Ressources naturelles Canada
Natural Resources Canada

Rapport technique évaluant l'aléa incendie de végétation sur le territoire de la Communauté métropolitaine de Québec

Suzanne Lavoie, Jonathan Boucher et Yan Boulanger



Rapport remis à

La Communauté métropolitaine de Québec

Canada

Ressources naturelles Canada
Natural Resources Canada

Rapport technique évaluant l'aléa incendie de végétation sur le territoire de la Communauté métropolitaine de Québec

Suzanne Lavoie, Jonathan Boucher et Yan Boulanger

Rapport remis à

La Communauté métropolitaine de Québec

23 mai 2025

Canada

© Sa Majesté le Roi du chef du Canada, représentée par le ministre de Ressources naturelles Canada, 2025

Ressources naturelles Canada
Service canadien des forêts
580, rue Booth
Ottawa (Ontario) K1A OE4

Ressources naturelles Canada
Service canadien des forêts
Centre de foresterie des Laurentides
1055, rue du P.E.P.S.
Québec (Québec) G1V 4C7

Crédits photographiques : première page, feu de Val-Bélair du 21 mai 2020, Google Earth à gauche et Zone911 à droite.

Le contenu de cette publication peut être reproduit en tout ou en partie, et par quelque moyen que ce soit, sous réserve que la reproduction soit effectuée uniquement à des fins personnelles ou publiques, mais non commerciales, sans frais ni autre permission, à moins d'avis contraire.

On demande seulement :

- de faire preuve de diligence raisonnable en assurant l'exactitude du matériel reproduit;
- d'indiquer le titre complet du matériel reproduit et l'organisation qui en est l'auteur;
- d'indiquer que la reproduction est une copie d'un document officiel publié par Ressources naturelles Canada, et que la reproduction n'a pas été faite en association avec Ressources naturelles Canada ni avec l'appui de celui-ci.

La reproduction et la distribution à des fins commerciales sont interdites, sauf avec la permission écrite de Ressources naturelles Canada. Pour de plus amples renseignements, veuillez communiquer avec Ressources naturelles Canada à nrcan.copyrightdroitdauteur.rncan@canada.ca.

Équipe



Jonathan Boucher PhD: Dr Boucher est chercheur sur les feux de végétation au Service canadien des forêts de Ressources Naturelles Canada depuis 2019. Il développe des connaissances scientifiques pour soutenir la gestion des feux de végétation et les activités d'évaluation des risques. Au niveau canadien, il est membre du comité scientifique et du comité opérationnel du programme de cartographie du Nord (NorthForm) pour la résilience aux feux de végétation. Il fait également partie du groupe sur le danger d'incendie du Service Canadien des Forêts, qui travaille à l'élaboration de la prochaine génération de la Méthode Canadienne d'Évaluation du Danger d'Incendie de Forêt, où il dirige le volet sur les combustibles. Il dirige aussi le projet Firehawk, une plateforme web étant un évaluateur rapide des risques pour les feux de végétation au Canada.



Yan Boulanger PhD Biologie: Dr Boulanger est chercheur en écologie forestière au Service canadien des forêts de Ressources Naturelles Canada depuis 2013. En partenariat avec le milieu académique de même que les différents paliers de gouvernement, Dr Boulanger utilise différents outils de modélisation afin notamment de projeter les impacts des changements climatiques sur les régimes de feux futurs de même que leurs conséquences sur la vulnérabilité des forêts et des volumes de bois.



Suzanne Lavoie : Mme Lavoie a participé à la conception du logiciel Burn-P3 dès ses débuts au Centre de foresterie du nord du Service canadien des forêts de Ressources Naturelles Canada. Elle a contribué à plusieurs projets d'analyse du paysage Burn-P3 à l'échelle pancanadienne, provinciale et régionale.

Résumé exécutif

Les incendies de végétation représentent une menace croissante pour les communautés périurbaines et les infrastructures, exacerbée par les changements climatiques et l'urbanisation. Une meilleure compréhension de l'aléa incendie est essentielle pour optimiser l'aménagement du territoire et la gestion des risques dans la Communauté métropolitaine de Québec (CMQuébec). L'objectif de cette étude était de mettre à jour les connaissances sur l'aléa incendie dans la région métropolitaine de Québec à l'aide d'outils modernes de cartographie, en particulier le modèle Burn-P3. Ce modèle permet de simuler des milliers de scénarios d'incendies à partir de données sur la répartition des combustibles, la météo et les allumages, afin d'évaluer la probabilité d'incendie, l'intensité et la vitesse de propagation des feux.

Les résultats indiquent que la répartition des combustibles suit un gradient latitudinal et altitudinal sur le territoire : les combustibles conifériens, très inflammables, se concentrent en altitude et dans le nord du territoire, tandis que les combustibles mixtes, feuillus et agricoles dominent les zones plus basses et méridionales, à proximité des centres urbains. De même, les températures et les indices forêt-météo augmentent généralement en basse altitude et vers le sud. La majorité des incendies observés sont de petite taille (moins d'un hectare) et sont plus fréquents dans le sud du territoire, près des centres urbains. Ils sont principalement d'origine humaine et surviennent surtout en été, bien que certains secteurs au sud connaissent une activité plus marquée au printemps.

L'analyse de l'aléa montre que la probabilité d'incendie dans la CMQuébec est globalement faible, sauf dans certaines zones au nord de Québec et en milieux conifériens inflammables. L'intensité et la vitesse de propagation des feux sont maximales en milieu agricole et dans les zones de végétation coniférienne dense, particulièrement en altitude où la connectivité des combustibles est plus élevée. L'aléa est plus marqué dans la couronne nord de Québec et au sud-ouest du territoire, tandis que l'ouest de la zone correspondant à la réserve faunique des Laurentides est relativement peu exposé.

Bien que la CMQuébec se situe dans un régime de feux peu actif comparativement à d'autres régions du Québec, des incendies d'ampleur significative ont déjà été observés dans des conditions similaires à celles qui y prévalent. Certaines zones, notamment la couronne de Québec et la rive sud, présentent un aléa élevé en raison de la présence d'une fréquence d'allumage plus importante, de combustibles inflammables et de conditions météorologiques favorables. Dans ces secteurs, l'intensité des incendies peut être importante, rendant leur suppression difficile et nécessitant des stratégies de lutte indirecte, comme le recours au soutien aérien.

L'urbanisation croissante et les effets du changement climatique accentuent les risques d'incendies de forêt, nécessitant des stratégies de prévention et d'adaptation continues. La prochaine étape consisterait à identifier les valeurs à risque et à identifier les mesures d'atténuation possibles afin de compléter l'évaluation des risques et d'améliorer la résilience des communautés face aux feux de forêt.

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre gratitude envers l'équipe de la Communauté métropolitaine de Québec pour leur soutien tout au long du projet, ainsi qu'à Brad Armitage et Marc-André Parisien pour leurs précieux conseils et le partage de leurs codes en langage R. Nous remercions également la SOPFEU pour la mise à disposition des données nécessaires à la calibration de Burn-P3. Nous sommes reconnaissants à Vittorio Nicoletta (RNCan) pour avoir fourni le code R permettant le calcul de l'aléa incendie. De plus, nous remercions le ministère des Ressources naturelles et des Forêts (MRNF) et la plateforme Forêt Ouverte pour l'accès aux couches spatiales des zones homogènes de régime de feux au Québec, ainsi que le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT) pour l'accès aux données ERA5. Enfin, nous soulignons la contribution des équipes de BioSIM du Service canadien des forêts, qui ont gracieusement fourni le modèle permettant le calcul du débourrement, ainsi que les équipes de développement du logiciel Burn-P3 qui a permis d'évaluer l'aléa sur le territoire de la CMQuébec.

Table des matières

Équipe **4**
Résumé exécutif **5**
Remerciements **6**
Liste des figures **9**
Liste des tableaux **10**
1. Contexte **11**
1. Méthodologie **14**
2.1 Aire d'étude 14
2.1.1 Caractéristique du paysage 14
2.1.2 Conditions météorologiques 16
2.2 Détermination du régime de feux 18
2.2.1 Taille, fréquence et répartition spatiale des feux 19
2.2.2 Saisonnalité 19
2.2.3 Causes 20
2.3 En perspective par rapport au reste du Québec 21
2.4 Le modèle Burn-P3 23
2.4.1 Intrants Burn-P3 24
2.4.2 Paysage 26
2.4.3 Module des allumages 27
2.4.4 Module des conditions de brûlage et de propagation 28
2.4.5 Extrants 29
2.5 Prémisses, particularités et limites de la modélisation 31
3. Résultats **33**
3.1 Probabilité d'incendies, intensité des incendies et vitesse de propagation 33
3.2 Aléa lié à l'intensité des incendies 34
3.3 Aléa lié à la vitesse de propagation 36
4. Discussion **39**
4.1 Limitations 41
5. Conclusion **43**
6. Références **44**
Annexe 1. Méthodes canadiennes de l'IFM et de PCI **49**

Annexe 2. Données météorologiques supplémentaires **52**
Annexe 3. Données supplémentaires sur le régime de feux **54**
Annexe 4. Logiciel Burn-P3 ..... **55**
Annexe 5. Calibration **57**

Liste des figures

Figure 1. A) Aire d'étude (ligne rouge) augmentée d'une zone tampon de 5 km (ligne pointillée). B) Localisation des points de grille ERA5 pour l'extraction de la météo (points gris) et périmètres des zones d'incendie et de météo 14
Figure 2. Topographie (gauche) et types de combustibles de la méthode canadienne de prédiction du comportement des incendies (droite) utilisées pour les simulations Burn-P3. 15
Figure 3. Superficie occupée par les différents types de combustible de la méthode de prédiction du comportement des incendies à l'intérieur de chacune des zones de régime de feux croisant l'aire d'étude. C-2: Pessière boréale; C-3: Pins gris à maturité; C-4: Jeunes pins gris; D-1: Peupliers faux-trembles sans feuilles; D-1/D-2; D-1 sans ou avec feuilles; O-1a : Herbes aplaties; M-1 (15 PC): Forêt boréale mixte sans feuilles avec 15% de résineux, M-1/M-2 (25 PC): Forêt boréale mixte sans ou avec feuilles avec 25% de résineux; M-1/M-2 (50 PC): Forêt boréale mixte sans ou avec feuilles avec 50% de résineux; M-1/M-2 (75 PC): Forêt boréale mixte sans ou avec feuilles avec 75% de résineux; 16
Figure 4. Caractéristiques spatiales du régime de feux de forêt par zone d'incendies et localisation des allumages: Allumages colorés par saison et redimensionnés selon la superficie brûlée. Note: les tailles et proportions ne sont pas à l'échelle. 20
Figure 5. Proportion (%) du nombre d'incendies et de la superficie brûlée selon la cause. 21
Figure 6. Localisation de l'aire d'étude (périmètre rouge) sur les zones des régimes de feux du Québec méridional (Couillard et al., 2022). Les valeurs représentent le nombre d'années correspondant aux cycles de feu calculés pour la période 1890-2020. 22
Figure 7. Grilles d'allumages au printemps et en été pour l'aire d'étude délimitée en rouge et sa zone tampon en pointillé. Les points rouges correspondent aux incendies saisonniers répertoriés entre 1994 et 2023 utilisés pour la création des grilles d'allumages. 28
Figure 8. Comparaison des indices du combustible léger (ICL), de l'humus (IH), de sécheresse (IS), de propagation initiale (IPI), de combustible disponible (ICD) et forêt-météo (IFM) par zones et saisons obtenus à partir des 1 000 journées présentant les conditions les plus propices aux incendies dans chaque zone. 29
Figure 9. Cartes montrant les probabilités d'incendie (A), l'intensité moyenne (B) et la vitesse de propagation moyenne (C) des incendies simulés sur le territoire de la CMQuébec lors de l'exercice. 34
Figure 10. Quartiles des valeurs de probabilité d'incendie (PI) et celles de l'intensité moyenne des incendies simulés (II), qui sont combinées afin de constituer l'aléa lié à l'intensité de l'incendie. 35
Figure 11. Quartiles des valeurs de probabilité d'incendie (PI) et de celle de vitesse de propagation moyenne des incendies simulés (VP) qui sont combinées afin de constituer l'aléa lié à la vitesse de propagation. 37

Liste des tableaux

Tableau 1. Valeurs saisonnières (avril-octobre) moyennes (Moy; et écart-type [ET]), minimales (Min), Maximales (Max) et Médianes (Med) de température à midi heure locale, de la somme des précipitations de midi à midi et des indices de la Méthode canadienne de l'indice forêt-météo observées à midi heure locale pour la période 1994-2023, pour les zones 6, 7 et 11. T°: température en celcius; Precip: Précipitations quotidiennes (mm); ICL: Indice de combustible léger; IH: Indice de l'humus; IS: Indice de sécheresse; IPI: Indice de propagation initial: ICD: Indice de combustible disponible; IFM : Indice forêt-météo. 18
Tableau 2. Liste des intrants utilisés par le logiciel Burn-P3. 24
Tableau 3. Fréquence des allumages simulés en fonction de la zone et de la saison 27

1. Contexte

La propagation d'incendies dans les environnements aménagés à partir des massifs de végétation environnants est un phénomène qui préoccupe les scientifiques, les gestionnaires de valeurs à risque (communautés, infrastructures, habitations, valeurs intangibles) et les gouvernements dans plusieurs pays (Johnston et al., 2017; Erni et al., 2021). Au cours des dernières décennies, plusieurs incendies catastrophiques sont survenus, certains résultant en des pertes de plusieurs milliards de dollars et de dizaines de vies humaines (Cherry et Haynes, 2017; Kirchmeyer-Young et al., 2019; Tepley et al., 2022; Higuera et al., 2023). Les incendies exceptionnels de 2023 qui sont survenus au Québec et au Canada de façon générale sont un exemple patent des risques que posent les incendies de forêt aux communautés et aux infrastructures (Jain et al., 2024; Mulverhill et al., 2024). La plupart de ces incendies ont résulté de la combinaison de conditions météorologiques extrêmes, d'accumulations importantes de combustibles et de l'augmentation progressive de la densité des valeurs à risque au travers des massifs forestiers (Barnes et al., 2023; Mulverhill et al., 2024).

Les régimes d'incendies de forêt sont définis par divers paramètres, notamment la saisonnalité, l'intensité (énergie libérée par le feu), le type d'incendie (feu de surface ou de cime), l'origine de l'allumage (humaine ou naturelle), la fréquence, la distribution des tailles et la sévérité (évaluée selon les impacts sur les écosystèmes) (Boulanger et al., 2012). Les dommages aux infrastructures et aux valeurs à risque dépendent en grande partie du comportement des incendies, notamment de leur vitesse de propagation et de leur intensité (Abo El Ezz et al., 2022). Ces éléments influencent également les stratégies et l'efficacité des mesures de suppression des incendies et des mesures d'atténuation des risques mises en œuvre (Shreve et al., 2014).

Le comportement des feux de forêt est conditionné par trois facteurs principaux, souvent représentés comme le triangle du comportement : les conditions météorologiques, la topographie et les types de combustibles présents (essentiellement la végétation) (Moritz et al., 2005). La météo, incluant l'humidité relative, la température, le vent (vitesse et direction) et les précipitations, jouent un rôle clé dans l'inflammabilité et la propagation dans les combustibles. La topographie, incluant la pente, l'exposition et l'altitude, influence également le comportement des feux, ceux-ci progressant plus rapidement sur des pentes ascendantes ou orientées au sud, où les conditions sont plus sèches et plus chaudes (Van Wagner, 1987).

Au Québec, les incendies sont un facteur de risque très important en milieu forestier (Couillard et al., 2022). Bien que les incendies en territoire urbains au sud de la province soient de moindre ampleur que ceux en milieu boréal, il n'en demeure pas moins qu'ils peuvent être particulièrement fréquents, notamment au printemps, et sont souvent d'origine anthropique (Erni et al., 2020). Ces perturbations peuvent survenir dans un environnement fortement anthropisé, où les valeurs à risque, c'est-à-dire un bien matériel ou immatériel ayant une valeur monétaire ou sociétale, sont nombreuses. Bien qu'un tel événement soit rare, le potentiel de perte peut être excessivement élevé. Parmi ces valeurs à risque se retrouvent notamment des résidences (ou autres structures commerciales, industrielles ou agricoles), des lieux de villégiature, des infrastructures stratégiques tels que des lignes à haute tension, etc. (Johnston et al., 2017).

On doit s'attendre à ce que les valeurs à risque soient de plus en plus exposées aux incendies au cours des prochaines décennies (Erni et al., 2021). En effet, il existe un large consensus scientifique à l'effet que les superficies incendiées vont s'accroître avec le réchauffement climatique, même dans les zones où ces feux sont historiquement peu fréquents (Flannigan et al., 2005; Boulanger et al. 2014). On s'attend à des sécheresses plus sévères, à des incendies plus grands et à des saisons de feux sévères plus fréquentes (Van Vliet et al., 2024). Toutefois, des travaux récents ont aussi démontré que l'étalement urbain pourrait contribuer à une augmentation du risque aux valeurs et infrastructures, qui va au-delà de l'impact des changements climatiques (Jeanneau et al., 2023).

En contrepartie, les institutions ou communautés possédant des valeurs et infrastructures à risque dans l'interface périurbaine peuvent atténuer le risque en aménageant les combustibles (p. ex. éliminer les combustibles inflammables autour des infrastructures), mais l'évaluation de la pertinence, de l'efficacité et des impacts économiques et écologiques de ces traitements nécessitent que l'on connaisse d'abord la probabilité que les valeurs à risque soient touchées par le feu (Saunders et al., 2013) et avec quelle intensité ou magnitude.

La saison des incendies de 2023 au Québec, a été l'une des pires jamais enregistrées (Boulanger et al., 2024). Cette saison s'est avérée pire que celles de 2005 et 2006 qui avaient justifié l'étude de détermination des zones à risque d'incendies de forêt pour le territoire de la CMQuébec (Del Degan, Massé et associés, 2007) et qui est maintenant désuète dû à l'évolution du territoire et des méthodes de cartographie de l'aléa. Les événements de 2023 soulignent l'urgence de mettre à jour les connaissances sur les risques d'incendies. Bien que la CMQuébec n'ait pas récemment subi de grands incendies, les données historiques montrent que la majorité des incendies depuis 1994 se sont produits dans les zones périurbaines, souvent causés par des activités humaines. Ces incidents soulignent l'importance de prendre en compte le risque d'incendies de végétation dans la planification territoriale de la CMQuébec. La problématique des incendies de végétation dans la région métropolitaine de Québec pourrait s'intensifier dans les prochaines décennies pour plusieurs raisons. Notamment, l'étude de 2007 a révélé que la végétation de la région contient des espèces susceptibles de favoriser les incendies. De plus, le relief accidenté des zones périurbaines de la couronne nord peut influencer la propagation des incendies. L'augmentation démographique entraîne un développement accru des zones périurbaines, souvent proches des forêts riches en combustibles variés. Combinée à la multiplication des chemins forestiers, qui accentuent l'érosion et l'assèchement des forêts tout en facilitant l'accès aux véhicules récréatifs motorisés, cette situation constitue également une cause d'allumage fréquente, souvent méconnue des utilisateurs.

Dans le cadre du projet « Amélioration des connaissances sur la prédisposition du territoire métropolitain aux incendies de végétation » présenté par la CMQuébec en octobre 2023, le présent exercice vise la mise à jour des connaissances sur l'aléa des incendies de végétation sur son territoire afin d'obtenir un portrait de la prédisposition de l'ensemble du territoire métropolitain aux incendies de végétation. Une équipe du Centre de Foresterie des Laurentides du Service canadien des forêts (SCF) de Ressources Naturelles Canada, située à Québec, a été mandatée afin d'assister la CMQuébec dans l'analyse de l'aléa.

Plus précisément, l'objectif de ce projet est de modéliser l'aléa incendie sur le territoire de la CMQuébec sous le climat actuel. L'étude utilise une méthode de modélisation des probabilités de brûler sur le territoire

afin de définir l'aléa incendie présent en intégrant les particularités locales (topographie, hydrographie, combustibles, etc.). Ce portrait permettra d'identifier les secteurs où des analyses plus approfondies sont nécessaires.

Le présent document décrit la méthodologie requise pour la production de cartes de l'aléa incendie de végétation, qui sont conçues à partir du modèle de simulation Burn-P3 (Parisien et al., 2005). Les intrants et paramètres utilisés lors des simulations Burn-P3, la source et la préparation des données sont détaillées dans ce document. Les résultats sont présentés sous forme de cartes de probabilité d'incendie (PI), d'intensité des incendies (II) et de vitesse de propagation (VP). Les aléas liés à l'intensité des incendies et à la vitesse de propagation sont aussi décrits.

À retenir!

- Les incendies de végétation menacent de plus en plus les communautés et les infrastructures au Canada et au Québec plus particulièrement, amplifiés par les changements climatiques, l'urbanisation et des conditions météorologiques extrêmes.
- Il devient alors nécessaire de bien connaître l'aléa incendie afin de mieux planifier l'aménagement et le développement des communautés et des infrastructures et d'orienter la réponse en sécurité incendie.
- L'objectif de ce projet était de mettre à jour les connaissances sur l'aléa incendie dans la Communauté métropolitaine de Québec avec des outils modernes permettant de cartographier cet aléa pour guider les décisions en matière d'aménagement, de gestion du territoire et de sécurité incendie.

1. Méthodologie

2.1 Aire d'étude

L'aire d'étude (Figure 1) délimite le territoire municipalisé de la CMQuébec, incluant l'Agglomération de Québec, la Ville de Lévie et les MRC de La Jacques-Cartier, de La Côte-de-Beaupré et de L'Île-d'Orléans. Font également partie de l'aire d'étude les territoires non organisés (TNO) incluant au nord, le Parc national de la Jacques-Cartier, la Réserve faunique des Laurentides et quelques sections des Zecs Batiscan-Neilson et de la Rivière-Blanche. À ce périmètre ont été ajoutés 5 km de zone tampon afin de permettre à des incendies dont le point d'allumage simulé était à l'extérieur de l'aire d'étude d'y pénétrer.

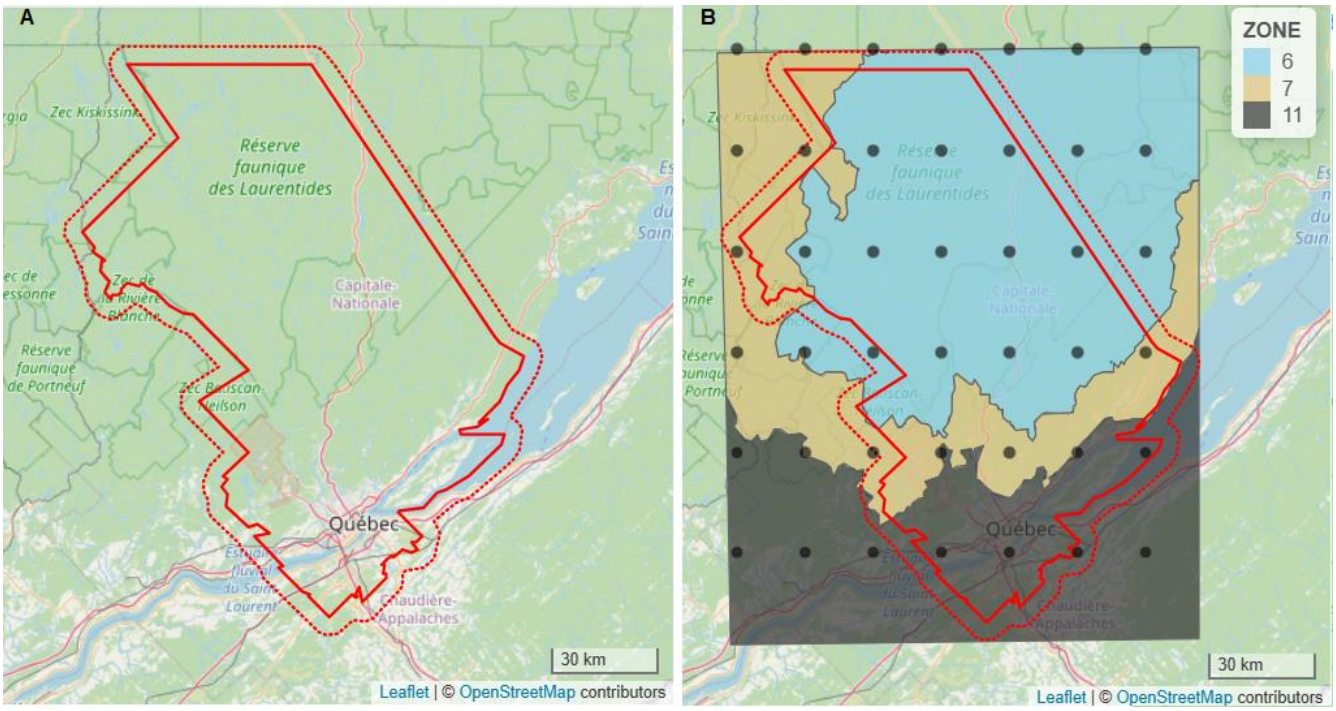


Figure 1. A) Aire d'étude (ligne rouge) augmentée d'une zone tampon de 5 km (ligne pointillée). B) Localisation des points de grille ERA5 pour l'extraction de la météo (points gris) et périmètres des zones d'incendie et de météo

2.1.1 Caractéristique du paysage

L'aire d'étude a été découpée en trois zones (no. 6, 7 et 11; voir Figure 1) représentant des spécificités météorologiques et des régimes de feux légèrement différents, inspirées des zones homogènes délimitées par la SOPFEU (Cardil et al., 2018). Ces zones se distinguent par l'utilisation du territoire et leur degré d'urbanisation, la zone 6 étant moins développée que la zone 11, tandis que la zone 7 présente un niveau intermédiaire de développement. Elles se différencient aussi dans leur topographie et altitude moyenne, laquelle s'élève à 88 m, 422 m et 713 m respectivement pour les zones 6, 7 et 11 (Figure 2A). La végétation (ou le combustible) y varie avec une tendance plus résineuse (C2) de la zone 11 à la zone 6, en suivant le gradient latitudinal et altitudinal. Il y a aussi une plus grande composante de combustibles d'herbe (O1), de

peuplements mixtes (M1/M2) et feuillus (D1/D2) au sud du territoire, le secteur agricole et la forêt feuillue étant notamment plus présents dans la zone 11 (Figures 2B et 3). Il est à noter que, dans le cadre de cette étude, les secteurs agricoles identifiés comme combustible O1 sont considérés comme des cultures s'apparentant à une prairie où l'on retrouverait approximativement 3 tonnes à l'hectare de biomasse d'herbe, et non à l'état de champs à sols nus.

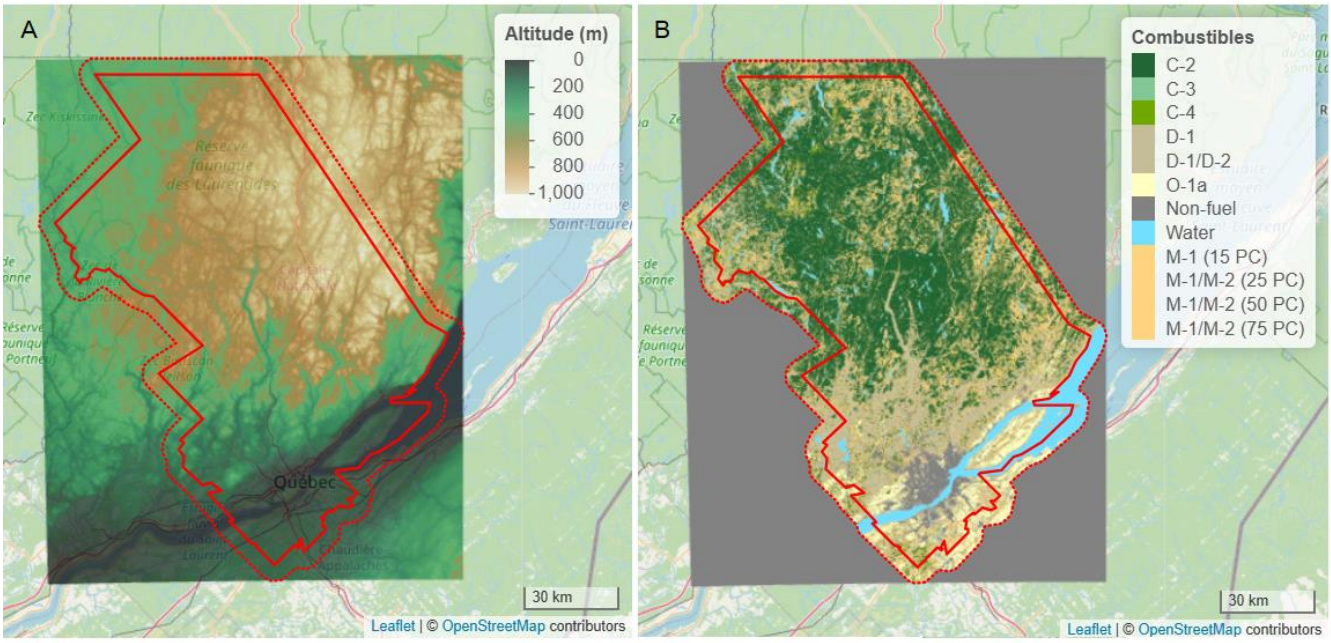


Figure 2. Topographie (gauche) et types de combustibles de la méthode canadienne de prédiction du comportement des incendies (droite) utilisées pour les simulations Burn-P3.

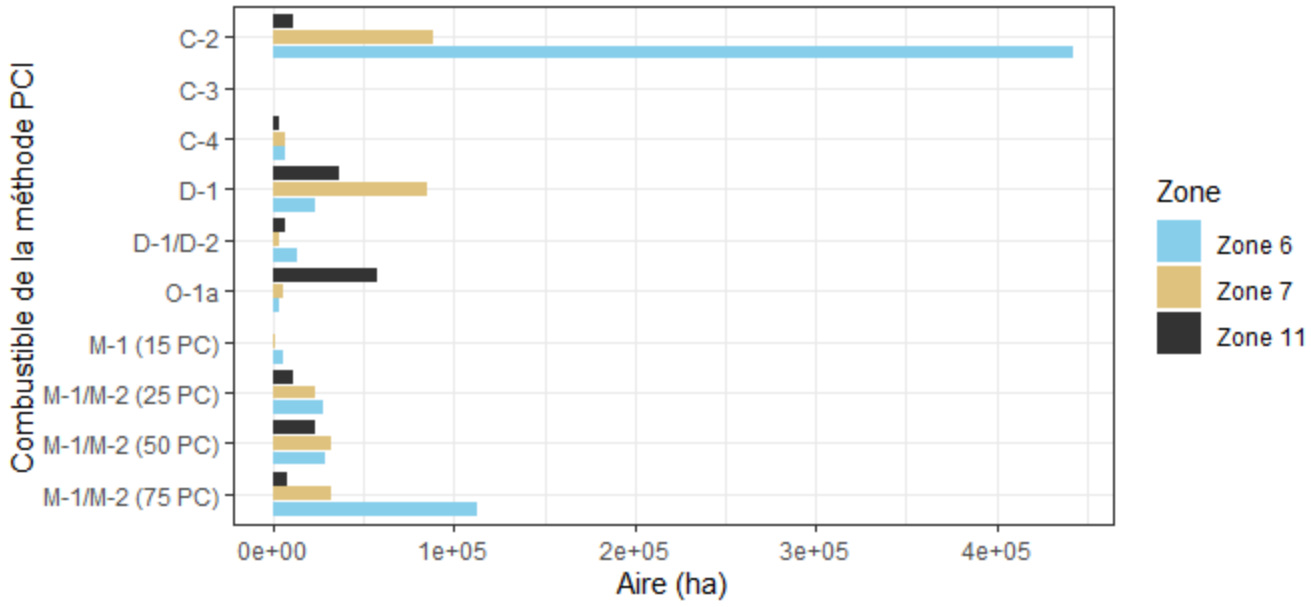


Figure 3. Superficie occupée par les différents types de combustible de la méthode de prédiction du comportement des incendies à l'intérieur de chacune des zones de régime de feux croisant l'aire d'étude. C-2: Pessière boréale; C-3: Pins gris à maturité; C-4: Jeunes pins gris; D-1: Peupliers faux-trembles sans feuilles; D-1/D-2; D-1 sans ou avec feuilles; O-1a : Herbes aplaties; M-1 (15 PC): Forêt boréale mixte sans feuilles avec 15% de résineux, M-1/M-2 (25 PC): Forêt boréale mixte sans ou avec feuilles avec 25% de résineux; M-1/M-2 (50 PC): Forêt boréale mixte sans ou avec feuilles avec 50% de résineux; M-1/M-2 (75 PC): Forêt boréale mixte sans ou avec feuilles avec 75% de résineux;

2.1.2 Conditions météorologiques

Afin de bien couvrir l'entièreté du territoire et d'en capturer les spécificités climatiques, les conditions météorologiques dans l'aire d'étude ont été déterminées à partir des données de réanalyses ERA5. Le jeu de données ERA5 est un ensemble de données climatiques mondiales complet et à haute résolution, produit par le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (Hersbach et al., 2020). Il fournit des informations détaillées sur diverses variables atmosphériques, océaniques et de surface terrestre, couvrant la période de 1940 à aujourd'hui. ERA5 combine des données d'observation historiques et des techniques de modélisation avancées pour générer des enregistrements cohérents et précis du temps et du climat, offrant des données horaires avec une résolution spatiale d'environ 31 kilomètres (0,25° x 0,25°). Nous avons restreint le jeu de données météorologiques à la période 1994-2023 et spatialement aux cellules ERA5 couvrant le territoire de la CMQuébec.

Afin de simuler le comportement d'incendie (intensité de l'incendie ou la vitesse de propagation) avec la Méthode canadienne de prévision du comportement d'incendies de forêt (MCPCI; Forestry Canada Fire Danger Group, 1992), il est requis de calculer les six indices de la Méthode Canadienne de l'Indice Forêt-Météo (MCIFM; Van Wagner & Pickett, 1985; Van Wagner, 1987). Ceux-ci sont calculés à partir de la température (T°), de l'humidité relative (HR), de la vitesse des vents (VV) et de la direction des vents (DV), tout en tenant compte des précipitations. Ces dernières variables ont été déterminées à partir de la base des données quotidiennes d'ERA5. Les indices de la MCIFM sont: l'Indice du combustible léger (ICL), l'Indice de l'humus (IH), l'Indice de sécheresse (IS), l'Indice de propagation initiale (IPI), l'Indice du combustible

disponible (ICD) et l'Indice forêt-météo (IFM). Plus d'explications sur la MCIFM sont disponibles à l'annexe 1.

Pour l'ensemble de l'aire d'étude, les conditions météorologiques historiques (1994-2023) durant les saisons de feux (3 mars au 20 novembre) montrent des valeurs moyennes journalières à midi, heure locale, de 16.1 °C pour la température, de 58.2% d'humidité relative, 13.9 km/h pour la vitesse des vents et une moyenne de précipitations cumulées des dernières 24h (soit de midi la veille à midi de la date d'observation) de 4 mm. Au niveau des conditions météorologiques spécifiques aux zones, la seule différence est au niveau de la T° journalière moyenne, qui diminue d'environ 1°C, lorsque l'on transitionne de la zone 11 à la zone 7, ainsi que de la zone 7 à la zone 6 (voir aussi annexe 2). Pour l'ensemble de l'aire d'étude, les valeurs journalières moyennes des indices MCIFM durant la saison des feux varient aussi d'une zone à l'autre. En effet les conditions forêt-météo sont plus propices au feu dans la zone 11 alors qu'on y rencontre les valeurs les élevées pour tous les indices MCIFM. Ces conditions deviennent progressivement moins sévères en se déplaçant vers la zone 6 (Tableau 1).

Tableau 1. Valeurs saisonnières (avril-octobre) moyennes (Moy; et écart-type [ET]), minimales (Min), Maximales (Max) et Médianes (Med) de température à midi heure locale, de la somme des précipitations de midi à midi et des indices de la Méthode canadienne de l'indice forêt-météo observées à midi heure locale pour la période 1994-2023, pour les zones 6, 7 et 11. T°: température en celcius; Precip: Précipitations quotidiennes (mm); ICL: Indice de combustible léger; IH: Indice de l'humus; IS: Indice de sécheresse; IPI: Indice de propagation initial: ICD: Indice de combustible disponible; IFM : Indice forêt-météo.

Zone	Paramètres	Min	Moy	ET	Max	Med
Zone 6	T°	-9.8	15.4	5.7	32.4	16.0
Zone 7	T°	-10.7	16.2	6.1	33.4	16.9
Zone 11	T°	-10.5	17.0	6.6	34.4	18.0
Zone 6	Précip	0	4.1	5.9	114.4	1.7
Zone 7	Précip	0	4.0	6.1	96.4	1.3
Zone 11	Précip	0	3.8	6.3	90.6	0.8
Zone 6	ICL	3.1	66.4	18.5	94.7	70.1
Zone 7	ICL	3.5	68.5	18.0	95.4	73.2
Zone 11	ICL	3.1	70.8	17.3	95.0	76.5
Zone 6	IH	0	7.7	6.8	69.1	5.9
Zone 7	IH	0	9.1	8.2	92.4	6.9
Zone 11	IH	0	10.7	9.5	100.0	8.1
Zone 6	IS	0	65.0	52.5	369.3	51.9
Zone 7	IS	0	73.0	60.6	375.4	57.9
Zone 11	IS	0	84.9	70.7	458.6	68.5
Zone 6	IPI	0	2.2	2.4	23.7	1.3
Zone 7	IPI	0	2.5	2.6	24.4	1.4
Zone 11	IPI	0	2.6	2.5	20.6	1.7
Zone 6	ICD	0	10.6	8.6	70.8	8.5
Zone 7	ICD	0	12.3	10.2	103.3	9.8
Zone 11	ICD	0	14.5	11.9	113.1	11.6
Zone 6	IFM	0	2.7	4.0	41.6	0.7
Zone 7	IFM	0	3.3	4.6	48.8	0.9
Zone 11	IFM	0	3.8	4.9	38.0	1.4

2.2 Détermination du régime de feux

Afin de déterminer le régime de feux récent sur le territoire de la CMQuébec, nous avons utilisé les données de l'historique des feux compilé par la SOPFEU. Cette base de données contient l'information liée aux incendies survenus sur le territoire de la CMQuébec pour les saisons de feux (10 avril au 8 novembre) de 1994 à 2023, ce qui comprend celle liée aux incendies gérés par les municipalités et ayant été signalés à la SOPFEU. Les feux répertoriés ont été extraits pour la zone tampon et pour les zones entières 6, 7 et 11, afin de mieux définir la taille, la fréquence, les patrons spatiaux des allumages, la saisonnalité et les causes des incendies dans l'aire d'étude. Ces caractéristiques sont essentielles pour la calibration de Burn-P3 (voir section ci-dessous portant sur le modèle). Au total, 379 incendies qui sont survenus sur le territoire de la CMQuébec entre 1994 et 2023 ont été utilisés afin de définir le régime de feu de cette région.

2.2.1 Taille, fréquence et répartition spatiale des feux

La très grande majorité (88%) des incendies enregistrés sur le territoire de la CMQuébec durant la période considérée font moins d'un hectare (Figure 4). Seuls quelques feux (1%) font plus de 10 ha, atteignant 58.6 ha au maximum. Une majorité de feux est observée dans la zone 11, dans les municipalités périphériques à la jonction des zones 7 et 11, au nord de la ville de Québec, de même qu'en territoire agricole sur la rive sud du Fleuve St-Laurent. Cependant, les superficies brûlées observées durant la période à l'étude étaient légèrement plus importantes dans la zone 7 en raison de trois feux de >30 ha qui y ont été observés. La zone 6 représente celle où on observe le moins de feux et les plus petites superficies brûlées (Figure 4).

2.2.2 Saisonnalité

La détermination de la saisonnalité des incendies est importante en raison de son impact sur leur comportement. D'une saison à l'autre, principalement entre le printemps et l'été, la météo est généralement différente. Par exemple, on retrouve souvent des humidités relatives beaucoup plus basses au printemps qu'en été, ce qui favorise un assèchement plus rapide du combustible. Le combustible est aussi très différent d'une saison à l'autre. En effet, au printemps et à l'automne, les feuillus sont sans feuille, lesquelles se retrouvent au sol plutôt que sur les branches où elles retiennent l'humidité. De plus, au printemps, les plantes de sous-bois des forêts de conifères ne sont pas encore débourrées, exposant ainsi les mousses hypnacées à l'assèchement. Les activités humaines sont aussi généralement différentes entre les saisons, entraînant différents patrons spatiaux d'allumage de causes humaines. Ainsi, dans les simulations, deux saisons distinctes ont été identifiées pour caractériser l'aire d'étude, le printemps et l'été, pour lesquelles les patrons d'allumages, la feuillaison, les pourcentages d'herbes fanées et les données météorologiques diffèrent. Les saisons ont été déterminées en se basant sur la moyenne des dates de feuillaison par zone. En effet, le jour julien du débourrement ou de l'émergence des feuilles a été estimé pour chaque cellule ERA5 en se basant sur l'indice de début de saison de croissance, avec un décalage de 10 jours (GSS10d). Cet indice correspond au 5^{e} jour de la première période de 10 jours consécutifs où la température moyenne quotidienne dépasse 5°C. En utilisant ces données, nous avons estimé au 16 mai la date de débourrement moyenne laquelle nous permet de séparer le "printemps" de "l'été".

L'analyse des données de la SOPFEU indique que les incendies sont principalement observés en été, i.e., une fois que les feuilles sont formées bien qu'une portion non négligeable d'incendies soient survenus au printemps dans la zone 11 (Figure 4). Toutefois, il est important de mentionner que des incendies sont survenus tout au long de la saison, soit de début avril à début novembre (Annexe 3). De plus, la saison des incendies débute généralement plus tôt dans les zones méridionales et s'y prolonge plus tardivement à l'automne. Les patrons spatiaux d'allumage, pour la période étudiée, indiquent qu'il n'y a eu aucun allumage au cœur de la zone fortement urbanisée de l'Agglomération de Québec, ainsi qu'aucun allumage au centre de la zone 6 (Figure 4).

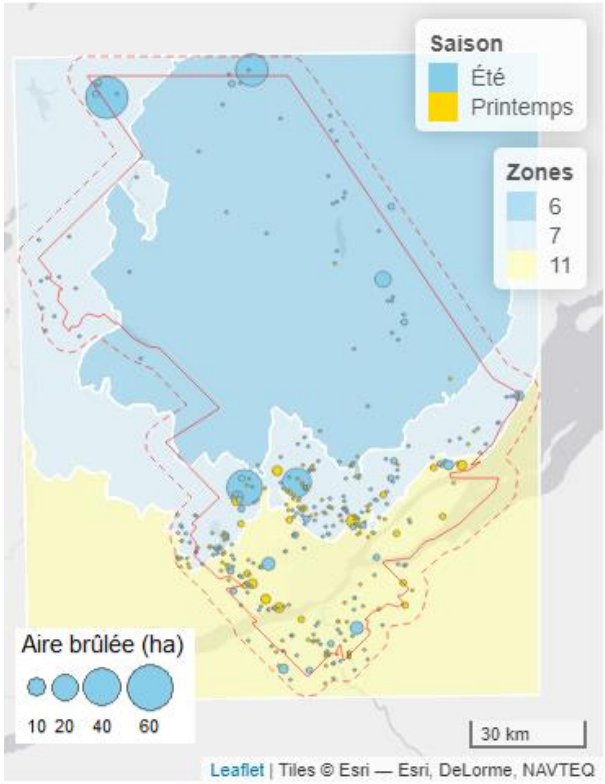


Figure 4. Caractéristiques spatiales du régime de feux de forêt par zone d'incendies et localisation des allumages: Allumages colorés par saison et redimensionnés selon la superficie brûlée. Note: les tailles et proportions ne sont pas à l'échelle.

2.2.3 Causes

L'analyse des données de la SOPFEU démontre que la majorité (>90%) des incendies répertoriés dans l'aire d'étude étaient de cause humaine et représentaient 62% des aires brûlées (Figure 5). La majorité des incendies de cause humaine sont allumés par des résidents (48,3% et 31,1% du nombre d'incendies et de la superficie brûlée respectivement) et une portion importante (25,6% et 10,6% du nombre de feux et de la superficie brûlée respectivement) est aussi attribuable aux activités récréatives. Puisque la très grande majorité des incendies survenus sur le territoire sont d'origine anthropique, la présente analyse ne différencie pas leur cause lors des simulations.

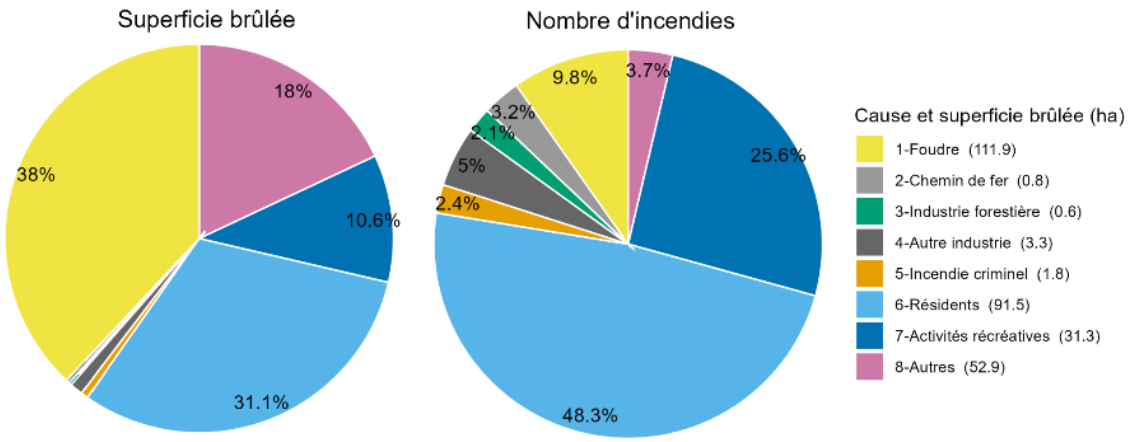


Figure 5. Proportion (%) du nombre d'incendies et de la superficie brûlée selon la cause.

2.3 En perspective par rapport au reste du Québec

Afin de bien comprendre l'aléa incendie sur le territoire de la CMQuébec, il est primordial d'inscrire les résultats obtenus dans le cadre de cet exercice dans un contexte géographique plus large. Ainsi, malgré la présence récurrente d'incendies de végétation de petite taille, l'aire d'étude est moins exposée aux incendies que bien d'autres régions du Québec et du Canada. La probabilité et l'intensité potentielle des incendies ainsi que l'aléa seraient faibles au sud du Saint-Laurent et moyens dans les TNO et au nord du fleuve (Erni et al., 2024).

Selon le zonage des régimes de feux du Québec méridional (Couillard et al., 2022), l'aire d'étude se situe essentiellement dans leur zone C (Figure 6). Celle-ci se caractérise par des cycles de feu longs, estimés à 665 ans en moyenne, et par des proportions de superficies brûlées variables d'un district écologique à l'autre. Il est important de noter que les secteurs de cette zone qui sont situés en haute altitude et qui chevauchent le territoire de la CMQuébec, comme les massifs des Laurentides, ont été peu touchés par les feux depuis la fin du 19e siècle. Cela étant dit, quelques feux de grandes ampleurs sont survenus dans le pourtour et à proximité du nord du territoire de la CMQuébec au tournant du 20e siècle (Forêt ouverte, 2025). Ces forêts reçoivent des précipitations abondantes et comptent une forte proportion de sapin baumier, une essence peu adaptée aux feux récurrents, ce qui témoigne de la rareté des incendies dans ce secteur. En effet, des études démontrent que plusieurs de ces sapinières d'altitude n'ont pas brûlé depuis quelques milliers d'années (De Lafontaine & Payette, 2011; Couillard et al., 2013).

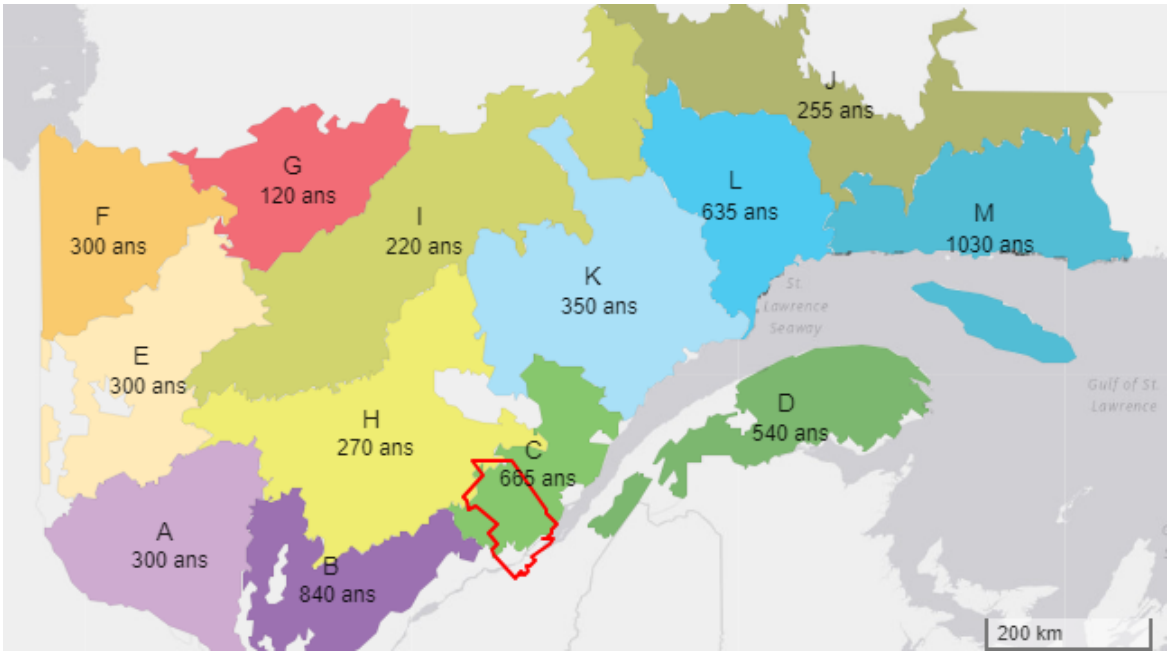


Figure 6. Localisation de l'aire d'étude (périmètre rouge) sur les zones des régimes de feux du Québec méridional (Couillard et al., 2022). Les valeurs représentent le nombre d'années correspondant aux cycles de feu calculés pour la période 1890-2020.

À retenir!

- La répartition des combustibles (végétation) sur le territoire suit un gradient latitudinal et altitudinal, où les combustibles conifériens très inflammables se trouvent en altitude et au nord alors que les combustibles mixtes et feuillus de même que ceux reliés à l'agriculture se trouvent plus près des centres urbains, au sud du territoire.
- Les températures et les indices forêt-météo suivent aussi un gradient latitudinal et altitudinal, leurs valeurs étant généralement plus élevées dans les portions méridionales et en basse altitude.
- La majorité des incendies observés sur le territoire font moins d'un hectare. Ils sont plus nombreux dans le sud du territoire, près des centres urbains.
- La très grande majorité des incendies sont d'origine anthropique.
- Les incendies surviennent généralement en été à l'exception de la zone 11 où ils surviennent fréquemment au printemps. Des incendies peuvent être observés tout au long de la saison.
- La CMQuébec se trouve à l'intérieur d'une zone de régime de feux qui est peu active comparativement à plusieurs autres régions au Québec.

2.4 Le modèle Burn-P3

Le comportement des incendies de forêt a été simulé en utilisant Burn-P3 (Parisien et al., 2005; Ressources Naturelles Canada, 2017), un logiciel de simulation des feux par la méthode de Monte-Carlo (Annexe 4). Nous avons utilisé Burn-P3 pour cartographier la probabilité de brûlage, l'intensité du feu, la vitesse de propagation et l'aléa. Nous définissons l'aléa comme la combinaison de la probabilité d'incendie et de la magnitude de l'incendie. La magnitude de l'incendie est définie par deux attributs du comportement d'incendie. Premièrement, par l'intensité de l'incendie (énergie dégagée lors du passage du front de flamme; quantifiée en kW/m), qui est indicative de la difficulté de suppression (Hirsch & Martell, 1996) et de l'impact potentiel du feu aux infrastructures (Abo El Ezz et al., 2022). Deuxièmement, par la vitesse de propagation de l'incendie (m/min), qui quant à elle est indicative de la vitesse d'intervention requise par les ressources de suppression. Ainsi, nous avons quantifié l'aléa selon deux approches, soit la combinaison de i) l'intensité et de la probabilité d'incendie d'une part et d'autre part ii) de la vitesse de propagation et de la probabilité

d'incendie. Nous avons considéré les données historiques récentes (1994-2023) de météo, de comportement des feux et de combustibles, afin d'obtenir une évaluation de l'état actuel de l'aléa.

Burn-P3 s'appuie sur une série d'intrants statiques et d'intrants probabilistes, ainsi que sur la propagation déterministe des incendies à l'aide de l'algorithme Prometheus (Tymstra et al., 2010), qui est basé sur la MCPCI (Forestry Canada Fire Danger Group, 1992) (Annexe 1), pour modéliser plusieurs milliers de fois une saison typique d'incendies. Les intrants représentent les combustibles, la topographie, la météo et les caractéristiques d'allumage (fréquence et emplacement) et de propagation des feux, dérivés des conditions historiques ou projetées. À chaque itération, Burn-P3 pige des valeurs aléatoires de l'emplacement de l'allumage et de la durée du feu pour simuler une gamme étendue de résultats possibles et rattache à celles-ci, pour chaque jour de brûlage, des paramètres météorologiques pigées depuis un ensemble de conditions météorologiques quotidiennes (Annexe 5). Ces itérations sont fusionnées pour produire des cartes de la probabilité d'incendie (PI), ainsi que d'autres mesures du comportement potentiel des incendies comme l'intensité de ces feux de même que leur vitesse de propagation.

2.4.1 Intrants Burn-P3

Afin de paramétrer les simulations d'incendies, Burn-P3 utilise des intrants statiques et stochastiques (Tableau 2). Les intrants statiques sont ceux qui restent constants au cours de toutes les itérations d'un scénario. Les intrants stochastiques sont des composantes variables de l'environnement du feu, qui permettent d'intégrer de la variation temporelle et spatiale au niveau des allumages (nombre, emplacement, saison, cause) et de la météorologie (conditions météorologiques et durée des feux).

Tableau 2. Liste des intrants utilisés par le logiciel Burn-P3.

Intrants du modèle	**Type de données**	**Description**
Statiques		
Topographie	Couche matricielle de valeurs continues	Altitude (m)
Zones de feu	Couche matricielle de valeurs discrètes (catégories)	Trois zones de régimes de feu géographiquement distinctes utilisées pour stratifier les allumages par saison et par cause, inspirées des zones homogènes de la SOPFEU
Zones météorologiques	Couche matricielle de valeurs discrètes	Trois régions géographiques influencées par des conditions climatiques distinctes, identiques aux zones de feux

Combustibles	Couche matricielle de valeurs discrètes	Types de combustibles de la Méthode canadienne de prévision du comportement des incendies et de non-combustibles; 10 types de combustibles au total dans la zone d'étude
Saisons	Paramètre	Dates de début et de fin pour lesquelles les feux sont permis dans nos simulations, le fanage de l'herbe y change; 2 saisons utilisées, le printemps et l'été, soit avant et après le 16 mai, lesquelles ont un taux de fanage de 85% et 0% respectivement. À cette date, les combustibles avec une composante de feuillus transitionnent de leur type sans feuille (p.ex., D-1) au type avec feuilles (p.ex., D-2)
Taille minimale du feu	Paramètre	Taille minimum des feux retenus pour l'analyse avec Burn-P3, soit 0.1 ha. Étant donné que les cellules des grilles sont de 1 ha, cette valeur est plus ou moins respectée dans Burn-P3, puisqu'il est conçu pour simuler des feux de grande taille
Stochastiques		
Grilles de localisation des allumages	Couche matricielle de valeurs continues	Probabilité utilisée pour modéliser les allumages est basée sur les données historiques (1994-2023) lissées à partir d'estimations de densité spatiale Gaussian Kernel à 30 km de distance
Saison, zone de feu et cause des feux	Distribution de fréquences	Proportion de feux allumés par saison et zone de feux. Une seule cause a été considérée, soit cause humaine
Conditions Forêt-météo	Liste numérique	Conditions forêt-météo quotidiennes pour lesquelles les incendies devraient s'allumer et se propager: les 1 000 journées au IFM le plus élevé par saison et zone, réparties par saison et par zone météorologique

Nombre d'allumages par itération	Distribution de fréquences	Distribution du nombre d'allumages de feu qui brûlent au cours de chaque itération ; basée sur la gamme de variabilité historique (1994-2023)
Durée des feux	Distribution de fréquences	Durée de l'incendie : nombre de jours où les feux ont le potentiel de se propager
Heures de brûlage	Distribution de fréquences	Nombre d'heures quotidiennes pendant lesquelles les incendies peuvent se propager

2.4.2 Paysage

Burn-P3 utilise des grilles représentatives des caractéristiques du paysage soit l'altitude, les combustibles, les zones d'incendie et les zones météorologiques ainsi que des grilles d'allumages. Toutes les grilles s'imbriquent et présentent les caractéristiques suivantes pour l'aire d'étude du présent projet:

Résolution: 100m x 100m (1 ha)
Colonnes et lignes: 1 319, 1 639
Nombre de pixels: 2 161 841
Projection: NAD83(CSRS) / MTM zone 7 (EPSG:2949)

Grille d'altitude

La grille d'altitude (Figure 2A) représente la topographie de l'aire d'étude, découpée à partir d'un rééchantillonnage à 100m de résolution des données ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, Yamaguchi et al., 1998) par l'étendue de la zone tampon et projetée en NAD83(CSRS) / MTM zone 7. L'altitude moyenne pour toute l'étendue de l'aire d'étude correspond à 467 m.

Grille de combustibles

La grille de combustibles (Figure 2B) résulte du rééchantillonnage k-Nearest Neighbours (KNN) à une résolution de 100m, basé sur la carte nationale de la Méthode canadienne d'évaluation des dangers d'incendie de forêt pour la prévision du comportement des incendies 2024, dont la résolution initiale était de 30 m × 30 m. Cette carte, produite par Samuel Lacarte et publiée par le Service canadien des forêts (https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/4e66dd2f-5cd0-42fd-b82c-a430044b31de), correspond à la version diffusée le 10 juillet 2024. La grille a été découpée selon l'étendue de la zone tampon et est projetée en NAD83(CSRS) / MTM zone 7. La description des types de combustibles utilisés par la Méthode canadienne de prévision de comportement d'incendies de forêt est accessible à l'adresse suivante : https://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/renseignements/fueltypes.

Grille des zones météorologiques et grille des zones d'incendies

Les grilles des zones météorologiques et d'incendies sont identiques (Figure 1B). Elles correspondent aux zones homogènes regroupées (SOPFEU, ZH_Regroupees_modifSurLim2010_buffer 1km.shp), mises en

format matriciel suivant les attributs des grilles d'altitude et de combustibles. Ces grilles permettent à Burn-P3 d'attribuer spatialement aux incendies les caractéristiques météorologiques et celles du régime de feu.

2.4.3 Module des allumages

Nous avons simulé un total de 5.2 millions d'allumages sur le territoire de l'aire d'étude de manière aléatoire, mais à l'intérieur d'un certain nombre de contraintes incluant: la distribution du nombre d'allumages par saison et par zone (Tableau 3), et selon une grille d'allumages par saison.

Tableau 3. Fréquence des allumages simulés en fonction de la zone et de la saison

Saison	Zone	Fréquence (%)
Printemps	6	0.8
	7	6.7
	11	24.9
Été	6	9.4
	7	28.4
	11	29.8

Grilles d'allumages

Afin de forcer Burn-P3 à respecter les patrons spatiaux historiques des allumages dans l'aire d'étude, des grilles d'allumages ont été utilisées lors des simulations. Elles ont été créées en utilisant l'occurrence des feux survenus sur le territoire de 1994 à 2023, occurrences qui ont par la suite été lissées à partir d'estimations de densité spatiale Gaussian Kernel à 30 km de distance (Figure 7), calculées à l'aide de la fonction *sf.kde* du R-package *spatialEco* (Evans et Murphy, 2023*)*. Ainsi, pour chaque allumage simulé, Burn-P3 sélectionne au hasard une coordonnée géographique (pixel) sur le territoire d'étude et les grilles d'allumages ont le rôle d'influencer la probabilité qu'un pixel soit sélectionné.

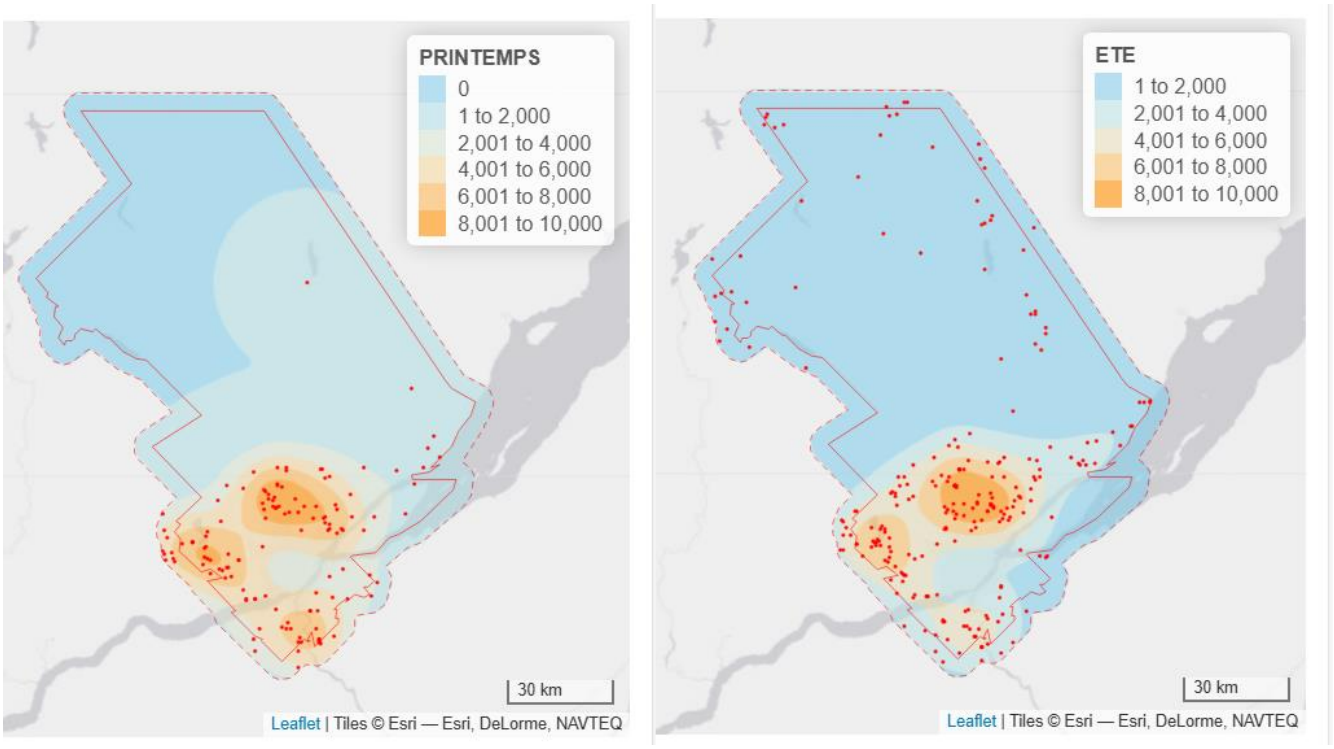


Figure 7. Grilles d'allumages au printemps et en été pour l'aire d'étude délimitée en rouge et sa zone tampon en pointillé. Les points rouges correspondent aux incendies saisonniers répertoriés entre 1994 et 2023 utilisés pour la création des grilles d'allumages.

2.4.4 Module des conditions de brûlage et de propagation

Les indices forêt-météo pour les 42 points de grilles ERA5 couvrant le territoire à l'étude (Figure 1B) ont été calculés selon la Méthode canadienne de l'indice Forêt-Météo (IFM) (Turner & Lawson, 1978; Wagner & Pickett, 1985; Lawson & Armitage, 2008) à l'aide de BioSIM v11 (Régnière et al., 2017) (https://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/renseignements/sdm/fwi).

Les 1 000 journées avec les valeurs de l'indice IFM les plus élevées ont été sélectionnées pour chaque zone afin de constituer la "liste forêt-météo" (Tableau 2), laquelle est nécessaire afin de simuler les conditions propices à la propagation des incendies (Figure 8). Lors des simulations, ces journées sont sélectionnées de manière séquentielle dans la liste forêt-météo, et comme les données sont classées en ordre chronologique, les séquences sont plus réalistes comparativement à une sélection aléatoire (Parisien et al., 2005). Cependant, cette sélection de journées extrêmes surestime la capacité du territoire à brûler, lequel se caractérise par des feux très peu fréquents et de petite taille.

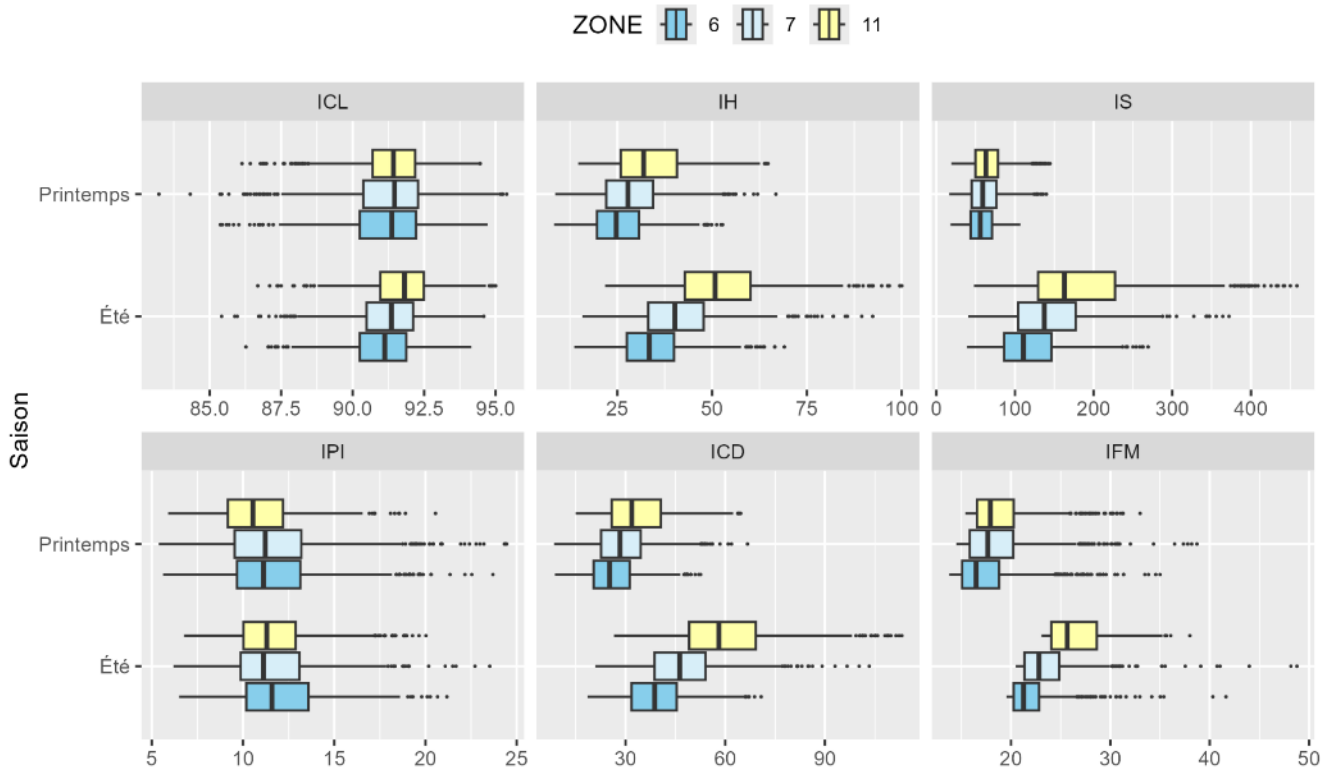


Figure 8. Comparaison des indices du combustible léger (ICL), de l'humus (IH), de sécheresse (IS), de propagation initiale (IPI), de combustible disponible (ICD) et forêt-météo (IFM) par zones et saisons obtenus à partir des 1 000 journées présentant les conditions les plus propices aux incendies dans chaque zone.

Chacune des 5.2 millions de simulations effectuées dans Burn-P3 contenait 1 allumage et donc 1 feu simulé. À travers une série d'essais et de simulations préliminaires nous avons perfectionné la paramétrisation du nombre d'heures et de jours de brûlage afin d'obtenir les résultats les plus réalistes possibles. Plus de détails sur cette calibration sont présentés à l'Annexe 5. La résolution spatiale de 100m, comme celle des grilles de topographie et de combustibles, a été conservée dans les simulations et dans la production des résultats.

2.4.5 Extrants

Dans le cadre de cette analyse, nous avons estimé trois paramètres essentiels afin de déterminer l'aléa à la suite des simulations Burn-P3. Ces paramètres sont déterminés en résumant l'information spatiale de tous les polygones de feux simulés par Burn-P3 durant l'exercice de simulation. Ces extrants correspondent respectivement à la probabilité d'incendie (PI), l'intensité de l'incendie (II) et la vitesse de propagation (VP). La PI est un pourcentage à l'échelle d'un pixel qui correspond à la somme du nombre de fois où ce pixel a brûlé dans les simulations, divisé par le nombre total de simulations (ici 5.2 millions), multiplié par le nombre annuel moyen d'allumages, soit 10, et par 100 afin d'obtenir une valeur en pourcentage. Le calcul de l'intensité de l'incendie et de la vitesse de propagation prend en compte à la fois les caractéristiques du combustible, de la topographie, et les conditions météorologiques quotidiennes, ce qui les rend pertinents pour évaluer l'inflammabilité du paysage et l'aléa incendie en combinaison avec la probabilité d'incendie. L'intensité du feu, une mesure de la libération de chaleur, est largement influencée par les caractéristiques

de combustion du combustible disponible ainsi que par les conditions atmosphériques. Nous avons cartographié l'intensité potentielle, en utilisant quatre classes utilisées par la Méthode canadien de prévision du comportement des incendies (MCPCI) et aux changements connus dans le comportement des incendies : <2 000 kW/m (feu de surface), 2 000-4 000 kW/m (feu de cimes intermittent), 4 000-10 000 kW/m (feu de cimes continu), >10 000 kW/m (feu de cimes extrême) (Alexander & de Groot, 1988 ; Alexander & Lanoville, 1989). Les seuils de 2 000 kW/m et de 10 000 kW/m dans les valeurs d'intensité de feu ont des implications majeures pour la gestion et la suppression des incendies de forêt (Hirsch & Martell, 1996). En effet, il est estimé que les pompiers forestiers sont généralement incapables de contenir sécuritairement un feu d'une intensité de plus de 2 000 kW/m sans support aérien (Hirsch & Martell, 1996). Alors que les feux présentant une intensité supérieure à 10 000 kW/m sont considérés comme explosifs, avec des taux de propagation rapides et un développement continu des feux de cime, les rendant très difficiles à maîtriser sur leurs flancs, voire impossibles à maîtriser à leur tête, et ce même avec les avions-citernes de types CL-415 (McFayden et al., 2023). Nous savons aussi que l'intensité de l'incendie est une métrique importante dans l'évaluation des impacts potentiels du feu aux infrastructures (ABo El Ezz et al., 2022).

La vitesse de propagation (VP) représente la rapidité avec laquelle un incendie progresse à son front, c'est-à-dire là où il avance le plus rapidement, que ce soit pour des feux de cime ou pour les feux de surface. Exprimée en mètres par minute, elle est déterminée en fonction du type de combustible, de l'indice de propagation initiale et de l'indice du combustible disponible. De plus, plusieurs caractéristiques spécifiques aux combustibles influencent cette vitesse, telles que le stade phénologique des feuillus (présence ou absence de feuilles), la quantité de combustible léger comme la litière d'aiguilles ou de feuilles, la hauteur de la base de la cime des conifères et le pourcentage de végétation desséchée ou fanée chez les graminées (Forestry Canada Fire Danger Group, 1992). La VP est une valeur critique, puisque selon l'équation du calcul d'intensité de Byram (1959), cette dernière est principalement fonction du combustible disponible (biomasse) et de la vitesse de propagation du feu. Ainsi plus la vitesse de propagation est rapide, plus l'intensité sera élevée pour un même combustible. Selon les travaux en cours au Laboratoire de Pyrologie Forestière du CFL (J. Boucher et collaborateurs), menés auprès des pompiers forestiers de l'Ontario et du Québec, ceux-ci ont une productivité moyenne de 3-4 m/min lors de l'attaque initiale, soit durant la première phase de suppression et d'arrosage d'un incendie. Puisque les pompiers font l'attaque initiale le long du périmètre de l'incendie, et que celui-ci croît de manière exponentielle par rapport à sa vitesse de propagation (VP), il est nécessaire que la vitesse de propagation de l'incendie soit plus basse que la productivité des pompiers, afin que ceux-ci puissent contenir l'incendie.

Ensemble, ces extrants permettent de mesurer l'aléa, lequel est considéré de deux façons à savoir, par la combinaison des PI et II d'une part et d'autre part par la combinaison des PI et VP. L'aléa a été cartographié en croisant les quartiles de probabilité d'incendie avec les classes d'intensité de feu ou celle de vitesse de propagation pour former 16 classes d'aléa, comme dans Stockdale et al. (2019). Tous ces extrants sont exprimés à la résolution de la grille de combustible, i.e. à 100m.

À retenir!

- Burn-P3 simule des incendies de forêt pour cartographier la probabilité d'incendie, l'intensité et la vitesse de propagation, lesquels permettent de déterminer **l'aléa d'incendie de végétation**.
- Des milliers de scénarios sont modélisés à partir de données sur les combustibles (la végétation), la topographie, les conditions forêt-météo et les allumages (fréquence et emplacements).
- Des résultats issus de cette méthode et notamment exprimés sous forme de cartes aident à mieux comprendre l'aléa et à en planifier la gestion

2.5 Prémisses, particularités et limites de la modélisation

Cette analyse constitue un exercice essentiel pour évaluer l'aléa incendie à l'échelle locale et régionale. Elle représente la phase initiale de tout projet utilisant Burn-P3, permettant d'aller au-delà d'un simple portrait basé sur l'historique des feux lequel constitue un portrait incomplet de l'aléa sur le territoire. Il est important de souligner que les scénarios simulés dans ce rapport surestiment la capacité des incendies à se propager rapidement et à brûler de vastes superficies. En effet, l'utilisation de conditions météorologiques extrêmes, bien que essentielles pour évaluer le potentiel des grands feux, complique la simulation des petits incendies. En effet, simuler de très petits incendies, tels qu'observés sur le territoire de la CMQuébec, nécessite une augmentation significative du nombre d'allumages pour couvrir l'ensemble du territoire étudié, ce qui résulte en des probabilités de brûlage extrêmement faibles pour ces zones. Cette approche limite la représentation des petits incendies en raison de la résolution spatiale du modèle, où la taille minimale simulée correspond à celle d'une cellule, généralement supérieure à un hectare. De plus, le nombre d'heures et de jours de brûlage utilisés dans le modèle ne reflète pas strictement la réalité, mais sert de contrainte pour calibrer le comportement des incendies simulés dans l'aire d'étude.

Nous n'avons utilisé que la période historique récente, de 1994 à 2023, pour définir le régime de feu (fréquence et grille d'allumage) ainsi que pour définir les conditions de météo et forêt-météo. Ce choix permet d'avoir des données de très haute qualité pour les simulations, mais en contrepartie, cette période retenue n'est pas nécessairement représentative de conditions plus extrêmes ayant pu avoir lieu avant 1994.

Il est aussi très important de mentionner que, bien que les simulations alignées sur les conditions historiques soient représentatives des régimes du passé récent, elles ne garantissent pas une couverture complète des risques futurs. Certaines zones identifiées comme étant à faible risque pourraient tout de même être exposées à des incendies dans des conditions extrêmes au-delà des conditions historiques observées et

non simulées ici. Bien que de telles simulations tenant compte du climat futur puissent être réalisées (Dawe et al., 2022), elles étaient hors du présent mandat avec la CMQuébec compte tenu du travail additionnel que cela suppose.

Il est également crucial de souligner que les zones identifiées comme « sans feux » dans l'historique ne sont pas nécessairement à l'abri des incendies. Ces territoires, souvent riches en combustibles, n'ont simplement pas rencontré les conditions favorables pour brûler dans les simulations. Sur un horizon temporel étendu, ces zones pourraient éventuellement être affectées par des incendies de grande ampleur ou par une succession de petits feux. Cela souligne l'importance d'inclure ces territoires dans les stratégies de gestion et de planification des risques, malgré leur faible probabilité apparente de brûlage.

En raison de la complexité de la méthode employée, des résultats et des limites qu'ils imposent, il est important de mentionner **que seuls des experts formés et qualifiés au Canada en comportement des incendies, avec une connaissance approfondie des logiciels de propagation des incendies (Prometheus) et de simulation des incendies (Burn-P3), ainsi que du comportement des incendies sur le territoire à l'étude, peuvent interpréter avec crédibilité les résultats de cette analyse**.

3. Résultats

3.1 Probabilité d'incendies, intensité des incendies et vitesse de propagation

On observe généralement de très faibles (< 0.1%) PI sur l'ensemble du territoire de la CMQuébec (Figure 9A). Malgré l'utilisation de 5.2 millions de simulations, aucun feu n'a été simulé dans une large portion du territoire situé en zone 6 (Figure 9A). Les PI tendent à augmenter dans la périphérie nord de la ville de Québec et sont maximales dans de petites portions du territoires situées sur les municipalités limitrophes. Les plus fortes probabilités d'incendie correspondent à des régions où la fréquence des feux est plus importante, où les conditions météorologiques sont relativement propices aux incendies, i.e., en milieu méridional et aux endroits localisés où les combustibles sont particulièrement inflammables. En zone 11, l'absence d'incendie est attribuable au type de combustible "urbain" qui est considéré comme non-combustible lors de simulations Burn-P3, qui n'est pas conçu pour simuler les incendies en zone habitée.

Les patrons d'II et de VP sont relativement similaires entre eux (Figures 9B et 9C). L'intensité des incendies simulés était généralement inférieure à 2 000 kW/m sur le territoire bien que des intensités moyennes supérieures à 4 000 kW/m aient été simulées localement en zone 7 et plus généralement dans l'est de la zone 6 (Figure 9B). De fortes vitesses de propagation et d'intensité d'incendie sont particulièrement simulées plus localement dans le sud de l'aire d'étude dans les pochettes où l'on observe majoritairement des combustibles conifériens. Il est aussi important de mentionner que les vitesses de propagation maximales sont observées en milieu agricole, dans le combustible de type O1 (herbes) (Figure 9C). Dans la zone 6, les plus fortes vitesses de propagation et d'intensité d'incendie ont été simulées en haute altitude où la connectivité du combustible conifèrien est particulièrement grande. La quasi-absence de feux dans l'ouest de la zone 6 empêche une interprétation complète de la vitesse de propagation et de l'intensité de l'incendie (Figures 9B et 9C). Cela étant dit, compte tenu de la présence abondante de combustibles conifériens et de leur connectivité dans cette région, il est juste de penser que des feux qui pourraient potentiellement s'allumer dans cette zone auraient un comportement relativement similaire à ceux simulés dans l'est de cette même zone.

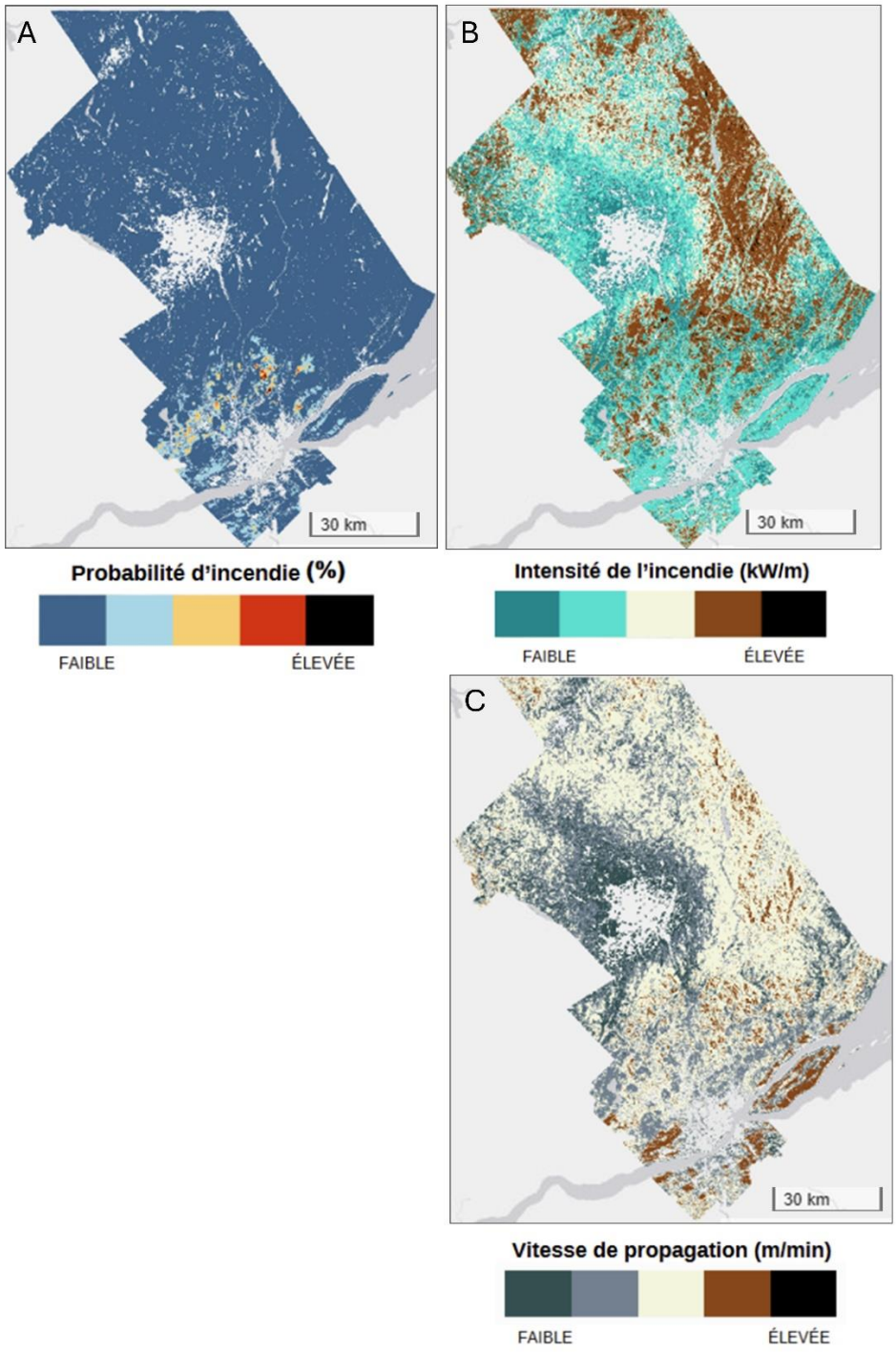
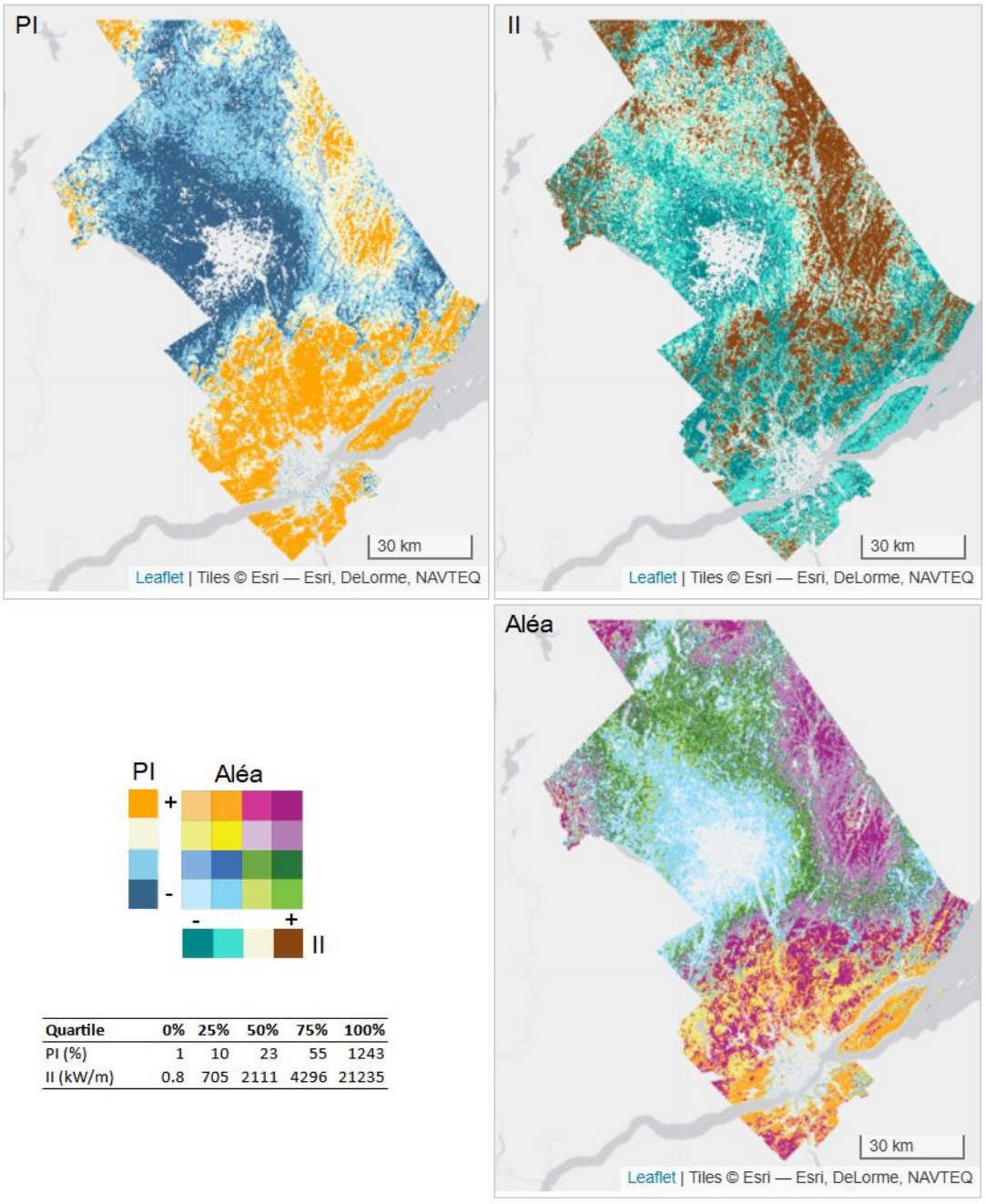


Figure 9. Cartes montrant les probabilités d'incendie (A), l'intensité moyenne (B) et la vitesse de propagation moyenne (C) des incendies simulés sur le territoire de la CMQuébec lors de l'exercice.

3.2 Aléa lié à l'intensité des incendies

L'aléa lié à l'intensité de l'incendie est maximal dans la périphérie nord de la ville de Québec de même que dans l'extrême sud-ouest de l'aire d'étude (Figure 10). Dans ces régions, la probabilité d'incendie et

l'intensité d'incendie sont maximales, notamment localement aux endroits où le combustible conifériens est commun et où la fréquence d'incendie est grande. L'aléa est aussi relativement important dans l'est de la zone 6. L'aléa le plus faible est observé dans l'ouest de la zone 6 où la fréquence des feux est particulièrement faible, amenant de très faibles probabilités d'incendies combinées à une intensité d'incendie faible ou impossible à mesurer compte tenu de l'absence de feux simulés (Figure 10).

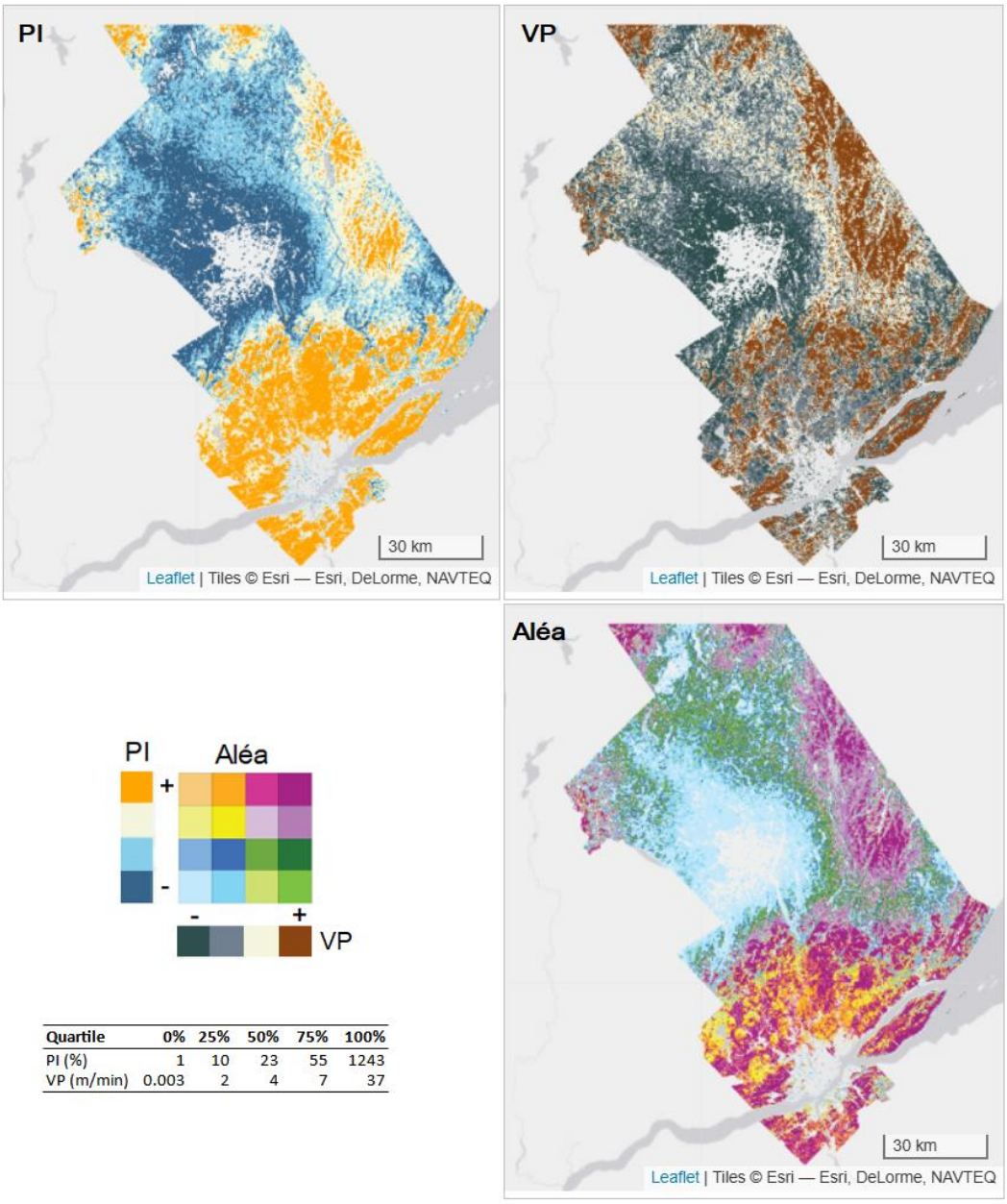


Quartile	0%	25%	50%	75%	100%
PI (%)	1	10	23	55	1243
II (kW/m)	0.8	705	2111	4296	21235

Figure 10. Quartiles des valeurs de probabilité d'incendie (PI) et celles de l'intensité moyenne des incendies simulés (II), qui sont combinées afin de constituer l'aléa lié à l'intensité de l'incendie.

3.3 Aléa lié à la vitesse de propagation

En raison de patrons relativement similaires entre la vitesse de propagation et l'intensité d'incendie, on observe un patron d'aléa d'incendie lié à la vitesse de propagation relativement semblable à celui lié à la l'intensité d'incendie (Figure 11). Cela dit, en raison de vitesses de propagation relativement grandes en milieu agricole conjuguées à celles observées dans les pochettes où le combustible conifèrien est particulièrement commun, on observe un aléa important relié à cette variable dans la périphérie immédiate de la ville de Québec, à la fois sur la rive nord et la rive sud (Figure 11). Comme pour l'aléa lié à l'intensité d'incendie, la zone 6 est séparée en deux, la portion ouest observant un aléa faible alors que l'aléa est maximal dans sa portion est (Figure 11).



Quartile	0%	25%	50%	75%	100%
PI (%)	1	10	23	55	1243
VP (m/min)	0.003	2	4	7	37

Figure 11. Quartiles des valeurs de probabilité d'incendie (PI) et de celle de vitesse de propagation moyenne des incendies simulés (VP) qui sont combinées afin de constituer l'aléa lié à la vitesse de propagation.

À retenir!

- **La probabilité d'incendie** sur le territoire est globalement faible, sauf dans certaines zones au nord de Québec et localement en milieux conifériens inflammables.
- **L'intensité et la vitesse de propagation** des incendies sont les plus élevées en milieu agricole, plus localement où la végétation coniférienne est plus importante et en haute altitude, là où la végétation inflammable est très connectée.
- **L'aléa combiné (II et VP) est maximal dans la périphérie nord de Québec et au sud-ouest**, tandis que l'ouest de la zone 6 reste peu exposé aux incendies

4. Discussion

Nos analyses démontrent que le territoire de la CMQuébec est soumis à un régime où les feux sont peu fréquents, brûlent surtout de petites superficies, sont presque exclusivement d'origine anthropique et surviennent majoritairement avant la fin juin. Ces feux brûlent majoritairement à faible intensité et ont une vitesse de propagation relativement faible plaçant la CMQuébec avantageusement par rapport à d'autres régions du Québec dans ce contexte. Les simulations suggèrent que la plupart des feux survenant sur le territoire de la CMQuébec ont tendance à brûler à une intensité inférieure à 2 000 kW/m dans les conditions actuelles, ce qui suggère que la longueur des flammes aurait tendance à demeurer inférieure à 2,5 m (Byram, 1959; Alexander, 1982). Les feux appartenant à cette classe de faible intensité peuvent généralement être contrôlés à l'aide de techniques de suppression directes (Hirsch & Martell, 1996), à condition que l'attaque initiale et les autres activités de suppression débutent avant que le feu ne puisse affecter les valeurs à risque. De même, la vitesse de propagation de la majorité des feux simulés se situaient sous 4 m/min. À titre d'exemple, la SOPFEU a comme objectif opérationnel de faire l'attaque initiale sur un incendie en moins d'une heure de sa détection (Cardil et al., 2019). Dans de telles conditions de VP, cela signifie qu'un feu pourrait se propager sur une distance maximale d'environ 240 m avant l'arrivée des ressources de suppression. Toutefois, dans un contexte comme la CMQuébec, où les pompiers municipaux pourraient intervenir plus rapidement, cette distance de propagation pourrait être significativement moindre, selon les capacités de suppression des incendies des services locaux. Dans ce contexte, ceci laisserait donc un certain temps aux équipes d'intervention afin d'attaquer un feu se dirigeant vers une valeur à risque, dans la mesure où l'incendie débute au-delà de 200-300 m de cette dernière. Dans tous les cas, les faibles intensités et vitesses de propagation seraient surtout conséquentes de l'abondance de combustibles peu inflammables sur le territoire, avec une composante feuillue très importante (M1/M2 ou D1/D2).

Toutefois, nos analyses permettent de dénoter des zones à l'intérieur de la CMQuébec présentant un aléa incendie important lié soit à l'intensité soit à la vitesse de propagation des incendies sur le territoire. Ces régions se présentent entre autres dans la périphérie de la ville de Québec de même que sur la rive sud, où la densité des valeurs à risque est potentiellement très importante. Ces régions représentent aussi celles où la saison de feux est la plus longue et où les conditions météorologiques propices aux feux sont les plus fréquentes et les plus sévères. Elles constituent des endroits où la fréquence de feux anthropiques est élevée et où localement on observe des combustibles qui mènent à des feux intenses (notamment les combustibles avec une forte proportion de conifères) ou encore à des vitesses de propagation élevée (O1). Le contrôle de la propagation d'un incendie aux niveaux d'intensité simulés aux endroits de fort aléa d'intensité, soit une intensité se situant entre 4 000 et 10 000 kW/m, nécessite généralement l'adoption de stratégies de lutte indirectes, telles que le brûlage de nettoiement pour réduire la charge de combustible ou l'établissement de lignes d'arrêt, en plus du soutien aérien assuré par les avions-citernes (Alexander & de Groot, 1988 ; Alexander & Lanoville, 1989). Bien que les opérations de suppression menées contre ces incendies puissent parfois être efficaces, elles risquent également d'être insuffisantes selon les conditions spécifiques en place (Hirsch & Martell, 1996). Lorsque l'intensité dépasse 10 000 kW/m, la suppression directe devient pratiquement irréalisable (Alexander & Lanoville, 1989). De même, les feux brûlant dans les endroits de fort aléa lié à la propagation présentent des vitesses de propagation moyenne de plus de 10 m/min. En effet, dans certains secteurs en périphérie des villes, où des tons de brun sont présents sur la

carte de VP de la figure 8, les vitesses de propagation moyennes sont de plus de 10 m/min, ce qui est considéré comme rapide (Muraro 1975) et bien au-delà de la capacité des équipes de pompiers forestiers. Dans de telles conditions extrêmes, l'évacuation des personnes, animaux domestiques et bétails menacés est souvent l'action à prioriser.

Les régions caractérisées par un aléa élevé en termes d'intensité des feux et celles où la vitesse de propagation est particulièrement importante ne coïncident pas nécessairement. Il est donc essentiel d'accorder une attention spécifique à chacune d'elles et de prioriser les interventions d'atténuation en fonction de la nature de l'aléa dominant. Par exemple, les régions où l'aléa lié à l'intensité est élevé pourraient être priorisées afin de sensibiliser les parties prenantes au fait que les combustibles peuvent y rendre plus difficile la suppression des feux si un allumage survient dans des conditions météorologiques propices aux incendies, ou encore de produire des intensités mettant les biens plus à risque. Aux endroits où l'aléa de vitesse de propagation est plus élevé, une attention particulière doit être portée à la vitesse d'intervention des ressources d'urgence. Il est à noter que les endroits où l'aléa est élevé sont particulièrement fragmentés dans la couronne de Québec ce qui pourraient faciliter des interventions localisées. À l'opposé, dans la zone 6, la connectivité des régions où aléa est élevé est beaucoup plus importante, faisant en sorte que quelques feux ont potentiellement des probabilités de se propager sur de plus grandes superficies tout en étant particulièrement intenses et difficiles à combattre. Ces différences dans l'aléa, soit en termes de l'aspect critique du comportement d'incendie (II ou VP) ou en lien avec la configuration spatiale du paysage et de la continuité du combustible peuvent mener à l'utilisation de stratégies différentes dans l'atténuation et la gestion de l'aléa et du risque. Par exemple, autour d'infrastructures menacées par de petits îlots de combustibles critiques, des stratégies d'atténuation fondées sur les principes Intelli-feu à petite échelle spatiale seraient potentiellement à prioriser. Alors qu'aux endroits où le combustible critique s'étend de manière continue, il vaudrait mieux viser des stratégies visant à briser la continuité spatiale du combustible, en mettant en place des bandes coupe-feu (Urza et al., 2023). Toutefois, le choix de stratégie d'atténuation optimale doit être fait sur une analyse de risque plus complète intégrant les valeurs à risques, et l'ensemble des options incluant les évacuations. Des outils d'optimisation et d'analyses coûts-bénéfices peuvent aussi être utilisés dans un tel exercice de décisionnel.

Il est important de mentionner que, bien que l'aléa incendie soit relativement faible sur le territoire de la CMQuébec, le risque zéro n'existe pas. Pensons par exemple au feu du 21 mai 2020 ayant eu lieu à Val-Bélair (voir l'article de TVA Nouvelles), où environ 80 pompiers ont travaillé à l'extinction et où l'incendie a brûlé tout près de quartiers résidentiels. En effet, de telles régions exposées à un régime de feux relativement similaire à celui prévalant sur le territoire de la CMQuébec peuvent être exposées à des incendies amenant des pertes considérables. L'exemple de Tantallon, en Nouvelle-Écosse, illustre bien ce phénomène. Située en périphérie d'Halifax, cette région présente une probabilité d'incendie relativement faible à l'échelle canadienne (Erni et al, 2024). Toutefois, le 28 mai 2023, une combinaison de conditions météorologiques propices à la propagation du feu, d'un allumage situé à proximité de la communauté et d'une interface péri-urbaine importante a conduit à un incendie de grande ampleur. En quelques heures, plus de 150 bâtiments ont été détruits (Insurance Bureau of Canada, 2023), démontrant que, même dans des régions où la récurrence des feux est faible (Boulanger et al., 2014), la présence de conditions favorables et d'une forte interface anthropique peut engendrer des impacts majeurs. Il est aussi important de mentionner que, bien qu'aucun feu de plus de 60 ha ne soit survenu sur le territoire de la CMQuébec depuis

1994, de grands feux y sont survenus au début du 20e siècle, essentiellement dans la partie nord du territoire (Forêt ouverte, 2025). Bien que les capacités de détection et de suppression soient beaucoup plus grandes aujourd'hui qu'à cette époque, ces faits rappellent qu'en présence de conditions propices, de très grands feux sont possibles sur le territoire de la CMQuébec. Nous souhaitons donc souligner que même dans des régions où la fréquence des incendies est relativement faible, certaines conditions peuvent favoriser des événements extrêmes. L'objectif est d'identifier les facteurs de risque afin d'informer les stratégies de prévention et de gestion adaptées au contexte local. Par conséquent, la caractérisation de l'aléa feux sur ce territoire situé en milieu habité et où les valeurs à risque sont nombreuses est donc important.

L'analyse actuelle permet de cibler les régions où l'aléa incendie est plus élevé sur le territoire de la CMQuébec. Toutefois, des analyses plus poussées au niveau des risques pourraient y être entreprises. Il sera donc important d'identifier quelles sont les valeurs à risque dans ces régions afin de compléter l'évaluation des risques et de pouvoir identifier quelles mesures d'atténuation pourraient être prises. En effet, le risque d'incendie de végétation résulte de l'interaction entre l'aléa et les impacts associés à un emplacement donné (CIFFC, 2023). Il sera donc important d'analyser les impacts en fonction des valeurs à risque potentiellement affectées, en tenant compte de leur vulnérabilité aux incendies ainsi que de leur degré d'exposition, c'est-à-dire leur recouvrement spatial avec des feux susceptibles de causer des dommages (Hirsch et al., 2001). Ce processus doit favoriser une mobilisation inclusive de l'ensemble des parties prenantes (Saunders et al., 2013). Il est donc évident que l'implication précoce du public est essentielle pour garantir une prise en compte diversifiée des perspectives, valeurs et préoccupations. Cela permet de préciser les objectifs, d'établir l'échelle spatiale et temporelle de l'évaluation, d'identifier les ressources et infrastructures à protéger, ainsi que les sources de données, les outils, les méthodes et l'expertise requise. La participation de nouveaux acteurs au fil du processus peut conduire à un ajustement des objectifs, de la portée de l'évaluation, des données utilisées, ainsi que des outils et méthodes mobilisés. Une réévaluation pourra aussi être entreprise si les priorités ou les objectifs de l'évaluation des risques changent, ou lorsque des changements significatifs se produisent dans le paysage en raison de l'évolution du couvert végétal, des conditions météorologiques, de la démographie et des zones à risque. Ainsi, il pourrait être judicieux de réévaluer le risque suivant les développements industriels et immobiliers de même qu'en fonction des opérations d'aménagement forestier au cours des prochaines années en raison de leur propension à modifier le paysage et son inflammabilité (Chas-Amil et al. 2015). Par exemple, un simple changement dans l'accessibilité et dans l'utilisation du territoire pourrait mener à une augmentation d'allumage de cause humaine, augmentant ainsi la PI, et ultimement l'aléa et le risque.

4.1 Limitations

Il est important de noter que les résultats ont été obtenus en utilisant un climat historique et par conséquent, la nature, les patrons spatiaux et la sévérité des aléas seront amenés à changer dans les prochaines décennies. Ainsi, les projections scientifiques indiquent une exposition croissante des infrastructures et des communautés aux incendies de forêt au cours des prochaines décennies (Erni et al., 2021). Il existe un consensus sur l'augmentation des superficies brûlées en raison du réchauffement climatique, même dans des régions historiquement peu touchées par les feux (Boulanger et al., 2014). Ce phénomène s'explique par l'intensification des sécheresses, l'augmentation de la taille des incendies et la fréquence accrue des conditions météorologiques favorables aux feux, voire à du comportement d'incendie

extrême (Barnes et al., 2023). En parallèle, l'expansion urbaine accentue l'exposition des zones habitées et des infrastructures, indépendamment des effets directs du climat. Ainsi, la fréquence des incendies dans les interfaces périurbaines, péri-industrielles et péri-infrastructures devrait croître, mettant davantage en péril ces territoires (Erni et al., 2021). Par ailleurs, la sévérité croissante des incendies limitera l'efficacité des mesures de suppression, tandis que les bassins pyrographiques, c'est-à-dire les territoires d'où les feux peuvent impacter les infrastructures, s'étendront (Dawe et al., 2022). Enfin, l'évolution du couvert végétal sous l'effet des changements climatiques et de l'aménagement forestier influencera également le risque d'incendie, selon que la végétation évolue vers des espèces feuillues, moins inflammables, ou vers une dominance coniférienne plus combustible (Boulanger et al., 2023; Arseneault et al., 2023). Une attention particulière aux changements climatiques devra donc être considérée dans les futures analyses.

De plus, il est essentiel de souligner que, bien que Burn-P3 constitue un outil performant pour représenter de manière spatialement explicite les probabilités d'incendie, leur vitesse de propagation de même que leur intensité, il ne s'agit pas d'un modèle conçu pour prédire avec précision où se produiront les incendies. L'occurrence des incendies demeure un phénomène hautement aléatoire. Par ailleurs, Burn-P3 repose sur une paramétrisation probabiliste des ignitions et des conditions atmosphériques, visant à reproduire les schémas historiques ou projetés. De plus, les résultats obtenus reposent sur l'hypothèse de stationnarité des relations entre le feu, le climat et le combustible, c'est-à-dire que ces relations demeurent inchangées (Parisien et al., 2019). Dans cette perspective, il est recommandé d'interpréter les résultats de cette étude comme des indications générales permettant une prise de décision éclairée en matière de gestion des risques, plutôt que comme des prédictions précises sur les caractéristiques des incendies à survenir.

Par ailleurs, bien que Burn-P3 prenne en compte de manière indirecte l'influence de l'attaque initiale et des opérations de suppression dans la simulation des allumages et de la propagation des incendies, ces interventions ne sont pas explicitement modélisées. L'efficacité de l'attaque initiale pourrait s'améliorer avec le temps ou, à l'inverse, être affectée par des modifications des ressources disponibles ou des stratégies de financement (Fried et al., 2008 ; Hope et al., 2016), ce qui pourrait altérer la relation entre l'occurrence des allumages et leur suppression.

À retenir!

- **L'aléa lié aux incendies demeure globalement faible** dans la CMQuébec, avec des feux peu fréquents, de petite taille, majoritairement d'origine humaine et à faible intensité.
- **Malgré cela**, bien que l'aléa soit relativement faible, notamment lorsque comparé à d'autres régions au Québec, des incendies amenant des pertes

considérables ont déjà été observés dans des conditions similaires à celles rapportées dans la CMQuébec

- **Certaines zones présentent un aléa élevé** (ex. périphérie de Québec, rive sud) en raison de combustibles inflammables et de conditions météo favorables.
- **Dans ces zones, l'Intensité des incendies peut être substantielle (>4 000 kW/m)**. Des feux de cette intensité peuvent être difficiles à combattre et doivent nécessiter des stratégies de lutte indirecte (ex. soutien aérien).
- **L'urbanisation et les changements climatiques augmentent les risques**, nécessitant des stratégies de prévention et d'adaptation continues.
- À la suite de ces analyses, **il sera important d'identifier quelles sont les valeurs à risque** et quelles mesures d'atténuation pourraient être prises afin de compléter l'évaluation des risques.

5. Conclusion

Nos analyses ont permis de déterminer et de cartographier l'aléa incendie de végétation dans la CMQuébec. Bien que cet aléa soit globalement faible sur l'ensemble du territoire, certaines régions présentent une exposition plus marquée, notamment dans la périphérie nord de la ville de Québec, sur la rive sud, ainsi que dans la partie est de la zone 6. Cette vulnérabilité accrue est attribuable à une fréquence élevée de feux d'origine anthropique à proximité des milieux habités, combinée soit à une vitesse de propagation élevée dans les milieux agricoles, soit à une intensité accrue dans les peuplements forestiers comportant une forte composante coniférienne. Les prochaines étapes de l'analyse devront viser à approfondir l'évaluation des effets des changements climatiques sur cet aléa, ainsi qu'à affiner l'identification et la caractérisation des valeurs potentiellement à risque face aux incendies de végétation pour quantifier de manière objective les autres composantes du risque composant les impacts, soit l'exposition et la susceptibilité (Nicoletta et al., 2023).

6. Références

Abo El Ezz, A.; Boucher, J.; Cotton-Gagnon, A.; Godbout, A. 2022. Framework for spatial incident-level wildfire risk modelling to residential structures at the wildland urban interface. Fire safety journal, 131:103625.

Alexander, M.E. 1982 Calculating and interpreting forest fire intensities. Canadian Journal of Botany 60(4):349–357. doi:10.1139/ b82-048

Alexander, M.E.; De Groot, W.J. 1988. Fire behavior in jack pine stands as related to the Canadian Forest Fire Weather Index System. Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Nord, Edmonton (Alberta)

Alexander, M.E.; Lanoville, R.A. 1989. Predicting fire behavior in the black spruce-lichen woodland fuel type of western and northern Canada (POSTER/PAMPHLET WITH TEXT) Canadian Forestry Service, Northwest Region, Edmonton, Alberta, Government of Northwest Territories, Department of Renewable Resources, Territorial Forest Fire Centre, Fort Smith, Northwest Territories.

Arseneault, D.; Parisien, M.-A.; Boulanger, Y.; Simard, M.; Asselin, H.; Shakeri Z.; et al. 2023. Exposition et adaptation aux incendies forestiers dans la taïga canadienne. Scientific Report.

Barnes, C.; Boulanger, Y.; Keeping, T.; Gachon, P.; Gillett, N.; Boucher, J.; Roberge, F.; Kew, S.; Haas, O.; Heinrich, D.; Vahlberg, M.; Singh, R.; Elbe, M.; Sivanu, S.; Arrighi, J. Van Aalst, M.; Otto, F. Zachariah, M.; Krikken, F.; Wang, X.; Erni, S.; Pietropalo, E.; Avis, A.; Bisaillon, A.; Kimutai, J. 2023. Climate change more than doubled the likelihood of extreme fire weather conditions in Eastern Canada. World Weather Attribution initiative, Grantham Institute for Climate Change, UK. doi:10.25561/105981.

Boulanger, Y.; Gauthier, S.; Burton, P.J.; Vaillancourt, M.-A. 2012. An alternative fire regime zonation for Canada. International Journal of Wildland Fire. 21(8) : 1052-1064. doi:10.1071/WF11073.

Boulanger, Y.; Gauthier, S.; Burton, P.J. 2014. A refinement of models projecting future Canadian fire regimes using homogeneous fire regime zones. Can. J. For. Res., 44(4):365-376. doi:10.1139/cjfr-2013-0372.

Boulanger, Y.; Pascual Puigdevall, J.; Bergeron, Y.; Brice, M.-H.; Cyr, D.; De Grandpré, L.; Fortin, D.; Gauthier, S.; Grondin, P.; Labadie, G.; Leblond, M.; Marchand, M.; Splawinski, T.; St-Laurent, M.-H.; Thiffault, E.; Tremblay, J.; Vaillancourt, M.-A.; Yamasaki, S. 2023. A regional integrated assessment of the impacts of climate change and of the potential adaptation avenues for Quebec's forests. Can. J. For. Res. 53:556-578.

Boulanger, Y.; Arseneault, D.; Belisle, A.C.; Bergeron, Y.; Boucher, J.; Boucher, Y.; Danneyrolles, V.; Erni, S.; Gachon, P.; Girardin, M.P.; Grant, E.; Grondin, P.; Jetté, J.-P.; Labadie, G.; Leblond, M.; Leduc, A.; Pascual Puigdevall, J.; St-Laurent, M.-H.; Tremblay, J.A.; Waldron, K. 2024. The 2023 wildfire season

in Québec: an overview of extreme conditions, impacts, lessons learned and considerations for the future. Can. J. For. Res. Sous presse.

Byram, G. M. 1959. Combustion of Forest Fuels. In K. P. Davis (Ed.), Forest Fire: Control and Use (pp. 61-89). New York: McGraw-Hill.

Cardil, A.; Lorente, M.; Boucher, D.; Boucher, J.; Gauthier, S. 2019. Factors influencing fire suppression success in the province of Quebec (Canada). Canadian Journal of Forest Research, 49(5): 531-542. https://doi.org/10.1139/cjfr-2018-0272

Chas-Amil, M. L.; Prestemon, J. P.; McClean, C. J.; Touza, J. 2015. Human-ignited wildfire patterns and responses to policy shifts. Applied Geography, 56:164-176.

Cherry, N.; Haynes, W. 2017. Effects of the Fort McMurray wildfires on the health of evacuated workers: follow-up of 2 cohorts. Can. Med. Assoc. 5:E638–E645.

Canadian Interagency Forest Fire Centre [CIFFC]. 2023. CIFFC Canadian Wildland Fire Glossary. https://ciffc.ca/publications/glossary, Accédé le 11 février 2025.

Couillard, P.-L.; Payette, S.; Grondin, P. 2013. Long-term impact of fire on high-altitude balsam fir (Abies balsamea) forests in south-central Quebec deduced from soil charcoal. Can. J. For. Res., 43(2): 188-199.

Couillard, P.-L; Bouchard, M.; Laflamme, J.; Hébert, F. 2022. Zonage des régimes de feux du Québec méridional. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière no 189. 23 p.

Dawe, D.A.; Parisien, M.-A.; Boulanger, Y.; Boucher, J.; Beauchemin, A.; Arseneault, D. 2022. Short- and long-term wildfire threat when adapting infrastructure for wildlife conservation in the boreal forest. Ecological Applications, 32:e2606.

De Lafontaine, G.; Payette, S. 2011. Shifting zonal patterns of the southern boreal forest in eastern Canada associated with changing fire regime during the Holocene. Quat. Sci. Rev., 30(7-8): 867-875.

Erni, S.; Wang, X.; Swystun, T.; Taylor, S.W.; Parisien, M.-A.; Robinne, F.-N.; Eddy, B.; Oliver, J.; Armitage, B.; Flannigan, M.D. 2024. Mapping wildfire hazard, vulnerability, and risk to Canadian communities, International Journal of Disaster Risk Reduction, 101:104221, ISSN 2212-4209, https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.104221.

Erni, S. et al. 2020. Developing a two-level fire regime zonation system for Canada. Can. J. Res., 50: 259–273.

Erni, S.; Johnston, L.; Boulanger, Y.; Manka, F.; Bernier, P.; Eddy, B.; Christianson, A.; Swystun, T.; Gauthier, S. 2021. Exposure of the Canadian wildland-human interface and population to wildland fire, under current and future climate conditions. Can. J. For. Res., 51: 1357–1367. doi:10.1139/cjfr-2020-0422.

Evans, J.S.; Murphy, M.A. 2023. _spatialEco_. R package version 2.0-2, https://github.com/jeffreyevans/spatialEco.

Flannigan, M.D.; Logan, K.A.; Amiro, B.D.; Skinner, W.R.; Stocks, B.J. 2005. Future area burned in Canada. Climatic change 72:1–16.

Forestry Canada Fire Danger Group. 1992. Development and structure of the Canadian Forest Fire Behaviour Prediction System. Report ST-X-3. Forestry Canada, Science and Sustainable Development Directorate.

Forêt ouverte. 2025. Visualisation de la cartographie détaillée des feux. https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/feux-de-foret/resource/22b135bd-53da-4104-a8ed-569e7b18e4bd (Accédé le 10 février 2025)

Fried, J.S.; Gilless, J.K.; Riley, W.J.; Moody, T.J.; de Blas, C.S.; Hayhoe, K.; Moritz, M.; Stephens, S.; Torn, M. Predicting the effect of climate change on wildfire behavior and initial attack success. Climatic Change, 87:251–264.

Hanes, C.C.; Wang, X.; Jain, P.; Parisien, M.-A.; Little, J.M.; Flannigan, M.D. 2019. Fire-regime changes in Canada over the last half century. Canadian Journal of Forest Research, 49(3), 256-269.

Hersbach, H. et al. 2020. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47 (Accédé le 11 février 2025).

Higuera, P.E. et al. 2023. Shifting social-ecological fire regimes explain increasing structure loss from Western wildfires. PNAS nexus, 2:pgad005.

Hirsch, K.; Kafka, V.; Tymstra, C.; McAlpine, R.; Hawkes, B.; Stegehuis, H.; Quintilio, S.; Gauthier, S.; Peck, K. 2001. Fire-Smart Forest Management: A Pragmatic Approach to Sustainable Forest Management in Fire-Dominated Ecosystems. The Forestry Chronicle, 77 (2): 357–63

Hirsch, K.G.; Martell, D.L. 1996. A review of initial attack fire crew productivity and effectiveness. International Journal of Wildland Fire, 6(4):199-215.

Hope, E.S.; McKenney, D.W.; Pedlar, J.H.; Stocks, B.J.; Gauthier, S. 2016. Wildfire Suppression Costs for Canada under a Changing Climate. PLoS ONE 11(8): e0157425.

Insurance Bureau of Canada. 2023. Tantallon wildfire causes over $165 million in insured damage. https://www.ibc.ca/news-insights/news/tantallon-wildfire-causes-over-165-million-in-insured-damage (Accédé le 10 février 2025).

Jain, P.; Barber, Q.E.; Taylor, S.; Whitman, E.; Acuna, D.C.; Boulanger, Y.; Charvadès, R.D.; Chen, J.; Englefield, P.; Flannigan, M.; Girardin, M.P.; Hanes, C.C.; Little, J.; Morrison, K.; Skakun R.S.; Thompson, D.K.; Wang, X.; Parisien, M.-A. 2024. Canada Under Fire – Drivers and Impacts of the Record-Breaking 2023 Wildfire Season. Nature Communications. Sous presse.

Jeanneau, A.; van Delden H.; Maier, H.R.; Zecchin, A.H.; Vanhout, R.; McNaught, T.; Wouters, M. 2023. "Peering into the future: Identification of emerging wildfire risk hotspots due to changes in climate and population in Western Australia". Article de conférence présenté à l'International Wildfire Conference 2023. Porto, Portugal

Johnston, L.M.; Flannigan, M.D. 2017. Mapping Canadian wildland fire interface areas. Int. J. Wildland Fire, 27:1–14.

Kirchmeier-Young, M.C.; Gillett, N.P.; Zwiers, F.W.; Cannon, A.J.; Anslow, F.S. 2019. Attribution of the influence of human-induced climate change on an extreme fire season. Earth's Future, 7: 2–10.

Lawson, B.D.; Armitage, O.B. 2008. Weather Guide for the Canadian Forest Fire Danger Rating System. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Nord, Edmonton (Alberta). 84 pages.

McFayden, C.B.; Wotton, B.M.; Robinson, J.W.; Johnston, J.M.; Cantin, A.; Jurko, N.M.; Boucher, J.; Wheatley, M.; Ansell, M.; Boychuk, D.; Russo, B. 2023. Reference Guide to the Drop Effectiveness of Skimmer and Rotary Wing Airtankers. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service. Great Lakes Forestry Centre, Sault Ste. Marie, Ontario. 182p. Information Report GLC-X-35.

Moritz, M.A.; Morais, M.E.; Summerell, L.A.; Carlson, J.M.; Doyle, J. 2005. Wildfires, complexity, and highly optimized tolerance. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 102 (50):17912-17917.

Mulverhill, C.; Coops, N.C.; Boulanger, Y.; Hoffman, K. M.; Cardinal Christianson, A.; Daniels, L. D.; Flamand-Hubert, M.; Wotherspoon, A. R.; Achim, A. 2024. Wildfires are spreading fast in Canada - we must strengthen forests for the future. Nature 633:282-285. doi:10.1038/d41586-024-02919-z.

Muraro, S.J. 1975. Prescribed Fire Predictor (slide-rule). Environment Canada, Canadian Forestry Service, Pacific Forestry Centre, Victoria, B.C. (réimprimé 1980).

Nicoletta, V.; Chavardès, R.D.; Abo El Ezz, A.; Cotton-Gagnon, A.; Bélanger, V.; Boucher, J. 2023. FireLossRate: An R package to estimate the loss rate of residential structures affected by wildfires at the Wildland Urban Interface. MethodsX, 10, 102238.

Parisien, M.A.; Kafka, V.G.; Hirsch, K.G.; Todd, J.B.; Lavoie, S.G.; Maczek, P.D. 2005. 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. 36p. http://cfs.nrcan.gc.ca/publications?id=25627

Parisien, M.-A.; Dawe, D.A.; Miller, C.l; Stockdale, C.A.; Armitage, O. B. 2019. Applications of simulation-based burn probability modelling: A review. International Journal of Wildland Fire, 28: 913-926.

Régnière, J.; Saint-Amant, R.; Béchard, A.; Moutaoufik, A. 2017. BioSIM 11: user's manual. Information Report LAU-X-137. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Laurentian Forestry Centre.

Ressources Naturelles Canada. 2017. Burn-P3 Guide de l'utilisateur Version 4.7. 59p. http://www.firegrowthmodel.ca/burnp3/downloads/UMfr_BurnP3_V4_7.pdf

Saunders, W.S.; Beban, J.G.; Kilvington, M. 2013. Risk-based land use planning for natural hazard risk reduction. Lower Hutt (NZ): GNS Science.

Shreve, C.M.; Kelman, I. 2014. Does Mitigation Save? Reviewing Cost-Benefit Analyses of Disaster Risk Reduction. International Journal of Disaster Risk Reduction, 10: 213–35.

Service canadien des forêts. Canadian Wildland Fire Information System [en ligne]. Available from http://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/datamart (Accédé le 11 février 2025).

Stockdale, C.; Barber, Q.; Saxena, A.; Parisien, M.-A. 2019. Examining management scenarios to mitigate wildfire hazard to caribou conservation projects using burn probability modeling. J Environ. Manage., 233:238-248.

Tepley, A.J.; Parisien, M.A.; Wang, X.; Oliver, J.A.; Flannigan, M.D. 2022. Wildfire evacuation patterns and syndromes across Canada's forested regions. Ecosphere, 13:e4255.

Turner, J.A.; Lawson, B.D. 1978. Weather in the Canadian Forest Fire Danger Rating System. A user guide to national standards and practices. Environnement Canada, Centre de recherches forestières du Pacifique, Victoria, BC. Inf. Rep. BC-X-177.

Tymstra, C.; Bryce, R.W.; Wotton, B.M.; Taylor, S.W.; Armitage, O.B. 2010. Development and structure of Prometheus: The Canadian wildland fire growth simulation model. Info. Rep. NOR-X-417, Northern Forestry Centre, Canadian Forest Service, Edmonton, Alta. 88pp.

Urza, A.K.; Hanberry, B.B.; Jain, T.B. 2023. Landscape-scale fuel treatment effectiveness: Lessons learned from wildland fire case studies in forests of the western United States and Great Lakes region. Fire Ecology. 19(1):1–12.

Van Vliet, L.; Fyke, J.; Nakoneczny, S.; Murdock, T.Q; Jafarpur, P. 2024. Developing user-informed fire weather projections for Canada. Clim. Serv., 35:100505.

Van Wagner, C.E.; Pickett, T.L. 1985. Equations and FORTRAN program for the Canadian Forest Fire Weather Index System. Service canadien des forêts, Ottawa, ON. Rapport forestier technique 33.

Van Wagner, C.E. 1987. The development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Information Report FTR-35. Canadian Forest Service, Petawawa National Forestry Institute.

Yamaguchi, Y.; Kahle, A.B.; Tsu, H.; Kawakami, T.; Pniel, M. 1998. Overview of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 36(4):1062-1071.

Annexe 1. Méthodes canadiennes de l'IFM et de PCI

La Méthode canadienne d'évaluation des dangers d'incendie de forêt (MCÉDIF) sert à analyser et anticiper à la fois le risque quotidien d'incendie de forêt ainsi que leur comportement potentiel. Cette dernière fonction repose notamment sur la Méthode canadienne de l'indice forêt-météo (MCIFM) ainsi que sur la Méthode canadienne de prévision du comportement d'incendie (MCPCI).

La MCIFM suit l'évolution des principaux paramètres météorologiques influençant l'allumage et la propagation des feux de forêt. Elle permet d'évaluer le taux d'humidité du combustible, la quantité de combustible disponible, la vitesse relative de propagation des feux et l'intensité attendue à la tête du feu. Ces éléments sont représentés par six indices, mis à jour quotidiennement à partir des observations de la température, de l'humidité relative, de la vitesse du vent et des précipitations (Figure A.1.1).

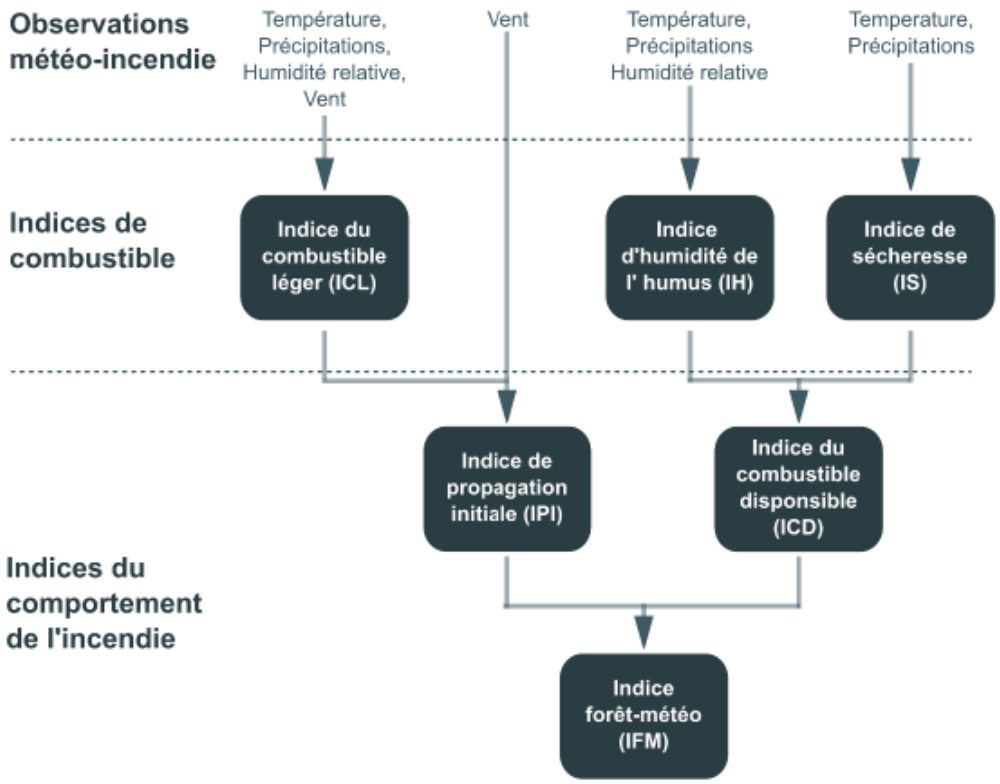


Figure A.1.1. Structure de la Méthode canadienne de l'indice Forêt-Météo

Les trois indices de combustible présentés dans la figure A.1.1 fournissent des renseignements sur l'humidité et l'inflammabilité des différentes composantes du complexe de combustible. L'Indice du combustible léger (ICL) exprime numériquement la teneur en eau de la litière et des combustibles légers, ce qui en fait un indicateur de leur inflammabilité. En raison de leur petite taille et de leur forte réactivité au

feu, ces combustibles jouent souvent un rôle déterminant dans l'ignition et la propagation des incendies. Ainsi, cet indice permet également d'évaluer le potentiel de propagation d'un incendie en cas de départ de feu.

L'Indice d'humidité de l'humus (IH) évalue la teneur en eau des couches organiques superficielles peu compactes du sol forestier ainsi que des matériaux ligneux de taille intermédiaire. Il est particulièrement utile pour estimer le risque d'ignition, notamment en cas coup de foudre. En complément, l'Indice de sécheresse (IS) reflète l'humidité des couches organiques profondes et compactes ainsi que des débris ligneux de grande taille. Comme ces matériaux perdent leur humidité plus lentement que les combustibles fins ou intermédiaires, cet indice sert à mesurer l'impact de la sécheresse saisonnière sur les combustibles forestiers et la probabilité d'une combustion couvante dans les couches profondes ou les gros débris. Il est aussi utilisé pour évaluer la difficulté d'extinction des incendies.

Les trois derniers indices de la MCIFM décrivent différents aspects du comportement des feux de forêt. L'Indice de propagation initiale (IPI) combine l'ICL et la vitesse du vent pour estimer la vitesse potentielle de propagation du feu. L'Indice du combustible disponible (ICD), issu de la combinaison de l'IH et de l'Indice de sécheresse, permet d'évaluer la quantité de combustible susceptible de brûler. Enfin, l'Indice forêt-météo (IFM) intègre l'IPI et l'ICD afin d'estimer l'intensité potentielle du feu et constitue un indicateur global fréquemment utilisé pour évaluer le danger d'incendie.

Les indices de la MCIFM offrent ainsi une évaluation relative de l'humidité des combustibles et du comportement des feux, sans être propres à un type particulier de combustible. Toutefois, ce système ne fournit pas de mesures absolues de l'humidité, de l'intensité ou de la propagation du feu. Pour des prévisions plus détaillées du comportement des incendies de forêt, on utilise la Méthode canadienne de prévision du comportement des incendies de forêt (MCPCI). Bien qu'une présentation détaillée de cette méthode et des types de combustibles dépasse le cadre de cette annexe, la figure A.1.2 en illustre la structure générale. Des informations complémentaires sur la méthode PCI peuvent être consultées dans le rapport du Groupe de travail sur les dangers d'incendie (1992).

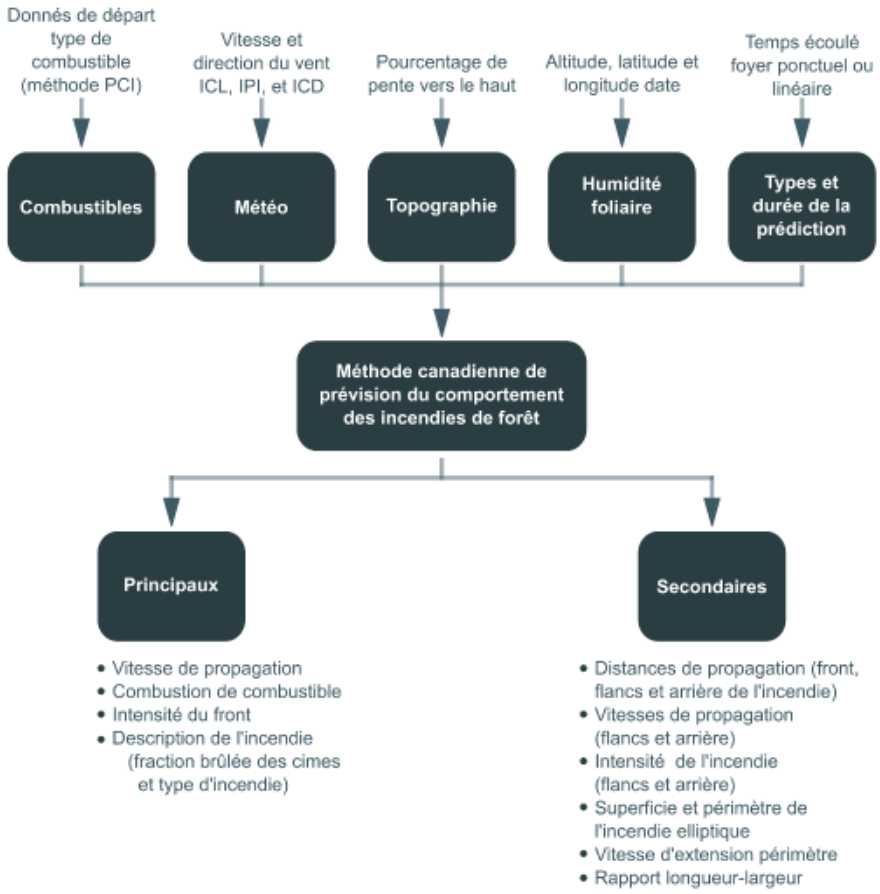


Figure A.1.2. Structure de la Méthode canadienne de prévision du comportement des incendies de forêt (PCI).

Annexe 2. Données météorologiques supplémentaires

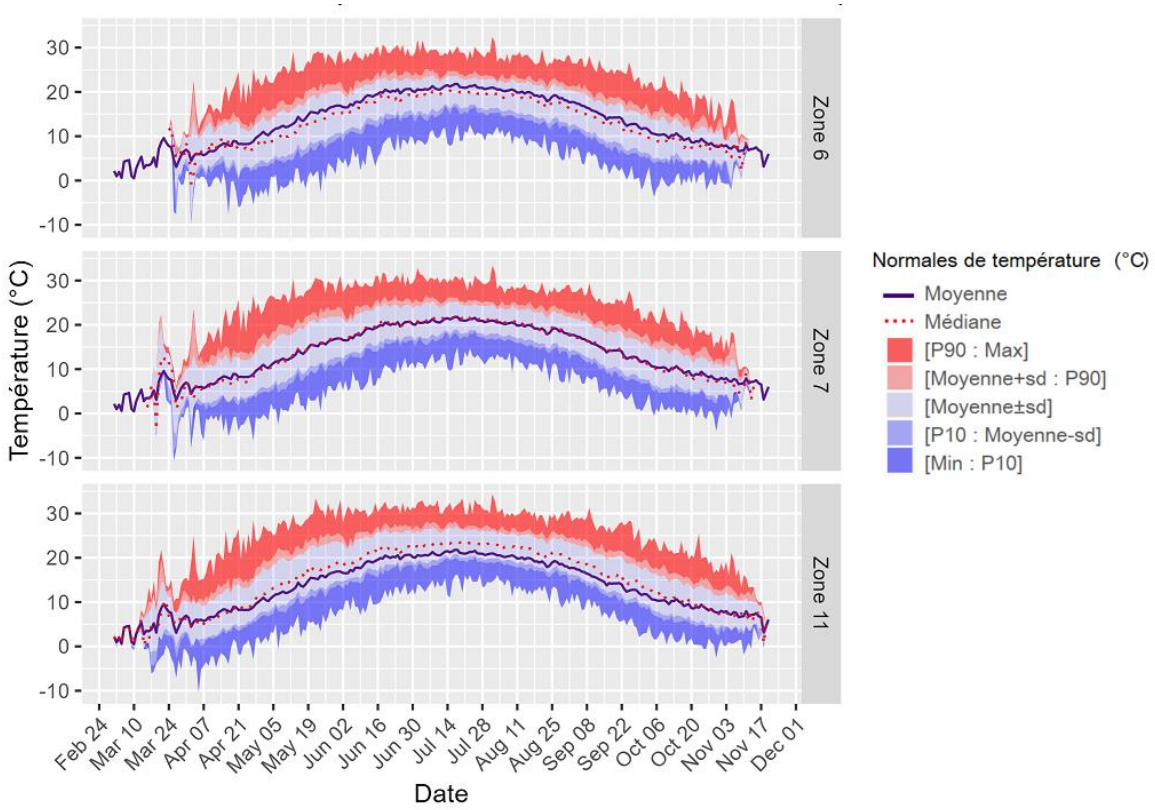


Figure A.2.1. Températures moyennes (ligne violette) et médianes (pointillés rouges) à midi heure locale, compilées pour chaque zone, au cours de la saison des feux sur la période 1994-2023.

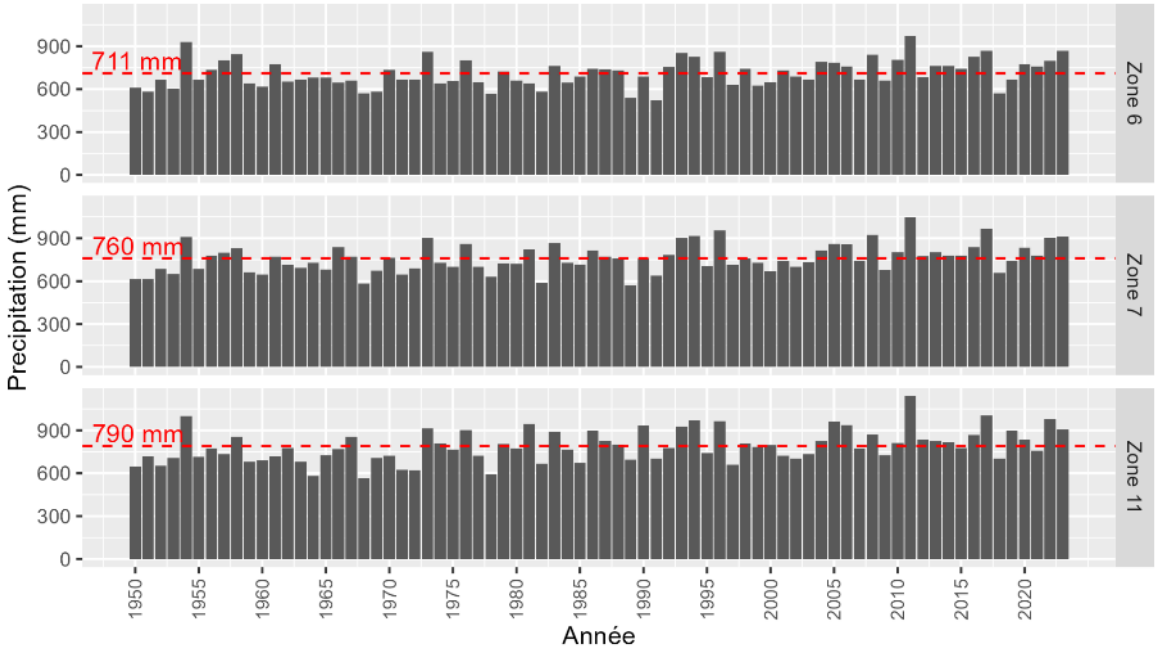


Figure A.2.2. Total annuel des précipitations cumulées au cours de la saison des feux pour chaque zone, de même que leur moyenne, sur la période 1994-2023 à chaque point de grille ERA5.

Annexe 3. Données supplémentaires sur le régime de feux

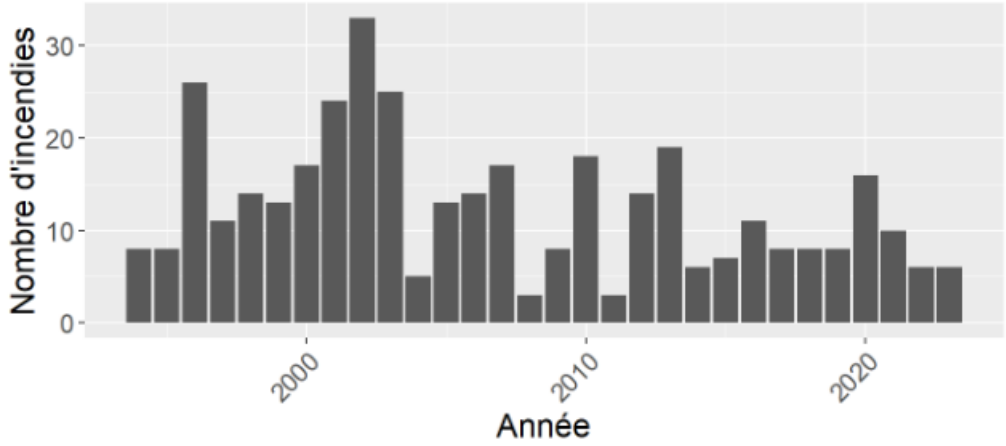


Figure A.3.1. Nombre annuel d'incendies dans l'aire d'étude pour la période 1994-2023.

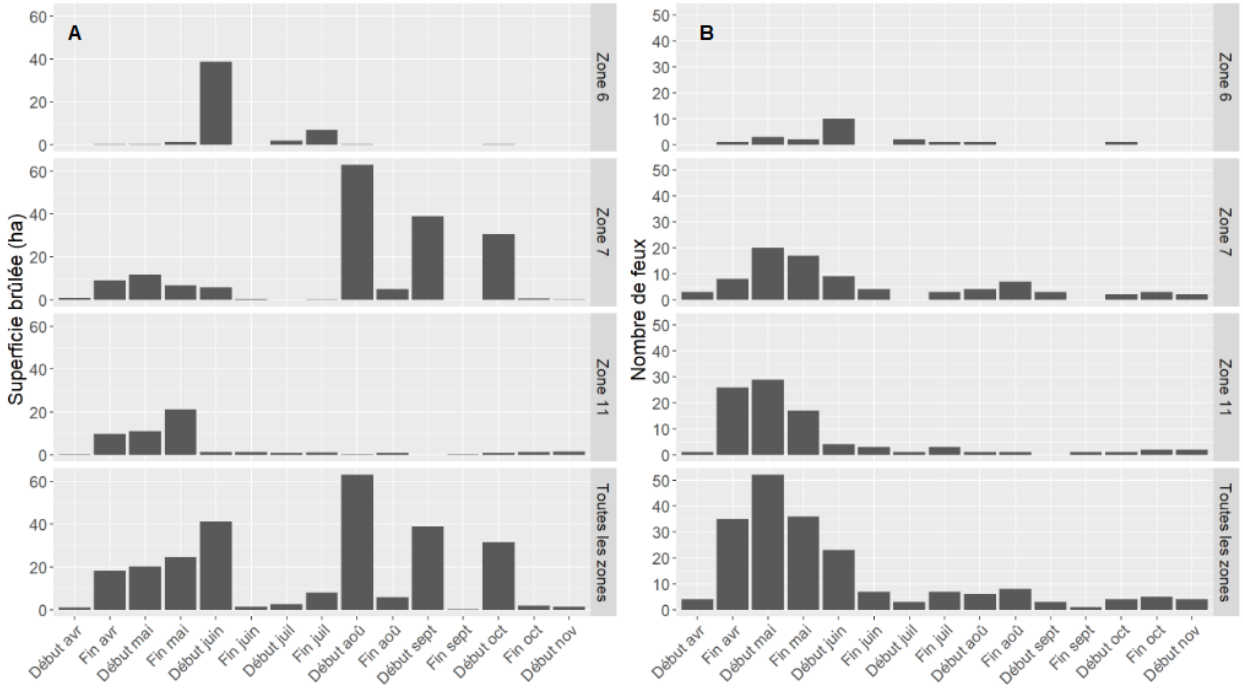


Figure A.3.2. Caractéristiques temporelles du régime de feux de forêt, représentées graphiquement aux deux semaines et par zone de feu, présentant A) la superficie totale brûlée (ha) et B) le nombre de feux.

Annexe 4. Logiciel Burn-P3

Description:

Burn-P3 (probabilité, prédiction et planification) est un modèle de simulation des incendies forestiers destiné à la gestion du territoire et à la recherche. Burn-P3 simule les allumages et la propagation d'un grand nombre de feux, et ce, à l'aide de Prometheus, un logiciel de propagation des incendies basé sur la MCPCI. Les données utilisées sont les combustibles forestiers, les données météorologiques, la topographie et les patrons d'allumages. Burn-P3 produit une carte des probabilités d'incendie couvrant l'entièreté d'un vaste territoire.

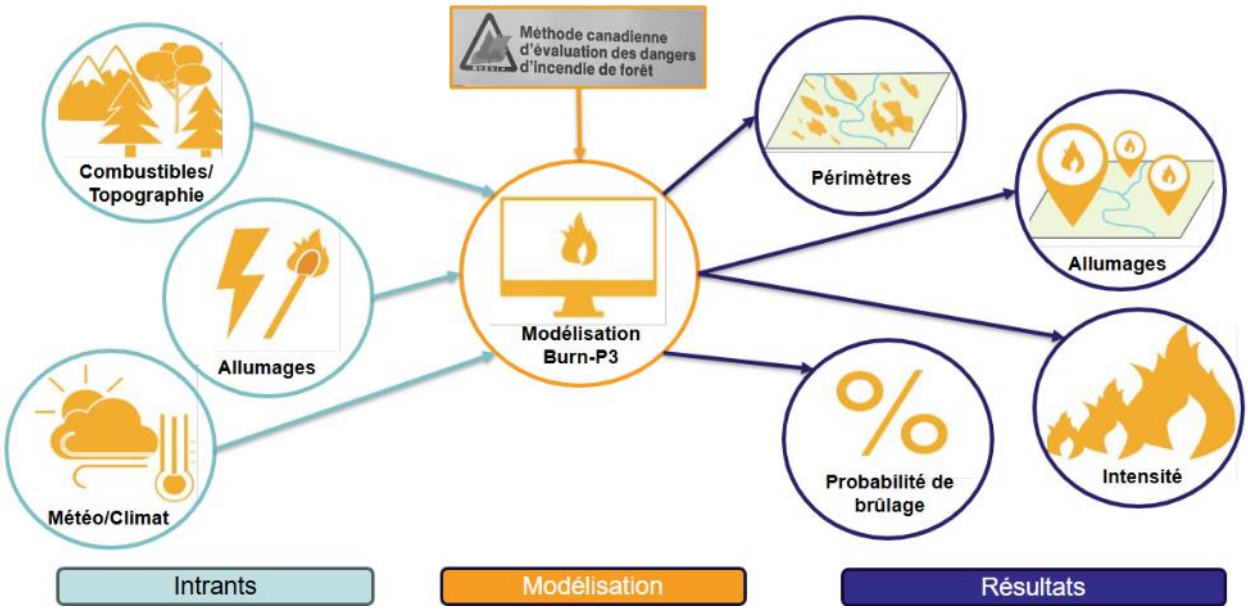


Figure A.4.1. Schématisation du mode de fonctionnement de Burn-P3. Les intrants concernent les combustibles et la topographie, les allumages et la météo alors que les extrants (résultats) sont exprimés sous forme de périmètres de feu, d'allumages, d'intensités de feu (ou de taux de propagation par exemple) et de probabilités de brûler

Téléchargement du logiciel:

Source: http://www.firegrowthmodel.ca/burnp3/software_f.php
Burn-P3 version: 2021.08.00 (21 août, 2021)
Prometheus version: 2021.12.03 (3 sept, 2021)

Documentation:

Burn-P3 Guide de l'utilisateur: Ressources Naturelles Canada. 2017. Burn-P3 Guide de l'utilisateur Version 4.7. 59p. http://www.firegrowthmodel.ca/burnp3/downloads/UMfr_BurnP3_V4_7.pdf

Documentation Burn-P3: Parisien, M.A.; Kafka, V.G.; Hirsch, K.G.; Todd, J.B.; Lavoie, S.G.; Maczek, P.D. 2005. 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. 36p. http://cfs.nrcan.gc.ca/publications?id=25627

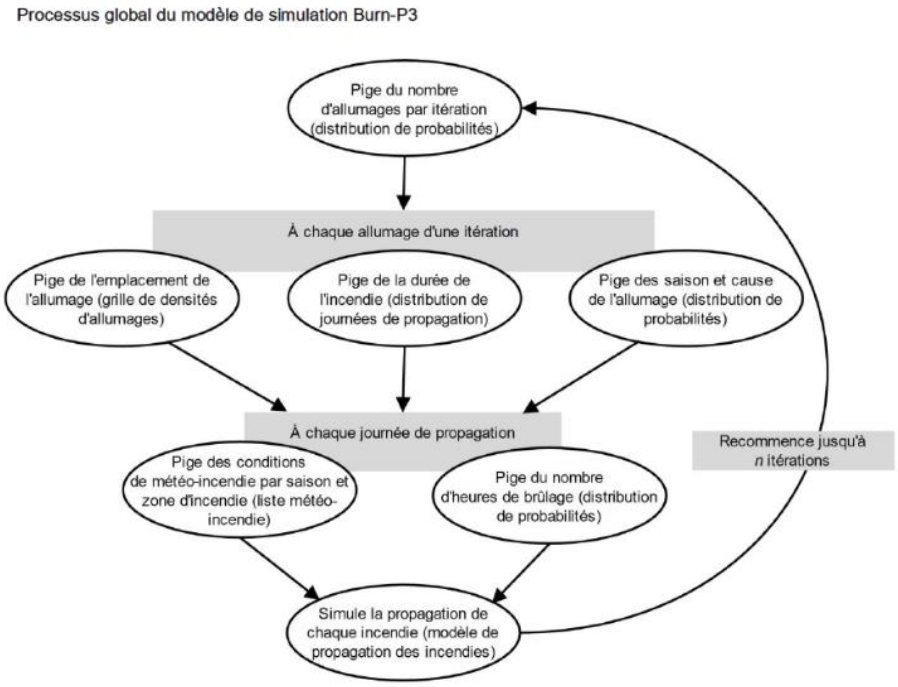


Figure A.4.2. Processus global du modèle de simulation Burn-P3. Tirée de Parisien, M.-A.; Kafka, V.G.; Hirsch, K.G.; Todd, B.M.; Lavoie, S.G.; Maczek, P.D. 2005. Mapping fire susceptibility with the Burn-P3 simulation model. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre, Edmonton, Alberta, Information Report NOR-X-405.

Annexe 5. Calibration

La calibration consiste à modifier le paramétrage de Burn-P3 afin de produire des incendies qui respectent le régime de feu dans l'aire d'étude. C'est une méthode qui permet d'induire l'effet de la suppression ou encore de mieux représenter l'impact d'écosystèmes spécifiques qui seraient absents des jeux de données disponibles.

Le nombre de journées de propagation et le nombre d'heures de brûlage par jour ont dû être abaissés au minimum pour arriver à simuler des aires brûlées représentatives du régime de feu de l'aire d'étude au printemps (1 heure de brûlage par jour). Toutefois, afin de permettre l'apparition d'incendies de tailles rencontrées ailleurs (c'est-à-dire hors de la CMQuébec) dans les zones homogènes 6, 7 et 11 de la SOPFEU, le nombre d'heures de brûlage par jour en été peut atteindre jusqu'à 3 heures, alors que 0.1% des journées de propagation est augmenté à 10 dans la zone 6 et à 6 dans la zone 7.

Les grilles d'allumages de pair avec la distribution du nombre d'allumages par zone, cause et saison ont permis d'intensifier la présence de feux en périphérie de l'aire d'étude et de concentrer la majorité des feux dans les zones 11 et 7.

Tableau A.5.1. Proportions du nombre d'incendies par saison et par zone simulées dans Burn-P3 comparés aux proportions historiques.

		Nombre d'incendies	
Saison	Zone	BP3 (%)	Historique (%)
1	6	1.5	1.6
	7	11.8	11.6
	11	21.7	21.6
2	6	10.9	10.6
	7	32.0	32.7
	11	22.1	21.9

Le nombre d'heures de brûlage par saison et le nombre de jours de brûlage par zone ont été modifiés afin de respecter les tailles des incendies historiques, dont la majorité est inférieure à 1 ha.

Tableau A.5.2. Statistiques sur les superficies finales des incendies (1994-2023) de la SOPFEU dans l'aire d'étude et dans les zones entières (incluant hors CMQuébec) 6, 7 et 11. Pour chaque combinaison de saison et de zone, calcul de la moyenne, écart type (sd), minimum (min), médiane, 70e et 95e percentiles (70p et 95p), maximum (max) et nombre total de feux (n).

Statistiques sur les superficies finales des incendies (1994 - 2023) de la SOPFEU dans l'aire d'etude.

Saison	Zone	moyenne	sd	min	mediane	70p	95p	max	n
	6	0.1	0.1	0	0.1	0.1	0.2	0.2	6
1	7	0.5	1.2	0	0.1	0.3	2.8	6.5	44
	11	0.4	0.6	0	0.1	0.3	1.2	3.0	82
	6	1.2	5.4	0	0.0	0.1	2.2	34.0	40
2	7	1.3	6.7	0	0.0	0.1	2.0	58.6	124
	11	0.4	1.0	0	0.0	0.1	2.0	5.8	83

Statistiques sur les superficies finales des incendies (1994 - 2023) de la SOPFEU répertoriés dans l'entièreté des zones homogènes 6, 7 et 11.

Saison	Zone	moyenne	sd	min	mediane	70p	95p	max	n
	6	1.8	4.1	0	0.4	0.9	5.6	19.2	42
1	7	1.8	6.2	0	0.2	0.8	6.0	79.7	324
	11	0.9	2.7	0	0.2	0.5	3.8	51.0	3063
	6	191.8	2086.8	0	0.1	0.6	119.1	50891.5	718
2	7	4.8	59.9	0	0.1	0.3	5.4	1284.9	839
	11	0.8	8.8	0	0.0	0.1	2.0	384.0	4492

La calibration cherche à imiter les caractéristiques du régime de feu à l'intérieur de l'aire d'étude. Mais comme l'aire d'étude ne couvre qu'une partie restreinte des zones homogènes de la SOPFEU, il est important d'aussi regarder l'historique dans l'entièreté des zones afin d'y permettre la présence de feux typiques dans ces zones. Les paramètres et intrants de la calibration c17 ont été utilisés lors des simulations finales de Burn-P3 (figure A.5.1).

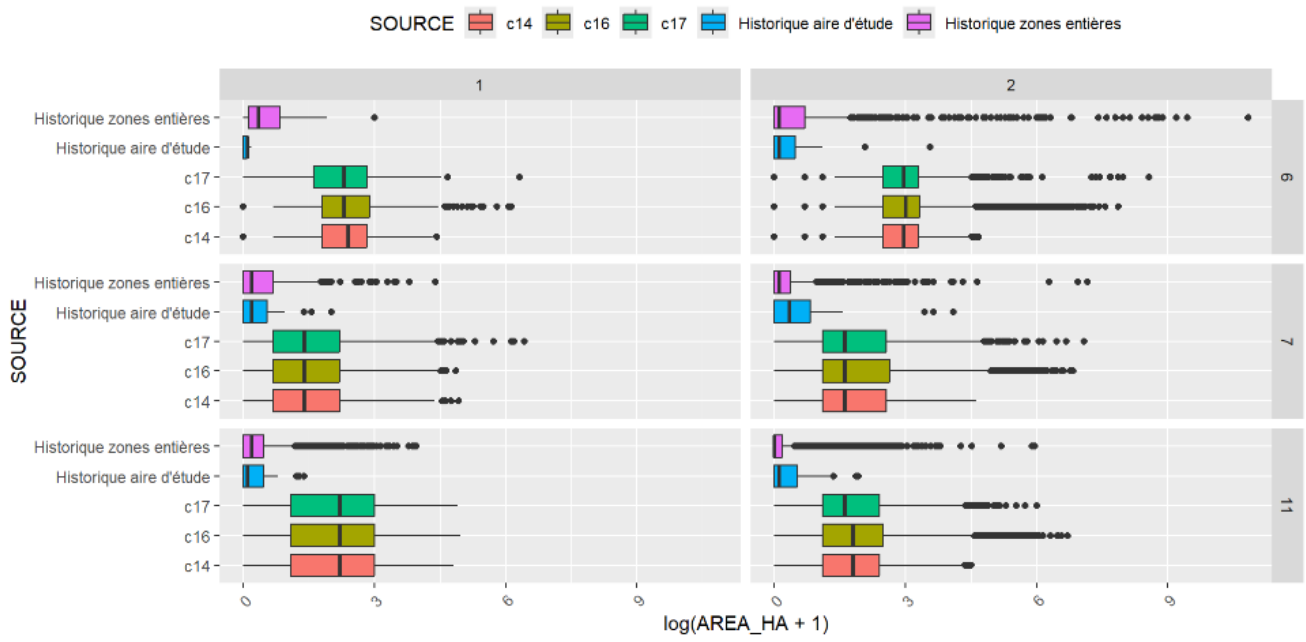


Figure A.5.1. Boîtes à moustaches des aires brûlées (en log(ab + 1)) de 3 calibrations (c14, c16 et c17) avec les aires brûlées dans l'aire d'étude et dans l'entièreté des zones homogènes de la SOPFEU.