



Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada



Mises à jour et révisions de la Méthode canadienne de prévision du comportement des incendies de forêt de 1992

B.M. Wotton, M.E. Alexander, S.W. Taylor
2009

Rapport d'information GLC-X-10F

Centre de foresterie des Grands Lacs,
Sault Ste. Marie (Ontario)



Canada

Mises à jour et révisions de la Méthode canadienne de prévision du comportement des incendies de forêt de 1992

B.M. Wotton

Ressources naturelles Canada
Service canadien des forêts
Centre de foresterie des Grands Lacs
1219, rue Queen Est
Sault Ste. Marie (Ontario) P6A 2E5

M.E. Alexander

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

S.W. Taylor

Ressources naturelles Canada
Service canadien des forêts
Centre de foresterie du Pacifique
506 West Burnside Road
Victoria (Colombie-Britannique) V8Z 1M5

Publié par :

Ressources naturelles Canada
Service canadien des forêts
Centre de foresterie des Grands Lacs

Rapport d'information no GLC-X-10

2009

Wotton, B. M. (Brian Michael), 1967-

Mises à jour et révisions de la Méthode canadienne de prévision du
comportement des incendies de forêt de 1992 / B.M. Wotton, M.E. Alexander, S.W. Taylor.

(Rapport d'information, 0832-7122 ; GLC-X-10)

Publ. aussi en anglais sous le titre: Updates and revisions to the 1992 Canadian
Forest Fire Behavior Prediction System.

Comprend un résumé en anglais.

Également disponible sur l'Internet.

Comprend des réf. bibliogr.: p.

ISBN 978-1-100-90483-2

No de cat.: Fo123-2/10-2009F

1. Méthode canadienne de prévision du comportement des incendies de
forêt--Guides, manuels, etc. 2. Forêts--Incendies--Prévision--Canada--Guides,
manuels, etc. 3. Forêts--Incendies--Prévision--Guides, manuels, etc. 4. Forêts
--Incendies--Prévention et maîtrise--Guides, manuels, etc. I. Alexander, Martin E
II. Taylor, Stephen W. (Stephen William), 1959- III. Centre de foresterie des
Grands Lacs IV. Titre. V. Collection: Rapport d'information (Centre de foresterie
des Grands Lacs) GLC-X-10

SD421.36 W6714 2008

634.9'6180971

C2009-980104-3

© Sa Majesté la Reine du Chef du Canada 2009



Wotton, B.M.; Alexander, M.E.; Taylor, S.W. 2009. Mises à jour et révisions de la Méthode canadienne de prévision du comportement des incendies de forêt de 1992. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie des Grands Lacs, Sault Ste. Marie (Ontario), Canada. Rapport d'information GLC-X-10F, 45p.

RÉSUMÉ

Le présent rapport décrit un certain nombre de modifications apportées à la version de 1992 de la Méthode canadienne de prévision du comportement des incendies (PCI) de forêt et porte sur plusieurs anomalies mathématiques et physiques qui ont été décelées dans les modèles sous-jacents au fil des 15 dernières années d'utilisation opérationnelle de la méthode au Canada. Il présente également plusieurs équations additionnelles permettant de calculer quelques éléments qui ne faisaient pas partie de la version originale de la méthode. Ces mises à jour et révisions ne constituent toutefois pas des modifications importantes à la structure de la méthode PCI et viennent surtout rectifier et clarifier certains modèles de la méthode. La plupart des utilisateurs pourront sans difficulté appliquer ces modifications mathématiques de la méthode PCI aux produits de transfert de la technologie actuellement disponibles (p. ex., guides et outils de terrain, produits logiciels). Pour terminer, le rapport présente 20 jeux d'essai officiels grâce auxquels les développeurs d'applications basées sur la méthode PCI pourront vérifier leurs produits en regard de repères connus. Il est important de bien comprendre que le présent document ne constitue pas une nouvelle version de la Méthode canadienne de prévision du comportement des incendies de forêt (décrite dans le rapport d'information ST-X-3F intitulé *Élaboration et structure de la Méthode canadienne de prévision du comportement des incendies de forêt*), mais plutôt un supplément à cette publication. Pour que l'application de la méthode PCI soit adéquate et à jour, il faut s'appuyer sur l'information contenue dans ces deux rapports.

Wotton, B.M.; Alexander, M.E.; Taylor, S.W. 2009. Updates And Revisions to the 1992. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Great Lakes Forestry Centre, Sault Ste. Marie, Ontario, Canada. Rapport d' information GLC-X-10F, 45p.

ABSTRACT

This report documents a number of changes to the 1992 release of the Canadian Forest Fire Behavior Prediction (FBP) System, and addresses several mathematical and physical inconsistencies in its underlying models that have been identified over the last 15 years of its operational use throughout Canada. Several additional equations are included to allow calculations of a few elements not included in the original release of the system. However, these updates and revisions do not represent significant changes to the structure of the FBP System, but are largely modifications and clarifications of some of the models within the system. The implementation of these mathematical changes to the FBP System into existing technology transfer products (e.g., field guides and aids, software products), should be virtually transparent to most users. Finally, 20 formal test cases are presented to allow the developers of applications based on the FBP System to test their products against known benchmarks. It is important to understand that this document does not represent a new version of the Canadian FBP System (described in ST-X-3 "The Development and Structure of the Canadian Forest Fire Behavior System"), but is rather a supplement to that publication. A correct and up-to-date implementation of the FBP System must rely on the information contained in both these reports.

TABLE de MATÈRES

RÉSUMÉ /ABSTRACT	i, ii
1.0 INTRODUCTION.....	1
2.0 ERRATA AU RAPPORT D' INFORMATION GLC-X-10F	4
3.0 RÉVISIONS ET AMÉLIORATIONS.....	4
3.1 Consommation du combustible de surface	5
3.1.1 Modèle de la consommation du combustible de surface dans le type C-1	5
3.1.2 Valeurs par défaut de la quantité de combustible herbacé	5
3.2 Calculs de la vitesse de propagation	6
3.2.1 Modèles du comportement de l'incendie dans les types de combustible M-3 et M-4.....	6
3.2.1.1 Type de combustible M-3 : forêt mixte à sapins baumiers morts, sans feuilles	7
3.2.1.1 Type de combustible M-3 : forêt mixte à sapins baumiers morts, sans feuilles	8
3.2.2 Effet du degré de fanage sur la vitesse de propagation dans les types de combustible herbacé O-1a et O-1b.....	8
3.2.3 Effet de la pente sur la vitesse de propagation	10
3.2.3.1 Maximum de pente du terrain	10
3.2.3.2 Calcul de l'indice de propagation initiale en fonction de l'équivalent de la pente pour tous les types de combustible, sauf les types M-1/2 et M-3/4 (forêts mixtes)	10
3.2.3.3 Calcul de l'indice de propagation initiale en fonction de l'équivalent de la pente pour les types de combustible M-1 et M-2	11
3.2.3.4 Calcul de l'indice de propagation initiale en fonction de l'équivalent de la pente pour les types de combustible M-3 et M-4	12
3.2.3.5 Calcul de l'équivalent vitesse du vent dans des conditions extrêmes	12
3.2.4 Estimation de la hauteur de la base de la cime dans le type de combustible C-6	13
3.2.5 Modèle à deux équations de la vitesse de propagation dans le type de combustible C-6.....	13
3.3 Consommation du combustible des cimes	14
3.4 Variation diurne du comportement potentiel du feu	14
3.5 Accélération d'un foyer ponctuel dans des types de combustible à couvert fermé	15
3.6 Croissance elliptique de l'incendie	15
3.6.1 Rapport longueur/largeur durant la phase d'accélération de la croissance d'un foyer ponctuel ...	15
3.6.2 Accélération d'un foyer ponctuel d'incendie et modèle à deux équations de la vitesse de propagation dans le type de combustible C-6.....	17
3.6.3 Calcul de la vitesse de propagation autour du périmètre d'un incendie elliptique.....	18
3.7 Sommaire des révisions au rapport ST-X-3F	21
4.0 JEUX D'ESSAI	21
4.1 Description.....	21
4.2 Exemples de type de combustible et effets vérifiés	22
4.3 Intrants et résultats des jeux de données d'essai	24
5.0 ANALYSE	25
6.0 CONCLUSIONS	30
7.0 REMERCIEMENTS	31
8.0 BIBLIOGRAPHIE	31
ANNEXE 1 : LISTE DES SYMBOLES ET DES ABRÉVIATIONS	42
ANNEXE 2 : SOMMAIRE DES ÉQUATIONS NOUVELLES ET MODIFIÉES.....	44

Figure 1. Structure de la Méthode canadienne de prévision du comportement des incendies (PCI) de forêt.	1
Figure 2. Le nouveau modèle de la consommation du combustible de surface pour le type de combustible C-1 (pessière à lichens) de la méthode PCI par rapport au modèle initial et aux données empiriques existantes.	6
Figure 3. Courbes de la vitesse de propagation établies à l'aide de la nouvelle équation pour le type de combustible M-3 (forêt mixte à sapins baumiers morts, sans feuilles) de la méthode PCI, pour une plage de valeurs du pourcentage de sapins baumiers morts (% $S_{b,m}$)	8
Figure 4. Courbes de la vitesse de propagation établies à l'aide de la nouvelle équation pour le type de combustible M-4 (forêt mixte à sapins baumiers morts, avec feuilles) de la méthode PCI, pour une plage de valeurs du pourcentage de sapins baumiers morts (% $S_{b,m}$)	9
Figure 5. Nouvelle équation corrélant le degré de fanage des herbes et la vitesse relative de propagation du feu dans les prairies (« nouveau modèle »), comparée à la formule d'origine utilisée dans le rapport ST-X-3F (« ancien modèle »), et relation actuellement utilisée en Australie pour évaluer le danger de feu d'herbes.	11
Figure 6. Relation entre le paramètre de l'humidité du combustible $f(ICI)$ utilisé pour calculer l'ICL, tel que défini dans la méthode IFM et représenté par l'équation 52, et le paramètre estimé à l'aide de l'équation 93	17
Figure 7. Représentation schématique d'un incendie de forme elliptique montrant la direction de la propagation sur les flancs ($V_{f,éq}$) et en un point arbitraire P du périmètre ($V_{t\theta}$)	21
Tableau 1. Liste des types de combustible actuels de la Méthode canadienne de prévision du comportement des incendies (PCI) de forêt	2
Tableau 2. Valeurs maximales approximatives de l'indice de propagation initiale en fonction de l'équivalent de la pente ($IPI_{p,z}$) dans tous les types de combustible de la méthode PCI, sauf les quatre types des forêts mixtes (M-1, M-2, M-3 et M-4)	13
Tableau 3. Exemple de calcul de la vitesse de propagation d'un incendie de forme elliptique. Les conditions sont les suivantes : incendie dans un type de combustible C-2 (pessière boréale) de la méthode PCI, en terrain plat, avec un ICL de 92, une vitesse du vent de 15 km/h et un ICD de 64. On obtient donc : $L/l = 1,98$, $V_{t.f} = 17,16$, $V_{f,éq} = 4,88$, et $V_{a,éq} = 2,16$	22
Tableau 4. Intrants de chaque jeu d'essai décrit dans la section 4.2. Les titres de colonnes correspondent à la liste des symboles et abréviations de l'annexe II du rapport ST-X-3F ou de l'annexe 1 du présent document, sauf indication contraire.	27
Tableau 5. Résultats primaires de la méthode PCI pour les jeux d'essai définis dans la section 4.2. Les titres de colonnes correspondent à la liste des symboles et abréviations de l'annexe II du rapport ST-X-3F ou de l'annexe 1 du présent document, sauf indication contraire.	28
Tableau 6. Résultats secondaires de la méthode PCI pour les jeux d'essai définis dans la section 4.2. Les titres de colonnes correspondent à la liste des symboles et abréviations de l'annexe II du rapport ST-X-3F ou de l'annexe 1 du présent document, sauf indication contraire.	29

1.0 INTRODUCTION

La Méthode canadienne d'évaluation des dangers d'incendie de forêt (MCEDIF) élaborée par le Service canadien des forêts comprend deux composantes principales, soit la Méthode canadienne de l'indice Forêt-météo (IFM) et la Méthode canadienne de prévision du comportement des incendies (PCI) de forêt (Taylor et Alexander, 2006). La méthode IFM a recours à six indices pour fournir une évaluation numérique relative du danger de feu potentiel dans un type de combustible étalon. La méthode PCI (figure 1) est une série complexe d'équations empiriques qui intègrent les principaux facteurs influant sur la propagation et l'intensité des incendies de forêt pour établir des prévisions quantitatives sur le comportement potentiel du feu dans un certain nombre de types de combustible présents au Canada

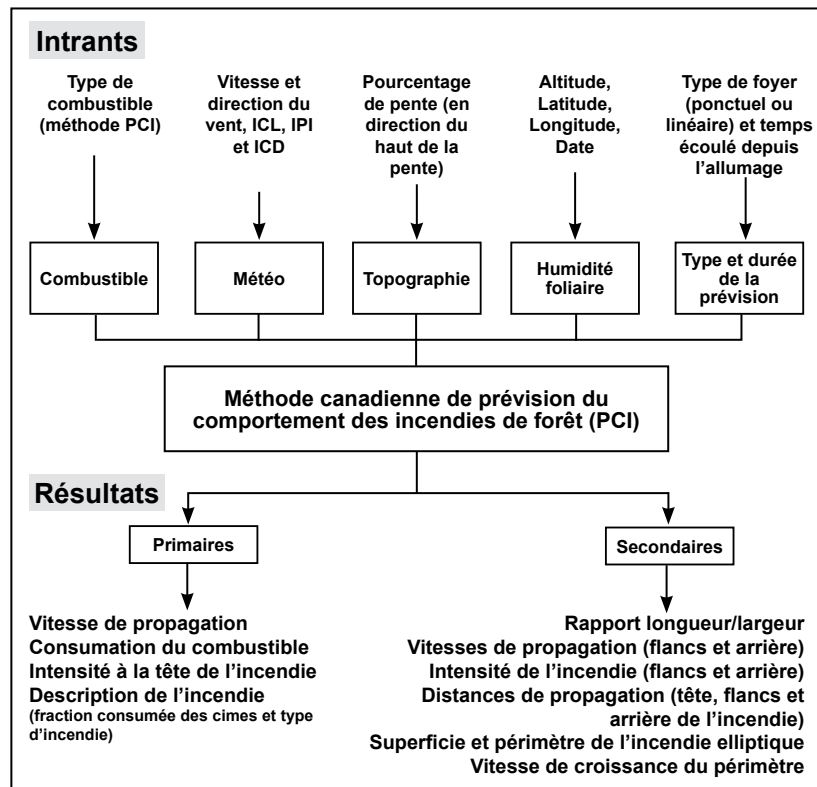


Figure 1. Structure de la Méthode canadienne de prévision du comportement des incendies (PCI) de forêt.

(Alexander et Stocks, 1998), et ont plus récemment fait appel à des médias interactifs comme des cours de formation sur CD-ROM et des pages Web² (Taylor et Alexander, 2006). Ces efforts se sont poursuivis et, à la suite de la publication du rapport ST-X-3F, ont mis l'accent sur la méthode PCI et ont notamment donné lieu à la publication d'articles en présentant une vue d'ensemble (p. ex., Hirsch, 1993; Alexander et al., 1996). Taylor et al. (1997) ont élaboré un manuel de terrain de la méthode PCI. Ce dernier, connu sous le nom de « livre rouge », présente une version simplifiée de la méthode PCI, convenant à des applications sur le terrain de la méthode (p. ex., prévision en temps quasi-réel du comportement d'un incendie de forêt). Les résultats de la méthode y sont présentés sous forme de tables à consulter. Ce

(tableau 1). Les principes à la base de l'élaboration de la méthode PCI remontent au milieu des années 1920, lorsqu'a débuté la recherche sur les incendies de forêt au Canada (Van Wagner, 1990). Le gros de la méthode a été officiellement élaboré durant les années 1970 et 1980 (Lawson et al., 1985; Van Wagner, 1989). Les détails de l'élaboration et de la structure mathématique de la méthode PCI ont été publiés en 1992 dans le rapport d'information ST-X-3F de Forêts Canada intitulé *Élaboration et structure de la Méthode canadienne de prévision du comportement des incendies de forêt* (Groupe de travail sur les dangers d'incendie, Forêts Canada, 1992)¹. Ce document sera ci-après simplement appelé « rapport ST-X-3F ». La méthode PCI est actuellement utilisée à l'échelle opérationnelle partout au Canada, dans certains États américains (p. ex., Alaska, Minnesota) et en Nouvelle-Zélande (Seli, 1999; Pearce et Anderson, 2008)

Au cours des dernières décennies, les activités de transfert de l'information et de la technologie de la MCEDIF ont pris diverses formes, allant de guides et d'outils de terrain à des affiches murales

¹ Comme en fait état le rapport ST-X-3F, l'élaboration de la méthode PCI est le fruit des efforts déployés à partir de 1981 et pendant environ une dizaine d'années par les membres suivants de l'ancien Groupe de travail sur les dangers d'incendie du Service des forêts du fédéral : C.E. Van Wagner et R.S. McAlpine (Institut forestier national de Petawawa, Chalk River (Ontario)), B.J. Stocks et T.J. Lynham (Centre de foresterie des Grands Lacs, Sault Ste. Marie (Ontario)), M.E. Alexander (Centre de foresterie du Nord, Edmonton (Alberta)) et B.D. Lawson (Centre de foresterie du Pacifique Centre, Victoria (Colombie-Britannique)).

² http://www.nofc.forestry.ca/fire/research/environment/cffdrs/cffdrs_f.htm

Table 1. Liste des types de combustible actuels de la Méthode canadienne de prévision du comportement des incendies (PCI) de forêt

Groupe/code	Nom descriptif
Conifères	
C-1	Pessière à lichens
C-2	Pessière boréale
C-3	Pins gris ou pins tordus à maturité
C-4	Jeunes pins gris ou pins tordus
C-5	Pins rouges et pins blancs
C-6 ^a	Plantation de conifères
C-7	Pins ponderosa et douglas
Feuillus	
D-1	Peupliers faux-trembles sans feuilles
Forêts mixtes	
M-1 ^b	Forêt boréale mixte sans feuilles
M-2 ^b	Forêt boréale mixte avec feuilles
M-3 ^c	Forêt mixte à sapins baumiers morts, sans feuilles
M-4 ^c	Forêt mixte à sapins baumiers morts, avec feuilles
Rémanents	
S-1	Rémanents de pins gris ou de pins tordus
S-2	Rémanents d'épinettes et de sapins baumiers
S-3	Rémanents de thuyas, de pruches et de douglas côtiers
Secteurs ouverts	
O-1a ^d	Enchevêtrement d'herbes aplaties
O-1b ^d	Herbes sur pied

^aPeut varier selon la hauteur de la base de la cime.

^bIl faut préciser le pourcentage de conifères entrant dans la composition du peuplement.

^cIl faut préciser le pourcentage de sapins baumiers morts.

^dIl faut préciser le degré de fanage des herbes, et il est possible de préciser la quantité de combustible.

manuel a été préparé afin d'aider le personnel qui n'a pas facilement accès à des applications informatiques à effectuer une première évaluation des résultats de la méthode PCI. Hirsch (2000) a élaboré un guide pratique et convivial qui présente des diagrammes, des exemples et des exercices qui aident à comprendre les fondements de la méthode PCI. Il est également l'auteur d'un programme de formation interactive et de référence sur CD-ROM multimédia (vidéo, audio, texte, graphiques, photos et animation) (1998) qui explique la méthode PCI aux utilisateurs. Une affiche murale présentant des photographies en couleurs des peuplements représentatifs de chacun des 16 types de combustible de la méthode PCI a également été préparée (de Groot, 1993). L'affiche de Stocks et Hartley (1995) illustre la gamme d'intensité du feu de certains brûlages expérimentaux qui ont été utiles à l'élaboration des types de combustible C-3 (pins gris ou pins tordus à maturité), C-4 (jeunes pins gris ou pins tordus) et S-1 (rémanents de pins gris ou de pins tordus)

de la méthode PCI et est analogue à la présentation d'Alexander et de Lanoville (1989) sur le type de combustible C-1 (pessière à lichens). L'affiche de Cole et d'Alexander (1995) sur le type de combustible C-2 (pessière boréale) présente un graphique permettant de déterminer la classe d'intensité à la tête de l'incendie (parmi les six existantes)³, le type d'incendie (incendie de surface, feu intermittent de cimes et feu continu de cimes) et la fraction consommée des cimes à partir de l'indice de propagation initiale et de l'indice du combustible disponible de la méthode IFM. Elle est accompagnée d'une table qui fournit des renseignements additionnels sur le potentiel d'incendie et les incidences sur la lutte (Alexander et Cole, 1995). Fogarty et Alexander (1999) ont élaboré une « fiche format de poche sur le comportement d'un feu d'herbes » qui est basée sur le type de combustible O-1b (herbes sur pied) et permet de juger rapidement du comportement potentiel du feu le pire ou presque dans les prairies (Alexander et Fogarty, 2002). Des modèles de la probabilité d'allumage par des flammes vives ont été élaborés à l'égard de plusieurs types de combustible de la méthode PCI (Lawson et Dalrymple, 1996). L'édition révisée du guide sur les conditions météorologiques de la MCEIDIF présente d'autres données d'interprétation de la méthode PCI (Lawson et Armitage, 2008).

Les concepteurs de la méthode PCI s'attendaient à ce que les organismes individuels de gestion des incendies dressent des cartes des types de combustible de la méthode PCI à partir des données d'inventaire forestier et d'autres données (p. ex., images de télédétection). C'est ce que chaque organisme canadien a fait pour les zones relevant de sa compétence, à des résolutions différentes (p. ex., Tymstra et Ellehoj, 1994; Wilson et al., 1994; Hawkes et al., 1995; Power, 1996; Ember Research Services Ltd., 2000; Pelletier et al., 2002; Nadeau et al., 2005; Nadeau et Englefield, 2006).

Les organismes de gestion des incendies du Canada et de l'étranger ont largement utilisé la méthode PCI (Beck, 2005; Taylor et Alexander, 2006), l'intégrant à un large éventail de systèmes d'aide à la décision servant à des fins opérationnelles. Au nombre d'exemples de son utilisation figurent les mesures de prévention des incendies (ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, 2008), le système de préparation de la présuppression (Beck, 2004), les alertes concernant la sécurité des équipes de suppression (Beck et al., 2002), l'ouverture d'une brèche dans un coupe-feu (Alexander et al., 2004, 2006), les projections de la croissance d'un incendie (Tymstra, 2002; Anderson et al., 2007a; Tymstra et al., 2008) et l'évaluation de la menace d'incendie de forêt (Hawkes et Beck, 1997). Une foule de travaux de recherche et de développement ont également utilisé directement ou indirectement la méthode PCI. Ils ont notamment porté sur des directives et plans de classification du danger de feu (Pearce et Alexander, 1994; de Groot et al., 2004; Alexander, 1994, 2008), la modélisation des émissions de carbone (Amiro et al., 2001; de Groot, 2006; de Groot et al., 2007; Lavoué et al., 2007), le changement climatique (Parisien et al., 2005a), des analyses du régime des feux (Flannigan, 1993; Flannigan et Wotton, 1994), les effets du feu (de Groot et al., 2003), des évaluations du comportement potentiel des incendies (Taylor et al., 1998; Anderson et Englefield, 2001; Hely et al., 2001; Lavoie, 2004), les aspects climatologiques (Kafka et al., 2000; Amiro et al., 2004), des stratégies de gestion du feu et des combustibles (Sanchez-Guisandez et al., 2002, 2007; Hirsch et al., 2004; Parisien et al., 2003, 2005b, 2007; Beck et Simpson, 2007), la modélisation mathématique de la croissance d'un incendie (Richards, 1994, 1999; Anderson et al., 1998, 2007b; Anderson, 2002), la modélisation du comportement d'un incendie en fonction de la sécurité des équipes de suppression (Baxter et al., 2004; Alexander et al., 2005) et les systèmes d'aide à la décision sur la gestion des incendies (Trevis, 2005).

La méthode PCI a été essentiellement utilisée telle quelle depuis la publication du rapport ST-X-3F en 1992. Certaines anomalies ont graduellement été décelées au sein de la méthode, notamment au cours des dernières années, au fil de l'élaboration d'un nombre croissant d'applications informatiques de la méthode. La présente publication a un double objectif. Le premier est de documenter les problèmes rencontrés jusqu'à maintenant et de présenter des solutions ainsi que des équations nouvelles ou révisées, le cas échéant. Le second est de présenter un vaste ensemble de données d'essai qui permettra aux développeurs de logiciels de vérifier au préalable si les équations et la structure de la méthode PCI de leurs programmes sont correctes.

³ Ces six classes d'intensité (à savoir, < 10, 10-500, 500-2 000, 2 000-4 000, 4 000-10 000 et > 10 000 kW/m) sont maintenant considérées comme une norme nationale.

Les révisions apportées aux modèles de la méthode PCI ne constituent toutefois pas des modifications importantes à la structure de la méthode PCI et viennent surtout rectifier et clarifier certains modèles de la méthode. Les utilisateurs pourront sans difficulté appliquer ces modifications mathématiques aux produits de transfert de la technologie actuellement disponibles (p. ex., révision au manuel de terrain de Taylor et al., (1997)). Il est présumé que le lecteur connaît bien la méthode PCI et le rapport ST-X-3F.

2.0 ERRATA AU RAPPORT D'INFORMATION ST-X-3F

Peu après la publication du rapport ST-X-3F, quelques fautes d'impression ont été relevées, et il a été jugé nécessaire d'apporter plusieurs éclaircissements au texte. Ces fautes et éclaircissements ont été documentés et consignés sur un errata qui a été distribué de manière informelle en avril 1994. Cet errata qui n'avait jusqu'à maintenant été consigné dans aucun document officiel est le suivant :

- Page 22, tableau 4 : Le nombre d'années de prélèvements effectué par Springer et Van Wagner (1984) à Kapuskasing était de 4.
- Page 26 : Le titre de la partie sur le type de combustible C-3 et C-4 de la figure 3 aurait dû se lire « ...Pins gris ou pins tordus à maturité et jeunes ».
- Pages 32 et 59 : L'équation 32 aurait dû se lire :

$$a = 140 \times e^{\left(\frac{-33,5}{S_{b.m.}}\right)} \quad (32)$$

- Pages 35 et 60 : L'équation 42 aurait dû se lire :

$$IPI_{p.z.} = \frac{\ln \left[1 - \left(\frac{100 \times V_{p.c.}}{\%C \times a} \right) \right]}{-b} \quad (42)$$

- Page 44, colonne de gauche, premier paragraphe complet : La fraction consommée des cimes pour le type d'incendie « continu de cimes » aurait dû se lire « $\geq 0,9$ ».
- Page 46, colonne de gauche, paragraphe complet : la ligne 8 aurait dû se lire : « ... dans un couvert ouvert (C-1, O-1, S-1, S-2, S-3, D-1). »
- Pages 49 et 63 : L'équation 77 devrait être remplacée par la vitesse de propagation correspondant au type de combustible en question. Pour obtenir la vitesse de propagation sur l'arrière de l'incendie, il faut simplement remplacer l'IPI par l'IPIa dans l'équation sur la vitesse de propagation.
- Page 50 (et dans la liste des figures de la page 5) : La légende de la figure 22 aurait dû se lire : « Rapport de la longueur à la largeur des aires incendiées elliptiques en fonction de la vitesse du vent dans les combustibles herbacés (équations 80 et 81) ».
- Pages 50 et 63 : L'équation 80 aurait dû se lire :

$$L/l = 1,1 \times V_{r.v.}^{0,464}, V_{r.v.} \geq 1,0 \quad (80)$$

- Pages 52, 64 et 65 : Le symbole de la vitesse de propagation sur les flancs (appelée vitesse latérale dans le rapport ST-X-3F) devrait être $V_{f.ég.}$ plutôt que $V_{i.p.}$.
- Page 59, (haut de la page), sous « Équation générale de la vitesse de propagation », il aurait fallu lire : C-1 à C-5, C-7, D-1 et S-1 à S-3
- Page 63 : sous « Rapport de la longueur à la largeur », la rubrique « Combustibles ouverts (O-1) » aurait dû se lire « Type de combustible herbacé (O-1) ».

Veillez noter que les erratum ci-dessus concernant les équations 32, 42 et 80 ont été modifiés par des révisions subséquentes qui seront exposées plus loin dans le présent rapport.

3.0 RÉVISIONS ET AMÉLIORATIONS

Au fil du temps, certaines irrégularités ont été décelées dans la méthode. Des chercheurs du Service canadien des forêts spécialisés dans les incendies de forêt ont périodiquement trouvé des solutions à ces problèmes suite à des échanges avec des responsables de la gestion des incendies, des chercheurs et des développeurs de logiciels commerciaux de la méthode PCI. La présente section fournit de l'information sur ces problèmes et leurs solutions. Les numéros des équations nouvelles ou des équations remplaçant celles du rapport ST-X-3F sont en caractères gras. Un résumé de toutes les modifications apportées aux équations du rapport ST-X-3F est présenté à la fin de la présente section. L'annexe 1 présente la liste de tous les symboles et abréviations utilisés dans le texte, et l'annexe 2 donne la liste complète des équations présentées.

Lawson et al. (1996) ont élaboré et mis à jour un modèle de la variation diurne de l'indice du combustible léger (ICL), y compris des équations et une nouvelle table de conversion, qui a été intégré au manuel de terrain de la méthode PCI (Taylor et al., 1997). Le nouveau modèle de l'ICL diurne décrit par Lawson et al. (1996) incorpore l'échelle des valeurs du CL faisant le lien entre l'ICL et la teneur en eau du combustible léger (Van Wagner, 1987) et permet d'établir des prévisions pour toute heure de la journée et à la minute près, donnant, par exemple, la possibilité de prévoir la variation diurne de l'intensité du feu (Beck et al., 2002).

3.1 Consommation du combustible de surface

3.1.1 Modèle de la consommation du combustible de surface dans le type C-1

Problème

Le modèle de la consommation du combustible de surface (CCS) dans le type C-1 (pessière à lichens) de la méthode PCI (équation 9 du rapport ST-X-3F) a une borne inférieure lorsque l'indice du combustible léger (ICL) est égal à 81 (figure 2). Cependant, l'équation équivalente de la vitesse de propagation pour le type de combustible C-1 n'a pas une telle borne, et le système peut donc être utilisé pour estimer les vitesses de propagation sans CCS correspondante, ce qui est clairement illogique sur le plan de la physique.

Solution

La borne inférieure est simplement un artéfact de la forme de la courbe de régression utilisée dans le modèle d'origine de la CCS pour le type C-1. Afin que la CCS diminue plus lentement avec l'ICL, une nouvelle équation, semblable à l'équation 9 du rapport ST-X-3F, a été élaborée. La courbe de cette équation passe quand même par les points de données de la CCS existants pour ce type de combustible (Alexander et al., 1991). Le nouveau modèle de la CCS pour le type C-1 de la méthode PCI comprend deux équations :

$$CCS = 0,75 + 0,75 \times (1 - e^{-0,23 \times (ICL - 84)})^{0,5} \quad \text{si } ICL > 84 \quad \mathbf{(9a)}$$

$$CCS = 0,75 - 0,75 \times (1 - e^{-0,23 \times (ICL - 84)})^{0,5} \quad \text{si } ICL \leq 84 \quad \mathbf{(9b)}$$

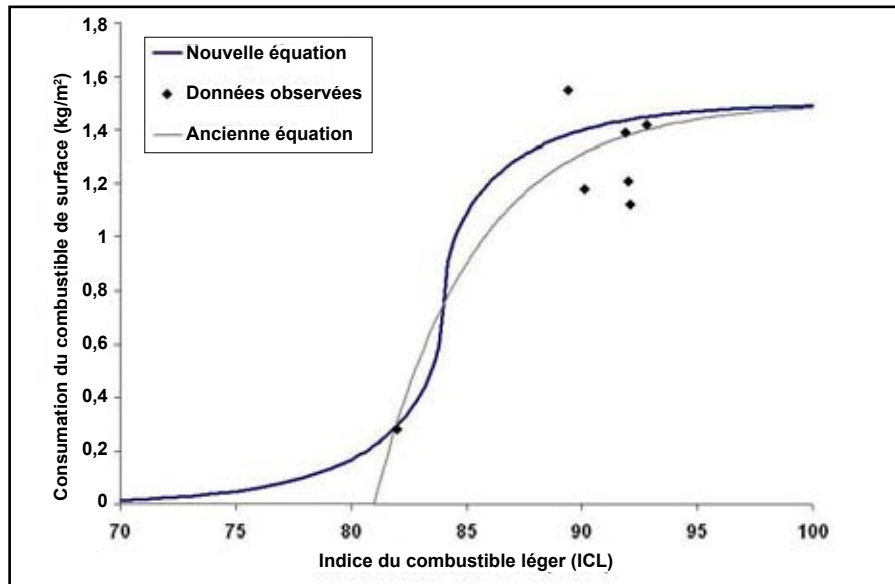


Figure 2. Le nouveau modèle de la consommation du combustible de surface pour le type de combustible C-1 (pessière à lichens) de la méthode PCI par rapport au modèle initial et aux données empiriques existantes.

3.1.2 Valeurs par défaut de la quantité de combustible herbacé

Problème

Les équations de la vitesse de propagation des feux d'herbes présentées dans le rapport ST-X-3F ont été dérivées de données recueillies par Cheney et al. (1993) dans le Territoire du Nord de l'Australie. Aux fins de l'édition provisoire de 1984 de la méthode PCI, une quantité nominale de combustible herbacé (QCH) de 3,0 t/ha (0,3 kg/m²) avait été sélectionnée à la lumière d'un examen de la documentation canadienne existante sur le sujet, mais aucune plage de la variation ou variabilité naturelle prévue n'était présentée. Cependant, en Nouvelle-Zélande, une quantité nominale de combustible de 3,5 t/ha avait été utilisée pour modéliser le danger de feu et le comportement de l'incendie à l'aide de la méthode PCI (Alexander, 1994, 2008; Fogarty et Alexander, 1999; Alexander et Fogarty, 2002) parce que cette quantité correspondait à la quantité moyenne de combustible des brûlages expérimentaux effectués par Cheney et al. (1993). La quantité moyenne (et la plage de variation) de combustible dans des prairies fauchées ou pâturées (n = 52) et dans des prairies naturelles non perturbées (n = 70) étaient respectivement de 3,55 (2,26-5,66) et de 3,41 (1,17-5,85) t/ha. Baxter (2006) a publié un rapport sur les quantités de combustibles herbacés dans les perturbations linéaires (p. ex., emprises des lignes de transport d'énergie, pipelines, lignes sismiques, voies ferrées et routes) dans le centre-nord de l'Alberta. Il a constaté que la quantité moyenne de combustible (n = 64) était de 3,47 t/ha au printemps et de 5,42 t/ha en automne (aux mêmes endroits).

La figure 2 présente la nouvelle forme de la courbe de l'équation de la CCS pour le type C-1 ainsi que la courbe initiale et les points de données.

Solution

La valeur par défaut de la quantité de combustible a été modifiée pour la faire correspondre aux observations sur lesquelles les modèles de la vitesse de propagation de l'incendie dans le combustible herbacé de la méthode PCI sont basés. La QCH (et, par conséquent, la CCS) des types O-1a et O-1b devrait donc être fixée à 3,5 t/ha ou 0,35 kg/m². Cependant, il convient de souligner que les utilisateurs des modèles du comportement d'un feu d'herbes de la méthode PCI devraient utiliser des valeurs mesurées de la quantité de combustible herbacé au lieu de cette valeur moyenne, s'ils disposent de telles observations.

3.2 Calculs de la vitesse de propagation

3.2.1 Modèles du comportement de l'incendie dans les types de combustible M-3 et M-4

Problème

Les données expérimentales décrivant le comportement du feu dans des peuplements mixtes qui comprennent une proportion de sapins baumiers tués par la tordeuse des bourgeons de l'épinette proviennent d'un nombre limité de brûlages expérimentaux effectués dans le nord-est de l'Ontario (Stocks, 1987). Il a donc fallu avoir recours à certains « artifices » (Van Wagner, 1985) pour formuler des équations de la vitesse de propagation dans ce complexe de combustible. La figure 7 du rapport ST-X-3F montre que la vitesse de propagation prévue dans les types M-3 et M-4 de la méthode PCI devient très similaire à mesure que le pourcentage de sapins baumiers morts (% $S_{b.m.}$) diminue. Dans les deux graphiques du bas de la figure 7 du rapport ST-X-3F, les courbes représentant un pourcentage de sapins baumiers morts de 30 % (% $S_{b.m.} = 30\%$) laissent voir une différence minime de la vitesse de propagation prévue dans les variantes sans feuilles (M-3) et avec feuilles (M-4) du type « forêt mixte à sapins baumiers morts », ce qui est incorrect sur le plan de la physique. De plus, à mesure que % $S_{b.m.}$ se rapproche de zéro, la vitesse de propagation prévue par le modèle s'approche aussi de zéro, ce qui est également illogique.

Solution

À mesure que diminue % $S_{b.m.}$ dans les types M-3 et M-4, un peuplement mixte comportant des sapins baumiers morts devrait ressembler à un peuplement pur de feuillus ou de conifères (p. ex., le type de combustible D-1 de la méthode PCI). Les modèles M-3 et M-4 reposent sur l'hypothèse que la totalité de la composante résineuse de ce type de combustible a été tuée par des insectes. Un nouveau modèle de la vitesse de propagation a donc été élaboré pour les types M-3 et M-4 et est un hybride du type D-1 et du modèle existant pour les types M-3 et M-4 avec un pourcentage de sapins baumiers morts de 100 %.

Les deux sous-sections suivantes (3.2.1.1 et 3.2.1.2) expliquent la reformulation des équations 29 à 32 du rapport ST-X-3F aux fins du calcul de la vitesse de propagation dans les types de combustible M-3 et M-4. Les équations 33 et 34 du rapport ST-X-3F ne sont plus utilisées.

3.2.1.1 Type de combustible M-3 : forêt mixte à sapins baumiers morts, sans feuilles

L'équation de la vitesse de propagation dans ce type de combustible a été reformulée de telle façon que lorsque la proportion de sapins baumiers morts est de 100 %, la courbe résultante corresponde à celle de l'équation actuelle de la méthode PCI pour le type M-3, et que lorsque la proportion de sapins baumiers morts est de 0 %, la vitesse de propagation résultante soit équivalente à celle pour le type de combustible D-1. Lorsque les valeurs de % $S_{b.m.}$ se situent entre 0 et 100 %, la vitesse de propagation est calculée par une forme hybride de ces équations d'une façon similaire à celle utilisée pour le type M-1 (forêt boréale mixte, sans feuilles), comme le montre l'équation 27 du rapport ST-X-3F. La nouvelle équation est la suivante :

$$V_{i.p.} = \frac{\% S_{b.m.}}{100} \times V_{i.p.M-3(100\%)} + \left(1 - \frac{\% S_{b.m.}}{100}\right) \times V_{i.p.D-1} \quad (29)$$

où $V_{i.p.}$ est la vitesse initiale de propagation sans l'effet de l'ICD (indice du combustible disponible) et $V_{i.p.D-1}$ est la vitesse de propagation calculée pour le type D-1 (peupliers faux-trembles sans feuilles). La $V_{i.p.M-3(100\%)}$, qui représente la vitesse de propagation lorsque % $S_{b.m.} = 100$, est calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$V_{i.p.M-3(100\%)} = 120 \times \left[1 - e^{-(0,0572 \times IPI)} \right]^{1,4} \quad (30)$$

L'équation 30 reprend la forme de l'équation générale de la vitesse de propagation présentée dans le rapport ST-X-3F sous le numéro d'équation 26. Dans le cas présent, les coefficients a , b et c sont explicitement inclus sur la base des calculs effectués à l'aide des équations 29, 30 et 31 dans le rapport ST-X-3F avec un % $S_{b.m.}$ de 100 %. La figure 3 illustre le nouveau modèle pour le type de combustible M-3 (forêt mixte à sapins baumiers morts, sans feuilles) pour une plage de valeurs de % $S_{b.m.}$.

3.2.1.2 Type de combustible M-3 : forêt mixte à sapins baumiers morts, sans feuilles

L'équation de la vitesse de propagation dans ce type de combustible à été reformulée de telle façon que lorsque la proportion de sapins baumiers morts est de 100 %, la courbe résultante corresponde à celle de l'équation actuelle de la méthode PCI pour le type M-3, et que lorsque la proportion de sapins baumiers morts est de 0 %, la vitesse de propagation résultante soit équivalente à celle pour le type de combustible D-1. Lorsque les valeurs de % $S_{b.m.}$ se situent entre 0 et 100 %, la vitesse de propagation est calculée par une forme hybride de ces équations d'une façon similaire à celle utilisée pour le type M-1 (forêt boréale mixte, sans feuilles), comme le montre l'équation 27 du rapport ST-X-3F. La nouvelle équation est la suivante :

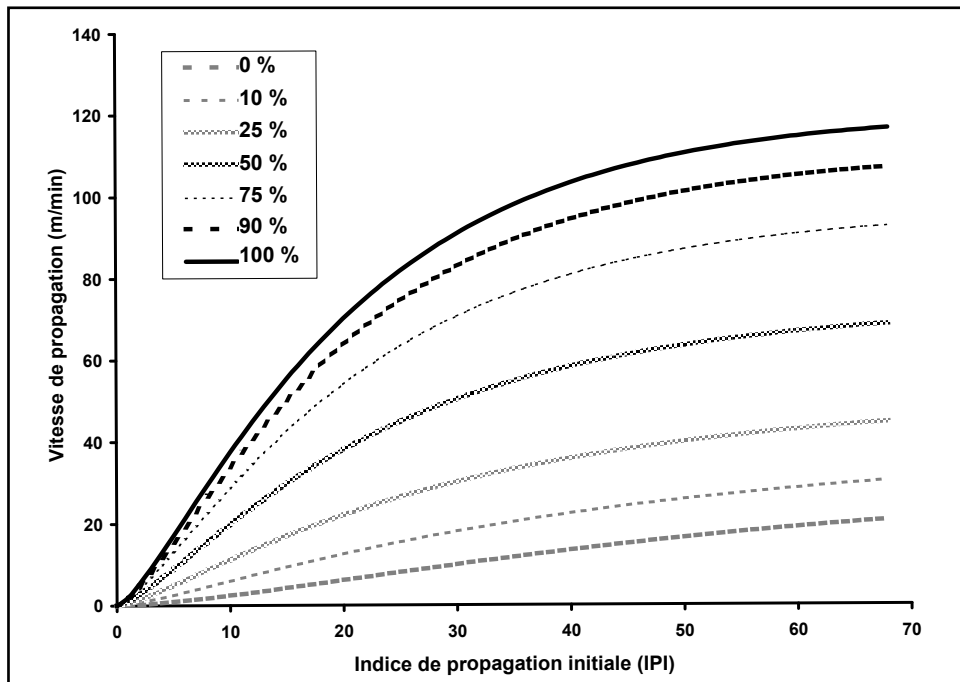


Figure 3. Courbes de la vitesse de propagation établies à l'aide de la nouvelle équation pour le type de combustible M-3 (forêt mixte à sapins baumiers morts, sans feuilles) de la méthode PCI, pour une plage de valeurs du pourcentage de sapins baumiers morts (% $S_{b.m.}$).

$$V_{i.p.} = \frac{\% S_{b.m.}}{100} \times V_{i.p.M-3(100\%)} + 0,2 \times \left(1 - \frac{\% S_{b.m.}}{100} \right) V_{i.p.D-1} \quad (31)$$

où $V_{i.p.}$ est la vitesse initiale de propagation sans l'effet de l'ICD (indice du combustible disponible) et $V_{i.p.D-1}$ est la

vitesse de propagation calculée pour le type D-1 (peupliers faux-trembles sans feuilles). La $V_{i.p.M-4(100\%)}$, qui représente la vitesse de propagation lorsque $\% S_{b.m.} = 100$, est calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$V_{i.p.M-4(100\%)} = 100 \times \left[1 - e^{(0,0404 \times IPI)} \right]^{1,48} \quad (32)$$

L'équation 32 reprend la forme de l'équation générale de la vitesse de propagation figurant dans le rapport ST-X-3F sous le numéro d'équation 26. Dans le cas présent, les coefficients a , b et c sont explicitement inclus sur la base des calculs effectués à l'aide des équations 32, 33 et 34 dans le rapport ST-X-3F avec un $\% S_{b.m.}$ de 100. La figure 4 illustre le nouveau modèle pour le type de combustible M-4 (forêt mixte boréale, avec feuilles) pour une plage de valeurs de $\% S_{b.m.}$.

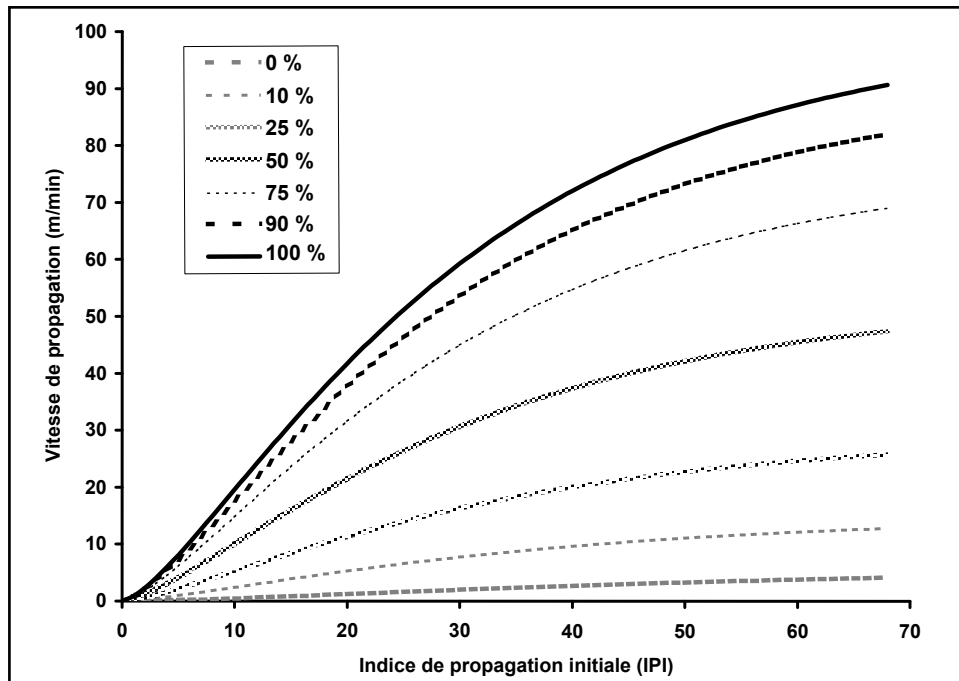


Figure 4. Courbes de la vitesse de propagation établies à l'aide de la nouvelle équation pour le type de combustible M-4 (forêt mixte à sapins baumiers morts, avec feuilles) de la méthode PCI, pour une plage de valeurs du pourcentage de sapins baumiers morts ($\% S_{b.m.}$).

3.2.2 Effet du degré de fanage sur la vitesse de propagation dans les types de combustible herbacé O-1a et O-1b

Problème

Le degré de fanage des herbes, exprimé en pourcentage de végétaux morts par rapport à l'ensemble des herbes sur pied, a un effet majeur sur la propagation du feu dans les prairies. Il est généralement admis que le feu ne se propagera pas dans une prairie lorsque le degré de fanage des herbes est inférieur à 50 % (Cheney et al., 1993, 1998; Cheney et Sullivan, 1997). Cependant, d'après des observations effectuées lors de brûlages expérimentaux en plein air, il est en effet possible que le feu se propage lorsque le degré de fanage est de 50 % ou moins (Parrott et Donald, 1970; Sneeuwjagt et Frandsen, 1977; Clark, 1983; Marsden-Smedley et Catchpole, 1995).

À l'époque de la préparation de la version finale du rapport ST-X-3F, il n'existait aucune relation reconnue entre le degré de fanage des herbes et la vitesse de propagation du feu dans les prairies. Faute de travaux de recherche concluants sur le sujet, on avait adopté une approche simple : il avait été présumé que la propagation du feu serait négligeable lorsque le degré de fanage était inférieur à 50 % et qu'elle s'accroîtrait linéairement à mesure que le degré de fanage des herbes

dépasserait les 50 %. Depuis la publication du rapport ST-X-3F, des chercheurs australiens ont publié la fonction sigmoïde suivante (Cheney et Sullivan, 1997) corrélant le degré de fanage des herbes à la propagation relative du feu pour des degrés de fanage de 50 à 100 % (figure 5) (d'après Cheney et al., 1998) :

$$C_{f.h.} = 1,120 / (1 + 59,2 \cdot e^{(-0,124 (\% \text{ Fan.} - 50))}) \quad \% \text{ Fan.} \geq 50$$

où $C_{f.h.}$ est le coefficient de fanage et $\% \text{ Fan.}$, le degré de fanage des herbes (%). Cette relation est basée sur l'expérience de terrain des auteurs et non pas sur des essais en bonne et due forme ou sur l'analyse de données corrélant le degré de fanage à la vitesse relative de propagation du feu.

Solution

On a élaboré une nouvelle relation pour le $C_{f.h.}$ qui, lorsque le degré de fanage est de 50 %, limite la vitesse de propagation à 10 % de la valeur maximale atteinte lorsque 100 % des tiges sont fanées. Lorsque moins de 50 % des tiges sont fanées, la nouvelle relation diminue simplement de manière exponentielle vers une valeur de zéro. La nouvelle fonction se compose des deux équations distinctes suivantes, dont les courbes se rejoignent à un degré de fanage de 58,8 % :

$$C_{f.h.} = 0,005 \times (e^{(-0,061 \times \text{Fan.})} - 1) \quad \text{si } \% \text{ Fan.} < 58,8 \quad (35a)$$

$$C_{f.h.} = 0,176 + 0,02 \times (\% \text{ Fan.} - 58,8) \quad \text{si } \% \text{ Fan.} \geq 58,8 \quad (35b)$$

Comme l'illustre la figure 5, cette nouvelle fonction maintient la relation linéaire initiale au-delà d'un degré de fanage d'environ 60 % mais donne maintenant la possibilité d'avoir une propagation limitée du feu lorsque le degré de fanage est inférieur à 50 %.

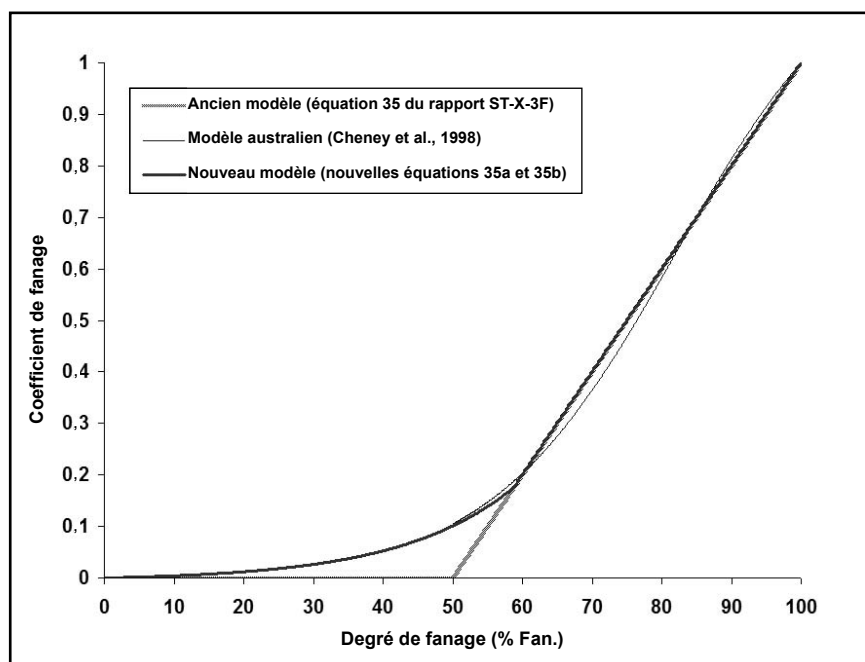


Figure 5. Nouvelle équation corrélant le degré de fanage des herbes et la vitesse relative de propagation du feu dans les prairies (« nouveau modèle »), comparée à la formule d'origine utilisée dans le rapport ST-X-3F (« ancien modèle »), et relation actuellement utilisée en Australie pour évaluer le danger de feu d'herbes.

3.2.3 Effet de la pente sur la vitesse de propagation

3.2.3.1 Maximum de pente du terrain

Précisions

L'application du modèle de coefficient de propagation lors du calcul de l'effet de la pente sur la propagation de l'incendie a créé une certaine confusion. L'équation 39 du rapport ST-X-3F n'est pas recommandée pour des pentes (% P) de plus de 70 % (Van Wagner, 1977a). Selon Van Wagner (1977a), sur une pente de plus de 70 %, les flammes auraient tendance à inonder directement la pente, et le comportement du feu deviendrait très intense et instable. De plus, Cheney (1981) était d'avis que l'application de tels modèles à des pentes très abruptes était discutable car la distribution du combustible était habituellement discontinue sur des pentes abruptes.

Lorsque la pente est supérieure à 70 %, il faudrait utiliser un CP équivalent à une pente de 70 % (c.-à-d., 6,78). Pour rendre l'application du modèle plus claire, l'équation 39 du rapport ST-X-3F se lit maintenant comme suit :

$$CP = e^{3,533 \left(\frac{\%P}{100} \right)^{1,2}} \quad \text{si } \%P < 70 \% \quad (39a)$$

$$CP = 10.0 \quad \text{si } \%P \geq 70 \% \quad (39b)$$

3.2.3.2 Calcul de l'indice de propagation initiale en fonction de l'équivalent de la pente pour tous les types de combustible, sauf les types M-1/2 et M-3/4 (forêts mixtes)

Problème

En présence d'un vent extrême et d'une pente très abrupte, le logarithme peut prendre une valeur négative lors du calcul de l'indice initial de propagation en fonction de l'équivalent de la pente ($IPI_{p.z.}$) (équations 41, 42 ou 43 du rapport ST-X-3F). Ce problème peut survenir lors de tous les calculs de l'effet de la pente lorsque les conditions sont extrêmes. Il résulte de la multiplication du coefficient de propagation de la pente (CP) par la vitesse de propagation par vent nul ($V_{p.z.}$) lors du calcul de la vitesse de propagation par vent nul corrigée selon la pente ($V_{p.c.}$) à l'aide de l'équation 40 du rapport ST-X-3F. Lorsqu'on utilise les équations de la méthode PCI dans des situations où la pente est extrême et lors de périodes pendant lesquelles les valeurs de l'ICL sont très élevées, il est possible que le produit de $V_{p.z.} \times CP$ soit supérieur à la valeur maximale de la vitesse de propagation dans un type de combustible, donnée par le coefficient a du tableau 6 du rapport ST-X-3F. Dans de tels cas, on obtient une valeur de la $V_{p.c.}/a > 1$, rendant l'argument du logarithme naturel négatif et par conséquent, indéfini.

Solution

Le problème peut être résolu en imposant une valeur limite à l'argument introduit dans le logarithme des équations 41 et 43 du rapport ST-X-3F. Dans le code source en langage C qu'utilise le Service canadien des forêts pour la méthode PCI, l'argument du logarithme est limité à une valeur de 0,01. Par conséquent, l'équation pour le groupe des conifères (C-1 à C-7), des feuillus (D-1) et des rémanents (S-1 à S-3) de la méthode PCI devrait prendre les formes suivantes :

$$IPI_{p.z.} = \frac{\ln \left[1 - \left(\frac{V_{p.c.}}{a} \right)^{\frac{1}{c}} \right]}{-b} \quad \text{si } 1 - \left(\frac{V_{p.c.}}{a} \right)^{\frac{1}{c}} \geq 0,01 \quad (41a)$$

$$IPI_{p.z.} = \frac{\ln(0,01)}{-b} \quad \text{si } 1 - \left(\frac{V_{p.c.}}{a} \right)^{\frac{1}{c}} < 0,01 \quad (41b)$$

Dans le cas des types O-1a et O-1b (combustible herbacé) de la méthode PCI, il faudrait maintenant utiliser les équations suivantes :

$$IPI_{p.z.} = \frac{\ln \left[1 - \left(\frac{V_{p.c.}}{C_{f.h.} \times a} \right)^{\frac{1}{c}} \right]}{-b} \quad \text{si } 1 - \left(\frac{V_{p.c.}}{C_{f.h.} \times a} \right)^{\frac{1}{c}} \geq 0,01 \quad (43a)$$

$$IPI_{p.z.} = \frac{\ln(0,01)}{-b} \quad \text{si } 1 - \left(\frac{V_{p.c.}}{C_{f.h.} \times a} \right)^{\frac{1}{c}} < 0,01 \quad (43b)$$

où $C_{f.h.}$ est le coefficient de fanage des herbes définissant la vitesse de propagation relative, telle qu'estimée à partir du degré de fanage des herbes (C) à l'aide des équations 35a et 35b.

Le tableau 2 ci-dessous présente les valeurs maximales approximatives de l'IPI_{p.z.}, qui sont limitées par l'introduction des équations 41b et 43b, dans chaque type de combustible de la méthode PCI. Toutes les valeurs sont très inférieures à la valeur maximale de l'IPI_{p.z.} des ensembles de données initiaux sur lesquels les équations sont basées.

Table 2. Valeurs maximales approximatives de l'indice de propagation initiale en fonction de l'équivalent de la pente (IPI_{p.z.}) dans tous les types de combustible de la méthode PCI, sauf les quatre types des forêts mixtes (M-1, M-2, M-3 et M-4)

Type de combustible	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	C-7	D-1	O-1a	O-1b	S-1	S-2	S-3
IPI _{p.z.} maximum	71	163	103	157	66	58	151	198	148	132	155	105	56

3.2.3.3 Calcul de l'indice de propagation initiale en fonction de l'équivalent de la pente pour les types de combustible M-1 et M-2

Problème

Les prévisions des caractéristiques du comportement du feu dans les types de combustible de la forêt boréale mixte (M-1 et M-2) de la méthode PCI sont un mélange des prévisions sur les types C-2 (pessière à lichens) et D-1 (peupliers faux-trembles sans feuilles). Cette approche semble acceptable lorsque la vitesse de propagation est basée sur un petit nombre d'incendies bien documentés (Stocks, 1988; Hely et al., 2001); cependant, ce modèle n'a pas encore été validé à fond.

Lors du calcul de la pente pour les types de combustible M-1 et M-2 de la méthode PCI, l'IPI_{p.z.} augmente à mesure que le pourcentage de conifères (% P) diminue en raison de la forme de l'équation 42 du rapport ST-X-3F. Les valeurs finales de l'IPI_{p.z.} dans les types M-1 ou M-2 peuvent donc être plus élevées que celles dans le type C-2 ou D-1 en pareilles circonstances; ce résultat n'est pas logique compte tenu des formules actuelles de la méthode PCI pour la vitesse de propagation dans la forêt boréale mixte.

Le problème est dû au fait que l'équation 42 du rapport ST-X-3F ajuste la valeur de la vitesse de propagation en fonction de l'équivalent de la pente ($V_{p.c.}$) en la divisant par % C, ce qui supprime la contribution du type de combustible D-1 à la valeur de $V_{p.c.}$. Il provient de ce que la vitesse de propagation par vent nul ($V_{p.z.}$) de $V_{p.c.}$ est calculée comme une moyenne pondérée des vitesses de propagation sans égard à la pente pour les types C-2 et D-1 dans les équations 27 et 28 du rapport ST-X-3F.

Solution

La nouvelle approche consiste à appliquer la moyenne pondérée au calcul de l'IPI_{p.z.}. L'équation 42 du rapport ST-X-3F prend donc la forme suivante :

$$IPI_{p.z.} = \frac{\%S_{p.z.}}{100} \times IPI_{p.z.C-2} + \left(1 - \frac{\%C}{100}\right) \times IPI_{p.z.D-1} \quad (42a)$$

où IPI_{p.z.C-2} et IPI_{p.z.D-1} sont les valeurs de l'IPI_{p.z.} calculées à l'aide de l'équation 41 pour les types C-2 et D-1 respectivement. Cette valeur de l'IPI_{p.z.} devra ensuite être utilisée pour calculer l'ÉVV à l'aide de l'équation 44 du rapport ST-X-3F.

3.2.3.4 Calcul de l'indice de propagation initiale en fonction de l'équivalent de la pente pour les types de combustible M-3 et M-4

Tout comme dans le cas des types de combustible M-1 et M-2 de la forêt boréale mixte, il faut calculer l'équivalent vitesse du vent (ÉVV) pour les types M-3 et M-4 (forêt mixte à sapins baumiers morts) en utilisant l'indice de propagation initiale en fonction de l'équivalent de la pente ($IPI_{p.z.}$) calculé pour le type D-1 (peupliers faux-trembles sans feuilles) et $100\% S_{b.m.}$ à la manière de la nouvelle équation 42a :

$$IPI_{p.z.} = \frac{\% S_{b.m.}}{100} \times IPI_{p.z.M-3(100\%)} + \left(1 - \frac{\% S_{b.m.}}{100}\right) \times IPI_{p.z.D-1} \quad (42b)$$

$$IPI_{p.z.} = \frac{\% S_{b.m.}}{100} \times IPI_{p.z.M-4(100\%)} + \left(1 - \frac{\% S_{b.m.}}{100}\right) \times IPI_{p.z.D-1} \quad (42c)$$

Il faudra ensuite utiliser cette valeur de l' $IPI_{p.z.}$ pour calculer l'ÉVV à l'aide de l'équation 44 du rapport ST-X-3F.

3.2.3.5 Calcul de l'équivalent vitesse du vent dans des conditions extrêmes

Problème

La méthode PCI utilise une fonction de la vitesse du vent (équation 53a du rapport ST-X-3F) qui diffère de la fonction normalisée définie dans la méthode IFM (Van Wagner, 1987) pour calculer l'IPI lorsque la vitesse du vent est supérieure à 40 km/h. Ce calcul est nécessaire pour empêcher que l'IPI ne devienne trop élevé lorsque les vitesses du vent sont élevées. La note 2 au bas de la page 36 du rapport ST-X-3F décrit l'équation 53a.

Lors du calcul de l'équivalent vitesse du vent de la pente (ÉVV) à l'aide de l'équation 44 du rapport ST-X-3F, des valeurs élevées de l'IPI en fonction de l'équivalent de la pente ($IPI_{p.z.}$) (dues à des pentes abruptes et à un ICL faible) peuvent se traduire par des valeurs de l'ÉVV supérieures à 40 km/h. Par conséquent, il faudrait également se servir de la fonction limitante utilisée lors du calcul de l'IPI pour rétrocalculer la valeur de l'ÉVV, puisque les mêmes conditions prévaudront (c.-à-d., l'IPI final sera calculé à l'aide de l'équation 53 ou 53a du rapport ST-X-3F); cependant, le rapport ST-X-3F ne décrit pas comment effectuer ce calcul.

Solution

Pour résoudre ce problème, on a attribué à l'équation 44 du rapport ST-X-3F le numéro 44a et on a ajouté l'équation 44b. Cette dernière est la solution de l'équation 53a pour la vitesse du vent. La forme des équations 52 et 53a du rapport ST-X-3F donne une valeur maximale possible de l'IPI pour chaque valeur particulière de l'ICL. Cette valeur maximale de l'IPI est équivalente à $2,496 \times f(ICL)$, où $f(ICL)$ est la fonction de l'indice du combustible léger dans l'IPI (Van Wagner, 1987). Pour éviter que le terme du logarithme contenu dans l'équation 44b ne devienne nul ou négatif, on a introduit une limite qui fait en sorte que lorsque $IPI_{p.z.} > 0,999 \times IPI_{MAX}$, alors $IPI_{p.z.} = 0,999 \times IPI_{MAX}$. On obtient ainsi dans tous les cas un ÉVV maximal de 112,45. On obtient donc les équations suivantes :

$$ÉVV' = \frac{1}{0,05039} \ln \left(\frac{IPI_{p.z.}}{0,0208 \times f(ICL)} \right) \quad (44a)$$

$$ÉVV' = 28 - \frac{1}{0,0818} \ln \left(\frac{IPI_{p.z.}}{2,496 \times f(ICL)} \right) \quad \text{si } IPI_{p.z.} < 0,999 \times 2,496 \times f(ICL) \quad (44b)$$

$$\text{ÉVV}'=112,45 \quad \text{si } \text{IPI}_{p.z.} < 0,999 \times 2,496 \times f(\text{ICL}) \quad (44c)$$

où $f(\text{ICL})$ est celui calculé par l'équation 45 du rapport ST-X-3F.

La méthode de calcul de l'ÉVV est maintenant la suivante :

$$\text{ÉVV} = \text{ÉVV}' \quad \text{si } \text{ÉVV}' \leq 40 \quad (44d)$$

$$\text{ÉVV} = \text{ÉVV}'' \quad \text{si } \text{ÉVV}' > 40 \quad (44e)$$

3.2.4 Estimation de la hauteur de la base de la cime dans le type de combustible C-6

Une hauteur caractéristique de la base de la cime vivante est associée à chaque type de combustible de la méthode PCI dont les cimes peuvent prendre feu, sauf le type C-6 (plantation de conifères). La raison est que les plantations de conifères ont une structure de peuplement relativement homogène (Van Wagner, 1986) et que le modèle à deux équations de la vitesse de propagation est flexible. Dans ce modèle, l'utilisateur peut entrer une hauteur précise de la base de la cime vivante, s'il la connaît. Depuis la publication du rapport ST-X-3F, McAlpine et Hobbs (1994) ont élaboré des équations permettant de prédire la hauteur de la base de la cime à partir de la hauteur et de la densité du peuplement dans des plantations de quatre essences boréales qui se rencontrent fréquemment (pin rouge, pin gris, épinette noire et épinette blanche). Ils ont constaté que l'équation suivante permettait de prédire la hauteur de la base de la cime vivante dans les plantations de pins rouges :

$$\text{HBC} = -11,2 + 1,06 \times \text{HP} + 0,00170 \times \text{DP} \quad (91)$$

où HBC = hauteur de la base de la cime vivante (m), HP = hauteur du peuplement (m) et DP = densité du peuplement (tiges/ha).

3.2.5 Modèle à deux équations de la vitesse de propagation dans le type de combustible C-6

Précisions

Il convient de préciser deux points au sujet de la documentation du type C-6 (plantation de conifères) décrite dans le rapport ST-X-3F :

- Page 40, figure 15 et équation 58 : dans le cas du type C-6, la vitesse finale ou à l'équilibre de propagation à la tête de l'incendie ($V_{t.f.}$) est remplacée par la vitesse de propagation de l'incendie de surface (V_s) dans le type C-6. Cette précision avait été présentée dans l'errata de 1994 au rapport ST-X-3F (voir la section 2.0).
- Page 40, équation 58 : dans l'équation 58, si $V_{c.s.} > V_s$, alors FCC = 0.

Le modèle à deux équations de la propagation de l'incendie depuis la surface jusqu'aux cimes (Van Wagner, 1989) n'est appliqué qu'à un seul type de combustible de la méthode PCI, à savoir les plantation de conifères (C-6). Les équations présentées par Van Wagner (1993), illustrant l'application de la méthode à deux équations dans les peuplements de pins gris jeunes et à maturité, ne font actuellement pas partie de la méthode PCI.

3.3 Consommation du combustible des cimes

Précisions

Pour ce qui est du combustible des cimes ou du couvert d'un peuplement forestier, la méthode PCI présume que seule

la consommation du combustible des conifères contribue à l'intensité à la tête de l'incendie lorsqu'un feu intermittent ou continu de cimes est prévu. Pour les types de combustible du groupe des conifères de la méthode PCI, la consommation du combustible des cimes est calculée à l'aide de l'équation 66 du rapport ST-X-3F de la façon suivante :

$$CC_{C-1 \text{ à } C-7} = QCC \times FCC \quad (66a)$$

où CC est la consommation des cimes, QCC , la quantité de combustible dans les cimes, et FCC , la fraction consommée des cimes. Comme le décrit la section 7.3 du rapport ST-X-3F, pour les forêts boréales mixtes M-1 et M-2, on multiplie la CC par un coefficient ($\% C/100$, où $\% C$ est le pourcentage de conifères) pour tenir compte de la proportion de conifères dans le peuplement, ce qui donne l'équation suivante :

$$CC_{M-1/M-2} = QCC \times FCC \times \% C/100 \quad (66b)$$

Il faut procéder de la même façon pour les types M-3 et M-4 (forêts mixtes de sapins baumiers morts, sans feuilles et avec feuilles) pour tenir compte de la proportion de sapins baumiers morts ($\% S_{b.m.}$) :

$$CC_{M-3/M-4} = QCC \times FCC \times \% S_{b.m.}/100 \quad (66c)$$

3.4 Variation diurne du comportement potentiel du feu

Problème

Le comportement potentiel du feu varie considérablement au fil de la journée. Cette variation a d'importantes répercussions sur les tactiques de suppression des incendies et la sécurité des membres des équipes d'intervention (Beck et al., 2002) ainsi que sur la modélisation de la croissance de l'incendie (Tymstra et al., 2009-10-07). C'est pourquoi un utilisateur peut vouloir prévoir à quel moment de la journée le comportement du feu atteindra un seuil déterminant, comme l'intensité critique de l'incendie de surface pour l'embrassement des cimes, ou une certaine classe d'intensité du feu.

Pour calculer le moment de la journée pour une valeur particulière, il faut appliquer la méthode PCI « à rebours ». La procédure est généralement la suivante. Étant donné que la consommation du combustible de surface et l'effet de l'indice du combustible disponible (ICD) sur la vitesse de propagation (ECD) sont présumés avoir une valeur constante tout au long de la journée (dans l'hypothèse d'absence de précipitations) dans tous les types de combustible, sauf le C-1, on peut utiliser l'équation 57 ou 69 du rapport ST-X-3F pour obtenir la vitesse de propagation pour une intensité d'incendie et un type de combustible donnés. On peut ensuite déterminer l'API critique en travaillant à rebours avec l'équation appropriée de la vitesse de propagation. Puis, pour une vitesse du vent prévue donnée, on obtient algébriquement le paramètre $f(V)$ à l'aide de l'équation 53 du rapport ST-X-3F, puis le paramètre $f(ICL)$ à l'aide de l'équation 52. Le problème réside dans l'absence d'une solution algébrique exacte pour le coefficient m de l'équation 45 du rapport ST-X-3F.

Solution

On a établi une approximation numérique de l'ICL pour une valeur $f(ICL)$ donnée afin de pouvoir estimer l'ICL sans utiliser les équations 45 et 46 (figure 6) :

$$ICL = 71,7069 + 6,375 \times \ln(f(ICL) - 2,0737) \quad (93)$$

Une fois la valeur de l'ICL calculée à l'aide de l'équation 93, on peut utiliser l'ICL diurne (Lawson et al., 1996) ou horaire (Van Wagner, 1977b) pour estimer le moment de la journée où une valeur prédite ou prévue du comportement du feu sera atteinte, compte tenu d'une vitesse donnée du vent et d'un type particulier de combustible.

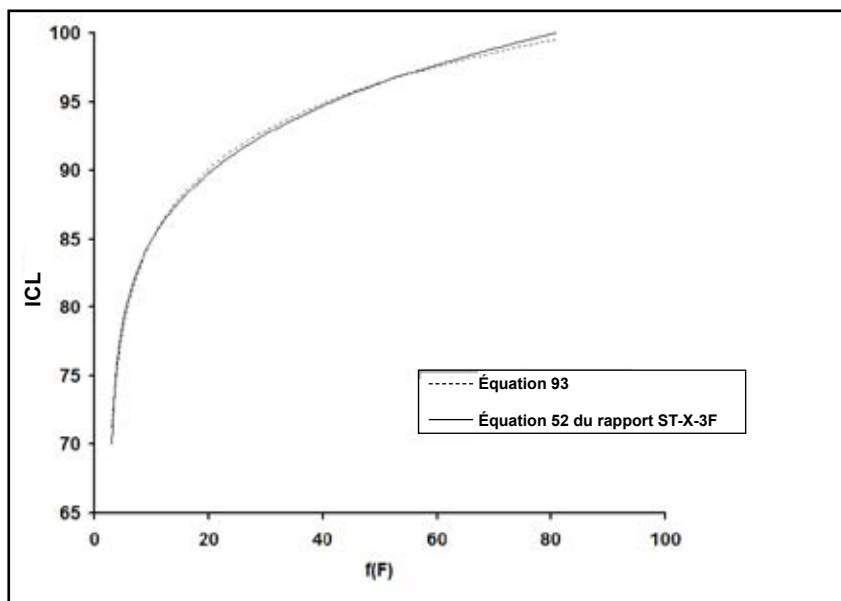


Figure 6: Relation entre le paramètre de l'humidité du combustible $f(\text{ICL})$ utilisé pour calculer l'ICL, tel que défini dans la méthode IFM et représenté par l'équation 52, et le paramètre estimé à l'aide de l'équation 93.

3.5 Accélération d'un foyer ponctuel dans des types de combustible à couvert fermé

Problème

Comme il est mathématiquement possible de calculer séparément les valeurs de la fraction consommée des cimes (FCC) à la tête, sur les flancs et sur l'arrière d'un incendie (et en fait, à tout endroit le long du périmètre), il est également possible de calculer un paramètre d'accélération distinct à chacun de ces points puisque l'accélération dépend de la FCC définie par l'équation 72 du rapport ST-X-3F. Toutefois, la forme fonctionnelle de l'équation 72 ouvre la voie à des vitesses d'accélération variables dans les différentes parties d'un incendie, ce qui peut à son tour entraîner des irrégularités de calcul. Ainsi, si la FCC à la tête (ou sur le front) de l'incendie est d'environ 0,3, il est fort possible que la fraction consommée des cimes sur les flancs de l'incendie (FCC_f) et la fraction consommée des cimes sur l'arrière de l'incendie (FCC_a) soient égales à zéro. Il s'ensuivra que la tête de l'incendie progressera plus doucement vers l'équilibre que les flancs ou l'arrière. Lorsque le vent est faible, on peut se retrouver avec une vitesse de propagation sur les flancs ($V_{f,t}$) et une vitesse de propagation sur l'arrière de l'incendie ($V_{a,t}$) supérieures à la vitesse de propagation à la tête de l'incendie au temps écoulé t ($V_{t,t}$) durant la phase d'accélération d'un foyer ponctuel d'incendie.

Solution

Dans le cas d'un incendie donné, il faut calculer la valeur du paramètre d'accélération (α) au moyen de la FCC obtenue à l'aide de la vitesse de propagation à la tête de l'incendie ($V_{t,t}$). Il faut ensuite appliquer cette valeur à l'accélération de la vitesse de propagation sur l'arrière et les flancs de l'incendie. L'équation pour calculer à partir de la FCC dans les types⁴ de couvert fermé de la méthode PCI demeure la même que celle du rapport ST-X-3F :

$$\alpha = 0,115 - 18,8 \times FCC^{2,5} \times e^{(-8 \times FCC)} \quad (72)$$

⁴ Y compris tous les types de combustible du groupe des conifères, sauf le type C-1, tous ceux du groupe des forêts mixtes (M-1 à M-4) et le type du groupe des peupliers faux-trembles sans feuilles (D-1).

où FCC se calcule au moyen de l'équation 58 du rapport ST-X-3F en utilisant la vitesse de propagation à l'équilibre à la tête de l'incendie.

3.6 Croissance elliptique de l'incendie

3.6.1 Rapport longueur/largeur durant la phase d'accélération de la croissance d'un foyer ponctuel

Problème

Dans le cadre de la méthode PCI actuelle, le rapport longueur/largeur (L/l) estimé d'un foyer ponctuel d'incendie (Alexander, 1985) reste le même durant la phase où le feu s'accélère pour atteindre sa vitesse de propagation à l'équilibre, l'incendie prenant donc dès l'allumage un L/l final. D'après des essais sur le terrain et en laboratoire (Peet, 1967; McAlpine, 1989; Bilgili et Methven, 1990; Alexander et al., 1991; Cheney et Gould, 1995; McRae, 1999), un foyer ponctuel d'incendie devrait avoir un L/l croissant à mesure qu'il progresse vers son état d'équilibre final (McAlpine et Wakimoto, 1991). La section 8.4.2 du rapport ST-X-3F traitait brièvement du problème lié au L/l constant.

Solution

Comme la forme de la fonction d'accélération de la propagation de l'incendie de la méthode PCI (équation 70 du rapport ST-X-3F) est appliquée au L/l , ce dernier varie d'une valeur de 1,0 au temps zéro à une valeur finale à l'équilibre définie par l'équation 79 (pour les types de combustibles constitués de bois sur pied et ceux du groupe des rémanents) ou par l'équation 80 (pour les types de combustibles herbacés). Durant la phase d'accélération de la croissance d'un foyer ponctuel d'incendie, il faudra calculer L/l à l'aide de l'équation suivante :

$$L/l_t = (L/l - 1) \times (1 - e^{-\alpha t}) + 1 \quad (81)$$

où t est le temps écoulé depuis l'allumage, L/l , le rapport longueur/largeur à l'équilibre calculé à l'aide de l'équation 79 ou 80, L/l_t , le rapport longueur/largeur au temps t après l'allumage, et, le paramètre d'accélération de l'équation 72 du rapport ST-X-3F.

Conséquences

L'introduction de cette nouvelle équation dans la méthode PCI a un certain nombre de conséquences qu'il convient de souligner.

a) Forme de l'incendie

Dans tous les types de combustibles, sauf O-1a et O-1b, il faut calculer L/l à l'aide de l'équation 79 du rapport ST-X-3F. Dans le cas des combustibles herbacés, il faut calculer L/l à l'aide des équations suivantes (anciennes équations 80 et 81 du rapport ST-X-3F):

$$L/l = 1,1 \times V_{r.v.}^{0,464} \quad \text{si } V_{r.v.} \geq 1,0 \quad (80a)$$

$$L/l = 1,0 \quad \text{si } V_{r.v.} < 1,0 \quad (80b)$$

b) Calcul du périmètre

Pour obtenir le modèle permettant de calculer la vitesse de croissance du périmètre ($V_{c.p.}$) d'un foyer ponctuel d'incendie (équation 88 du rapport ST-X-3F), il faut déterminer le taux de variation instantané du périmètre total de l'incendie elliptique, c.-à-d. calculer la dérivée en fonction du temps de l'estimation du périmètre obtenue à l'aide de l'équation 87

du rapport ST-X-3F. Lorsque L/l varie avec le temps durant la phase d'accélération de la croissance d'un foyer ponctuel d'incendie, la dérivée de l'équation 87 donne une forme finale très complexe. Cependant, cette complexité accrue ne se traduit pas par des résultats très différents de ceux obtenus avec l'équation 88, $V_{r.v.}$ étant calculée avec L/l_t au lieu de L/l . Par conséquent, durant la phase d'accélération, la valeur de $V_{r.v.}$ devrait être calculée à l'aide de l'équation 88 en substituant L/l_t à L/l . Le résultat ainsi obtenu devrait toutefois être considéré comme une approximation.

L'équation 87 du rapport ST-X-3F est présentée comme celle permettant de calculer le périmètre d'un incendie elliptique. Sa formule se fonde sur la valeur de L/l et la distance totale de propagation de l'incendie le long du grand axe de l'ellipse (D). Il est à noter que durant la période d'accélération, ces termes devraient être respectivement L/l_t et Dt_t .

c) Vitesse et distance de propagation sur les flancs

À la page 52 du rapport ST-X-3F, les auteurs suggèrent d'utiliser l'équation 70 (la fonction d'accélération de la vitesse de propagation) pour calculer la vitesse de propagation sur les flancs au temps écoulé t ($V_{f.t.}$)⁵. C'est incorrect. Il faut plutôt utiliser l'équation 89 du rapport ST-X-3F pour calculer $V_{f.t.}$ en remplaçant L/l par L/l_t . Pour calculer la distance de propagation sur les flancs au temps t après l'allumage (Df_t), il faut utiliser la nouvelle équation 92 ci-dessous :

$$Df_t = \frac{Dt_t + Da_t}{L/l_t \times 2} \quad (92)$$

où Dt_t et Da_t sont respectivement la distance de propagation à la tête et sur l'arrière de l'incendie au temps écoulé t .

3.6.2 Accélération d'un foyer ponctuel d'incendie et modèle à deux équations de la vitesse de propagation dans le type de combustible C-6

Problème

Le rapport ST-X-3F n'explique pas clairement la série d'étapes que nécessite l'application de la fonction d'accélération dans le modèle à deux équations de la vitesse de propagation aux fins du calcul de la vitesse de propagation, notamment de celle sur les flancs de l'incendie ($V_{f.s.}$), dans le type de combustible C-6 de la méthode PCI, ce qui a créé une certaine confusion.

Solution

Tous les termes de la vitesse de propagation et le paramètre L/l de la forme elliptique de l'incendie sont explicitement définis et utilisés ci-dessous avec l'indice t , qui dénote le temps écoulé depuis l'allumage. Pour calculer ces valeurs à l'état d'équilibre, il faut remplacer les termes en fonction du temps par les termes en fonction de l'équilibre (p. ex., $V_{s.t.}$ est remplacé par V_s , L/l_t est remplacé par L/l).

a) Vitesses de propagation en surface à la tête et sur l'arrière de l'incendie

Durant la phase d'accélération de la croissance d'un foyer ponctuel, on calcule la vitesse de propagation à la tête et sur l'arrière de l'incendie au temps t à l'aide de l'équation 70 décrite dans le rapport ST-X-3F en utilisant la vitesse appropriée de propagation à l'équilibre. Il est à noter que la vitesse de propagation en surface sur l'arrière de l'incendie, soit l'UPI correspondant à la vitesse de propagation sur l'arrière de l'incendie ou IPIa, est utilisée à la place de l'UPI dans l'équation 62. IPIa se calcule à l'aide des équations 75 et 76 de la manière décrite dans la section 8.3 du rapport ST-X-3F.

⁵Nota : Le rapport ST-X-3F utilise l'abréviation $V_{l.p.}$ pour désigner la vitesse finale de propagation latérale (sur les flancs). Dans le présent rapport, nous utilisons plutôt l'abréviation $V_{f.éq}$ conformément à la convention d'abréviation choisie (p. ex., $V_{a.s.}$, $V_{a.éq.}$).

b) Vitesse de propagation en surface sur les flancs de l'incendie

Il faut toujours calculer la vitesse de propagation sur les flancs à partir des vitesses de propagation à la tête et sur l'arrière de l'incendie et de L/l à l'aide de l'équation 89 du rapport ST-X-3F. Pour que le cas d'un incendie de surface dans le type C-6 de la méthode PCI soit bien clair, une nouvelle équation (semblable à l'équation 89) est présentée ci-dessous :

$$V_{f.s.t.} = \frac{V_{p.s.t.} + V_{p.a.s.t.}}{2 \times L/l_t} \quad (90)$$

où $V_{s.t.}$, $V_{f.s.t.}$ et $V_{a.s.t.}$ correspondent à la vitesse de propagation en surface d'un foyer ponctuel respectivement à la tête, sur les flancs et sur l'arrière de l'incendie, et L/l_t correspond au rapport longueur/largeur (L/l) d'un incendie elliptique au temps écoulé t défini à la section 3.6.1.

c) Vitesse finale de propagation à la tête de l'incendie

La vitesse finale de propagation à la tête de l'incendie dans le type C-6 est calculée à l'aide de l'équation 65 du rapport ST-X-3F, qui intègre la $V_{s.t.}$ et la vitesse de propagation d'un feu de cimes ($V_{f.c.}$), cette dernière étant calculée à l'aide de l'équation 64 du rapport ST-X-3F. Il est à noter que la $V_{f.c.}$ n'est pas influencée par la fonction d'accélération.

d) Vitesse finale de propagation sur l'arrière de l'incendie

La méthode de calcul de la vitesse finale de propagation sur l'arrière de l'incendie est la même que celle décrite ci-dessus pour la vitesse finale de propagation à la tête de l'incendie (à savoir, à l'aide des équations 62 à 65 du rapport ST-X-3F). Comme le rapport ST-X-3F ne décrit pas explicitement ni clairement comment utiliser l' IPI_a pour effectuer ce calcul, en voici une description.

Tel que mentionné ci-dessus dans le cas de la $V_{a.s.t.}$, l' IPI_a est utilisé au lieu de l' IPI dans l'équation 62. Il faudra remplacer IPI par IPI_a dans l'équation 64 pour calculer la vitesse de propagation d'un feu de cimes sur l'arrière de l'incendie ($V_{a.c.}$). Il faut ensuite utiliser la $V_{a.c.}$ dans l'équation 65 avec les valeurs de la $V_{a.s.t.}$ et de la fraction consommée des cimes sur l'arrière de l'incendie au temps écoulé t ($FCC_{a.t.}$, calculée à l'aide de l'équation 58 du rapport ST-X-3F) pour calculer la vitesse finale de propagation sur l'arrière de l'incendie ($V_{a.t.}$).

e) Vitesse finale de propagation sur les flancs

Tout comme dans le cas de la $V_{f.s.t.}$, il faut toujours calculer la $V_{f.t.}$ à l'aide de la vitesse finale à la tête et sur l'arrière de l'incendie ($V_{t.t.}$ et $V_{a.t.}$, respectivement) et de L/l_t . Il faut calculer la $V_{f.t.}$ à l'aide de l'équation 89 du rapport ST-X-3F. Par souci de clarté, nous présentons l'équation suivante utilisant le temps écoulé t en indice :

$$V_{f.t.} = \frac{V_{t.t.} + V_{a.t.}}{2 \times L/l_t} \quad (89)$$

3.6.3 Calcul de la vitesse de propagation autour du périmètre d'un incendie elliptique

Problem

Le rapport ST-X-3F ne présente pas de méthode de calcul de la vitesse de propagation ($V_{t.f.}$) en tout point du périmètre d'un incendie elliptique. Pour appliquer adéquatement la méthode PCI à la modélisation de la croissance de l'incendie, il faut toutefois calculer la vitesse de propagation et d'autres caractéristiques du comportement du feu, comme l'intensité de l'incendie, en tout point du périmètre d'un incendie. Certaines méthodes publiées de calcul de la $V_{t.f.}$ en tout point du périmètre d'un incendie elliptique utilisent comme point d'origine de l'incendie l'un des foyers de l'ellipse afin

de simplifier la géométrie. Ainsi, la méthode américaine de prévision du comportement de l'incendie BehavePlus (Andrews et al., 2008) et d'autres applications (p. ex., Scott, 2007) ont recours à cette hypothèse; or, l'emplacement du point d'origine d'un incendie ne correspond pas nécessairement à l'un des foyers de l'ellipse (Catchpole et al., 1982). La version finale de 1992 de la méthode PCI présentait une relation explicite de la vitesse de propagation sur l'arrière de l'incendie ($V_{a.éq.}$) qui avait été construite afin d'éliminer la nécessité de recourir à l'hypothèse de l'« approche par foyers »; cet aspect est examiné dans la section 8.3 du rapport ST-X-3F. Une estimation de la $V_{a.éq.}$, conjuguée à la vitesse prévue de propagation à la tête de l'incendie, définit l'emplacement du point d'origine de l'incendie sur le demi-grand axe de l'ellipse (figure 7). Catchpole et al. (1982) présentent une méthode de calcul de la vitesse de propagation en tout point P autour du périmètre d'un incendie elliptique, mais cette forme fonctionnelle donne la vitesse de propagation dans la direction perpendiculaire à la tangente de l'ellipse en ce point. Nous définissons toutefois la vitesse de propagation au point P du périmètre d'une ellipse comme la vitesse de propagation dans la direction définie par une droite tracée depuis l'origine de l'incendie jusqu'au point P (figure 7). Il a donc été jugé nécessaire de modifier la formulation.

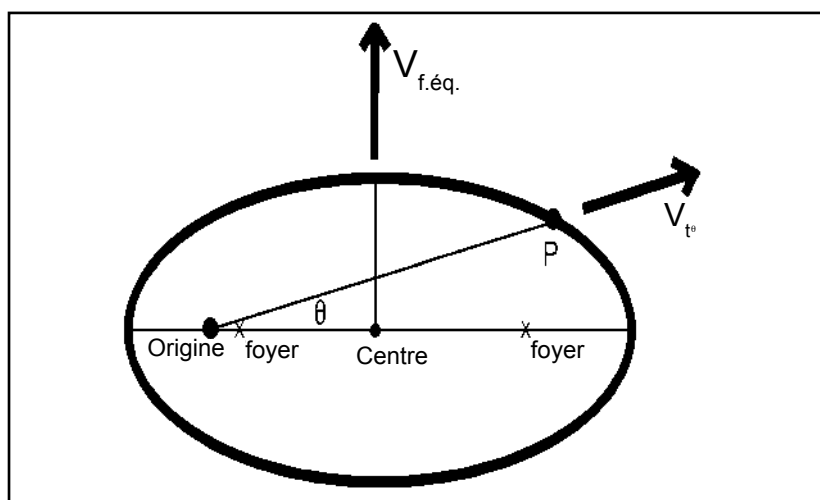


Figure 7 : Représentation schématique d'un incendie de forme elliptique montrant la direction de la propagation sur les flancs ($V_{f.éq.}$) et en un point arbitraire P du périmètre (V_{t^e}).

Solution

L'équation 94 ci-dessous permet de calculer la vitesse de propagation en tout point du périmètre d'un incendie elliptique à l'aide des vitesses de propagation à la tête, sur les flancs et sur l'arrière de l'incendie de la méthode PCI. La figure 7 illustre un incendie de forme elliptique idéale et les propriétés pertinentes.

Il est à noter (figure 7) que la vitesse de propagation sur les flancs ($V_{f.éq.}$) est définie dans la méthode PCI comme la vitesse latérale de propagation ou vitesse de propagation sur les flancs perpendiculairement à la direction de la propagation à la tête de l'incendie. La direction de la propagation au point P (figure 7) suit la droite qui unit le point d'allumage ou d'origine de l'incendie au point P de l'ellipse. La vitesse de propagation de l'incendie au point P de l'ellipse à un angle par rapport à la direction de la propagation à la tête de l'incendie est calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$V_{t\theta}(\theta) = \frac{V_{t.f.} - V_{a.éq.}}{2 \times \cos \theta} + \frac{V_{t.f.} - V_{a.éq.}}{2 \times \cos \theta} \times \left(\frac{V_{f.éq.} \times \cos \theta \times \left[V_{f.éq.}^2 \times \cos^2 \theta + (V_{t.f.} \times V_{a.éq.}) \times \sin^2 \theta \right]^{\frac{1}{2}} - \frac{V_{t.f.}^2 - V_{a.éq.}^2}{4} \times \sin^2 \theta}{V_{f.éq.}^2 \times \cos^2 \theta + \left(\frac{V_{t.f.} \times V_{a.éq.}}{2} \right)^2 \sin^2 \theta} \right) \quad (94)$$

À partir de cette valeur de $V_{t\theta}$, on peut ensuite calculer la valeur de tout descripteur ou de toute caractéristique connexe du comportement du feu, comme l'intensité de l'incendie, en tout point de l'ellipse à l'aide des relations présentées dans le rapport ST-X-3F. Le tableau 3 présente un exemple de calcul à l'aide de l'équation 94. Un aspect particulier important à noter est le cas où $\theta = 90^\circ$. Dans ce cas, l'équation 94 donne une valeur indéfinie (à savoir, 0/0), mais seulement lorsque θ est exactement de 90° ; aucun comportement asymptotique n'est observé à mesure que l'angle s'approche de 90° . Par conséquent, si θ est décalé très légèrement (p. ex., $\theta = 90,001^\circ$), on peut obtenir une estimation précise de $V_{t\theta}$ ($\theta = 90$).

Table 3. Exemple de calcul de la vitesse de propagation d'un incendie de forme elliptique. Les conditions sont les suivantes : incendie dans un type de combustible C-2 (pessière boréale) de la méthode PCI, en terrain plat, avec un ICL de 92, une vitesse du vent de 15 km/h et un ICD de 64. On obtient donc : $L/l = 1,98$, $V_{t.f.} = 17,16$, $V_{f.éq.} = 4,88$, et $V_{a.éq.} = 2,16$.

θ (degrés)	$V_{t\theta}$ (m/min)
0	17,16
15	14,29
30	9,72
45	6,6
60	4,78
75	3,71
90	3,07
105	2,67
120	2,43
135	2,28
150	2,20
165	2,17
180	2,16

3.7 Sommaire des révisions au rapport ST-X-3F

La liste ci-dessous résume les changements présentés dans la section précédente. L'annexe 2 énumère toutes les équations présentées dans ce document.

- Les équations 9a et 9b remplacent l'équation 9 du rapport ST-X-3F.
- Les équations 29 à 32 remplacent les équations 29 à 32 du rapport ST-X-3F; les équations 33 et 34 du rapport ST-X-3F ne sont plus utilisées.
- Les équations 35a et 35b remplacent l'équation 35 du rapport ST-X-3F.
- Les équations 39a et 39b remplacent l'équation 39 du rapport ST-X-3F.
- Les équations 41a et 41b remplacent l'équation 41 du rapport ST-X-3F.
- L'équation 42a remplace l'équation 42 du rapport ST-X-3F.
- Les équations 42b et 42c ont été ajoutées.
- Les équations 44a, 44b, 44c, 44d et 44e remplacent l'équation 44 du rapport ST-X-3F.
- Les équations 66a, 66b et 66c remplacent l'équation 66 du rapport ST-X-3F.
- Les équations 80a, 80b et 81 remplacent les équations 80 et 81 du rapport ST-X-3F.
- Les équations 90 à 94 sont nouvelles.

4.0 JEUX D'ESSAI

4.1 Description

En 1992, les routines mathématiques qui constituaient la méthode PCI ont été programmées en langage C et rigoureusement testées. On espérait que les développeurs de logiciels utiliseraient ce code machine comme noyau pour mettre en œuvre leur système (et on l'espère toujours), garantissant ainsi que les calculs seraient effectués à l'aide d'une méthode normalisée. Le code source C est disponible gratuitement⁶, et certains développeurs de logiciels et d'autres personnes l'ont utilisé comme noyau dans leurs applications de la méthode PCI. Cependant, certaines applications informatiques de la méthode ont été élaborées sans l'aide de cette bibliothèque de codes C. Nous avons donc élaboré un ensemble de données officiel à utiliser comme référence et permettant de vérifier chaque type de combustible et divers sous-modèles de la méthode PCI (p. ex., calcul de l'humidité foliaire ou de l'équivalent vitesse du vent de la pente). En pratique, les développeurs de logiciels devraient utiliser ce jeu d'essai pour vérifier l'exactitude des résultats de leurs applications informatiques de la méthode PCI par rapport aux résultats du code « officiel » conservé par le Service canadien des forêts.

Cet ensemble d'intrants de la méthode PCI que nous avons préparé est conçu pour produire un petit jeu de données d'essai afin que les développeurs de logiciels puissent vérifier un nombre limité d'exemples tout en étant en mesure de bien contrôler tous les effets et interactions importants de la méthode PCI. Les caractéristiques du jeu de données d'essai, qui est composé de 20 cas ou scénarios, sont les suivantes :

- Nous avons jugé nécessaire que tous les types de combustible soient représentés afin de permettre de rechercher des erreurs dans les constantes et équations propres aux divers types de combustible de la méthode PCI (p. ex., voir les tableaux 6, 7 et 8 du rapport ST-X-3F).
- Nous présentons une gamme de latitudes et de longitudes à des fins de vérification des équations permettant d'estimer l'humidité foliaire, puis l'effet sur l'intensité critique de l'incendie de surface pour l'embrasement des cimes.

⁶Des copies électroniques de l'ensemble d'intrants et une liste détaillée des résultats ainsi que le code C de la méthode PCI sont disponibles sur demande. Pour les obtenir, prière de s'adresser à B.M. Wotton, Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie des Grands Lacs, 1219, rue Queen Est, Sault Ste. Marie (Ontario) P6A 2E5 (courriel : mwotton@nrcan.gc.ca).

- Un nombre important de scénarios comportent des interactions vent/pente et testent une gamme de combinaisons de direction du vent et d'orientation de la pente.
- Tous les cas ou scénarios sont considérés comme des foyers ponctuels d'incendie afin de permettre de vérifier la fonction d'accélération et la fonction de propagation d'un incendie elliptique de la méthode PCI (c.-à-d., calcul du rapport longueur/largeur et des vitesses de propagation à la tête, sur les flancs et sur l'arrière d'un incendie de forme elliptique au temps écoulé t depuis l'allumage).

La section 4.2 présente une description des interactions examinées dans les 20 cas compilés à des fins de vérification. La section 4.3 énumère en détail les intrants utilisés et les résultats.

4.2 Exemples de type de combustible et effets vérifiés

Certaines équations et interactions sont vérifiées pour chaque type de combustible. Les résultats de chaque jeu d'essai sont présentés dans la section qui suit.

Jeu d'essai 1 : Type de combustible C-1

- Interaction vent/pente de faible amplitude (le vent est à angle droit par rapport à la pente)
- Un ICD élevé devrait faire augmenter la vitesse de propagation ($ECD > 1,0$)
- Fonction d'accélération dans un couvert clair
- Nouvelle fonction CCS

Jeu d'essai 2 : Type de combustible C-2

- Conditions extrêmes pour la vitesse de propagation (vitesse du vent élevée et combustible léger sec)
- Addition du vecteur pente et du vecteur vent à angle oblique l'un par rapport à l'autre
- Vitesse du vent > 40 km/h : vérification de l'inclusion de l'autre formule de calcul de l'IPI (équation 53a de la note n° 2 au bas de la page 36 du rapport ST-X-3F)
- $\% P > 70 \%$: vérification de la limite supérieure de la pente à l'aide des nouvelles équations 39a et 39b
- $V_{p.c.} \sim 110$: vérification de l'inclusion des nouvelles équations 41a et 41b

Jeu d'essai 3 : Type de combustible C-3

- ICD faible : devrait se traduire par $ECD < 1,0$ et une réduction de la vitesse de propagation
- Vitesse du vent > 40 km/h : vérification de l'inclusion de l'autre formule de calcul de l'IPI (équation 53a de la note n° 2 au bas de la page 36 du rapport ST-X-3F)
- Temps écoulé bref : vérification de la nouvelle relation L/l_t (équation 81)

Jeu d'essai 4 : Type de combustible C-4

- Vent nul et ICL faible : très faible vitesse de propagation
- $\% P > 70 \%$: vérification de la limite supérieure de la pente de 60 % (nouvelles équations 39a et 39b)
- Prise en compte de l'élévation lors du calcul de l'HF : il faut utiliser la deuxième série d'équations du modèle de l'HF (équations 3 et 4 du rapport ST-X-3F)
- ICD élevé : alors $ECD > 1,0$ et vitesse de propagation plus élevée
- Conditions proches du point de transition entre un feu intermittent de cimes et un feu continu de cimes (c.-à-d., $FCC \approx 0,9$)

Jeu d'essai 5 : Type de combustible C-5

- Conditions de faible propagation
- $ICD = ICD_0$: par conséquent, ECD devrait être égal à 1,0
- Le vecteur pente et le vecteur vent ont des directions opposées et sont équivalents : ils s'annulent donc l'un et l'autre et donnent $\acute{E}VV = 0$

Jeu d'essai 6 : Type de combustible C-6

- HF < 97 % : vérification de l'effet de l'EHF sur la vitesse de propagation du feu de cimes
- $V_{t.f.}$ a atteint le point d'un feu continu de cimes (FCC \approx 0,9) mais est sensible aux différences de HF
- ICD proche de ICD_0 : ECD est donc à peu près égal à 1,0.
- Modèle de double vitesse de propagation à l'équilibre ou méthode à deux équations avec embrasement des cimes : vérification des calculs de la FCC sur les flancs de l'incendie, de la vitesse de propagation et de l'intensité à l'aide de l'équation sur la vitesse de propagation d'un feu de cimes dans le type de combustible C-6 (équation 64 du rapport ST-X-3F)
- Le vent et la pente sont contraires : vérification des vecteurs adéquats pour l'ÉVV

Jeu d'essai 7 : Type de combustible C-7

- ICL modéré (à une décimale aux fins de vérification de l'exactitude des intrants)
- Exactitude de la vitesse du vent également à une décimale
- Directions de la pente et du vent perpendiculaires : vérification des vecteurs adéquats pour l'ÉVV
- ICD très faible : par conséquent, ECD < 1,0 et vitesse de propagation réduite

Jeu d'essai 8 : Type de combustible D-1

- Conditions sèches et venteuses
- ICD élevé : par conséquent, ECD > 1,0 et vitesse de propagation plus élevée
- Vitesse du vent > 40 km/h : à nouveau aux fins de vérification de l'inclusion de l'équation 53a de la note n° 2 au bas de la page 36 du rapport ST-X-3F

Jeu d'essai 9 : Type de combustible M-1

- Interaction du vent et de la pente : vérification de la nouvelle équation 42
- Valeurs moyennes de % C
- ICD < ICD_0 : ECD < 1,0 et vitesse de propagation réduite

Jeu d'essai 10 : Type de combustible M-2

- Conditions extrêmement sèches et venteuses
- Interaction du vent et de la pente : vérification de la nouvelle équation 42
- % C faible
- Vitesse du vent > 40 km/h : à nouveau aux fins de vérification de l'inclusion de l'équation 53a de la note n° 2 au bas de la page 36 du rapport ST-X-3F

Jeu d'essai 11 : Type de combustible M-3

- ICD faible : ECD < 1,0 et vitesse de propagation réduite
- Conditions proches du point de transition entre un feu intermittent de cimes et un feu continu de cimes (FCC \approx 0,10)
- % $S_{b.m.}$ élevé
- Directions de la pente et du vent perpendiculaires : vérification des vecteurs adéquats pour l'ÉVV

Jeu d'essai 12 : Type de combustible M-4

- Conditions extrêmement sèches et venteuses
- % $S_{b.m.}$ faible
- HF est au maximum
- Directions de la pente et du vent perpendiculaires : vérification des vecteurs adéquats pour l'ÉVV

Jeu d'essai 13 : Type de combustible O-1a

- Conditions extrêmement sèches et venteuses
- Vérification de l'interaction du vent et de la pente aux fins de l'inclusion des nouvelles équations 43a et 43b
- Absence d'effet de l'ICD

- % Fan. = 90 %
- Fort vent : vérification du modèle du rapport longueur/largeur (L/l) d'un feu d'herbes
- Bref temps écoulé depuis l'allumage : vérification de L/l , à l'aide de la nouvelle équation 81

Jeu d'essai 14 : Type de combustible O-1b

- Conditions de brûlage très modérées
- Le degré de fanage des herbes est un peu plus élevé que le seuil critique de 50 %
- Vents plus faibles que la limite de < 1 km/h mais non nuls : vérification du modèle du rapport longueur/largeur (L/l) d'un feu d'herbes à l'aide de la nouvelle équation 80b
- Terrain plat (aucune pente)

Jeu d'essai 15 : Type de combustible O-1b

- Conditions extrêmement sèches et venteuses
- % Fan. < 50 % : vérification du nouveau modèle du $C_{f.h.}$ par rapport à la vitesse de propagation (équation 35a) pour les types de combustibles herbacés à % Fan. < 50 %

Jeu d'essai 16 : Type de combustible S-1

- Conditions extrêmement sèches et venteuses
- Interaction d'une pente moyennement abrupte et du vent
- ICD très élevé : $ECD > 0$ et vitesse de propagation plus élevée

Jeu d'essai 17 : Type de combustible S-2

- Combustible humide : les vitesses de propagation devraient être faibles
- Absence de vent et de pente
- $ICD = ICD_0$: par conséquent, $ECD = 1,0$

Jeu d'essai 18 : Type de combustible S-3

- Conditions de brûlage modérées
- Pente moyennement abrupte et vent nul
- ICD faible : $ECD < 1,0$ et vitesse de propagation réduite

Jeu d'essai 19 : Type de combustible C-6

- HF ~ 97 % : par conséquent, aucune influence de l'EHF sur la vitesse de propagation
- Conditions de brûlage choisies pour qu'il n'y ait pas d'embranchement des cimes : vérification du modèle de double vitesse de propagation à l'équilibre ou méthode à deux équations

Jeu d'essai 20 : Type de combustible C-6

- HF > 97 % : par conséquent, l'EHF devrait réduire la vitesse de propagation
- Conditions de brûlage choisies pour correspondre à celles d'un feu intermittent de cimes : vérification du modèle de double vitesse de propagation à l'équilibre ou méthode à deux équations.

4.3 Intrants et résultats des jeux de données d'essai

Les tableaux 4 à 6 présentent les intrants et résultats des 20 jeux d'essais décrits dans la section 4.2. Il est à noter que les résultats de chaque jeu d'essai présentent, dans la plupart des cas, des valeurs en apparence très exactes (c.-à-d., à plusieurs décimales). Ce degré d'exactitude dépasse le degré d'exactitude réel des modèles de la méthode PCI et ne pourrait être utilisé à l'échelle opérationnelle. Le degré élevé d'exactitude des résultats présentés a pour but de permettre aux évaluateurs de logiciels d'examiner l'exactitude de leur programmation de la méthode PCI.

Tableau 4. Intrants de chaque jeu d'essai décrit dans la section 4.2. Les titres de colonnes correspondent à la liste des symboles et abréviations de l'annexe II du rapport ST-X-3F ou de l'annexe 1 du présent document, sauf indication contraire.

Jeu d'essai	Type de combustible	ICL	ICD	V _v (km/h)	DIR _v ^a (°)	AZ _v (°)	%P (%)	AZ _p (°)	Lat. ^b (°)	Long. ^b (°)	Élév. ^b (m)	D _j	D ₀ ^c t	(min)	%C (%)	%S _{b,m.} (%)	QCH (kg/m ²)	% Fan. (%)	
1	C-1	90	130	20	0	180	15	90	55	110	-	182	-	20	-	-	-	-	-
2	C-2	97	119	20,4	0	180	75	135	50	90	-	121	-	20	-	-	-	-	-
3	C-3	95	30	50	0	180	0	0	55	110	-	182	-	5	-	-	-	-	-
4	C-4	85	82	0	-	171	75	135	55	105	200	182	-	30	-	-	-	-	-
5	C-5	88	56	3,4	0	180	23	0	55	105	-	152	145	30	-	-	-	-	-
6	C-6	94	56	25	0	180	10	0	55	105	-	152	132	60	-	-	-	-	-
7	C-7	88,8	15	22,1	270	90	15	180	50	125	-	152	-	20	-	-	-	-	-
8	D-1	98	100	50	270	90	35	180	45	100	-	152	-	60	-	-	-	-	-
9	M-1	90	40	15,5	180	0	25	0	47	85	-	182	-	20	55	-	-	-	-
10	M-2	97	150	41	180	0	50	20	63	120	100	213	-	20	10	-	-	-	-
11	M-3	87	25	10,7	180	0	8	93	56	90	10	130	-	20	-	70	-	-	-
12	M-4	97	80	35	180	0	50	90	56	90	-	258	-	20	-	30	-	-	-
13	O-1a	95	20	35	180	0	50	90	56	90	-	244	-	5	-	-	1	90	-
14	O-1b	85	40	0,5	180	0	0	-	50	90	-	152	-	10	-	-	0,2	55	-
15	O-1b	95	40	35	180	0	10	90	50	90	-	152	-	20	-	-	1	45	-
16	S-1	95	130	15	180	0	20	45	50	90	-	152	-	20	-	-	-	-	-
17	S-2	87	63	0	0	180	0	0	50	90	-	182	-	20	-	-	-	-	-
18	S-3	89	20	0	0	180	30	90	50	90	-	213	-	20	-	-	-	-	-
19	C-6	90	80	15	0	180	10	90	46	77	-	171	-	10	-	-	-	-	-
20	C-6	91	100	20	0	180	30	90	46	77	-	213	-	10	-	-	-	-	-

^a Direction du vent (c.-à-d., la direction d'où souffle le vent).

^b Lat., Long. et Élév. correspondent respectivement à la latitude (nord), la longitude (ouest) et l'élévation.

^c Dans les intrants, D₀ correspond à une date du minimum de HF précisée par l'utilisateur.

Tableau 5. Résultats primaires de la méthode PCI pour les jeux d'essai définis dans la section 4.2. Les titres de colonnes correspondent à la liste des symboles et abréviations de l'annexe II du rapport ST-X-3F ou de l'annexe 1 du présent document, sauf indication contraire.

Jeu d'essai	ÉVW (km/h)	Az _{v.r.} (°)	EOD	CP	IPI	HF (%)	D ₀	V _s (m/min)	CCS (kg/m ²)	IIS (kW/m)	CC (kg/m ²)	V _{c.s.} (m/min)	ICS (kW/m)	CTC (kg/m ²)	FCC	DI ^a	V _{l.f.} ^b (m/min)	ITI ^c (kW/m)
1	20,086	174,7	1,033	1,437	11,796	93,33	161	5,569	1,399	2336,99	0,485	1,04	436,56	1,884	0,647	I	5,569	3147,82
2	127,689	141,5	1,137	6,78	136,138	107,39	155	121,104	3,728	135426,4	0,8	0,857	958,88	4,528	1	C	121,104	164491,3
3	50	180	0,781	1	86,707	93,33	161	80,517	0,602	14536,5	1,15	19,345	3492,44	1,752	1	C	80,517	42314,89
4	27,059	135	1,034	6,78	8,239	94,15	160	11,293	2,543	8613,74	1,07	1,637	1248,34	3,612	0,891	I	11,293	12237,99
5	0,004	0	1	1,832	3,219	85,93	145	0,049	1,218	17,88	0	29,082	10627,79	1,218	0	S	0,049	17,88
6	22,939	180	0,981	1,25	23,963	92,56	132	18,261	1,218	6673,44	1,64	7,74	2828,67	2,858	0,911	C	42,809	36704,87
7	22,429	99,8	0,628	1,437	11,175	89,84	136	2,358	2,107	1490,59	0	7,359	4652,24	2,107	0	S	2,358	1490,59
8	52,425	107,5	1,118	2,725	134,432	0	0	31,212	1,259	11792,25	0	0	0	1,259	0	S	31,212	11792,25
9	24,753	0	0,946	1,953	14,924	108,57	147	13,307	1,364	5446,63	0,343	6,72	2750,68	1,708	0,78	I	13,307	6817,05
10	65,616	7,7	1,16	4,654	129,9	118,7	165	18,057	1,674	9069,43	0,075	6,149	3088,24	1,749	0,935	C	18,057	9474,8
11	10,861	13,3	0,8	1,186	4,822	112,73	169	9,366	1,249	3510,38	0,178	7,704	2887,5	1,427	0,318	I	9,366	4010,24
12	48,639	44	1,087	4,654	111,007	120	174	36,098	3,007	32568,84	0,240	3,472	3132,31	3,247	0,999	C	36,098	35166,5
13	46,175	40,7	1	4,654	80,396	0	0	134,693	1	40407,98	0	0	0	1	0	S	134,693	40407,98
14	0,5	0	1	1	2,161	0	0	0,402	0,2	24,14	0	0	0	0,2	0	S	0,402	24,14
15	35,135	5	1	1,25	50,849	0	0	13,299	1	3989,59	0	0	0	1	0	S	13,299	3989,59
16	22,511	16,9	1,307	1,669	26,915	0	0	45,111	7,797	105514,8	0	0	0	7,797	0	S	45,111	105514,8
17	0	180	1	1	2,789	0	0	1,012	11,454	3478,58	0	0	0	11,454	0	S	1,012	3478,58
18	6,224	90	0,775	2,3	5,083	0	0	1,399	10,249	4301,89	0	0	0	10,249	0	S	1,399	4301,89
19	15,105	173,3	1,041	1,25	9,178	96,81	146	4,395	2,038	2687,57	0	4,896	2993,79	2,038	0	S	4,395	2687,57
20	21,207	160,6	1,071	2,3	14,399	120	146	10,279	2,654	8184,36	1,271	4,957	3947,16	3,925	0,706	I	17,637	20766,53

^a Description de l'incendie (type d'incendie) : S = incendie de surface; I = feu intermittent de cimes, et C = feu continu de cimes.

^b Dans le cas présent, représente la vitesse finale de propagation à l'équilibre à la tête de l'incendie.

Tableau 6. Résultats secondaires de la méthode PCI pour les jeux d'essai définis dans la section 4.2. Les titres de colonnes correspondent à la liste des symboles et abréviations de l'annexe II du rapport ST-X-3F ou de l'annexe 1 du présent document, sauf indication contraire.

Jeu d'essai	L/l	L/i	A (ha)	P (km)	V_{cp} (m/min)	Tête de l'incendie ^a			Flancs de l'incendie ^b			Arrière de l'incendie ^c							
						V_{lt} (m/min)	D_t^d (m)	FCC	DI ^e	$V_{u,eq}$ (m/min)	I (kW/m)	V_{lt} (m/min)	D_t^d (m)	FCC	DI ^e	$V_{u,eq}$ (m/min)	I (kW/m)	$V_{d,t}$ (m/min)	D_t^d (m)
1	2,581	2,423	0,149	0,16	12,73	5,011	67,808	0,009	S	1,079	455,03	1,034	14	0	S	0,002	1,04	0,002	0,03
2	9,326	8,379	19,292	2,9	244,86	107,33	1434,62	0,726	I	6,493	8392,74	6,405	85,609	0	S	0,001	1,63	0,001	0,017
3	6,066	3,124	0,213	0,19	166,26	33,758	92,003	0	S	6,637	1198,23	5,403	14,726	0	S	0,002	0,44	0,001	0,003
4	3,463	3,353	1,342	0,52	25,08	10,79	234,758	0,006	S	1,663	1271,76	1,641	35,693	0	S	0,223	170,06	0,213	4,635
5	1	1	0	0,01	0,31	0,047	1,056	0	S	0,049	17,86	0,047	1,055	0	S	0,049	17,85	0,047	1,054
6	2,939	2,935	125,83	4,84	95,92	42,729	2160,886	0	S	3,133	1144,81	7,304	369,388	0	S	0,152	55,67	0,152	7,69
7	2,874	2,686	0,025	0,07	5,36	2,121	28,708	0	S	0,416	263,08	0,401	5,421	0	S	0,034	21,8	0,031	0,42
8	6,289	6,283	32,207	3,31	64,45	31,18	1601,575	0	S	2,487	939,71	2,487	127,735	0	S	0,07	26,6	0,07	3,613
9	3,169	2,847	0,635	0,33	30,25	11,33	147,286	0	S	2,163	885,28	2,05	26,651	0	S	0,403	164,99	0,343	4,462
10	7,312	6,555	0,536	0,43	36,93	15,892	211,294	0	S	1,236	620,85	1,214	16,134	0	S	0,02	9,93	0,017	0,231
11	1,553	1,254	0,218	0,15	30,42	4,306	47,448	0	S	3,748	1404,85	2,134	23,515	0	S	2,28	854,39	1,048	11,548
12	5,936	5,375	2,713	0,89	75,22	31,991	427,593	0	S	3,064	2764,19	2,999	40,083	0	S	0,276	249,08	0,245	3,27
13	6,511	3,41	0,607	0,33	278,79	58,901	161,286	0	S	10,413	3123,82	8,695	23,808	0	S	0,911	273,24	0,398	1,091
14	1	1	0,001	0,01	2,42	0,275	1,633	0	S	0,38'6	23,19	0,264	1,568	0	S	0,37	22,23	0,253	1,503
15	5,736	5,261	0,398	0,34	27,80	11,965	161,926	0	S	1,169	350,71	1,147	15,519	0	S	0,113	33,86	0,102	1,374
16	2,885	2,696	10,265	1,33	109,19	40,588	549,273	0	S	8,45	19763,6	8,135	110,094	0	S	3,639	8511,65	3,274	44,309
17	1	1	0,048	0,08	6,36	0,911	12,326	0	S	1,012	3478,58	0,911	12,326	0	S	1,012	3478,58	0,911	12,326
18	1,192	1,173	0,027	0,06	4,78	1,259	17,036	0	S	0,693	2130,08	0,634	8,574	0	S	0,253	778,14	0,228	3,081
19	1,991	1,677	0,016	0,04	10,90	3,004	17,835	0	S	1,129	690,49	0,916	5,44	0	S	0,101	61,98	0,069	0,411
20	2,721	2,002	0,136	0,13	40,06	10,266	58,699	0	S	1,901	1513,65	2,574	14,718	0	S	0,066	52,48	0,038	0,219

^a Toutes les valeurs de ces deux colonnes concernent la tête de l'incendie (p. ex., $V_{t.f}$ décrit la vitesse de propagation à la tête de l'incendie au temps écoulé t).

^b Toutes les valeurs de ces six colonnes concernent les flancs de l'incendie (p. ex., $V_{f,eq}$ décrit la vitesse de propagation sur les flancs de l'incendie).

^c Toutes les valeurs de ces six colonnes concernent l'arrière de l'incendie (p. ex., I décrit l'intensité sur l'arrière de l'incendie).

^d Distance de propagation au temps écoulé t à la tête, sur les flancs ou sur l'arrière de l'incendie, selon le cas.

^e Description de l'incendie (type d'incendie) : S = incendie de surface.

5.0 ANALYSE

La méthode PCI et ses nombreux outils dérivés d'aide à la décision ont été rapidement adoptés par tous les organismes de gestion des incendies de forêt du Canada. Des rapports publiés (p. ex., Alexander, 1991, 1992, 2000; Alexander et al., 1993; Fogarty et al., 1996; Rasmussen et Fogarty, 1997; Quintilio et al., 2001; Mottus, 2001; Cruz et Plucinski, 2007) et quelque 200 études de cas, dont la préparation était exigée dans le cadre du cours spécialisé de formation sur le comportement des incendies de forêt parrainé par le Centre interservices des feux de forêt du Canada (CIFFC) (voir Alexander et Thomas, 2003b, p. 7), ont évalué favorablement les prévisions des modèles et le comportement observé des incendies de végétation et des brûlages dirigés. J. M. Watts (1987) a toutefois formulé des commentaires pertinents concernant la validation des modèles d'incendie en général et la nécessité de continuer à les évaluer, des commentaires qu'il convient de rappeler :

... même si la validation est un processus qui consiste à vérifier que les résultats d'un modèle sont conformes à la réalité, aucun modèle ne peut être validé de façon absolue; en d'autres termes, la validation ne peut montrer l'infailibilité d'un modèle, seulement ses failles. Qui dit acceptation d'un modèle, ne dit pas nécessairement certitude mais plutôt degré de confiance suffisant pour justifier d'y donner suite. En pratique, la validation d'un modèle d'incendie est donc en fait un problème d'invalidation. Plus il est difficile d'invalider le modèle, plus le niveau de confiance dans le modèle est élevé. (traduction libre)

Les commentaires de J. M. Watts abondent dans le même sens que ceux formulés en 1979 par George Box qui affirmait que tous les modèles sont faux, mais certains sont utiles.

Malgré l'acceptation et l'utilisation opérationnelle à grande échelle de la méthode PCI, les utilisateurs ne doivent pas oublier que l'élaboration des modèles repose sur une approche empirique et l'avis d'experts. Les paragraphes suivants examinent certaines des hypothèses à la base de la méthode PCI.

Vitesse de propagation et plafonnement dans les équation de la $V_{i,f}$ en fonction de l'IPI

Lors de l'élaboration du rapport ST-X-3F, il a été posé comme hypothèse que la vitesse à laquelle avance un incendie plafonne à des vitesses très élevées du vent ou plus particulièrement à des IPI très élevés. Les auteurs ont jugé que c'était une voie d'approche prudente à adopter pour pallier l'absence de recherches précises sur le sujet. Les valeurs maximales possibles de la vitesse de propagation dans les types de combustible herbacé O-1a et O-1b sont respectivement de 190 et 250 m/min dans la méthode PCI. Or, des valeurs plus élevées ont déjà été observées lors de feux d'herbes. Cheney et al. (1998) répertorient six cas documentés de feux d'herbes dont la vitesse de propagation avait été supérieure à 250 m/min, y compris un feu de 383 m/min (Noble, 1991) dans une prairie entièrement fanée et exceptionnellement sèche (ICL de 99; Fogarty et Alexander, 1999), avec un vent soufflant à 10 m de la surface en terrain dégagé de 45 km/h, ce qui a eu pour effet de faire passer la valeur de l'IPI de la méthode PCI à 131. En outre, Cheney (1981) a souligné que des observations effectuées lors d'incendies de végétation semblent indiquer que la vitesse de propagation du feu diminue en présence de vitesses très élevées du vent dans les prairies australiennes mais non pas dans les forêts de feuillus indigènes de l'Australie (eucalyptus) où la propagation aux cimes peut toutefois être réduite.

Même si la vitesse maximale calculable de progression du feu dans les types de combustible de la méthode PCI les plus sujets à des feux de cimes (à savoir les types C-2, C-3 et C-4) est de 110 m/min, Keeves et Douglas (1983) ont fait état d'une vitesse de propagation observée d'environ 200 m/min durant un intervalle de 50 minutes lors d'un incendie dans une plantation de pins de Monterey du sud de l'Australie où les conditions étaient extrêmement sèches (ICL de 99, ICD de 199; Pearce et Alexander, 1994) et où le vent soufflant à 10 m de la surface en terrain dégagé était de plus de 80 km/h (Australian Bureau of Meteorology, 1984), ce qui a eu pour effet de faire passer la valeur de l'IPI de la méthode PCI à environ 175. On a signalé peu de cas d'incendies de végétation se propageant dans des forêts de conifères de l'Amérique du Nord à des vitesses variant de 133 à 183 m/min (8-11 km/h) durant de brefs intervalles (Anderson, 1968; Wade et

Ward, 1973; Simard et al., 1983). En revanche, on ne dispose d'aucune donnée fiable sur la vitesse du vent à associer à ces « pointes » de vitesse de propagation du feu.

Plafonnement dans les modèles de la consommation du combustible de surface

Les modèles de la consommation du combustible de surface (CCS) de la méthode PCI contiennent également une valeur maximale possible de la consommation du combustible, qui est déterminée par la quantité maximale disponible présumée de combustible. À la lumière des résultats d'une étude après-feu de l'incendie de 1968 de Vega (Kiil et Grigel 1969) et de l'incendie de 2001 de Chisholm (centre de l'Alberta), qui comportait le rebrûlage d'un ancien site d'étude du brûlage expérimental (Quintilio et al., 1991), la société Ember Research Services Ltd. (2003a, 2003b) est arrivée à la conclusion que le modèle de la CCS dans le type D-1 (peupliers faux-trembles sans feuilles) de la méthode PCI sous-estimerait la CCS lorsque les valeurs de l'ICD sont élevées et que la quantité de bois mort et de bois gisant est importante. Il importe de se rappeler que toutes les parcelles expérimentales utilisées pour élaborer le modèle de la CCS dans le type de combustible D-1 (Alexander et Sando, 1989; Quintilio et al., 1991), sauf une (Alexander, 1982), ne contenaient pas de quantités appréciables de bois mort/gisant. En fait, selon la description du type de combustible D-1, « Le combustible constitué de bois ronds morts jonchant le sol est un élément mineur du complexe de combustibles. » La valeur maximale possible établie pour le modèle de la CCS dans le type D-1 (1,5 kg/m²) était basée sur la quantité totale de combustible avant le brûlage. Il est évident que nous devons effectuer d'autres brûlages expérimentaux et/ou activités de surveillance d'incendies de forêt dans des tremblaies où l'accumulation de bois gisant est importante et le combustible exceptionnellement sec.

Les 16 types de combustible originaux

Les types de combustible modélisés dans la méthode PCI (tableau 1) représentent un large éventail de types forestiers et végétaux présents au Canada. Ils ne visaient pas à être représentatifs de tous les types pertinents de combustible du pays ni à constituer un ensemble définitif de modèles. L'objectif était plutôt de poursuivre les recherches afin d'étendre la méthode PCI à d'autres types de combustible. D'ailleurs, le Groupe de travail sur la Science et la technologie des feux du CIFFC (1999) soulignait que la méthode PCI n'avait pas de modèle de comportement du feu pour nombre de types de combustible du Canada, y compris les peuplements feuillus sans feuilles, les forêts ravagées par des insectes autres que la tordeuse des bourgeons de l'épinette et les forêts où des traitements sylvicoles, comme des travaux d'éclaircie ou d'élagage, sont effectués à des fins d'aménagement des peuplements. Le ministère des Forêts et des Parcs de la Colombie-Britannique et le Centre de foresterie du Pacifique du Service canadien des forêts mènent actuellement des essais de brûlage dans des peuplements de pins tordus ravagés par le dendroctone du pin ponderosa dans un site près de Vanderhoof, dans le centre de la Colombie-Britannique. Le ministère des Richesses naturelles de l'Ontario et le Service canadien des forêts mènent également un projet de brûlage expérimental près de Sault Ste. Marie (Ontario) afin d'examiner la validité des prévisions du comportement du feu établies à l'aide de la méthode PCI à l'égard du type de combustible M-1 (forêt boréale mixte sans feuilles) (Hely et al., 2001).

Même si certains essais sur le terrain ont porté sur un feu couvant soutenu dans des tremblaies durant l'été (Otway et al., 2007), l'allumage expérimental de bandes dans ce type de combustible n'a pas encore fait l'objet d'étude officielle. Certains utilisateurs ont présumé qu'il existait en fait un type « D-2 » (c.-à-d., peupliers faux-trembles sans feuilles) résultant de l'application d'un pourcentage de feuillus de 100 % au type M-2 (forêt boréale mixte avec feuilles) de la méthode PCI. Il convient toutefois de rappeler ce que précisait le rapport ST-X-3F (p. 32) à cet égard : « On ne possède aucune donnée sur la vitesse de propagation dans les feuillus l'été ou au débourrement, mais on pose par hypothèse qu'elle serait [équivalente à] 20 % de la vitesse observée quand les feuilles sont absentes. » L'approche relativement prudente ainsi adoptée – c.-à-d., 1/5 du résultat du modèle de la vitesse de propagation de l'incendie dans le type D-1 (peupliers faux-trembles sans feuilles) de la méthode PCI – était jugée justifiée puisque, d'après des essais antérieurs (p. ex., Stocks et Walker, 1968) et nombre d'observations non structurées et de comptes rendus non scientifiques sur

des incendies de forêt ayant balayé durant l'été des peuplements mixtes à proportion variable de conifères et de feuillus (p. ex., Juday, 1985), il est effectivement possible que le feu se propage dans des peuplements feuillus en été. En fait, on part de l'hypothèse que la teneur en eau de l'humus doit franchir un seuil donné pour que le feu puisse se propager dans les combustibles de surface qui, par ailleurs, doivent absolument être assez secs.

Ajustement de la hauteur de la base de la cime

De l'avis de plusieurs, la prévision du comportement des incendies tient à la fois de l'art et de la science (Van Wagner, 1985; Alexander et Thomas, 2004). En conséquence, les concepteurs de la méthode s'attendaient à ce que les praticiens apportent les ajustements et autres modifications appropriés dans leurs diverses applications de la méthode PCI pour adapter cette dernière à des situations précises. Il faut toujours procéder avec prudence et bien comprendre les hypothèses sous-jacentes à l'élaboration et à la structure de la méthode. Ainsi, nombre d'utilisateurs et de développeurs de logiciels voulaient être en mesure de modifier la HBC dans les types de combustible de la méthode PCI autres que le type C-6 (plantation de conifères). Le rapport ST-X-3F (p. 39) aborde cet aspect dans les termes suivants :

La hauteur de la base de la cime [appelée couronne dans le rapport ST-X-3F] détermine le critère d'inflammation des cimes; toutefois, la théorie sur laquelle repose ce critère dépend elle-même de données empiriques pour sa forme quantitative finale. La hauteur de la base de la cime affectée à chaque type de combustible est donc d'une certaine façon empirique. Même si la description de chaque type de combustible donne une indication de cette hauteur, la valeur affectée à chaque type de combustible devrait correspondre à l'allure générale du phénomène d'inflammation des cimes. Les valeurs finales attribuées à cette hauteur représentent dans la mesure du possible la structure réelle de la forêt ...

Même si une valeur unique de la HBC a été affectée à chaque type de combustible de la méthode PCI sujet à un feu de cimes, il existe dans la pratique une plage de HBC associées à chacun des types en raison de la variabilité naturelle des peuplements à partir desquels les modèles du comportement du feu ont été élaborés. Il n'est pas recommandé de modifier la hauteur de la base de la cime dans les types de combustible de la méthode PCI autres que le type C-6 (plantation de conifères). Il existe cependant des modèles qui permettent à un utilisateur d'examiner l'effet de diverses hauteurs de la base de la cime sur le comportement du feu dans certains types de peuplement (p. ex., Cruz et al., 2003, 2004, 2007; Alexander et al., 2006).

6.0 CONCLUSIONS

L'élaboration de la méthode PCI se poursuit depuis plus de 30 ans. Le Groupe de recherche sur les incendies du Service canadien des forêts, dans le cadre de son engagement envers l'avancement de la pyrologie forestière et le soutien des groupes d'intervention, continuera de s'employer à réunir des données et à intégrer régulièrement des améliorations à la méthode PCI et à les diffuser sous forme de publications, comme le présent rapport. La méthode PCI et la MCEDEFIF doivent une grande partie de leur succès à l'application de simples principes de la physique combinés à des mesures détaillées sur le terrain et à la modélisation empirique (Van Wagner, 1971, 1985; Alexander et Quintilio, 1990; Stocks et al., 2004a). La recherche menée par le Service canadien des forêts et d'autres scientifiques sur les processus physiques agissant sur le comportement des incendies de forêt (Stocks et al., 2004b; Taylor et al., 2004; Cruz et al., 2005, 2006a, 2006b, 2006c; Alexander et Cruz, 2006; Beverly et Wotton, 2007), y compris la teneur en eau du combustible (Beck et Armitage, 2004; Northcott, 1999; Abbott et al., 2007; Wotton et Beverly, 2007) et les caractéristiques du complexe de combustible (Alexander et al., 2004; Lavoie, 2004; Whitehead et al., 2007), se poursuit sans relâche, et les relations

empiriques et théoriques contenues dans la méthode PCI devraient évoluer au fil de l'amélioration des connaissances.

La rétroaction des utilisateurs et l'expérience opérationnelle continueront d'être des éléments indispensables à l'amélioration de la méthode. L'observation, par les chercheurs sur les incendies et le personnel d'intervention, du comportement de futurs incendies de végétation non maîtrisés, en regard des répercussions sur la documentation des études de cas antérieures (Alexander et Thomas, 2003a, 2003b) et des résultats des précédentes études sur les incendies menées sur le terrain et en laboratoire, doit également faire partie intégrante de l'ensemble du processus. D'autres recherches sur le terrain sont d'une importance capitale, mais elles sont coûteuses et exigent beaucoup de temps. Par conséquent, il est fort probable qu'il faudra faire appel à de nouvelles approches pour tenir compte des effets de la variation des propriétés du combustible sur le comportement du feu, comme la modélisation physique, pour continuer d'améliorer et de parfaire la méthode PCI.

7.0 REMERCIEMENTS

Les auteurs aimeraient remercier les nombreux utilisateurs de la méthode PCI qui ont souligné des erreurs et des irrégularités dans les modèles initialement décrits dans le rapport ST-X-3F. Nous aimerions remercier tout particulièrement Brad Armitage, Robert Bryce, Ugo Feunekes, Gwyn Richards et Cordy Tymstra pour leur apport. Nous aimerions également remercier tous ceux et celles du Service canadien des forêts qui ont examiné les changements susmentionnés apportés aux modèles de la méthode PCI et qui ont pris part aux longues discussions sur les répercussions de ces changements. Nous aimerions remercier tout particulièrement Bill Droog, Cordy Tymstra et Tim Lynham pour leur examen attentif de la version définitive du présent document et leurs commentaires.

8.0 BIBLIOGRAPHIE

- Abbott, K.N.; Alexander, M.E.; MacLean, D.A.; Leblon, B.; Beck, J.A.; Staples, G.C. 2007. Predicting forest floor moisture for burned and unburned *Pinus banksiana* forests in the Canadian Northwest Territories. *International Journal of Wildland Fire* 16: 71-80.
- Alexander, M.E. 1982. Fire behavior in aspen slash fuels as related to the Canadian Fire Weather Index. *Can. J. For. Res.* 12:1028-1029.
- Alexander, M.E. 1985. Estimating the length-to-breadth ratio of elliptical forest fire patterns. Pages 287-304 in L.R. Donoghue et R.E. Martin, eds. *Proceedings of Eighth Conference on Fire and Forest Meteorology*, 29 April - 2 May, 1985, Detroit, MI. Soc. Am. For., Maryland, MD. SAF Publ. 85-04.
- Alexander, M.E. 1991. The 1985 Butte Fire in central Idaho: a Canadian perspective on the associated burning conditions. Pages 334-343 in S.C. Nodvin et T.A. Waldrop, eds. *Proceedings of International Symposium on Fire and the Environment: Ecological and Cultural Perspectives*, 20-24 Mar. 1990, Knoxville, TN. U.S. Dep. Agric., For. Serv., Southeast. For. Exp. Stn., Asheville, NC. Gen. Tech. Rep. SE-69.
- Alexander, M.E. 1992. The 1990 Stephan Bridge Road Fire: a Canadian perspective on the fire danger conditions. *Wildfire News & Notes* 6(1):6.
- Alexander, M.E. 1994. Proposed revision of fire danger class criteria for forest and rural areas in New Zealand. *Natl. Rural Fire Authority*, Wellington, N.Z. 73 p.

- Alexander, M.E. 2000. The Mann Gulch Fire and the Canadian Forest Fire Danger Rating System. Pages 97-98 in Preprints of Third AMS Symposium on Fire and Forest Meteorology, 9-14 Jan. 2000, Long Beach, CA. Am. Meteorol. Soc., Boston, MA.
- Alexander, M.E. 2008. Fire danger class criteria for forest and rural areas of New Zealand. Ensis, Rotorua, in association with the N.Z. Fire Serv. Comm. et Natl. Rural Fire Authority, Wellington, N.Z. Bull. No. 197 For. Rural Fire Sci. Tech Ser. Rep. No. 7. Sous presse.
- Alexander, M.E.; Baxter, G.J.; Dakin, G.R. 2005. Travel rates of Alberta wildland firefighters using escape routes. in B.W. Butler et M.E. Alexander, eds. Proceedings of Eighth International Wildland Fire Safety Summit: Human Factors - Ten Years Later, 26-28 April 2005, Missoula, MT. [CD-ROM]. Int. Assoc. Wildland Fire, Hot Springs, SD. 12 p.
- Alexander, M.E.; Baxter, G.J.; Hsieh, R. 2006. Software under development for predicting the effectiveness of grassland firebreaks. For. Eng. Res. Institut. Can., Wildland Fire Oper. Res. Group, Hinton, Alta. Consulté le 2 juillet, 2008 <<http://fire.feric.ca/>>
- Alexander, M.E.; Cole, F.V. 1995. Predicting and interpreting fire intensities in Alaskan black spruce forests using the Canadian system of fire danger rating. Pages 185-192 in Managing forests to meet people's needs. Proceedings of 1994 Society of American Foresters/Canadian Institute of Forestry Convention, 18-22 Sept. 1994, Anchorage, AK. Soc. Am. For., Bethesda, MD. SAF Publ. 95-02.
- Alexander, M.E.; Cruz, M.G., 2006. Evaluating a model for predicting active crown fire rate of spread using wildfire observations. Can. J. For. Res. 36:3015-3028.
- Alexander, M.E.; Cruz, M.G.; Lopes, A.M.G. 2006. CFIS: a software tool for simulating crown fire initiation and spread. in D.X. Viegas, ed. Proceedings of 5th International Conference on Forest Fire Research, 27-30 November 2006, Figueira da Foz, Portugal [CD-ROM]. Elsevier B.V., Amsterdam (Pays-Bas). 13 p.
- Alexander, M.E.; Fogarty, L.G. 2002. A pocket card for predicting fire behavior in grasslands under severe burning conditions. Nat. Resour. Can., Can. For. Serv., Ottawa (Ontario), For. Res., Rotorua, N.Z. et Natl. Rural Fire Authority, Wellington, N.Z. Fire Technol. Trans. Note 25. 8 p.
- Alexander, M.E.; Lanoville, R.A. 1989. Predicting fire behavior in the black spruce-lichen woodland fuel type of western and northern Canada. For. Can., North. For. Cent., Edmonton (Alberta), et Gov. Northwest Territ., Dep. Renew. Resour., Territ. For. Fire Cent., Fort Smith (Northwest Territories). Affiche avec texte.⁷
- Alexander, M.E.; Pearce, H.G.; Farrow, R.F.; Smart, P.N. 1993. Experimental fires in radiata pine logging slash within the Kinleith Forest during early 1993. Pages 40-41 in Proceedings of Forest and Rural Fire Association of New Zealand 3rd Annual Conference, 4-6 Aug. 1993, Wellington, NZ. For. Rural Fire Assoc. N.Z., Rotorua, NZ.
- Alexander, M.E.; Quintilio, D. 1990. Perspectives on experimental fires in Canadian forestry research. Math. Computer Model. 13(12):17-26.
- Alexander, M.E.; Sando, R.W. 1989. Fire behavior and effects in aspen-northern hardwood stands. Pages 263-274 in D.C. MacIver, H. Auld et R. Whitewood, eds. Proceedings of 10th Conference on Fire and Forest Meteorology, 17-21 April 1989, Ottawa (Ontario). For. Can. et Environ. Can., Ottawa (Ontario).

⁷Veillez noter qu'une erreur typographique s'est glissée dans la note en bas de page a du tableau 3 de l'affiche d'Alexander et Lanoville (1989). Les équations pour calculer l'aire incendiée aurait dû se lire de la façon suivante : $A \text{ (ha)} = K_A \times [V_{t.f.} \text{ (m/min)} \times T \text{ (min)}]^2 / 10\ 000$ ou $K_A \times [V_{t.f.} \text{ (km/h)} \times T \text{ (h)}]^2 \times 100$

- Alexander, M.E.; Stefner, C.N.; Mason, J.A.; Stocks, B.J.; Hartley, G.R.; Maffey, M.E.; Wotton, B.M.; Taylor, S.W.; Lavoie, N.; Dalrymple, G.N. 2004. Characterizing the jack pine-black spruce fuel complex of the International Crown Fire Modelling Experiment (ICFME). Nat. Resour. Can., Can. For. Serv., North. For. Cent., Edmonton (Alberta). Inf. Rep. NOR-X-393. 49 p.
- Alexander, M.E.; Stocks, B.J. 1998. Appreciation of fire behavior in boreal ecosystems: two new interpretive aids [Abstr.]. Page 62 in T.L. Pruden et L.A. Brennan, eds. Fire in ecosystem management: shifting the paradigm from suppression to prescription. Proceedings of 20th Tall Timbers Fire Ecology Conference, 7-10 May 1996, Boise, ID. Tall Timbers Res. Stn., Tallahassee, FL.
- Alexander, M.E.; Stocks, B.J.; Lawson, B.D. 1991. Fire behavior in black spruce-lichen woodland: the Porter Lake Project. For. Can., North. For. Cent., Edmonton (Alberta). Inf. Rep. NOR-X-310. 44 p.
- Alexander, M.E.; Stocks, B.D.; Lawson, B.D. 1996. The Canadian Forest Fire Danger Rating System. Initial Attack 1996(Spring):6-9.
- Alexander, M.E.; Thomas, D.A. 2003a. Wildland fire behavior case studies and analyses: value, approaches and practical uses. Fire Manage. Today 63(3):4-8.
- Alexander, M.E.; Thomas, D.A. 2003b. Wildland fire behavior case studies and analyses: other examples, methods, reporting stands, and some practical advice. Fire Manage. Today 63(4):4-12.
- Alexander, M.E.; Thomas, D.A. 2004. Forecasting wildland fire behavior: aids, guides, and knowledge-based protocols. Fire Manage. Notes 64(1):4-11.
- Alexander M.E.; Tymstra, C; Frederick, K.W. 2004. Incorporating breaching and spotting considerations into PROMETHEUS - the Canadian wildland fire growth model. Foothills Model For., Hinton (Alberta). Chisholm/Dogrib Fire Res. Initiative Quicknote 6. 2 p.
- Amiro, B.D.; Logan, K.A.; Wotton, B.M.; Flannigan, M.D.; Todd, J.B.; Stocks, B.J.; Martell, D.L. 2004. Fire Weather Index System components for large fires in the Canadian boreal forest. Int. J. Wildland Fire 13:391-400.
- Amiro, B.D.; Todd, J.B.; Wotton, B.M.; Logan, K.A.; Flannigan, M.D.; Stocks, B.J.; Mason, J.A.; Martell, D.L.; Hirsch, K.G. 2001. Direct carbon emissions from Canadian forest fires, 1959-1999. Can. J. For. Res. 31:512-525.
- Anderson, H.E. 1968. Sundance Fire: an analysis of fire phenomena. U.S. Dep. Agric., For. Serv., Intermt. For. Range Exp. Stn., Ogden, UT. Res. Pap. INT-56. 39 p.
- Anderson, K.R. 2002. Fire growth modelling at multiple scales. in D.X. Viegas, ed. Forest fire research & wildland fire safety. Proceedings of IV International Conference on Forest Fire Research/2002 Wildland Fire Safety Summit, 18-23 2002, Luso-Coimbra, Portugal [CD-ROM]. Millpress Sci. Publ., Rotterdam, Pays-Bas. 6 p.
- Anderson, K.; Englefield, P. 2001. Quantile characteristics of forest fires in Saskatchewan. Pages 9-16 in Preprints of Fourth Symposium on Fire and Forest Meteorology, 13-15 Nov. 2001, Reno, NV. Am. Meteorol. Soc., Boston, MA.
- Anderson, K.; Powell, S.; Etches, M. 1998. A modified suppression decision support system for Wood Buffalo National Park. Pages 32-37 in Preprints of Second Conference on Fire and Forest Meteorology, 11-16 Jan. 1998, Phoenix, AZ. Am. Meteorol. Soc., Boston, MA.
- Anderson, K.R.; Englefield, P.; Little, J. 2007a. Operational forest fire-growth predictions for Canada. Paper 2.4 in Seventh Symposium on Fire and Forest Meteorology, 23-25 Oct. 2007, Bar Harbor, ME. Am. Meteorol. Soc., Boston, MA. 4 p. Consulté le 2 novembre 2007 <http://ams.confex.com/ams/7firenortheast/techprogram/paper_135848.htm>

- Anderson, K.; Reuter, G.; Flannigan, M.D. 2007b. Fire-growth modelling using meteorological data with random and systematic perturbations. *Int. J. Wildland Fire* 16:174-182.
- Andrews, P.L.; Bevins, C.D.; Seli, R.C. 2008. BehavePlus fire modeling system, version 4.0: user's guide. U.S. Dep. Agric., For. Serv., Rocky Mtn. Res. Stn., Fort Collins, CO. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-106WWW Revised. 116 p.
- Australian Bureau of Meteorology. 1984. Report on the meteorological aspects of the Ash Wednesday fires - 16 February 1983. Aust. Govt. Publ. Serv., Canberra, ACT. 143 p.
- Baxter, G. 2006. Grass fuel loads on linear disturbances in Alberta. *For. Eng. Res. Instit. Can., Point-Claire, QC et Vancouver, BC. Advantage Rep. Vol. 7, No. 21.* 8 p.
- Baxter, G.J.; Alexander, M.E.; Dakin, G. 2004. Travel rates by Alberta wildland firefighters using escape routes on a moderately steep slope. *For. Eng. Res. Instit. Can., Point-Claire, QC et Vancouver, BC. Advantage Rep. Vol. 5, No. 25.* 15 p.
- Beck, J. 2004. The effectiveness of Alberta's presuppression preparedness planning system. *For. Eng. Res. Instit. Can., Point-Claire, QC et Vancouver, BC. Advantage Rep. Vol. 5, No. 14.* 8 p.
- Beck J.A. 2005. Operational fire management in Canada. Pages 224-232 in *Proceedings of 5th NRIFD Symposium - International Symposium on Forest Fire Protection*, 30 Nov. - 2 Dec. 2005. Natl. Res. Instit. Fire Disaster, Tokyo, Japan.
- Beck, J.A.; Alexander, M.E.; Harvey, S.D.; Beaver, A.K. 2002. Forecasting diurnal variation in fire intensity to enhance wildland firefighter safety. *Int. J. Wildland Fire* 11:173-182.
- Beck J.A.; Armitage, O.B. 2004. Diurnal fine fuel moisture and FFMC characteristics at northern latitudes. Pages 211-221 in R.T. Engstrom, K.E.M. Galley et W.J. de Groot, eds. *Fire in temperate, boreal, and montane ecosystems. Proceedings of the 22nd Tall Timbers Fire Ecology Conference*, 15-18 Oct. 2001, Kananaskis (Alberta). Tall Timbers Res. Stn., Tallahassee, FL.
- Beck, J.; Simpson, B. 2007. Wildfire threat analysis and the development of a fuel management strategy for British Columbia. in *Proceedings of 4th International Wildland Fire Conference*, 13-17 May 2007, Seville, Spain [CD-ROM]. Minist. Environ., Madrid et Junta de Andalucía, Seville, Spain. 12 p.
- Beverly, J.L.; Wotton, B.M. 2007. Modelling the probability of sustained flaming: predictive value of fire weather index components compared with observations of site weather and fuel moisture conditions. *Int. J. Wildland Fire* 16: 161-173.
- Bilgili, E.; Methven, I.R. 1990. The simple ellipse: A basic growth model. Pages B.18-1-B.18-14 in *Proceedings of International Conference on Forest Fire Research*, 19-22 Nov. 1990, Coimbra, Portugal. Univ. Coimbra, Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial, Coimbra, Portugal.
- Box, G.E.P. 1979. Robustness in the strategy of scientific model building. Pages 201-239 in R.L. Launer et G.N. Wilkinson, eds. *Robustness in statistics*. Academic Press, New York.
- Catchpole, E.A.; de Mestre, N.J.; Gill, A.M. 1982. Intensity of a fire at its perimeter. *Aust. For. Res.* 12:47-54.
- Cheney, N.P. 1981. Fire behaviour. Pages 151-175 in A.M. Gill, R.H. Groves et I.R. Noble, eds. *Fire and the Australian Biota*. Aust. Acad. Sci., Canberra, ACT.
- Cheney, N.P.; Gould, J.S. 1995. Fire growth in grassland fuels. *Int. J. Wildland Fire* 5:237-247.

- Cheney, N.P.; Gould, J.S.; Catchpole, W.R. 1993. The influence of fuel, weather and fire shape variables on fire-spread in grasslands. *Int. J. Wildland Fire* 3:31-44.
- Cheney, N.P.; Gould, J.S.; Catchpole, W.R. 1998. Prediction of fire spread in grasslands. *Int. J. Wildland Fire* 8:1-13.
- Cheney, P.; Sullivan, A. 1997. *Grassfires: fuel, weather and fire behaviour*. CSIRO Publ., Collingwood, Victoria, Australia 102 p.
- CIFFC Fire Science and Technology Working Group. 1999. Fire science and technology issues assessment. *Can. Interagency For. Fire Cent., Winnipeg, MB.* 6 p.
- Clark, R.G. 1983. Threshold requirements for fire spread in grassland fuels. Thèse de doctorat, Texas Tech Univ., Lubbock, TX. 72 p.
- Cole, F.V.; Alexander, M.E. 1995. Head fire intensity class graph for FBP System fuel type C-2 (boreal spruce). AK. Dep. Nat. Resour., Div. For., Fairbanks, AK. et Nat. Resour. Can., Can. For. Serv., Edmonton (Alberta). Affiche avec texte.
- Cruz, M.G.; Alexander, M.E.; Wakimoto, R.H. 2003. Assessing the probability of crown fire initiation based on fire danger indices. *For. Chron.* 79:976-983.
- Cruz, M.G.; Alexander, M.E.; Wakimoto, R.H. 2004. Modeling the likelihood of crown fire occurrence in conifer forest stands. *For. Sci.* 50:640-658.
- Cruz, M.G.; Alexander, M.E.; Wakimoto, R.H. 2005. Development and testing of models for predicting crown fire rate of spread in conifer forest stands. *Can. J. For. Res.* 35:1626-1639.
- Cruz, M.G.; Butler, B.W.; Alexander, M.E.; Forthofer, J.M.; Wakimoto, R.H. 2006a. Predicting the ignition of crown fuels above a spreading surface fire. Part I: model idealization. *International Journal of Wildland Fire* 15:47-60.
- Cruz, M.G., Butler, B.W., Alexander, M.E. 2006b. Predicting the ignition of crown fuels above a spreading surface fire. Part II: model behavior and evaluation. *Int. J. Wildland Fire* 15:61-72.
- Cruz, M.G.; Butler, B.W.; Alexander, M.E.; Viegas, D.X. 2006c. Development and evaluation of a semi-physical crown fire initiation model. in D.X. Viegas, ed. *Proceedings of 5th International Conference on Forest Fire Research*, 27-30 Nov. 2006, Figueira da Foz, Portugal [CD-ROM]. Elsevier B.V., Amsterdam, Pays-Bas. 17 p.
- Cruz, M.G.; Fernandes, P.A.M.; Alexander, M.E. 2007. Development of a model system to predict wildfire behaviour in pine plantations. Pages 119-128 in *Programme, Abstracts & Papers of the 2007 Institute of Foresters of Australia et New Zealand Institute of Forestry Conference*, 3-7 June 2007, Coffs Harbour, NSW. Instit. For. Aust., Canberra, ACT.
- Cruz, M.G.; Plucinski, M.P. 2007. Billo Road Fire - report on fire behaviour phenomena and suppression activities. *Bushfire Coop. Res. Cent., East Melbourne, Victoria. Rep. No. A.07.02.* 96 p.
- de Groot, W.J. 1993. Exemples de combustibles de la Méthode canadienne de prévision du comportement des incendies (PCI). *For. Can., Rég. du Nord-Ouest., Centre de forest. du Nord, Edmonton (Alberta).* Affiche avec texte.
- de Groot, W.J. 2006. Modeling Canadian wildland fire carbon emissions with the Boreal Fire Effects (BORFIRE) model. in D.X. Viegas, ed. *Proceedings of 5th International Conference on Forest Fire Research*, 27-30 Nov. 2006, Figueira da Foz, Portugal [CD-ROM]. Elsevier B.V., Amsterdam, Pays-Bas 10 p.
- de Groot, W.J.; Bothwell, P.M.; Carlsson, D.H.; Logan, K.A. 2003. Simulating the effects of future fire regimes on western Canadian boreal forests. *J. Veg. Sci.* 14:355-364.

- de Groot, W.J.; Field, R.D.; Brady, M.A.; Roswintiarti, O.; Mohamad, M. 2004. Development of the Indonesian and Malaysian fire danger rating systems. *Mitig. Adapt. Strat. Glob. Change* 12:165-180.
- de Groot, W.J.; Landry, R.; Kurz, W.A.; Anderson, K.R.; Englefield, P.; Fraser, R.H.; Hall, R.J.; Banfield, E.; Raymond, D.A.; Decker, V.; Lynham, T.J.; Prichard, J.M. 2007. Estimating direct carbon emissions from Canadian wildland fires. *Int. J. Wildland Fire* 16:593-606.
- Ember Research Services Ltd. 2000. Yukon community wildfire risk and reduction assessment. In association with Applied Ecosystem Management Ltd. et TransNorthern Management Consulting, Whitehorse, Y.T. Final report prepared for Government of Yukon, Department of Economic Development et Indian et Northern Affairs Canada, Fire Management Program, Whitehorse, Y.T. 396 p.
- Ember Research Services Ltd. 2003a. Aspen stands stop fires, don't they? Foothills Model For., Hinton (Alberta). Chisholm/Dogrib Fire Res. Initiative Quicknote 3. 2 p.
- Ember Research Services Ltd. 2003b. Fire behaviour in immature and mature aspen stands under severe spring burning conditions: does fire history matter? Foothills Model For., Hinton (Alberta). Chisholm/Dogrib Fire Res. Initiative Rep. 1. 94 p.
- Flannigan, M.D. 1993. Fire regime and the abundance of red pine. *Int. J. Wildland Fire* 3:241-247.
- Flannigan, M.D.; Wotton, B.M. 1994. Fire regime and the abundance of jack pine. Pages 625-636 in *Proceedings of 2nd International Conference on Forest Fire Research, 21-24 Nov. 1994, Coimbra, Portugal, Vol. II.* Univ. Coimbra, Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial, Coimbra, Portugal.
- Fogarty, L.G.; Alexander, M.E. 1999. A field guide for predicting grassland fire potential: derivation and use. *Nat. Resour. Can., Can. For. Serv., Ottawa (Ontario), For. Res., Rotorua, N.Z. et Natl. Rural Fire Authority, Wellington, N.Z.. Fire Technol. Trans. Note* 20. 10 p.
- Fogarty, L.G.; Jackson, A.F.; Lindsay, W.T. 1996. Fire behaviour, suppression and lessons from the Berwick Forest Fire of 26 February 1995. N.Z. For. Res. Instit., Rotorua in association with Natl. Rural Fire Authority, Wellington, N.Z. *FRI Bull. No. 197 For. Rural Fire Sci. Tech. Ser. Rep. No. 3.* 38 p. + Appendices.
- Forêts Canada, Groupe de travail sur les dangers d'incendie. 1992. Élaboration et structure de la Méthode canadienne de prévision du comportement des incendies de forêt. *For. Can., Ottawa (Ontario). Rapp. d'inf. rapport ST-X-3F.* 68 p.
- Hawkes, B.C.; Beck, J. 1997. Une méthode d'évaluation de la menace d'incendie de forêt. *Ress. nat. Can., Serv. can. for., Cent. for. Pac., Victoria (Colombie-Britannique). Note transf. techn. 1.* 6 p.
- Hawkes, B.C.; Goodenough, D.G.; Lawson, B.; Thomson, A.J.; Sahle, W.; Niemann, K.O.; Fuglem, P.; Beck, J.; Bell, B.; Symington, P. 1995. Forest fire fuel type mapping using GIS and remote sensing in British Columbia. Pages 647-656 in *Symposium Proceedings of Ninth Annual Symposium on Geographic Information Systems GIS 95: The Next Step, 27-30 Mar. 1995, Vancouver, BC, Vol. 2.* GIS World Inc., Fort Collins, CO.
- Hely, C.; Flannigan, M.; Bergeron, Y.; McRae, D. 2001. Role of vegetation and weather on fire behavior in the Canadian mixedwood boreal forest using two fire behavior prediction systems. *Can. J. For. Res.* 31:430-441.
- Hirsch, K.G. 1993. A brief overview of the Canadian Forest Fire Behavior Prediction (FBP) System. *IAWF HotSheet* 2(2&3):3-7.

- Hirsch, K.G. 2000. Méthode canadienne de prévision du comportement des incendies de forêt (PCI) : guide de l'utilisateur. Les Presses de l'Université Laval - Les Éditions de l'UQRC, Laval (Québec). Rapport Spécial 7F. 132p.
- Hirsch, K.G. 1998. Canadian Forest Fire Behavior Prediction (FBP) System: interactive training and reference [CD-ROM]. Nat. Resour. Can., Can. For. Serv., North. For. Cent., et Alta. Environ. Protect., For. Protect. Div., Edmonton (Alberta)
- Hirsch, K.G.; Kafka, V.; Todd, J.B. 2004. Using forest management techniques to alter forest fuels and reduce wildfire size: an exploratory analysis. Pages 175-184 in R.T. Engstrom, K.E.M. Galley et W.J. de Groot, eds. Fire in temperate, boreal, and montane ecosystems. Proceedings of the 22nd Tall Timbers Fire Ecology Conference, 15-18 Oct. 2001, Kananaskis (Alberta). Tall Timbers Res. Stn., Tallahassee, FL.
- Juday, G.P. 1985. The Rosie Creek Fire. *Agroborealis* 17(1):11-20.
- Kafka, V.; Tymstra, C.; Hirsch, K.G.; Flannigan, M.D. 2000. Assessing fire behavior potential: a comparative analysis of two spatial techniques. Pages 113-122 in L.F. Neuenschwander, K.C. Ryan, G.E. Goldberg et J.D. Geer, eds. Crossing the millennium: integrating spatial technologies and ecological principles for a new age in fire management. Proceedings of Joint Fire Science Conference and Workshop, 15-17 June 1999, Boise, ID, Vol. I. Univ. Idaho et Int. Assoc. Wildland Fire, Boise, ID.
- Keeves, A.; Douglas, D.R. 1983. Forest fires in South Australia on 16 February 1983 and subsequent future forest management aims. *Aust. For.* 46:148-162.
- Kiil, A.D.; Grigel, J.E. 1969. The May 1968 forest conflagrations in central Alberta - a review of fire weather, fuels and fire behaviour. Can. Dep. Fish. For., For. Branch, For. Res. Lab., Edmonton (Alberta). Inf. Rep. A-X-24. 36 p.
- Lavoie, N. 2004. Variation in flammability of jack pine/black spruce forests with time since fire in the Northwest Territories, Canada. Thèse de doctorat, Univ. Alberta, Edmonton (Alberta). 332 p.
- Lavoué, D.; Gong, S.; Stocks, B.J. 2007. Modelling emissions from Canadian wildfires: a case study of the 2002 Quebec fires. *Int. J. Wildland Fire* 16: 649-663.
- Lawson, B.D.; Stocks, B.J.; Alexander, M.E.; Van Wagner, C.E. 1985. A system for predicting fire behavior in Canadian Forests. Pages 6-16 in L.R. Donoghue et R.E. Martin, eds. Proceedings of Eighth Conference on Fire and Forest Meteorology, 29 April - 2 May, 1985, Detroit, MI. Soc. Am. For., Maryland, MD. SAF Publ. 85-04.
- Lawson, B.D.; Armitage, O.B.; Hoskins, W.D. 1996. Diurnal variation in the Fine Fuel Moisture Code: tables and computer source code. Nat. Resour. Can., Can. For. Serv., Pac. For. Cent. et B.C. Min. For., Res. Branch, Victoria, BC. FRDA Rep. 245. 20 p.⁸
- Lawson, B.D.; Dalrymple, G.N. 1996. Probabilities of sustained ignition in lodgepole pine, interior Douglas-fir, and white spruce-subalpine fir forest types. Nat. Resour. Can., Can. For. Serv., Pac. For. Cent. et B.C. Min. For., Res. Branch, Victoria, BC. FRDA Handb. 012 Suppl. 1.
- Lawson, B.D.; Armitage, O.B. 2008. Weather guide for the Canadian Forest Fire Danger Rating System. Nat. Resour. Can., Can. For. Serv., North. For. Cent., Edmonton (Alberta) 84p.

⁸NI est à noter qu'une feuille d'errata a été diffusée en novembre 2006 (<http://www.for.gov.bc.ca/hfd/pubs/Docs/Frr/Frr245.pdf>)

- Lee, B.S.; Alexander, M.E.; Hawkes, B.C.; Lynham, T.J.; Stocks, B.J.; Englefield, P. 2002. Information systems in support of wildland fire management decision making in Canada. *Comput. Electron. Agric.* 37:185-198.
- Marsden-Smedley, J.B.; Catchpole, W.R. 1995. Fire behaviour modelling in Tasmanian buttongrass moorlands II. Fire behaviour. *Int. J. Wildland Fire* 5:215-228.
- McAlpine, R.S. 1989. Temporal variations in elliptical forest fire shapes. *Can. J. For. Res.* 19:1496-1500.
- McAlpine, R.S.; Hobbs, M.W. 1994. Predicting height to live crown base in plantations of four boreal forest species. *Int. J. Wildland Fire* 4:103-106.
- McAlpine, R.S.; Wakimoto, R.H. 1991. The acceleration of fire from point source to equilibrium spread. *For. Sci.* 37:1314-1337.
- McRae, D.J. 1999. Point-source fire growth in jack pine slash. *Int. J. Wildland Fire* 9:65-77.
- Ministère des Richesses naturelles de l'Ontario. 2008. Modification du protocole relatif aux activités industrielles. Imprimeur de la Reine pour l'Ontario, Toronto (Ont.). MNR no 52136. 24 p.
- Mottus, B. 2001. Duffield wildfire behavior and review of April 24 2001 fire in Parkland County in west-central Alberta. *Nat. Resour. Can., Can. For. Serv., North. For. Cent., Edmonton (Alberta)*. 37 p.
- Nadeau, L.B.; Englefield, P. 2006. Fine-resolution mapping of wildfire fuel types for Canada: fuzzy logic modeling for an Alberta pilot area. *Environ. Monitor. Assess.* 120:127-152.
- Nadeau, L.B.; McRae, D.J.; Jin, J-Z. 2005. Development of a national fuel-type map for Canada using fuzzy logic. *Nat. Resour. Can., Can. For. Serv., North. For. Cent., Edmonton (Alberta)*. Inf. Rep. NOR-X-406. 26 p.
- Noble, J.C. 1991. Behaviour of a very fast grassland wildfire on the Riverine Plain of southeastern Australia. *Int. J. Wildland Fire* 1:189-196.
- Northcott, K. 1999. Foliar moisture content in the Northwest Territories, Canada. Mémoire de BScF, Université du Nouveau-Brunswick, Fredericton (Nouveau-Brunswick). 51 p.
- Otway, S.G.; Bork, E.W.; Anderson, K.R.; Alexander, M.E. 2007. Predicting the probability of sustained smouldering combustion in trembling aspen duff. *Int. J. Wildland Fire* 16: 690-701
- Parisien, M.-A.; Junor, D.R.; Kafka, V.G. 2007. Comparing landscape-based decision rules for placement of fuel treatments in the boreal mixedwood of western Canada. *Int. J. Wildland Fire* 16: 664-672.
- Parisien, M.-A.; Kafka, V.; Flynn, N.; Hirsch, K.G.; Todd, J.B.; Flannigan, M.D. 2005a. Fire behavior potential in central Saskatchewan under predicted climate change. *Prairie Adapt. Res. Collaborat., Regina, SK*. PARC Summ. Doc. 05-01.12 p.
- Parisien, M.-A.; Kafka, V.; Hirsch, K.G.; Todd, J.B.; Lavoie, S.G.; Maczek, P.D. 2005b. Mapping wildfire susceptibility with the BURN-P3 simulation model. *Nat. Resour. Can., Can. For. Serv., North. For. Cent., Edmonton (Alberta)*. Inf. Rep. NOR-X-405. 36 p.
- Parisien, M.-A.; Kafka, V.G.; Todd, J.B.; Hirsch, K.G.; Lavoie, S. 2003. The peripheral reduction in burn probability around recent burns in the boreal forest. Paper J6E in *Proceedings of 2nd International Wildland Fire Ecology et Management Congress*, 16-19 Nov. 2003, Orlando, FL. *Am Meteorol. Soc., Boston, MA*. 3 p. Consulté le 23 octobre 2007. <<http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/65569.pdf>>

- Parrott, R.T.; Donald, C.M. 1970. Growth and ignitability of annual pastures in a Mediterranean environment. 2. Ignitability of swards of various annual species. *Aust. J. Exp. Agric. Animal Husbandry* 10:76-83.
- Pearce, H.G.; Alexander, M.E. 1994. Fire danger ratings associated with New Zealand's major pine plantation wildfires. Pages 534-543 in *Proceedings of 12th Conference on Fire and Forest Meteorology*, 26-28 Oct. 1993, Jekyll Island, GA.. Soc. Am. For., Bethesda, MD. SAF Publ. 94-02.
- Pearce, H.G.; Anderson, S.A.J. (comps). 2008. *A manual for predicting fire behaviour in New Zealand fuel types*. Ensis Bushfire Research Group, Christchurch, N.Z.
- Peet, G.B. 1967. The shape of mild fires in jarrah forest. *Aust. For.* 31:121-127.
- Pelletier, G.; St-Onge, J.; Roy, J-F.; Therriault, G.; Bordeleau, P. 2002. Classification des peuplements forestiers en tant que combustibles, selon la méthode canadienne de prévision du comportement des incendies de forêt. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources Naturelles, Québec (Québec). 24 p.
- Power, R.G. 1996. Forest fire history and vegetation analysis of Terra Nova National Park. Parks Can., Atlantic Reg., Halifax, NS. Parks Can. Tech. Rep. Ecosyst. Sci. Rep. 004. 42 p.
- Quintilio, D.; Alexander, M.E.; Ponto, R.L. 1991. Spring fires in a semimature trembling aspen stand in central Alberta. *For. Can., North. For. Cent., Edmonton (Alberta). Inf. Rep. NOR-X-323*. 30 p.
- Quintilio, D.; Lawson, B.D.; Walkinshaw, S.; Van Nest, T. 2001. Final documentation report - Chisholm Fire (LWF-063). Alta. Sustainable Resour. Develop., For. Prot. Div., Edmonton (Alberta). Publ. No. I/036. 93 p. + annexes.
- Rasmussen, J.H.; Fogarty, L.G. 1997. A case study of grassland fire behaviour and suppression: the Tikokino Fire of 31 January 1991. N.Z. For. Res. Instit., Rotorua in association with Natl. Rural Fire Authority, Wellington, N.Z. FRI Bull. No. 197 For. Rural Fire Sci. Tech. Ser. Rep. No. 2. 18 p. + annexes.
- Richards, G.D. 1994. The properties of elliptical wildfire growth for time dependent fuel and meteorological conditions. *Combust. Sci. Tech.* 95:357-383.
- Richards, G.D. 1999. The mathematical modelling and computer simulation of wildland fire perimeter growth over a 3-dimensional surface. *Int. J. Wildland Fire* 9:213-221.
- Sanchez-Guisandez, M.; Cui, W.B.; Martell, D.L. 2002. FireSmart management of flammable wildland urban interface landscapes. in D.X. Viegas, ed. *Forest fire research & wildland fire safety. Proceedings of IV International Conference on Forest Fire Research/2002 Wildland Fire Safety Summit*, 18-23 2002, Luso-Coimbra, Portugal [CD-ROM]. Millpress Sci. Publ., Rotterdam (Pays-Bas). 12 p.
- Sanchez-Guisandez, M.; Cui, W.B.; Martell, D.L. 2007. A decision support system for evaluating fuel management strategies for wildland-urban interface areas. in *Proceedings of 4th International Wildland Fire Conference*, 13-17 May 2007, Seville, Spain [CD-ROM]. Minist. Environ., Madrid et Junta de Andalucia, Seville, Spain. 11 p.
- Scott, J.H. 2007. Nomographs for estimating surface fire behavior characteristics. U.S. Dep. Agric., For. Serv., Rocky Mt. Res. Stn., Fort Collins, CO. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-192. 119 p.
- Seli, R. 1999. Assignment as a fire behavior analyst in Alaska. Paper presented at the National Interagency Fire Behavior Workshop, 1-5 Mar. 1999, Phoenix, AZ. 4 p.
- Simard, A.J.; Haines, D.A.; Blank, R.W.; Frost, J.S. 1983. The Mack Lake Fire. U.S. Dep. Agric., For. Serv., North Cent. For. Exp. Stn., St. Paul, MN. Gen. Tech. Rep. NC-83. 36 p.

- Sneeuwjagt, R.J.; Frandsen, W.H. 1977. Behavior of experimental grass fires vs. predictions based on Rothermel's model. *Can. J. For. Res.* 7:357-367.
- Springer, E.A.; Van Wagner, C.E. 1984. The seasonal foliar moisture trend of black spruce at Kapuskasing (Ontario). *Agric. Can., Can. Forest. Serv. Res. Notes* 4:39-42.
- Stocks, B.J. 1987. Fire potential in the spruce budworm-damaged forests of Ontario. *For. Chron.* 63:8-14.
- Stocks, B.J. 1988. Forest fire close to home: Terrace Bay Fire #7/86. Pages 189-193 in W.C. Fischer et S.F. Arno, comps. *Protecting people and home from wildfire: proceedings of the symposium and workshop (6-8 Oct. 1987, Missoula, MT)*. U.S. Dep. Agric., For. Serv., Intermt. Res. Stn, Ogden, UT. Gen. Tech. Rep. INT-251.
- Stocks, B.J.; Alexander, M.E.; Lanoville, R.A. 2004a. Overview of the International Crown Fire Modelling Experiment (ICFME). *Can. J. For. Res.* 34:1543-1547.
- Stocks, B.J.; Alexander, M.E.; Wotton, B.M.; Stefner, C.N.; Flannigan, M.D.; Taylor, S.W.; Lavoie, N.; Mason, J.A.; Hartley, G.R.; Maffey, M.E.; Dalrymple, G.N.; Blake, T.W.; Cruz, M.G.; Lanoville, R.A. 2004b. Crown fire behaviour in a northern jack pine - black spruce forest. *Can. J. For. Res.* 34:1548-1560.
- Stocks, B.J.; Hartley, G.R. 1995. Fire behaviour in three jack pine fuel complexes. *Nat. Resour. Can., Can. For. Serv., Great Lakes For. Cent., Sault Ste. Marie (Ontario)*. Affiche avec texte.
- Stocks, B.J.; Walker, J.D. 1968. The effect of green vegetation on surface fire spread in the laboratory. *Can. Dep. For. Rural Develop., Petawawa For. Exp. Stn., Chalk River (Ontario)*. Inf. Rep. PS-X-5. 5 p.
- Taylor, S.W.; Alexander, M.E. 2006. Science, technology, and human factors in fire danger rating: the Canadian experience. *Int. J. Wildland Fire* 15:121-135.
- Taylor, S.W.; Baxter, G.J.; Hawkes, B.C. 1998. Modeling the effects of forest succession on fire behavior potential in southeastern British Columbia. Pages 2059-2071 in D.X. Viegas, ed. *Proceedings of III International Conference on Forest Fire Research/14th Conference on Fire et Forest Meteorology, 16-20 Nov. 1998, Luso-Coimbra, Portugal, Vol. II*. Univ. Coimbra, Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial, Coimbra, Portugal.
- Taylor, S.W.; Pike, R.G.; Alexander, M.E. 1997. Field guide to the Canadian Forest Fire Behavior Prediction (FBP) System (MCPCI.ppt). *Nat. Resour. Can., Can. For. Serv., North. For. Cent., Edmonton (Alberta)*. Spec. Rep. 11. 60 p.
- Taylor, S.W.; Wotton, B.M.; Alexander, M.E.; Dalrymple, G.N. 2004. Variation in wind and crown fire behaviour in a northern jack pine - black spruce forest. *Can. J. For. Res.* 34:1561-1576.
- Trevis, L.K. 2005. Prototype development for a wildfire modeling and management system. MSc thesis, Univ. Calgary, Calgary (Alberta). 126 p.
- Tymstra, C. 2002. PROMETHEUS - the Canadian wildland fire growth model. *Initial Attack* 2002(Spring):8-9.
- Tymstra, C.; Bryce, R.W.; Wotton, B.M.; Armitage, O.B. 2009. Development and structure of Prometheus: the Canadian wildland fire growth simulation model: development et assessment. *Nat. Resour. Can., Can. For. Serv., North. For. Cent., Edmonton, AB*. Inf. Rep. NOR-X-47. Forthcoming.
- Tymstra, C.; Ellehoj, E.A. 1994. Fire behaviour prediction fuel type mapping using the Alberta Vegetation Inventory. Pages 887-893 in *Decision making with GIS - the fourth dimension. Symposium Proceedings of Eighth Annual Symposium on Geographic Information Systems in Forestry, Environmental et Natural Resources Management GIS 94, 21-24 Feb. 1994, Vancouver (Colombie-Britannique), Vol. Two*. Min. Supply Serv. Can., Ottawa (Ontario).

- Van Wagner, C.E. 1971. Two solitudes in forest fire research. Can. For. Serv., Petawawa For. Exp. Stn., Chalk River (Ontario). Inf. Rep. PS-X-29. 7 p.
- Van Wagner, C.E. 1977a. Effect of slope on fire spread rate. Can. For. Serv. Bi-mon. Res. Notes 33:7-8.
- Van Wagner, C.E. 1977b. A method for computing fine fuel moisture content throughout the diurnal cycle. Can. For. Serv., For. Exp. Stn., Chalk River (Ontario). Inf. Rep. PS-X-69. 15 p.
- Van Wagner, C.E. 1985. Fire behaviour modelling - how to blend art et science. Pages 3-5 in L.R. Donoghue et R.E. Martin, eds. Proceedings of Eighth Conference on Fire et Forest Meteorology, 29 April - 2 May 1985, Detroit, MI. Soc. Am. For., Maryland, MD. SAF Publ. 85-04.
- Van Wagner, C.E. 1986. Fire. Pages 27-35 in J.F. Gourlay et E.L. Borczon, eds. Managing red pine plantations. Ont. Min. Nat. Resour., Toronto (Ontario).
- Van Wagner, C.E. 1987. Élaboration et structure de la méthode canadienne de l'indice Forêt-météo. Agric. Can., Serv. can. des for., Ottawa (Ontario). Rapp. techn. de forest. 35. 34 p.
- Van Wagner, C.E. 1989. Prediction of crown fire behaviour in conifer stands. Pages 207-212 in D.C. MacIver, H. Auld et R. Whitewood, eds. Proceedings of 10th Conference on Fire et Forest Meteorology, 17-21 April 1989, Ottawa (Ontario). For. Can. et Environ. Can., Ottawa (Ontario).
- Van Wagner, C.E. 1990. Six decades of forest fire science in Canada. For. Chron. 66:133-137.
- Van Wagner, C.E. 1993. Prediction of crown fire behavior in two stands of jack pine. Can. J. For. Res. 23:442-449.
- Wade, D.D.; Ward, D.E. 1973. An analysis of the Air Force Bomb Range Fire. U.S. Dep. Agric., For. Serv., Southeast. For. Exp. Stn., Asheville, NC. Res. Pap. SE-105. 38 p.
- Watts, J.M., Jr. 1987. Editorial: validating fire models. Fire Tech. 23:93-94.
- Whitehead, R.J.; Russo, G.L.; Hawkes, B.C.; Armitage, O.B. 2007. A silvicultural assessment of 10 lodgepole pine stands after partial cutting to reduce susceptibility to mountain pine beetle. Nat. Resour. Can., Can. For. Serv., Can. Wood Fibre Cent., Pac. For. Cent., Victoria (Colombie-Britannique). 47 p.
- Wilson, B.A.; Ow, C.F.Y.; Heathcott, M.; Milne, D.; McCaffrey, T.M.; Ghitter, G.; Franklin, S.E. 1994. Landsat MSS classification of fire fuel types in Wood Buffalo National Park, northern Canada. Global Ecol. et Biogeog. Letters 4:33-39.
- Wotton, B.M.; Beverly, J.L. 2007. Stand-specific litter moisture content calibrations for the Canadian Fine Fuel Moisture Code. Int. J. Wildland Fire 16:463-472.

ANNEXE 1 : Liste des symboles et des abréviations

La méthode PCI utilise nombre d'abréviations et de symboles pour les intrants et les résultats. Le présent document utilise un grand nombre de ceux-ci et quelques nouveaux, qui figurent ci-dessous en caractères gras. La présente annexe donne la signification de ces abréviations et symboles et présente les nouveaux en caractères gras.

% C	Pourcentage de conifères
% Fan.	Degré de fanage des herbes
% P	Pourcentage de pente
% S _{b.m.}	Pourcentage de sapins baumiers morts
α	Fonction alpha commandant la fonction d'accélération
θ	Angle formé par le demi-grand axe d'une ellipse et la direction de la propagation
a, b et c	Coefficients de l'équation de la vitesse de propagation
CC	Consumation du combustible des cimes
CCC_f	Consumation du combustible des cimes sur les flancs de l'incendie
CCS	Consumation du combustible de surface
C _{f.h.}	Coefficient de fanage des herbes
CP	Coefficient de propagation de la pente (appliqué pour tenir compte de l'augmentation de la vitesse de propagation vers le haut de la pente)
Da_t	Distance de propagation sur l'arrière de l'incendie au temps écoulé <i>t</i>
Df_t	Distance de propagation sur les flancs de l'incendie au temps écoulé <i>t</i>
DP	Densité du peuplement
Dt_t	Distance de propagation à la tête de l'incendie au temps écoulé <i>t</i> (D _p dans le rapport ST-X-3)
ECD	Effet de l'ICD sur la vitesse de propagation
EHF	Effet de l'humidité foliaire
ÉVV	Équivalent vitesse du vent de la pente
f(ICL)	Fonction de l'indice du combustible léger dans l'IPI
f(V)	Fonction du vent dans l'IPI
FCC	Fraction consommée des cimes à la tête de l'incendie
FCC_a	Fraction consommée des cimes sur l'arrière de l'incendie
FCC_{a,t.}	Fraction consommée des cimes sur l'arrière de l'incendie au temps écoulé <i>t</i>
FCC_f	Fraction consommée des cimes sur les flancs de l'incendie
HBC	Hauteur de la base de la cime
HF	Humidité foliaire
HP	Hauteur du peuplement
ICD	Indice du combustible disponible
ICD ₀	ICD moyen d'un type donné de combustible
ICL	Indice du combustible léger
IPI	Indice de propagation initiale
IPI _a	IPI servant à calculer la vitesse de propagation sur l'arrière de l'incendie
IPI _{p.z.}	Indice de propagation initiale vers le haut de la pente par vent nul

L/l	Rapport longueur/largeur
L/l_t	Rapport longueur/largeur au temps écoulé t
QCC	Quantité de combustible dans les cimes
QCH	Quantité de combustible herbacé
t	Temps écoulé depuis l'allumage d'un foyer ponctuel d'incendie
$V_{a.c.}$	Vitesse de propagation dans les cimes sur l'arrière de l'incendie dans le type de combustible C-6
$V_{a.éq.}$	Vitesse de propagation à l'équilibre sur l'arrière de l'incendie
$V_{a.s.}$	Vitesse de propagation en surface sur l'arrière de l'incendie dans le type de combustible C-6
$V_{a.s.t.}$	Vitesse de propagation en surface sur l'arrière de l'incendie au temps écoulé t
$V_{a.t.}$	Vitesse de propagation sur l'arrière de l'incendie au temps écoulé t
$V_{c.p.}$	Vitesse de croissance du périmètre
$V_{c.s.}$	Vitesse critique de propagation pour l'embrassement des cimes
$V_{f.c.}$	Vitesse de propagation d'un feu de cimes dans le type de combustible C-6
$V_{f.éq.}$	Vitesse finale de propagation à l'équilibre sur les flancs de l'incendie ($V_{p.l.}$, dans le rapport ST-X-3)
$V_{f.s.}$	Vitesse de propagation en surface sur les flancs de l'incendie dans le type de combustible C-6
$V_{f.s.t.}$	Vitesse de propagation en surface sur les flancs de l'incendie au temps écoulé t
$V_{f.t.}$	Vitesse finale de propagation sur les flancs de l'incendie au temps écoulé t
$V_{i.p.}$	Vitesse initiale de propagation (avant correction en fonction de l'ECD)
$V_{p.c.}$	Vitesse de propagation en surface, vers le haut de la pente, par vent nul
$V_{p.z.}$	Vitesse de propagation en surface, par vent nul, sur un terrain plat
$V_{r.v.}$	Vitesse résultante du vent, basée sur l'influence du vent et de la pente.
V_s	Vitesse de propagation d'un incendie de surface
$V_{s.t.}$	Vitesse de propagation d'un incendie de surface au temps écoulé t
$V_{t.f.}$	Vitesse finale de propagation à la tête de l'incendie
$V_{t.t.}$	Vitesse de propagation à la tête de l'incendie au temps écoulé t
$V_{t\theta}$	Vitesse de propagation à un angle θ par rapport à la direction de la tête de l'incendie

$$CCS = 0,75 + 0,75 \times (1 - e^{-0,23 \times (ICL - 84)})^{0,5} \quad \text{si } ICL > 84 \quad (9a)$$

$$CCS = 0,75 - 0,75 \times (1 - e^{-0,23 \times (ICL - 84)})^{0,5} \quad \text{si } ICL \leq 84 \quad (9b)$$

$$V_{i.p.} = \frac{\% S_{b.m.}}{100} \times V_{i.p.M-3(100\%)} + \left(1 - \frac{\% S_{b.m.}}{100}\right) \times V_{i.p.D-1} \quad (29)$$

$$V_{i.p.M-3(100\%)} = 120 \times \left[1 - e^{(0,0572 \times IPI)}\right]^{1,4} \quad (30)$$

$$V_{i.p.} = \frac{\% S_{b.m.}}{100} \times V_{i.p.M-4(100\%)} + 0,2 \times \left(1 - \frac{\% S_{b.m.}}{100}\right) V_{i.p.D-1} \quad (31)$$

$$V_{i.p.M-4(100\%)} = 100 \times \left[1 - e^{(0,0404 \times IPI)}\right]^{1,48} \quad (32)$$

$$C_{f.h.} = 0,005 \times \left(e^{(-0,061 \times Fan.)} - 1\right) \quad \text{si } \% Fan. < 58,8 \quad (35a)$$

$$C_{f.h.} = 0,176 + 0,02 \times (\% Fan. - 58,8) \quad \text{si } \% Fan. \geq 58,8 \quad (35b)$$

$$CP = e^{3,533 \left(\frac{\%P}{100}\right)^{1,2}} \quad \text{si } \%P < 70 \% \quad (39a)$$

$$IPI_{p.z.} = \frac{\ln \left[1 - \left(\frac{V_{p.c.}}{a}\right)^{\frac{1}{c}}\right]}{-b} \quad \text{si } 1 - \left(\frac{V_{p.c.}}{a}\right)^{\frac{1}{c}} < 0,01 \quad (41a)$$

$$IPI_{p.z.} = \frac{\ln(0,01)}{-b} \quad (41b)$$

$$IPI_{p.z.} = \frac{\% S_{p.z.}}{100} \times IPI_{p.z.C-2} + \left(1 - \frac{\% C}{100}\right) \times IPI_{p.z.D-1} \quad (42a)$$

$$IPI_{p.z.} = \frac{\% S_{b.m.}}{100} \times IPI_{p.z.M-4(100\%)} + \left(1 - \frac{\% S_{b.m.}}{100}\right) \times IPI_{p.z.D-1} \quad (42c)$$

$$IPI_{p.z.} = \frac{\ln \left[1 - \left(\frac{V_{p.c.}}{C_{f.h.} \times a}\right)^{\frac{1}{c}}\right]}{-b} \quad \text{si } 1 - \left(\frac{V_{p.c.}}{C_{f.h.} \times a}\right)^{\frac{1}{c}} \geq 0,01 \quad (43a)$$

$$IPI_{p.z.} = \frac{\ln(0,01)}{-b} \quad \text{si } 1 - \left(\frac{V_{p.c.}}{C_{f.h.} \times a}\right)^{\frac{1}{c}} < 0,01 \quad (43b)$$

$$\acute{E}VV' = \frac{1}{0,05039} \ln \left(\frac{IPI_{p.z.}}{0,0208 \times f(ICL)} \right) \quad (44a)$$

$$\acute{E}VV' = 28 - \frac{1}{0,0818} \ln \left(\frac{IPI_{p.z.}}{2,496 \times f(ICL)} \right) \text{ si } IPI_{p.z.} < 0,999 \times 2,496 \times f(ICL) \quad (44b)$$

$$\acute{E}VV' = 112,45 \quad \text{si } IPI_{p.z.} < 0,999 \times 2,496 \times f(ICL) \quad (44c)$$

$$\acute{E}VV = \acute{E}VV' \quad \text{si } \acute{E}VV' \leq 40 \quad (44d)$$

$$\acute{E}VV = \acute{E}VV'' \quad \text{si } \acute{E}VV' > 40 \quad (44e)$$

$$CCC_{c-1 \text{ à } c-7} = QCC \times FCC \quad (66a)$$

$$CC_{M-1/M-2} = QCC \times FCC \times \% C/100 \quad (66b)$$

$$CC_{M-3/M-4} = QCC \times FCC \times \% S_{b.m.}/100 \quad (66c)$$

$$L/l = 1,1 \times V_{r.v.}^{0,464} \quad \text{si } V_{r.v.} \geq 1,0 \quad (80a)$$

$$L/l = 1,0 \quad \text{si } V_{r.v.} < 1,0 \quad (80b)$$

$$L/l_t = (L/l - 1) \times (1 - e^{-\alpha \cdot t}) + 1 \quad (81)$$

$$V_{f.t.} = \frac{V_{t.f.} + V_{a.t.}}{2 \times L/l_t} \quad (89)$$

$$V_{f.s.t.} = \frac{V_{p.s.t.} + V_{a.s.t.}}{2 \times L/l_t} \quad (90)$$

$$HBC = -11,2 + 1,06 \times HP + 0,00170 \times DP \quad (91)$$

$$Df_t = \frac{Dt_t + Da_t}{L/l_t \times 2} \quad (92)$$

$$ICL = 71,7069 + 6,375 \times \ln(f(ICL) - 2,0737) \quad (93)$$

$$V_{t\theta}(\theta) = \frac{V_{t.f.} - V_{a.éq.}}{2 \times \cos \theta} + \frac{V_{t.f.} - V_{a.éq.}}{2 \times \cos \theta} \times \left(\frac{V_{f.éq.} \times \cos \theta \times \left[V_{f.éq.}^2 \times \cos^2 \theta + \left(V_{t.f.} \times V_{a.éq.} \right) \times \sin^2 \theta \right]^{\frac{1}{2}} - \frac{V_{t.f.} - V_{a.éq.}}{4} \times \sin^2 \theta}{V_{f.éq.}^2 \times \cos^2 \theta + \left(\frac{V_{t.f.} \times V_{a.éq.}}{2} \right)^2 \sin^2 \theta} \right) \quad (94)$$

