moment où les combustibles sont tout à fait secs, la détection sera beaucoup plus facile, mais les feux pourront s'être engagés dans un stade de propagation rapide, ce qui en rend l'extinction beaucoup plus coûteuse.

Les systèmes infrarouges permettent de déceler jusqu'au quart les feux couvants, notamment durant la nuit, ce qui réduit considérablement le risque de détection tardive. L'emploi de détecteurs infrarouges exigera toutefois que les systèmes de prédiction des feux causés par la foudre insistent sur les feux couvants plutôt que sur les feux que l'on peut déceler visuellement. La structure modulaire du système de prédiction relative à l'allumage, à la combustion lente et à la détection qui est décrite ici convient bien aux systèmes infrarouges.

Les feux allumés par la foudre peuvent être subdivisés en deux groupes, selon le moment où s'allume l'incendie. Les feux du premier groupe s'allument durant la période de propagation de la journée durant laquelle la foudre est tombée. Ils peuvent être décelés immédiatement et peuvent ne pas couvrir. C'est l'évolution souvent observée dans les régions intermontagnardes de la Colombie-Britannique, où les combustibles extrêmement secs favorisent la propagation rapide de l'incendie peu après l'allumage. Le second groupe comprend les feux provoqués par la foudre tombée avant la période de propagation visée par les prédictions. La figure 4 montre l'enchaînement de la période où les feux causés par la foudre sont observables.

L'indice du combustible léger (ICL), la vitesse du vent, la température et l'humidité relative déterminent la visibilité ou non des feux. Dans une situation extrême, par une journée chaude, sèche et venteuse, alors que l'indice du combustible léger est élevé (faible humidité du combustible léger), on peut être sûr que les feux seront décelés. À l'autre extrême, par journée humide ou brumeuse, fraîche, peu venteuse, le feu restera à l'état couvant, s'il parvient à se maintenir. Les feux qui restent invisibles au cours de la période de propagation peuvent réussir à se maintenir jusqu'à la prochaine période, au cours de laquelle ils peuvent, de nouveau, devenir visibles.

La probabilité qu'un feu devienne visible dépend également de l'indice de l'humus (IH)

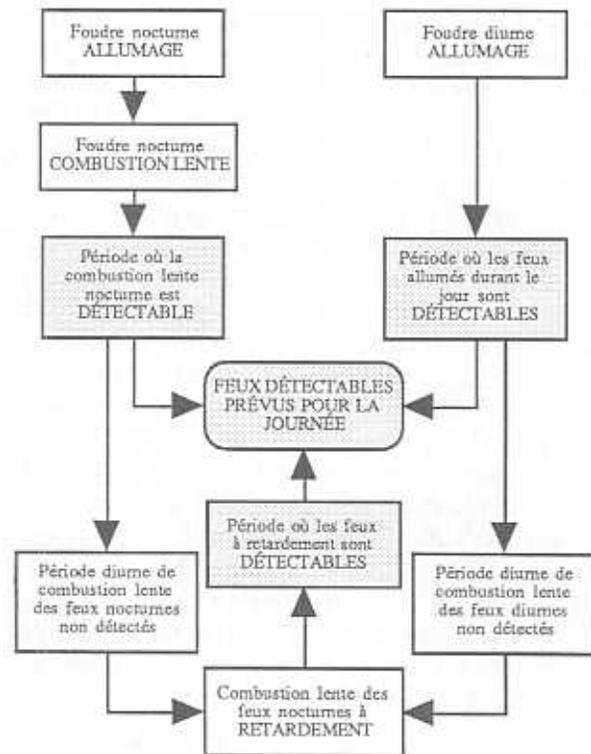


Figure 4. Enchaînement de la période où les feux causés par la foudre sont détectables.

ainsi que de la période d'allumage. Le tableau 7 montre la probabilité de détecter le feu selon ces deux paramètres.

La probabilité qu'un feu couvant devienne visible dépend de l'indice de propagation initiale (IPI), autre paramètre de la Méthode canadienne de l'Indice Forêt-Météo. Cet indice corrèle l'humidité des combustibles légers et la vitesse du vent à la vitesse de propagation de l'incendie. Le tableau 8 présente sept équations qui décrivent la probabilité de détecter un feu en fonction de l'indice de propagation initiale (IPI). Cette probabilité s'échelonne entre les indices 0 à 100, 0 représentant une probabilité nulle de détection, 100 la certitude que le feu dégagera énormément de fumée.

Formulation d'une prévision de l'incendie

Il n'est pas pratique de modéliser les probabilités d'allumage, de combustion lente et de détection découlant de chaque éclair qui survient au cours de la journée à cause de l'inexactitude des renseignements dont on dispose sur la foudre, les précipitations et les combustibles. Même si le système de détection de la foudre enregistre

Tableau 7. Probabilité de détecter les feux causés par la foudre

Probabilité	Indice de l'humus
Allumage durant la période dangereuse durant la nuit précédente	
Très faible	0 - 20
Faible	21 - 35
Modérée	36 - 50
Moyenne	51 - 65
Forte	66 - 80
Très forte	81 - 120
Extrêmement forte	121 +
Feux à retardement brûlant plus d'une nuit	
Très faible	0 - 19
Faible	20 - 30
Modérée	31 - 39
Moyenne	40 - 49
Forte	50 - 64
Très forte	65 - 80
Extrêmement forte	81 +

Tableau 8. Équations décrivant la probabilité de détection

Probabilité	Équation ^a
Très faible	8,00 ln (ISI)
Faible	13,07 ln (ISI)
Modérée	18,14 ln (ISI)
Moyenne	23,21 ln (ISI)
Forte	28,26 ln (ISI)
Très forte	33,35 ln (ISI)
Extrêmement forte	38,42 ln (ISI)

^a ln réfère au logarithme népérien.

instantanément les données relatives aux éclairs, à mesure que ceux-ci surviennent, beaucoup de ces derniers passent inaperçus. Pour ceux qui sont enregistrés, l'erreur de localisation peut atteindre des douzaines de kilomètres. Les données relatives aux précipitations ne sont communiquées que deux fois par jour, à 8 et à 13 h, provenant de 25 stations météorologiques fortement disséminées. Les renseignements sur les combustibles tirés des cartes des essences ligneuses ou des données des satellites ne sont souvent disponibles pour chaque maille de 50 km² dans une région forestière, que sous forme de sommaires. Si l'on tient compte de la faible résolution des données, ce système de prédiction est conçu pour deux prévisions quotidiennes: la première à 8 h, qui porte sur la période de propagation de la journée, et celle de 18 h, qui permet de prédire le nombre de feux auxquels on peut s'attendre durant les mêmes heures du

lendemain, compte tenu des prévisions de la foudre pour la soirée et la nuit. Toutes les prédictions se fondent sur des mailles régionales de 50 km².

Le processus de prédiction est lancé 10 jours avant la journée visée par la prédiction. L'activité de la foudre au cours de cette journée est traitée à partir des étapes de l'allumage, de la combustion lente et du maintien ainsi que de la détection. Les feux que l'on suppose détectables sont désormais omis. Les feux résiduels peuvent couvrir durant la nuit. Toutefois, ils peuvent se joindre à des feux qui viennent de s'allumer à cause de la foudre qui vient de tomber. Les feux couvants qui s'éteignent spontanément au cours de la nuit sont omis. Les feux qui se maintiennent continuent de couvrir jusque dans la période de propagation du lendemain. Durant ce temps, ils peuvent se joindre à des feux qui viennent de s'allumer. Une fraction de ces derniers peut devenir visible, ce qui fait que l'on peut les omettre. À partir de ce point, le cycle recommence. Le cycle des allumages de nouveaux feux, de la combustion lente et de l'omission des feux qui s'éteignent spontanément ou qui sont détectés se poursuit jusque dans la journée visée par les prévisions. Au cours de cette journée, les feux visibles représentent les feux prédits. La figure 4 montre le déroulement du processus.

La prédiction comporte sept étapes, comme suit:

Étape 1 Saisie de l'information. — Les renseignements météorologiques, l'indice forêt-météo, la nature du couvert forestier ainsi que les données sur les éclairs sont fournis, par le système de gestion de l'information de la base de données, de chaque maille de la région visée par les prédictions. Les renseignements météorologiques se fondent sur les prévisions de 8 h et sur les mesures effectivement prises à 13 h. Les renseignements sur la foudre sont résumés pour des périodes de 8 h. Ces données sont nécessaires pour les 10 journées précédentes à cause de la possibilité d'existence de feux à retardement.

Étape 2 Détermination de la relation entre la maille et l'orage. — Cette relation est déterminée par la subdivision de la région en neuf sous-régions. Le nombre total d'éclairs et le pourcentage de la superficie qui a été le théâtre de manifestations de la foudre dans chaque sous-région servent à

catégoriser l'orage dans l'une des cinq classes prévues de taille (tableau 1). La taille de l'orage sert ensuite, avec le nombre d'éclairs dans chaque maille, à déterminer la localisation de la maille à l'intérieur de l'orage ou sa proximité relativement au centre de l'orage (tableau 2).

Étape 3 Détermination du nombre d'éclairs longs à courant continu et de la quantité de pluie tombée dans chaque maille. — Le classement de l'orage et la localisation de chaque maille relativement à l'orage servent à déduire la proportion d'éclairs longs à courant continu (tableau 3) et à corriger la hauteur de pluie tombée (tableau 4). Le produit de la proportion d'éclairs longs à courant continu et du nombre d'éclairs donne une estimation du nombre d'éclairs à courant continu qui risquent d'allumer des feux de forêt. Afin de faire correspondre la répartition de la pluie avec celle de la foudre, on compare la localisation de la maille relativement à l'orage ainsi que la taille de ce dernier à la hauteur correspondante de pluie mesurée à la station météorologique la plus rapprochée. Un coefficient de correction de pluie est ensuite appliqué à la hauteur de la pluie tombée pour faire en sorte que la répartition de la pluie et celle de la foudre soient semblables.

Étape 4 Détermination du nombre de feux allumés. — La nature du combustible et son humidité sont importantes pour le calcul du nombre de feux qui s'allumeront. Les éclairs à courant continu se voient accorder une probabilité égale de frapper n'importe quel point à l'intérieur de la maille. Le nombre d'éclairs qui aboutissent dans chaque type de combustible est proportionnel à la superficie relative couverte par le combustible. Le type de combustibles dans la maille, les types de combustibles énumérés à l'annexe 1 et les équations de la probabilité d'allumage figurant au tableau 5 servent à estimer la probabilité d'allumage et le nombre prévu de feux allumés dans chaque type de combustible. L'indice du combustible léger est utilisé dans les équations de la probabilité d'allumage dans la litière des peuplements clairsemés de pin, l'humus brut des pessières et la mousse de sphaigne, tandis que l'humidité de l'IFC sert pour les trois catégories où le combustible est constitué de bois pourri. Chaque fois, la teneur en humidité est calculée selon l'estimation corrigée de la hauteur de pluie tombée.

Étape 5 Détermination du nombre de feux qui se maintiennent. — On détermine ensuite le nombre de feux allumés qui subsisteront jusqu'à la prochaine période de propagation. L'IFC est calculé pour la maille d'après l'indice de l'humus et l'indice de sécheresse corrigés, compte tenu de la pluie tombée. Huit équations (tableau 6) traduisent la probabilité que persiste le feu en fonction de l'IFC. Le taux de persistance varie de l'extrêmement élevé à l'extrêmement bas. Dans l'annexe 2 on trouvera les équations applicables de persistance fondées sur le type de combustibles dans la maille, l'indice du combustible léger, l'indice de l'humus et l'humidité relative. Par exemple, étant donné un indice du combustible léger et de l'humus de 88 et de 30, respectivement ainsi qu'une humidité relative de 35, l'humus brut de pinède qui aurait été allumé durant la nuit posséderait une probabilité extrêmement élevée de rester allumé. Le produit du nombre d'allumages et du taux de persistance donne le nombre prévu de feux qui dureront jusqu'à la prochaine période de propagation, dans chaque type de combustible.

Il faut prendre en considération trois situations de persistance du feu. Le taux de persistance des feux qui se déclarent durant le jour (de 8 à 18 h) est beaucoup plus élevé que celui des feux allumés la nuit (de 18 à 8 h). De fait, les feux allumés durant le jour passent directement à l'étape où on peut les détecter. La troisième situation est la combustion lente des feux à retardement. Le taux de persistance est alors maximal; les feux à retardement sont, par hypothèse, considérés comme brûlant dans un complexe de combustibles protégés contre la pluie, situation qui se prête à la combustion lente.

Étape 6 Détermination du nombre de feux détectables. — Dans une maille donnée, on détermine ensuite le nombre de feux qui, en se maintenant, pourront être détectés pendant la période de propagation. La probabilité de détecter le feu est une fonction de l'indice de propagation initiale, de l'indice de l'humus et du moment de l'allumage. Sept équations ont été construites pour déterminer la probabilité de détecter un feu qui varie en intensité de l'extrême au très faible, selon l'indice de l'humus et le moment de l'allumage (tableaux 7 et 8). L'expérience a montré que le moment de l'allumage est un facteur important de la probabilité de détection du feu. Les feux allumés

durant la période de propagation ou durant la nuit précédente sont moins susceptibles d'être détectés que les feux qui ont été des feux à retardement pendant plus d'une nuit. Le type de combustible n'est pas considéré comme un facteur important de la probabilité de détection. Par hypothèse, on pose que les feux qui brûlent dans différents combustibles ont la même probabilité d'être détectés. Les feux que l'on ne peut pas observer durant les heures dangereuses couvent jusque dans la soirée et, éventuellement, jusqu'à la prochaine période de propagation, le lendemain, moment à partir duquel le cycle recommence (figure 4). La prédiction des feux causés par la foudre dans la maille est le nombre de feux qui devraient pouvoir être détectés durant la période de propagation visée par les prédictions.

Étape 7 Prédiction régionale pour la période de propagation en cours. — On prédit le nombre de feux causés par la foudre susceptibles de se déclarer dans la région, durant la période de propagation en cours, par sommation des prédictions relatives à chaque maille. On peut exprimer la probabilité, par exemple que se déclarent au moins n feux, dans l'hypothèse que ce phénomène obéisse à la loi de Poisson et que les prédictions cumulatives pour les mailles soient un paramètre convenable de cette loi. Ces estimations de la probabilité sont souvent plus frappantes que le nombre prédit de feux, qui est un nombre non entier, souvent inférieur à un. De même, on peut affecter la prédiction d'un intervalle de confiance. Cette précision est utile aux faibles probabilités d'incendie, mais, aux fortes probabilités, cet intervalle peut devenir trop étendu et perdre sa signification. Cela semble montrer que la survenue d'un grand nombre d'incendies causés par la foudre n'obéit pas à une loi semblable à celle de Poisson.

Le tableau 9 donne un spécimen de sortie du programme de prédiction des feux causés par la foudre pour le 22 juin 1989, dans la région de l'Outaouais au Québec. On tente d'y résumer l'information disponible à toutes les étapes du processus de prédiction. Dans la première case, on résume les renseignements enregistrés en trois périodes distinctes, à partir de la veille, sur les éclairs négatifs et positifs observés dans la région. Dans la case suivante, on résume les renseignements se rapportant à la nuit précédente: le nombre de feux à retardement qui existaient au début de la soirée et le nombre de feux allumés du

fait de la foudre tombée durant cette nuit. La troisième case renferme des renseignements sur la persistance de ces feux. La quatrième case renseigne sur le nombre prévu de feux qui devraient s'allumer du fait de la foudre tombée au cours de la journée. La cinquième case donne des estimations du nombre de feux détectables qui trouvent leur origine dans les feux à retardement, les feux qui viennent de s'allumer au cours de la nuit antérieure et les feux qui s'allument pour la première fois au cours de la période de propagation actuelle. On donne également l'intervalle de la probabilité de survenue des feux prévus selon la loi de Poisson. La dernière case donne une estimation des feux qui devraient couvrir durant toute la journée jusqu'à la prochaine période de propagation.

Évaluation des prédictions

Dans le tableau 10, on compare les prédictions des feux causés par la foudre avec les feux survenus sur une période de cinq jours, en 1989, dans la région de Québec et de la Mauricie. On y donne le nombre d'éclairs observés au cours de la nuit qui a précédé (18 à 8 h) et durant la journée (8 à 18 h). Quatre tailles d'orage sont représentées, du petit au très gros. Dans tous les cas, la foudre est tombée durant l'après-midi.

La prédiction relative au 24 juin concerne un petit orage survenu dans le quadrant nord-ouest de la région au début de la journée: elle est assez précise. Les prédictions, qui se rapportent à la période du 25 au 27 juillet, concernent une période de trois jours où la foudre s'est manifestée. Le gros orage du 25 juillet survenu au début de l'après-midi a couvert les deux tiers de la région. Les données en temps réel sur les précipitations au cours de la période n'étaient pas disponibles, par conséquent le nombre prédit de feux était élevé. Pour le 26 juillet toutefois, la prédiction était assez précise, montrant que la fonction qui décrit la combustion lente et la persistance du feu sur une journée était fidèle. La prédiction se rapportant au 27 juillet concerne un très gros orage survenu à la fin de l'après-midi. Comme les mesures sur les précipitations n'étaient pas disponibles, le système de prédiction a mal fonctionné et donné des résultats erronés. La prédiction qui se rapporte au 30 août concerne un orage petit à moyen, survenu au début de la matinée: la prédiction est fidèle.

Tableau 9. Exemple de sortie du programme de prédiction

Prédiction des feux causés par la foudre pour le 22 juin 1989	
Renseignements sur la foudre au cours des trois dernières périodes	
Hier (de 8 h à 18 h)	
Éclairs négatifs	1079
Éclairs positifs	39
Hier soir (de 18 h à 8 h)	
Éclairs négatifs	2521
Éclairs positifs	33
Aujourd'hui (de 8 h à maintenant)	
Éclairs négatifs	4100
Éclairs positifs	87
Nombre prévu de feux allumés hier soir	
Feux à retardement, au début de la soirée	14,4
Nombre prévu de feux allumés par la foudre hier soir	104,8
Total	119,2
Nombre prévu de feux ayant survécu à la soirée d'hier	
Chez les feux à retardement d'hier soir	7,1
Chez les feux allumés hier soir	75,7
Total	83,8
Nombre prévu de feux allumés aujourd'hui	
Nombre prévu de feux allumés par la foudre aujourd'hui	55,7
Nombre prévu de feux détectables aujourd'hui	
Chez les feux à retardement d'hier soir	4,1
Chez les feux allumés hier soir	47,7
Chez les feux allumés aujourd'hui	35,6
Total	87,4
Limite inférieure du nombre prévu de feux détectés	23,4
Limite supérieure du nombre prévu de feux détectés	167,7
Feux à retardement susceptibles de se maintenir jusqu'à la prochaine période de propagation	33,5

Tableau 10. Comparaison des prédictions des feux causés par la foudre pour cinq journées, dans la région de Québec et de la Mauricie

Date	Manifestations de la foudre de la veille au soir (de 18 à 8 h)	Manifestations de la foudre au cours de la journée (de 8 à 18 h)	Nombre prévu de feux	Nombre réel de feux
24 juin 1989	65	160	5,5	7
25 juillet 1989	433	2728	40,3	24
26 juillet 1989	101	25	4,4	5
27 juillet 1989	270	5196	77,0	7
30 août 1989	127	1711	5,1	5

Le système de prédiction donne des résultats assez bons à bons pour les orages petits à moyens de la matinée et pour les orages moyens à gros de la nuit. De même, la fonction de combustion lente et de persistance du feu sur une journée semble assez juste. On obtient toutefois des prédictions insatisfaisantes pour les orages gros à très gros survenant l'après-midi, lorsque les données sur les précipitations et l'humidité des combustibles ne sont pas disponibles et lorsque la fonction décrivant la combustion lente porte sur plus de deux jours.

Sommaire

Le système de prédiction que nous avons décrit utilise comme données d'entrée des renseignements sur les éclairs, sur les types de combustibles, les estimations de la probabilité d'allumage et des connaissances générales sur le comportement du feu causé par la foudre afin de prédire les probabilités de survenue de ces feux, le lendemain, dans une vaste région forestière. À cette fin, on subdivise les vastes régions forestières en mailles d'environ 50 km². Selon la foudre observée dans chaque maille, on classe les orages selon la taille. À l'aide du classement de la taille des orages et du nombre d'éclairs observés dans chaque maille, on classe la position des mailles relativement à l'orage. La taille de l'orage et les caractéristiques spatiales de chaque maille servent ensuite à estimer la proportion d'éclairs à courant continu. La taille de l'orage dans chaque maille et la position de cette dernière relativement à l'orage sont ensuite comparées aux données pluviométriques de la station météorologique la plus rapprochée. Un facteur de correction de la hauteur des précipitations est ensuite déterminé afin que la répartition de la pluie et de la foudre correspondent. Le nombre de feux que l'on s'attend se voir s'allumer dans chaque type de combustible et dans chaque maille est ensuite estimé. Ensuite, on estime le nombre de feux que l'on s'attend de voir se maintenir en couvant. À ce point, on combine les feux à retardement, qui peuvent s'être maintenus pendant jusqu'à 10 jours avec les nouveaux feux couvants. Enfin, on estime le nombre de feux couvants qui devraient pouvoir être détectés durant la période de propagation visée par les prévisions. Le résultat final est une

prédiction des feux causés par la foudre dans chaque maille. On additionne ensuite les prédictions relatives à chaque maille et on les cartographie pour donner un bulletin régional de prédiction des probabilités d'incendie.

Ce processus de prédiction souffre de nombreuses faiblesses. L'inexactitude affligeant le nombre d'éclairs et l'emplacement de ces derniers fait particulièrement problème. Un autre problème réside dans les connaissances insuffisantes des processus de combustion lente et de persistance des feux. Le système décrit repose sur nombre d'opinions de spécialistes sur la nature des divers processus, dans une tentative de remédier à la piètre qualité des données et au manque de connaissances des processus véritables. Malgré ces inconvénients, les prédictions des feux causés par la foudre ont été assez dignes de confiance. Le système semble permettre des prévisions justes pour les gros orages couvrant de façon générale la région, qui surviennent au cours de la nuit et au début de la matinée. Les prédictions sont assez proches de la réalité. Toutefois, à l'égard des orages qui surviennent à la fin de l'après-midi, les résultats sont peu satisfaisants. Ces orages surviennent après que les stations météorologiques ont enregistré la hauteur des précipitations dans l'après-midi. En raison des renseignements inexacts sur les précipitations, les estimations de l'humidité des combustibles sont également erronées; par conséquent, la prédiction est peu fiable. Le système de prédiction est également peu fidèle pour ce qui concerne la modélisation des feux à retardement et le taux de survie des feux sur des périodes plus longues qu'une journée. D'autres travaux de recherche fondamentale sont nécessaires dans ces domaines. Des mesures plus précises et plus détaillées, saisies par les capteurs d'éclairs, les résultats de la détection des précipitations par radar, en temps réel, ainsi que les données numérisées sur la réserve de bois sur pied, sans oublier l'intégration de réseaux de systèmes experts et de réseaux neuronaux pour l'analyse et l'emploi de l'information, tout cela améliorera les prédictions. En attendant ces améliorations, le mécanisme décrit dans le présent rapport fournira une solution à court terme à la prédiction des feux causés par la foudre.

Références

- Baughman, R.G.; Schmid, C.W. 1977. Alaskan lightning storm characteristics. USDA For. Serv. Res. Note, INT-235, Intermt. For. and Range Exp. Stn., Ogden, UT.
- Bellaschi, P.L. 1947. Lightning and 60-cycle power tests on wood-pole line insulation. AIEE Trans. 66: 838-847.
- Flannigan, M.D.; Wotton, B.M. 1991. Lightning-ignited forest fires in northwestern Ontario. Can. J. For. Res. 21: 277-287.
- Fosberg, M.A. 1972. Theory of precipitation effects on dead cylindrical fuels. For. Sci. 18:98-108.
- Fuquay, D.M. 1980. Lightning that ignites forest fires. Proc. 6th Conf. on Fire and For. Met., Seattle, WA, 109-112.
- Fuquay, D.M.; Baugman, R.G.; Taylor, A.R.; Hawe, R.G. 1967. Documentation of lightning discharges and resultant forest fires. USDA For. Serv. Res. Note, INT-68, Intermt. For. and Range Exp. Stn., Ogden, UT.
- Fuquay, D.M.; Baughman R.G.; Latham, D.J. 1979. A model for predicting lightning fire ignition in wildland fuels. USDA For. Serv. Res. Pap., INT-217, Intermt. For. and Range Exp. Stn., Ogden, UT.
- Kitagawa, N.; Brook, M.; Workman, E.J. 1962. Continuing currents in cloud-to-ground lightning discharges. J. Geophys. Res. 67:637-647.
- Kourtz, P.H. 1974. A system to predict the occurrence of lightning-caused forest fires. For. Fire Res. Inst., Ottawa, Ont., Inf. Rep. FF-X-47.
- Kourtz, P.H. 1977. Structure of the 1977 forest fire occurrence prediction model. For. Fire Res. Inst., Ottawa, Ont.
- Kourtz, P.H. 1984. Decision-making for centralized forest fire management. For. Chron. 60:320-327.
- Latham, D.L. 1980. A channel model for long arcs in air. Phys. Fluids 23: 1710-1715.
- Latham, D.L. 1989. Characteristics of long vertical DC arc discharges. USDA For. Serv. Res. Note, INT-407, Intermt. For. and Range Exp. Stn., Ogden, UT.
- Latham, D.L.; Schlieter, J.A. 1989. Ignition probabilities of wildland fuels based on simulated lightning discharges. USDA For. Serv. Res. Note, INT-411, Intermt. For. and Range Exp. Stn., Ogden, UT.
- Levin, Z.; Ziv, A. 1974. The electrification of thunderclouds and the rain gush. J. Geophys. Res. 79: 2699-2704.
- Marshall, J.S.; Radhakant, S. 1978. Radar precipitation maps as lightning indicators. J. Appl. Meteorol. 17: 206-212.
- Noggle, R.C.; Krider, E.P.; Vance, D.L.; Barker, K.B. 1976. A lightning-direction-finding system for forest fire detection. Proc. 4th Natl. Conf. on Fire and Met., St. Louis, MO.
- Orville, R.E. 1972. Lightning between clouds and ground. Weatherwise (June): 108-111.
- Orville, R.E. 1990. Peak-current variations of lightning return strokes as a function of latitude. Nature, 343: 149-151.
- Pieppgrass, M.V.; Krider, E.P.; Moore, C.B. 1982. Lightning and surface rainfall during Florida thunderstorms. Geophys. Res. Pap. 87: 11 193-11 201.
- Ramsey, G.S.; Higgins, D.G. 1986. Statistiques sur les incendies de forêt au Canada, 1981, 1982, 1983. Institut forestier national de Petawawa, Rapport d'information PI-X-49 E/F.
- Shindo, T.; Uman, M.A. 1989. Continuing current in negative cloud-to-ground lightning. J. Geophys. Res., 94: 5189-5198.
- Taylor, A.R. 1969. Lightning effects on the forest complex. Annual Tall Timbers Fire Ecol. Conf. Proc., Tallahassee, FL, 9: 127-150.
- Uman, M.A.; Krider, E.P. 1989. Natural and artificially initiated lightning. Science, 246: 457-464.
- Van Wagner, C.E. 1987. Élaboration et structure de la Méthode canadienne de l'Indice Forêt-Météo. Service canadien des forêts, Institut forestier national de Petawawa, Rapport technique de foresterie 35F.
- Wilson, C.T.R. 1916. Proc. R. Soc. London, A92: 555.

**Annexe 1. — Correspondance entre les types de combustibles
du Québec et ceux de Latham et de Schlieter (1989)**

Types de combustibles du Québec	Types de combustibles de Latham et de Schlieter
Résineux Régénération Jeune bois Pin blanc Autres pins et feuillus intolérants Peuplements à maturité	Mousse de sphaigne Litière de pinède Humus brut de pinède Humus brut de pinède Humus brut de pinède
Bois mélangés Régénérations Jeunes peuplements Peuplier faux-tremble et résineux Pin blanc et feuillus intolérants Autres pins et feuillus intolérants Bouleau à papier, bouleau jaune ainsi que résineux Peuplements à maturité	Mousse de sphaigne Humus brut de pessière Humus brut de pessière
Feuillus Régénérations Jeunes peuplements Intolérants Bouleau à papier et bouleau jaune Peuplier faux-tremble Érable et bouleau Peuplements à maturité	Bois pourri en gros morceaux Bois pourri en gros morceaux
Terrains non cultivés ou jachères	s.o.
Terrains brûlés	s.o.
Terrains de coupe à blanc	Litière de pinède
Terrains attaqués par les insectes et la maladie	Humus brut de sapinière
Plantations	Mousse de sphaigne
Marécages	s.o.
Terrains agricoles	s.o.
Eau	s.o.

Annexe 2. — Équations de la persistance du feu fondées sur le type de combustible, l'indice du combustible léger (ICL), l'indice de l'humus (IH) et l'humidité relative (HR)

Type de combustible	ICL	IH	HR	Équation de la probabilité de persistance ^a
Feux dont l'allumage survient en plein jour				
Litière de pinède clairsemée	0 - 79	0 - 14	56 +	Très faible
	80 - 83	15 - 19	46 - 55	Faible
	84 - 87	20 - 29	36 - 45	Modérée
	88 - 91	30 - 39	26 - 35	Moyenne
	92 +	40 +	0 - 25	Forte
Humus brut de pinède	0 - 74	0 - 14	56 +	Modérée
	75 - 79	15 - 19	46 - 55	Moyenne
	80 - 84	20 - 26	41 - 45	Forte
	85 - 88	27 - 32	31 - 40	Très forte
	89 +	33 +	0 - 30	Extrêmement forte
Humus brut de sapinière	0 - 74	0 - 14	56 +	Faible
	75 - 79	15 - 19	46 - 55	Modérée
	80 - 84	20 - 26	41 - 45	Moyenne
	85 - 88	27 - 32	31 - 40	Forte
	89 +	33 +	0 - 30	Très forte
Humus brut de pessière	0 - 74	0 - 14	56 +	Très faible
	75 - 79	15 - 19	46 - 55	Faible
	80 - 84	20 - 26	41 - 45	Modérée
	85 - 88	27 - 32	31 - 40	Moyenne
	89 +	33 +	0 - 30	Forte
Mousse de sphaigne	0 - 79	0 - 19	46 +	Ultra faible
	80 - 84	20 - 26	41 - 45	Très faible
	85 - 88	27 - 32	31 - 40	Faible
	89 +	33 +	0 - 30	Modérée
Bois pourri	0 - 74	0 - 14	56 +	Faible
	75 - 79	15 - 19	46 - 55	Modérée
	80 - 84	20 - 26	41 - 45	Moyenne
	85 - 88	27 - 32	31 - 40	Forte
	89 +	33 +	0 - 30	Très forte
Feux dont l'allumage survient la nuit				
Litière de pinède clairsemée	0 - 79	0 - 14	56 +	Ultra faible
	80 - 83	15 - 19	46 - 55	Très faible
	84 - 87	20 - 29	36 - 45	Faible
	88 - 91	30 - 39	26 - 35	Modérée
	92 +	40 +	0 - 25	Moyenne
Humus brut de pinède	0 - 79	0 - 14	56 +	Moyenne
	80 - 83	15 - 19	46 - 55	Forte
	84 - 87	20 - 29	36 - 45	Très forte
	88 +	30 +	0 - 35	Extrêmement forte

Annexe 2 (suite)

Type de combustible	ICL	IH	HR	Équation de la probabilité de persistance ^a
Humus brut de sapinière	0 - 79	0 - 14	56 +	Modérée
	80 - 83	15 - 19	46 - 55	Moyenne
	84 - 87	20 - 29	36 - 45	Forte
	88 +	30 +	0 - 35	Très forte
Humus brut de pessière	0 - 79	0 - 14	56 +	Très faible
	80 - 83	15 - 19	46 - 55	Faible
	84 - 87	20 - 29	36 - 45	Modérée
	88 - 91	30 - 39	26 - 35	Moyenne
	92 +	40 +	0 - 25	Forte
Mousse de sphaigne	0 - 83	0 - 19	46 +	Ultra faible
	84 - 87	20 - 29	36 - 45	Très faible
	88 - 91	30 - 39	26 - 35	Faible
	92 +	40 +	0 - 25	Modérée
Bois pourri	0 - 79	0 - 14	56 +	Faible
	80 - 83	15 - 19	46 - 55	Modérée
	84 - 87	20 - 29	36 - 45	Moyenne
	88 - 91	30 - 39	26 - 35	Forte
	92 +	40 +	0 - 25	Très forte
Feux à retardement				
Litière de pinède clairsemée	0 - 79	0 - 14	56 +	Très faible
	80 - 83	15 - 19	46 - 55	Faible
	84 - 87	20 - 29	36 - 45	Modérée
	88 +	30 +	0 - 35	Moyenne
Humus brut de pinède	0 - 74	0 - 10	46 +	Moyenne
	75 - 79	11 - 14	41 - 45	Forte
	80 - 83	15 - 19	36 - 40	Très forte
	84 +	20 +	0 - 35	Extrêmement forte
Humus brut de sapinière	0 - 74	0 - 10	61 +	Modérée
	75 - 79	11 - 14	56 - 60	Moyenne
	80 - 83	15 - 19	46 - 55	Forte
	84 - 87	20 - 29	36 - 45	Très forte
	88 +	30 +	0 - 35	Extrêmement forte
Humus brut de pessière	0 - 79	0 - 14	56 - 60	Faible
	80 - 83	15 - 19	46 - 55	Modérée
	84 - 87	20 - 29	36 - 45	Moyenne
	88 +	30 +	0 - 35	Forte
Mousse de sphaigne	0 - 79	0 - 14	56 +	Très faible
	80 - 83	15 - 19	46 - 55	Faible
	84 - 87	20 - 29	36 - 45	Modérée
	88 +	30 +	0 - 35	Moyenne
Bois pourri	0 - 79	0 - 14	56 +	Moyenne
	80 - 83	15 - 19	46 - 55	Forte
	84 - 87	20 - 29	36 - 45	Très forte
	88 +	30 +	0 - 35	Extrêmement forte

^a Consulter le tableau 6 pour la formulation des équations.



